

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656:338

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).290-304](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).290-304)

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **Д.В. Голуб**, доц., канд. техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, канд. техн. наук, докторант, **В.О. Дьяченко**, асп., **А.С. Замуренко**, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: AulinVV@gmail.com, dimchik529@gmail.com, sv07091976@gmail.com,
avgrinkiv@gmail.com

Теоретичний підхід до оцінки ймовірностей безвідмовної роботи транспортних та виробничих систем і ланцюгів постачань на основі їх логічних структурних схем надійності

Дано теоретичне обґрунтування оцінки надійності функціонування транспортних та виробничих систем і ланцюгів постачань з використанням логічних структурних схем надійності. Виявлено, що їх побудова ґрунтується на аналізі наслідків відмов окремих елементів. Виділено властивості елементів систем та ланцюгів постачань для їх працездатного і непрацездатного станів. Наведено формули для розрахунку ймовірності їх безвідмовної роботи та відмови, а також напрацювання на відмову. Показано залежність ймовірності безвідмовної роботи транспортної та виробничої систем і ланцюгів постачань від рівня ймовірності та кількості її елементів. Розглянуто випадки послідовного та паралельного з'єднання елементів. Наведено методи розрахунку структурних логічних схем надійності та отримано формули, за якими проводиться оцінка ймовірності безвідмовної роботи транспортних та виробничих систем і ланцюгів постачань, а також ймовірність їх відмов. Наведена оцінка надійності за містковими структурними схемами, використовуючи методи мінімальних шляхів, мінімальних перерізів, перетворення з'єднання елементів "трикутник" - "зірочка", ключового елемента.

транспортна система, виробнича система, ланцюг постачань, безвідмовна робота, ймовірність, оцінка надійності, структурна схема, елементи, методи

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **Д.В. Голуб**, доц., канд. техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, канд. техн. наук, докторант, **В.О. Дьяченко**, асп., **А.С. Замуренко**, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Теоретический подход к оценке вероятностей безотказной работы транспортных и производственных систем и цепей поставок на основе их логических структурных схем надежности

Дано теоретическое обоснование оценки надежности функционирования транспортных и производственных систем и цепей поставок с использованием логических структурных схем надежности. Обнаружено, что их построение основывается на анализе последствий отказов отдельных элементов. Выделенные свойства элементов, систем и для их работоспособного и неработоспособного состояний. Приведены формулы расчета вероятности их безотказной работы и отказов в целом, а также наработки на отказ. Показана зависимость вероятности безотказной работы транспортной и производственной систем и цепей поставок от уровня вероятности и количества ее элементов. Рассмотрены случаи последовательного и параллельного соединения элементов. Приведены методы расчета структурных логических схем надежности и получены формулы, по которым проводится оценка вероятности безотказной работы транспортных и производственных систем и цепей поставок, а также вероятность их отказов. Приведена оценка надежности по мостиковым структурным схемам, используя методы минимальных путей, минимальных сечений, преобразования соединения элементов "треугольник" - "звездочка", ключового элемента.

© В.В. Аулін, Д.В. Голуб, С.В. Лисенко, А.В. Гриньків, В.О. Дьяченко, А.С. Замуренко, 2020

транспортная система, производственная система, цепь поставок, безотказная работа, вероятность, оценка надежности, структурная схема, элементы, методы

Постановка проблеми. Відомо [1, 2], що оцінку рівня надійності транспортної та виробничої систем починають з формулювання умов їх працездатності, з використанням ряду різних моделей, таких, як: словесні, аналітичні та графічні. Опис умов працездатності системи за словесними моделями є найпростішим, однак, переважно громіздким і недостатньо чітким. Аналітичні методи розрахунку надійності функціонування транспортних і виробничих систем дають можливість синтезувати структурну схему надійності складних систем з наперед заданими показниками надійності. Графічні моделі, якими є структурні схеми надійності є достатньо наочними і у багатьох випадках містять більш повну інформацію про логіку виникнення відмов у системі та їх наслідки, тобто відтворює логічні зв'язки між подіями відмов. В зв'язку з чим, при оцінці рівня надійності транспортних і виробничих систем, в першу чергу, є доцільним розгляд їх логічних структурних схем надійності, правил їх побудови та використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Складні транспортні і технічні системи та ланцюги постачань мають велику кількість елементів, надійність яких залежить не лише від надійності окремих елементів, але й від характеру зв'язків між ними, тобто від функціональної структури системи [1, 3, 4].

Розроблені методологічні підходи дослідження належного рівня ефективності і надійності транспортних систем [5] та експлуатаційних властивостей та якості їх функціонування [6, 7]. Розглянуті методи оцінки і аналізу надійності та ефективності транспортних і виробничих систем [8-10] та якості їх функціонування [11], але не систематизовано математичний інструментарій розрахунку [12]. В оцінках показників надійності слід враховувати багатофункціональну роботу підсистем транспортних і виробничих систем, а також ланцюгів постачання [13]. Визначено, що надійність зазначених систем підвищується впровадженням логістичного підходу [14, 15, 16] та визначенням критеріїв реалізації процесів забезпечення надійності та ефективності їх функціонування [17, 18]. Важливими є і методи формування систем і ланцюгів постачань [19].

Запропоновані основні напрямки підвищення надійності транспортних систем [20] та виявлено ряд проблем [21], серед яких належним чином виділяються методи теоретичного обґрунтування та розрахунку показників та фізико-інформаційний підхід їх дослідження [22].

В проблемі підвищення надійності процесів в транспортних і виробничих системах, ланцюгів постачань ефективними є і способи структурного резервування [23-26], які передбачають побудову структурних схем надійності та моделювання процесів [27, 28]. Щоб забезпечити ефективність функціонування системи і ланцюгів постачань необхідна розробка структурно-функціональних резервних схем процесів [29].

Розв'язання проблеми надійності технологічних процесів розглянуто на прикладі перевезень у агропромисловому виробництві [30] на та у міжнародному сполученні [31]. Важливим в даній проблемі є формування інформаційних потоків [32, 33].

З аналізу результатів досліджень по проблемі надійності транспортних систем можна бачити, що побудова логічних схем надійності ґрунтується на дослідженнях наслідків причин відмов окремих елементів:

- якщо відмова елемента приводить до відмови ланцюга або системи, то його в логічну схему надійності включають послідовно;
- якщо ж відмова елемента не призводить до відмови ланцюга або системи, то його в логічну схему надійності включають паралельно.

Безумовно актуальним для більш точного комплексного забезпечення надійності і ефективності транспортних систем, розробка методу оцінки ймовірності їх безвідмовної роботи на основі логічних структурних схем.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка підходу оцінки ймовірності безвідмовної роботи транспортних та виробничих систем і ланцюгів постачань на основі логічних структурних схем надійності, що дає можливість оцінки їх залежності від рівня ймовірності та кількості елементів, а також прогнозування і попередження відмови.

Виклад основного матеріалу. Аналіз функціонування транспортних і виробничих систем та ланцюгів постачань в сучасних умовах, дає можливість виділити їх наступні властивості:

- самі системи, ланцюги постачань та кожний із їх елементів можуть перебувати лише в одному з двох станів - працездатному або непрацездатному;
- системи, ланцюги постачань працездатні або непрацездатні, якщо всі їх елементи відповідно теж працездатні або відмовили;
- відмова елемента в системі, ланцюзі постачань, що відмовили, не відновлюють їх працездатності;
- відновлення елемента в системі, ланцюзі постачань, що працюють, не може стати причиною їх відмов.

Транспортні і виробничі системи, ланцюги постачань, які відповідають зазначеним вимогам є монотонними або з когерентними структурами [34].

Прикладом ланцюга системи з монотонною структурою і незалежними елементами є ланцюг з послідовним з'єднанням n елементів (рис. 1).



Рисунок 1 – Послідовна логічна структурна схема надійності системи або ланцюга з n елементів

Зазначимо, що в логічну схему надійності елементи включають послідовно, коли їх відмова є причиною відмови системи або ланцюга. Позначимо через x_i працездатний стан елемента, а через \bar{x}_i - його непрацездатний стан. Аналогічно введемо позначення станів працездатного S і непрацездатного \bar{S} ланцюга або системи.

Ймовірність безвідмовної роботи у такому випадку є добутком ймовірностей безвідмовної роботи елементів [35]:

$$p_S(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (1)$$

де $p_i(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента впродовж часу t .

При цьому ймовірність відмови системи та ланцюгу відповідно становитиме:

$$q_S(t) = 1 - p_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n p_i(t). \quad (2)$$

За відомим показником $p_S(t)$ можна розрахувати точне значення напрацювання системи, ланцюга на відмову:

$$t_{BS} = \int_0^{\infty} p_S(t) dt. \quad (3)$$

Якщо відмови окремих елементів транспортної та виробничої системи або ланцюга постачань підпорядковані експоненційному закону розподілу:

$$q_i(t) = e^{-\lambda_i t} \approx 1 - \lambda_i t, \quad (4)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента, то за такої умови інтенсивність їх відмов є сумою інтенсивностей відмов її елементів:

$$\lambda_S(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t), \quad (5)$$

При експоненційному розподілі часу напрацювання на відмову для відновлюваних елементів параметр потоку відмов і напрацювання на відмову системи, ланцюга дорівнюють:

$$\omega_S(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i(t); \quad (6)$$

$$t_{\text{BBS}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i(t)}. \quad (7)$$

Оцінка показників надійності для транспортних і виробничих систем та ланцюгів постачань з послідовними структурами свідчить, що їх надійність є не більшою від надійності найменш надійного елемента та із зростанням кількості елементів їх надійність не збільшується.

В логічну схему надійності елементи включають паралельно, коли їх відмова не є причиною відмови всієї системи та ланцюга. Паралельна структура ланцюга або системи з n елементів відображена на рис. 2.

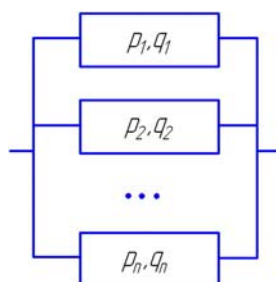


Рисунок 2 – Логічна схема надійності системи або ланцюга з паралельним з'єднанням елементів

Ймовірність відмови такої її структури становить:

$$q_S(t) = \prod_{i=1}^n q_i(t) = \prod_{i=1}^n [1 - p_i(t)], \quad (8)$$

а ймовірність безвідмовної роботи розраховують за формулою:

$$p_S(t) = 1 - q_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - p_i(t)]. \quad (9)$$

У випадку експоненційного закону розподілу напрацювання елементів системи або ланцюга на відмову, якщо ймовірності безвідмовної роботи елементів близькі до 1. Ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента при цьому дорівнює:

$$p_i(t) = e^{-\lambda_i t} \approx 1 - \lambda_i t, \quad (10)$$

і, відповідно, ймовірність відмови i -го елемента становить:

$$q_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t} \approx \lambda_i t. \quad (11)$$

Ймовірність відмови системи або ланцюга при цьому дорівнює:

$$q_S(t) = (\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_n) t^n, \tag{12}$$

а для рівнонадійних елементів, маємо:

$$q_S(t) \approx (\lambda t)^n, \tag{13}$$

де $\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_n = \prod_{i=1}^n \lambda_i$.

Середня тривалість безвідмовної роботи системи, ланцюга з паралельним з'єднанням n елементів у логічній схемі надійності можна визначити за формулою:

$$\bar{t}_{BBS} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} - \sum_{i < k} \frac{1}{\lambda_i + \lambda_k} + \sum_{i < k < e} \frac{1}{\lambda_i + \lambda_k + \lambda_e} + \dots + (-1)^n \frac{1}{\lambda_i + \lambda_k + \lambda_e + \dots \lambda_n}, \tag{14}$$

а для рівнонадійних елементів, маємо:

$$\bar{t}_{BBS} = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right). \tag{15}$$

При експоненційному розподілі часу напрацювання на відмову для відновлюваних елементів тривалість напрацювання системи, ланцюга з паралельним з'єднанням елементів не є експоненціальною функцією. Виявлено, що напрацювання на відмову окремих елементів добре узгоджується із законом Вейбулла-Гнеденка з параметром форми b і середню тривалість напрацювання на відмову розраховують за формулою:

$$\bar{t}_{BBS} = \sum_{i=1}^n C_n^i (-1)^{i-1} \frac{\Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right)}{\lambda^{\frac{1}{b}} i^{\frac{1}{b}}}. \tag{16}$$

де $\Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right)$ – гама функція.

При паралельному з'єднанні елементів надійність системи (ланцюга) є не меншою від надійності найбільш надійного елемента. Зі зростанням кількості елементів надійність системи (ланцюга) не зменшується.

Більшість систем (ланцюгів), як правило є, не лише послідовними або паралельними, або послідовно-паралельними але й паралельно-послідовними. Оцінку надійності таких систем та їх ланцюгів проводять ітераційно, замінюючи групи послідовно та паралельно з'єднаних елементів еквівалентними (рис. 3) та остаточно розраховуючи їх надійність за формулами (3) і (8).

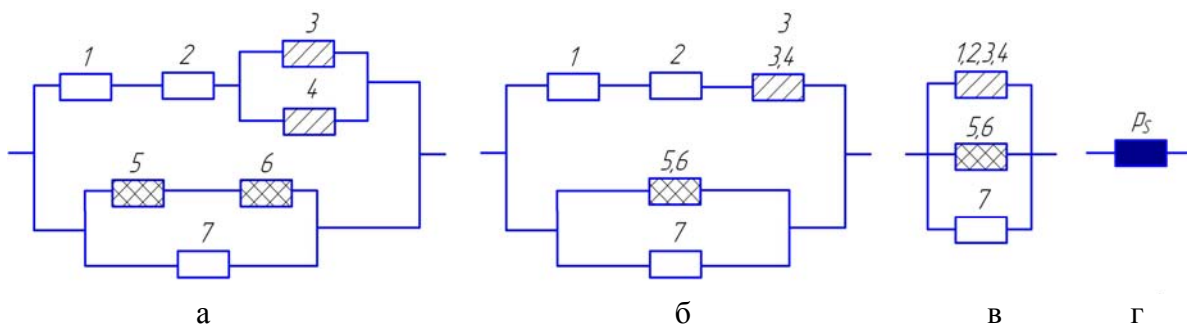


Рисунок 3 – Процедура аналізу послідовно-паралельної структури з'єднання елементів першої (а), другої (б), третьої (в) і четвертої (г) ітерації системи (ланцюга)

Розглянемо ітераційну процедуру підходу до оцінки послідовно-паралельної структури системи (ланцюга). На першій ітерації розглядають групу паралельно з'єднаних елементів 3 і 4, замінюють їх одним еквівалентним елементом 3, 4, розрахувавши ймовірність безвідмовної роботи такого еквівалентного елемента за формулою (9). На другій ітерації розглядають групу послідовно з'єднаних елементів 5 і 6, замінюють їх одним еквівалентним елементом 5,6, розрахувавши ймовірність безвідмовної роботи такого еквівалентного елемента за формулою (1). На третій ітерації розглядають групу послідовно з'єднаних елементів 1, 2 і 3,4, замінюють їх одним еквівалентним елементом 1, 2, 3, 4, розрахувавши ймовірність безвідмовної роботи такого еквівалентного елемента за формулою (1). На четвертій ітерації розглядають групу паралельно з'єднаних елементів 1, 2, 3, 4 і 5, 6 і 7, замінюючи їх одним еквівалентним елементом S . Розраховується ймовірність безвідмовної роботи такого еквівалентного елемента за формулою (9). Яка є ймовірністю безвідмовної роботи системи (ланцюга). Відповідно для першої та другої ітерації ймовірність безвідмовної роботи дорівнюють:

$$p_{3,4}(t) = 1 - [1 - p_3(t)][1 - p_4(t)];$$

$$p_{5,6}(t) = p_5(t)p_6(t),$$

а для третьої та четвертої ітерацій:

$$p_{1,2,3,4}(t) = p_1(t)p_2(t)p_{3,4}(t),$$

$$p_S(t) = 1 - [1 - p_{1,2,3,4}(t)][1 - p_{5,6}(t)][1 - p_7(t)].$$

Методи розрахунку логічних структурних схем надійності транспортних і виробничих систем та ланцюгів постачання, які не зводяться до послідовно-паралельних, використовуються для місткової схеми надійності (рис. 4). Для оцінки надійності за такими схемами використовують спеціальні методи: мінімальних шляхів, мінімальних перерізів, перетворення з'єднання елементів "трикутник"- "зірочка", ключового елемента [36].

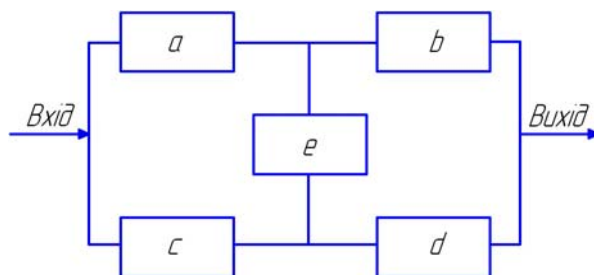


Рисунок 4 – Місткова структурна схема надійності транспортних та виробничих систем або їх ланцюгів з'єднання елементів

Щоб перейти до розгляду методу мінімальних шляхів, передусім слід сформулювати визначення шляху, набору елементів, які з'єднують «вхід» і «вихід». Для даної місткової схеми існують наступні шляхи: $abcde$, $abed$, $abce$, $abde$, $bede$, aed , ceb , abe , abc , abd , cda , cdb , cde , ab , cd . Зазначимо, що набори силуетів ac , ae , bd , be , ce і de шляхів не утворюють.

Мінімальним є шлях, після вилучення з якого хоча б одного елемента, решту елементів шляху вже не утворюють. Мінімальними шляхами в містковій схемі (рис. 4) є aed , ceb , ab , cd . Шлях cde не є мінімальним, адже після вилучення з нього елемента e , елементи cd , що залишилися, все ще утворюють шлях.

В термінах мінімальних шляхів умова працездатності транспортної та виробничої систем (ланцюгів) наступна: система (ланцюг) буде працездатною тоді, коли буде працездатним хоча б один мінімальний шлях. Система (ланцюг) також залишається працездатною, коли працездатною є хоча б одна із декількох її складових. Це відповідає схемі надійності з паралельним з'єднанням таких складових (рис. 5, а). Елементи мінімального шляху повинні бути з'єднані послідовно в схемі надійності (рис. 5, б).

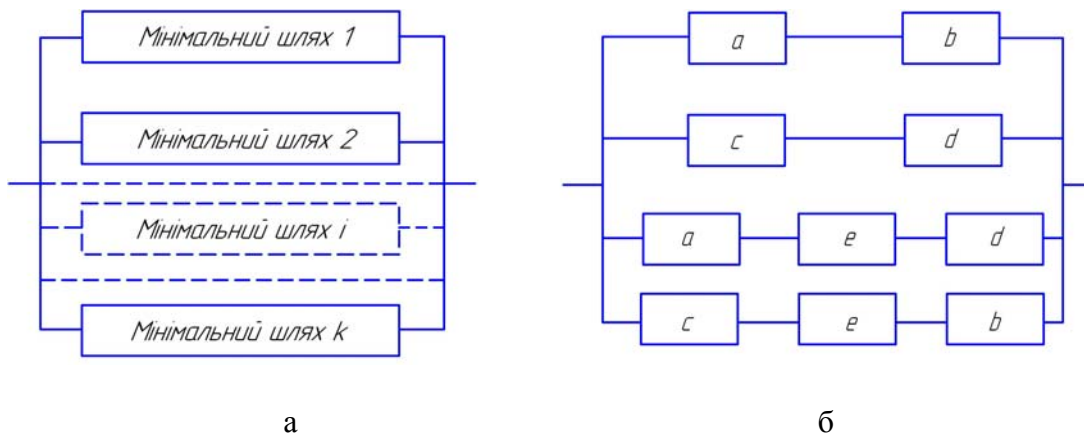
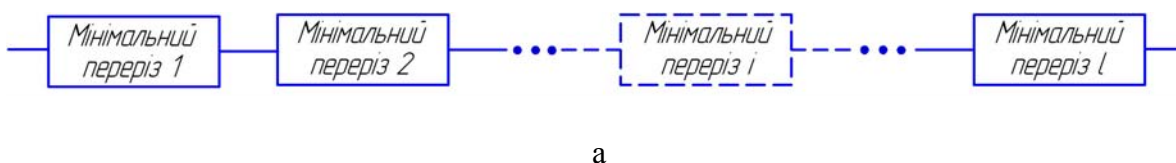


Рисунок 5 – Схема заміщення місткової схеми з паралельним (а) та послідовним (б) з'єднанням елементів, отримана методом мінімальних шляхів

Можна бачити, що схема заміщення є послідовно-паралельною, а її оцінка надійності не викликає складнощів. Щоб перейти до розгляду методу мінімальних перерізів передусім слід сформулювати визначення перерізу. Перерізом у схемі надійності є набір елементів, вилучення яких роз'єднує «вхід» і «вихід». Запишемо всі перерізи для місткової схеми: $abode, abed, abce, abde, bede, ade, bee, ace, bde, abd, acd, bde, ac, bd$. Також зазначимо, що набори abe, cde, ad, ae, be, de і ce перерізів не утворюють. Мінімальним є такий переріз, після вилучення з якого хоча б одного елемента, решту елементів перерізу вже не утворюють. Мінімальними перерізами в містковій схемі (рис. 4) є: aed, ceb, ac, bd . Переріз bde не є мінімальним, адже після вилучення з нього елемента e , елементи bd , що залишилися, все ще утворюють переріз.

В термінах мінімальних перерізів умова втрати працездатності системи (ланцюга): система (ланцюг) буде непрацездатною тоді, коли в ній буде непрацездатним хоча б один мінімальний переріз. Система (ланцюг) стає непрацездатною, коли непрацездатною є хоча б одна із декількох її складових. Це відповідає схемі надійності з послідовним з'єднанням таких складових (рис. 6, а). Відповідно до визначення елементи мінімального перерізу повинні бути з'єднані паралельно в схемі надійності системи або її ланцюгів (рис. 6, б).



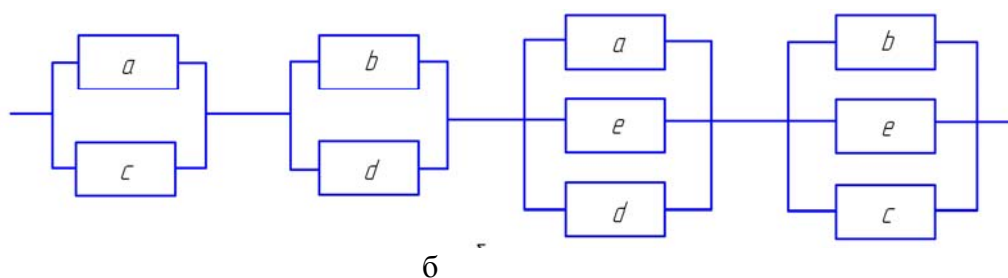


Рисунок 6 – Схема заміщення місткової схеми з послідовним (а) та паралельним (б) з'єднаннями елементів, отримана методом мінімальних перерізів

Таким чином, представлена схема заміщення є послідовно-паралельною, а її розрахунок не викликає жодних складнощів.

Якщо уважно проаналізувати місткову схему (рис. 7), то стане очевидним, що складність її розрахунку полягає в тому, що група елементів, виділених пунктирним контуром, з'єднана "трикутником".

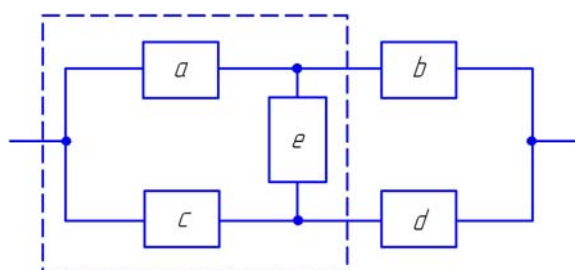


Рисунок 7 – Група елементів місткової схеми, що з'єднані "трикутником"

Для цієї схеми застосовують метод перетворення "трикутник" → "зірочка". Виділимо ці елементи окремо (рис. 8, а), для того, щоб перетворити початкове з'єднання елементів "трикутник" в еквівалентне з'єднання "зірочка" (рис. 8, б). Зазначимо, що забезпечується однакова ймовірність безвідмовної роботи ланок 1-2, 1-3, 2-3 як для "трикутника", так і для "зірочки".

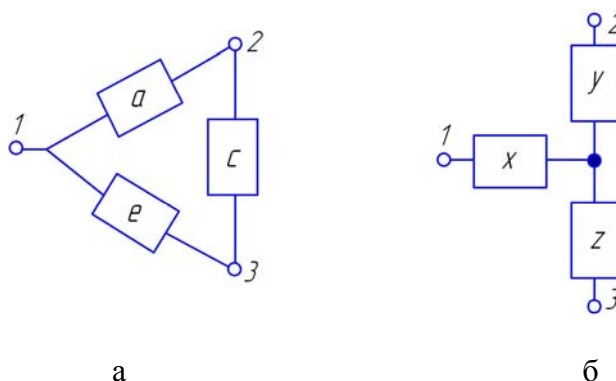


Рисунок 8 – Заміна групи елементів системи або ланцюга, що з'єднані трикутником (а), групою елементів, з'єднаних зірочкою (б)

Для останніх структурних перетворень характерною є система рівнянь:

$$\begin{cases} p_a + p_c p_e - p_a p_c p_e = p_x p_y, \\ p_c + p_c p_e - p_a p_c p_e = p_x p_z, \\ p_e + p_a p_e - p_a p_c p_e = p_y p_z. \end{cases} \quad (17)$$

Якщо ймовірності безвідмовної роботи елементів дорівнюють $p_a = p_c = p_e = p_{\Delta}$ і $p_z = p_x = p_y = p$, то система рівнянь спрощується:

$$p_{\Delta} + p_{\Delta}^2 - p_{\Delta}^3 = p^2. \quad (18)$$

Структурна схема заміщення (рис. 9), відносно структурної схеми, відображеної на рис. 7, є послідовно-паралельною, а її розрахунок не викликає складнощів.

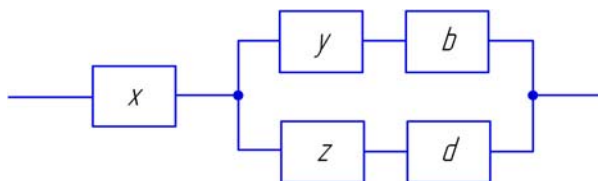


Рисунок 9 – Схема заміщення місткової схеми, отримана методом перетворення "трикутник" → "зірочка"

Ключовим елементом у структурній логічній схемі надійності системи або ланцюга є елемент з найбільшою кількістю зв'язків (рис. 10).

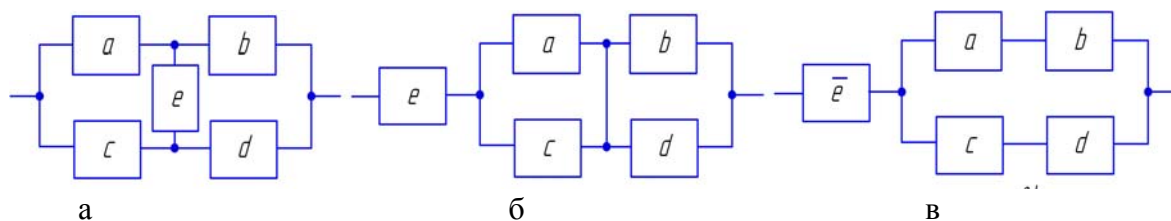


Рисунок 10 – Перетворення місткової структурно-логічної схеми надійності за методом ключового елемента, що має найбільшу кількість зв'язків (а), паралельним (а) та послідовним (б) з'єднанням

На основі розглянутого можливо сформулювати загальні правила розгляду складних структурних логічних схем надійності (рис. 10) за методом ключового елемента:

- у схемі надійності (рис. 10, а) вибирають ключовий елемент з найбільшою кількістю зв'язків e ;
- у місці ключового елемента e (рис. 10, б) використовують абсолютно надійний зв'язок (замикання), а сам ключовий елемент під'єднують до схеми паралельно;
- розраховують ймовірність p_I безвідмовної роботи для такої структурної схеми;
- у місці ключового елемента використовують абсолютно ненадійний зв'язок (обрив), а до схеми послідовно під'єднують елемент \bar{e} (рис. 10, в);
- розраховують ймовірність p_{II} безвідмовної роботи для такої структурної схеми надійності;
- знаходять ймовірність безвідмовної роботи початкової схеми надійності:
 $p_s = p_I + p_{II} \cdot$

Висновки.

1. Виявлено, що складні транспортні і виробничі системи та ланцюги постачань мають велику кількість елементів, а тому їх надійність залежить не лише від надійності окремих елементів, але й від характеру зв'язків між ними.

2. Проведення аналізу надійності транспортних і виробничих систем та ланцюгів постачань можливо за допомогою їх структурних логічних схем надійності і на відміну від фізичних схем, які відтворюють фізичні зв'язки між елементами, логічні схеми надійності будують так, щоб показати, які комбінації відмов окремих елементів приводять до відмови ланцюга або системи в цілому.

3. Побудова логічних структурних схем надійності ґрунтується на аналізі наслідків причин відмов окремих елементів, що в подальшому може бути використано при розробці теоретичних основ підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем, виробничих систем різних галузей та ланцюгів постачань.

Список літератури

1. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія / під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавництво ТОВ "КОД", 2017. 370 с.
2. Курганов В.М. Управление эффективностью и надежностью функционирования систем доставки. *Грузовое и пассажирское автомобильное хозяйство*. 2009. Вып. № 6. С. 8-13.
3. Загашев И.О., Заир-Бек С.И. Технология развития критического мышления: перспективы для высшего образования. СПб.: Изд-во «Скифия», 2002. 283 с.
4. Ротштейн А.П., Штовбас С.Д., Козачко А.Н. Моделирование и оптимизация надежности многомерных алгоритмических процессов. Винница: "УНИВЕРСУМ-Винница", 2007. 215 с.
5. Аулін В.В., Біліченко В.В., Голуб Д.В., Великодний Д.О. Методологія підходів до дослідження шляхів і сукупності факторів забезпечення належного рівня ефективності і надійності транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту ВНТУ*. 2017. №2. С. 4-14.
6. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Методологія визначення основних експлуатаційних властивостей та якості функціонування транспортних і технічних систем. *Вісник інж. академії України*. 2017. №2. С. 110-115.
7. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Методологічне обґрунтування дослідження та розв'язання проблеми надійності функціонування транспортних систем. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. №10. С. 29-36.
8. Аулін В.В., Голуб Д.В. Методи оцінки і аналізу надійності автомобільних транспортних систем. Актуальні задачі сучасних технологій. *Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів*: зб. тез доповідей, (Тернопіль, 16–17 листопада 2017 р.). Том III. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. С.14-15.
9. Аулін В.В., Голуб Д.В. Методи оцінки і аналізу надійності складних транспортних систем та технологічних процесів в них. *Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2018*: зб. тез доповідей XIV Міжнар. наук. конф., 19-22 травня 2018 року. НУБіП. Київ, 2018. С.47-51.
10. Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В., Замуренко А.С. Формування показників оцінки ефективності транспортного процесу перевезень. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2020. №1(11). С.5-10.
11. Аулін В.В., Голуб Д.В. Методологічний підхід до визначення рівня якості функціонування транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. №1(7). С. 4-9.
12. Аулін В.В., Голуб Д.В., Луценко А.С. Математичний апарат оцінки надійності багатофункціональних транспортних систем. *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту*: зб. наук. матеріалів міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. ЦНТУ м.Кропивницький, Україна, 14-15 листопада 2018 р. Кропивницький, 2018. С.33-41.
13. Аулін В.В., Голуб Д.В. Забезпечення та підвищення надійності транспортних систем і процесів перевезень багатофункціональною роботою їх учасників. *Крамаровські читання*: зб. тез доповідей V Міжнар. наук.-техн. конф., 22-23 лют. 2018 р., м. Київ; НУБіП. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2018. С. 107-110.

14. Аулін В.В., Великодний Д.О., Дьяченко В.О. Підвищення ефективності транспортних систем в АПК на основі логістичного підходу. *Крамаровські читання: зб. тез доповідей V Міжнар. наук.-техн. конф., 22-23 лют. 2018 р., м. Київ; НУБіП. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2018. С. 135-138.*
15. Аулін В.В., Головатий А.О. Ефективність створення та функціонування логістичних систем на АТП. *Підвищення надійності машин і обладнання: зб. тез доповідей XII Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих науковців. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 71-73.*
16. Olexiy Pavlenko, Denys Velikodnyy, Oleksandr Kalinichenko, Andriy Hrinkiv, Viktoriy Diychenko, Volodymyr Dzyura Methodological approach to estimation of efficiency of the facing of the stock complex of transport and logistic centers in Ukraine. ICCPT 2019: Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference, May 28-29, 2019, Ternopil, Ukraine. С.120-134.
17. Аулін В.В., Черновол М.И., Панков А.А. Критерий эффективности применения зерновых сеялок с механическими высевающими аппаратами. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.. 2017. Вип. 47, ч.І. С.40-46.*
18. Аулін В.В., Лисенко С.В., Головатий А.О., Тирса Я.В., Хорольський Н.К. Сучасна логістична система доставки вантажних відправлень у міжнародному сполученні *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability: Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 15-17 квітня 2020 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. С. 256-257.*
19. Аулін В.В., Великодний Д.О. Методи формування системи транспортно-технологічного забезпечення в АПК. *Транспорт і логістика: проблеми та рішення: зб. наук. праць за матеріалами VIII-ї Міжнар. наук.-практ. конф., Северодонецьк – Одеса – Вільнюс – Київ, 23-25 травня 2018р.; Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет. Одеса: КУПРІСНКО СВ, 2018. С. 15-17.*
20. Аулін В.В. Аналіз напрямів підвищення надійності автомобільних транспортних систем. *Підвищення надійності машин і обладнання: зб. тез доповідей XII Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих науковців. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 87-91.*
21. Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В. Методологічний підхід до визначення рівня якості функціонування транспортних систем. *Проблеми трибології (Problems of tribology). 2018. №3. С.23-32.*
22. Аулін В.В., Голуб Д.В. Реалізація фізико-інформаційного підходу дослідження проблеми підвищення надійності та ефективності функціонування транспортних систем. *Вестник ХНАДУ. 2018. Вып. 81. С.21-28.*
23. Аулін В.В., Голуб Д.В., Великодний Д.О. Підвищення надійності процесу перевезень в транспортних системах різними способами структурного резервування. *Крамаровські читання: зб. тез доповідей VI Міжнар. наук.-техн. конф., 21-22 лют. 2019 р., м. Київ; НУБіП. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2019. С. 68-71.*
24. Аулін В.В., Великодний Д.О., Голуб Д.В., Дьяченко В.О. Підвищення ефективності управління логістичним ланцюгом постачання в транспортній системі. *Крамаровські читання: зб. тез доповідей VI Міжнар. наук.-техн. конф., 21-22 лют. 2019 р., м. Київ; НУБіП. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2019. С. 195-198.*
25. Аулін В.В., Голуб Д.В. Оцінка ймовірності безвідмовної роботи транспортних систем з мажоритарними схемами резервування. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем: матеріали I Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф., 21-23 травня 2019 р. Рівне : НУВГП, 2019. С.77-78.*
26. Аулін В.В., Голуб Д.В. Підхід оцінки надійності функціонування транспортних систем резервованих способом заміщення. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability: матеріали 1^{ої} Міжнар. наук.-практ. конф., 17-19 квітня 2019 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2019. С.251-252.*
27. Аулін В.В., Великодний Д.О., Дьяченко В.О. Моделювання ланцюга постачання в транспортно-логістичній системі. *Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання: тези доповідей Третьої Всеукр. наук.-теорет. конф., 28-30 березня 2019 року. Дрогобич.: ІПосвіт, 2019. С.68-69.*
28. Аулін В.В., Великодний Д.О., Моделювання ланцюга постачання в транспортно-логістичній системі. *Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання: тези доповідей. 3-ої Всеукр. наук.-теорет. конф., 28 – 30 березня 2019 р. Дрогобич.: Посвіт, 2019. С.68-69.*
29. Аулін В.В., Голуб Д.В. Забезпечення ефективності функціонування транспортних систем шляхом підвищення надійності структурно-функціональних резервних схем процесу доставки / Зб. тез

- доповідей викладачів, аспірантів та співробітників І наукової конференції "Наука – виробництву 2019", 18 квітня 2019 року. Кропивницький: ЦНТУ, 2019. С. 17-20.
30. Аулін В.В., Голуб Д.В., Великодний Д.О., Дьченко В.О. Розв'язання проблеми надійності технологічних процесів вантажних перевезень підприємствами агропромислового виробництва. *Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(32). С.36-45.
 31. Аулін В.В., Великодний Д. О., Кернус Р. О., Мосузенко Ю. А. Підвищення ефективності доставки вантажів у міжнародному сполученні. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту*: зб. наук. праць матерів VIII-ої міжн. наук.-практ. інтернет-конф., 14-15 квітня 2020 року: МОН України, ВНТУ [та інш.]. Вінниця: ВНТУ, 2020. С.13-14.
 32. Аулін В.В., Голуб Д.В., Замуренко А. Підвищення ефективності транспортного процесу формування інформаційних потоків в системі перевезень вантажів. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем*: матеріали II Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф., 25-27 березня 2020 р. Рівне : НУВГП, 2020. С. 41-43.
 33. Аулін В.В., Голуб Д.В., Дібрівний В.С., Талалаєв О.М., Шерстюков В.В., Ніколенко Б.М. Інформаційна модель забезпечення надійності та ефективності транспортних процесів пасажирських перевезень. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 15-17 квітня 2020 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. С.230-232.
 34. Волкова Н.В., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. 511 с.
 35. Горопашная А.В. Методы анализа безопасности сложных технических систем: дисс. канд. физ-мат наук. СПб, 2009. 109 с.
 36. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2007. 276 с.

References

1. Aulin, V.V., Golub, D.V., Grinkiv A.V. & Lisenko, S.V. (2017). Metodologichni i teoretichni osnovi zabezpechennya ta pidvishennya nadijnosti funkcionuvannya avtomobilnih transportnih sistem [Methodological and theoretical bases of maintenance and increase of reliability of functioning of automobile transport systems]. Aulina V.V. (Ed.). Kropivnickij: Vidavnictvo TOV "KOD". 370.
2. Kurganov V.M. (2009) Upravlenie effektivnostyu i nadezhnostyu funkcionirovaniya sistem dostavok [Performance management and reliability of delivery systems] // Gruzovoe i passazhirskoe avtomobilnoe hozyajstvo. Freight and passenger car economy. 8-13. [in Russian].
3. Zagashev I.O., Zair-Bek S.I. (2002) Tehnologija razvitija kriticheskogo myshlenija: perspektivy dlja vysshego obrazovaniya [Critical Thinking Development Technology: Prospects for Higher Education]. – SPb.: Izd-vo «Skifija». 283. [in Russian].
4. Rotshtejn A.P., Shtovbas S.D., Kozachko A.N. (2007) Modelirovanie i optimizacija nadezhnosti mnogomernyh algoritmicheskikh processov [Modeling and optimization of reliability of multidimensional algorithmic processes]. – Vinnica: "UNIVERSUM-Vinnica". 215.
5. Aulin V.V., Bilichenko V.V., Holub D.V., Velykodnyj D.O. Metodolohiia pidkhodiv do doslidzhennia shliakhiv i sukupnosti faktoriv zabezpechennia nalezhnoho rivnia efektyvnosti i nadijnosti transportnykh system [Methodology of approaches to the study of ways and a set of factors to ensure the appropriate level of efficiency and reliability of transport systems]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu VNTU*. №2, 2017. - S. 4-14.
6. Aulin V.V., Holub D.V., Hryn'kiv A.V., Lysenko S.V. Metodolohiia vyznachennia osnovnykh ekspluatatsijnykh vlastyvostej ta iakosti funktsionuvannia transportnykh i tekhnichnykh system [Methodology for determining the basic operational properties and quality of operation of transport and technical systems]. - *Visnyk inzh. akademii Ukrainy*. – 2017. – №2. – S. 110-115.
7. Aulin V.V., Holub D.V., Hryn'kiv A.V., Lysenko S.V. Metodolohichne obgruntuvannia doslidzhennia ta rozv'iazannia problemy nadijnosti funktsionuvannia transportnykh system [Methodological substantiation of research and solution of the problem of reliability of functioning of transport systems]. *Tekhnichnyj servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. – 2017. – №10. – S. 29-36.
8. Aulin V.V., Holub D.V. Metody otsinky i analizu nadijnosti avtomobil'nykh transportnykh system [Methods for assessing and analyzing the reliability of road transport systems. - Actual problems of modern technologies]. - *Aktual'ni zadachi suchasnykh tekhnolohij. Zbirnyk tez dopovidej Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv, (Ternopil', 16–17 lystopada 2017 r.)*.

- Tom III. – Ternopil': Ternopil's'kyj natsional'nyj tekhnichnyj universytet imeni Ivana Puliuia, 2017. – S.14-15.
9. Aulin V.V., Holub D.V. Metody otsinky i analizu nadijnosti skladnykh transportnykh system ta tekhnolohichnykh protsesiv v nykh [Methods for assessing and analyzing the reliability of complex transport systems and technological processes in them]. - Zbirnyk tez dopovidej XIV Mizhnarodnoi naukovo konferentsii «Ratsional'ne vykorystannia enerhii v tekhnitsi. TechEnergy 2018» (19-22 travnia 2018 roku) / NUBiP. Kyiv. 2018. S.47-51.
 10. Aulin V.V., Holub D.V., Bilichenko V.V., Zamurenko A.S. Formuvannia pokaznykiv otsinky efektyvnosti transportnoho protsesu perevezhen' [Formation of indicators for assessing the efficiency of the transport process]. - Visnyk mashynobuduvannia ta transportu №1(11), 2020. S.5-10.
 11. Aulin V.V., Holub D.V. Metodolohichnyj pidkhid do vyznachennia rivnia iakosti funktsionuvannia transportnykh system [Methodological approach to determining the level of quality of transport systems] // Visnyk mashynobuduvannia ta transportu. №1(7), 2018. S. 4-9.
 12. Aulin V.V., Holub D.V., Lutsenko A.S. Matematychnyj aparat otsinky nadijnosti bahatofunktional'nykh transportnykh system [Mathematical apparatus for assessing the reliability of multifunctional transport systems] / Zbirnyk naukovykh materialiv mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii: "Innovatsijni tekhnolohii rozvytku ta efektyvnosti funktsionuvannia avtomobil'noho transportu", TsNTU m.Kropyvnyts'kyj, Ukraina, 14-15 lystopada 2018 roku. Kropyvnyts'kyj. 2018. S.33-41.
 13. Aulin V.V., Holub D.V. Zabezpechennia ta pidvyschennia nadijnosti transportnykh system i protsesiv perevezhen' bahatofunktional'noiu robotoiu ikh uchastnykiv [Ensuring and increasing the reliability of transport systems and transportation processes by multifunctional work of their participants] / Zb. tez dopovidej V Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Kramarovs'ki chytannia" 22-23 liut. 2018 r., m. Kyiv / NUBiP. – K.: Vydavnychij tsentr NUBiP Ukrainy, 2018. – S. 107-110.
 14. Aulin V.V., Velykodnyj D.O., D'iachenko V.O. Pidvyschennia efektyvnosti transportnykh system v APK na osnovi lohistychnoho pidkhodu [Improving the efficiency of transport systems in the agro-industrial complex on the basis of a logistical approach] / Zb. tez dopovidej V Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Kramarovs'ki chytannia" 22-23 liut. 2018 r., m. Kyiv / NUBiP. – K.: Vydavnychij tsentr NUBiP Ukrainy, 2018. – S. 135-138.
 15. Aulin V.V., Holovatyj A.O. Efektyvnist' stvorennia ta funktsionuvannia lohistychnykh system na ATP [Efficiency of creation and functioning of logistics systems on ATP] / Zb. tez dopovidej KhII Vseukrains'koi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv «Pidvyschennia nadijnosti mashyn i obladnannia». – Kropyvnyts'kyj: TsNTU, 2018. – S. 71-73.
 16. Olexiy Pavlenko, Denys Velikodnyy, Oleksandr Kalinichenko, Andriy Hrinkiv, Viktoriy Diychenko, Volodymyr Dzyura Methodological approach to estimation of efficiency of the facing of the stock complex of transport and logistic centers in Ukraine [Methodological approach to estimation of efficiency of the facing of the stock complex of transport and logistic centers in Ukraine] / ICCPT 2019: Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference, May 28-29, 2019, Ternopil, Ukraine. – S.120-134.
 17. Aulin V.V., Chernovol M.Y., Pankov A.A. Kryterij efektyvnosti pryomenyia zernovykh seialok s mekhanycheskymy vysevaiuschymy apparatamy [Criterion of efficiency of application of grain seeders with mechanical sowing devices] / Zahal'noderzhavnyj mizhvidomchyj naukovo-tekhnichnyj zbirnyk. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn, vyp. 47, ch.I. – Kropyvnyts'kyj: TsNTU, 2017. – S.40-46.
 18. Aulin V.V., Lysenko S.V., Holovatyj A.O., Tyrsa Ya.V., Khorol'skyj N.K. Suchasna lohistychna sistema dostavky vantazhnykh vidpravlen' u mizhnarodnomu spoluchenni [Modern logistics system for delivery of cargo shipments in international traffic] / Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Pidvyschennia nadijnosti mashyn i obladnannia. Increase of Machine and Equipment Reliability", 15-17 kvitnia 2020 r. – Kropyvnyts'kyj : TsNTU, 2020. – S. 256-257.
 19. Aulin V.V., Velykodnyj D.O. Metody formuvannia cystemy transportno-tekhnolohichnoho zabezpechennia v APK [Methods of forming the system of transport and technological support in the agro-industrial complex] Transport i lohistyka: problemy ta rishennia: Zbirnyk naukovykh prats' za materialamy VIII-i Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Sievierodonets'k – Odesa – Vil'nus – Kyiv, 23-25 travnia 2018r. / Skhidnoukrains'kyj natsional'nyj universytet im. V. Dalia, Odes'kyj natsional'nyj mors'kyj universytet – Odesa: KUPRIYeNKO SV, 2018. – S. 15-17.
 20. Aulin V.V. Analiz napriamiv pidvyschennia nadijnosti avtomobil'nykh transportnykh system [Analysis of ways to increase the reliability of road transport systems] / Zb. tez dopovidej KhII Vseukrains'koi

- naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv «Pidvyschennia nadijnosti mashyn i obladnannia». – Kropyvnyts'kyj: TsNTU, 2018. – S. 87-91.
21. Aulin V.V., Holub D.V., Bilichenko V.V. Metodolohichnyj pidkhyd do vyznachennia rivnia yakosti funktsionuvannia transportnykh system [Methodological approach to determining the level of quality of transport systems] / Problemy trybolohii (Problems of tribology). Khmel'nyts'kyj. KhNU, 2018. – №3 – S.23-32.
 22. Aulin V.V., Holub D.V. Realizatsiia fizyko-informatsijnoho pidkhotu doslidzhennia problemy pidvyschennia nadijnosti ta efektyvnosti funktsionuvannia transportnykh system [Implementation of a physical-information approach to the study of the problem of improving the reliability and efficiency of transport systems] / Vestnyk KhNADU, vyp. 81, 2018. S.21-28.
 23. Aulin V.V., Holub D.V., Velykodnyj D.O. Pidvyschennia nadijnosti protsesu perevezen' v transportnykh systemakh riznymi sposobamy strukturnoho rezervuvannia [Improving the reliability of the transportation process in transport systems by various methods of structural redundancy] / Zb. tez dopovidej VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Kramarovs'ki chytannia" 21-22 liut. 2019 r., m. Kyiv / NUBiP. – K.: Vydavnychij tsentr NUBiP Ukrainy, 2019. – S. 68-71.
 24. Aulin V.V., Velykodnyj D.O., Holub D.V., D'chenko V.O. Pidvyschennia efektyvnosti upravlinnia lohistrychnym lantsiuhom postachannia v transportnij systemi [Improving the efficiency of logistics supply chain management in the transport system] / Zb. tez dopovidej VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Kramarovs'ki chytannia" 21-22 liut. 2019 r., m. Kyiv / NUBiP. – K.: Vydavnychij tsentr NUBiP Ukrainy, 2019. – S. 195-198.
 25. Aulin V.V., Holub D.V. Otsinka jmovirnosti bezvidmovnoi roboty transportnykh system z mazhorytarnymy skhemamy rezervuvannia [Estimation of probability of trouble-free operation of transport systems with majority schemes of redundancy] / Innovatsijni tekhnolohii rozvytku mashynobuduvannia ta efektyvnoho funktsionuvannia transportnykh system: materialy I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii, 21-23 travnia 2019 r. - Rivne : NUVHP, 2019. – S.77-78.
 26. Aulin V.V., Holub D.V. Pidkhyd otsinky nadijnosti funktsionuvannia transportnykh system rezervovanykh sposobom zamischennia [Approach to assessing the reliability of the operation of transport systems reserved by the method of replacement] / Materialy 1oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Pidvyschennia nadijnosti mashyn i obladnannia. Increase of Machine and Equipment Reliability", 17-19 kvitnia 2019 r. – Kropyvnyts'kyj : TsNTU, 2019. – S.251-252.
 27. Aulin V.V., Velykodnyj D.O., D'chenko V.O. Modeliuvannia lantsiuha postachannia v transportno-lohistrychnij systemi [Supply chain modeling in the transport and logistics system] / Tezy dopovidej Tret'oi Vseukrains'koi naukovo-teoretychnoi konferentsii "Problemy z transportnymy potokamy i napriamy ikh rozv'iazannia", 28–30 bereznia 2019 roku. – Drohobych.: IPosvitl, 2019. – S.68-69.
 28. Aulin V.V., Velykodnyj D.O., Modeliuvannia lantsiuha postachannia v transportno-lohistrychnij systemi [Supply chain modeling in the transport and logistics system] / 3-ia Vseukr. nauk.-teoretychna konferentsiia «Problemy z transportnymy potokamy i napriamy ikh rozv'iazannia», 28 – 30 bereznia 2019 roku: Tezy dopovidej. – Drohobych.: Posvit, 2019. – S.68-69.
 29. Aulin V.V., Holub D.V. Zabezpechennia efektyvnosti funktsionuvannia transportnykh system shliakhom pidvyschennia nadijnosti strukturno-funktsional'nykh rezervnykh skhem protsesu dostavky [Ensuring the efficiency of transport systems by increasing the reliability of structural and functional backup schemes of the delivery process] / Zb. tez dopovidej vykladachiv, aspirantiv ta spivrobotnykiv L naukovo konferentsii "Nauka – vyrobnytstvu 2019", 18 kvitnia 2019 roku. Kropyvnyts'kyj: TsNTU, 2019. – S. 17-20.
 30. Aulin V.V., Holub D.V., Velykodnyj D.O., D'chenko V.O. Rozv'iazannia problemy nadijnosti tekhnolohichnykh protsesiv vantazhnykh perevezen' pidpriemstvamy ahropromysloвого vyrobnytstva [Solving the problem of reliability of technological processes of freight transportation by agro-industrial enterprises] // Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky. Vyp. 1(32). Kropyvnyts'kyj: TsNTU, 2019. S.36-45.
 31. Aulin V.V., Velykodnyj D. O., Kernus R. O., Mosuzenko Yu. A. Pidvyschennia efektyvnosti dostavky vantazhiv u mizhnarodnomu spoluchenni [Improving the efficiency of cargo delivery in international traffic] / Materialy VIII-oi mizhn. nauk.-praktychnoi internet-konf. «Problemy i perspektyvy rozvytku avtomobil'noho transportu», 14-15 kvitnia 2020 roku: zb. nauk. prats' / MON Ukrainy, VNTU [ta insh.]. – Vinnytsia: VNTU, 2020. – S.13-14.
 32. Aulin V.V., Holub D.V., Zamurenko A. Pidvyschennia efektyvnosti transportnoho protsesu formuvanniam informatsijnykh potokiv v systemi perevezen' vantazhiv [Improving the efficiency of the transport process by forming information flows in the freight system] / Innovatsijni tekhnolohii rozvytku

- mashynobuduvannia ta efektyvnoho funktsionuvannia transportnykh system: materialy II Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii 25-27 bereznia 2020 r. Rivne : NUVHP, 2020. S. 41-43.
33. Aulin V.V., Holub D.V., Dibrivnyj V.S., Talalaiev O.M., Sherstiukov V.V., Nikolenko B.M. Informatsijna model' zabezpechennia nadijnosti ta efektyvnosti transportnykh protsesiv pasazhyr'skykh perevezhen' [Information model for ensuring the reliability and efficiency of passenger transport processes] / Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Pidvyschennia nadijnosti mashyn i obladnannia. Increase of Machine and Equipment Reliability", 15-17 kvitnia 2020 r. – Kropyvnyts'kyj : TsNTU, 2020. – S.230-232.
 34. Volkova N.V., Denisov A.A. (2001) Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza [Fundamentals of systems theory and systems analysis]. - SPb.: Izd-vo SPbGTU. 511. [in Russian].
 35. Goropashnaja A.V. (2009) Metody analiza bezopasnosti slozhnyh tehniceskikh sistem: dissertacija kand. fiz-mat nauk [Safety analysis methods for complex technical systems]. - SPB. 109. [in Russian].
 36. Rjabinin I.A. (2007) Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnyh sistem [Reliability and safety of structurally complex systems]. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta. 276. [in Russian].

Vktor Aulin, Prof., DSc., **Dmytro Holub**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Lisenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andriy Grinkiv**, PhD tech. sci., doctoral student, **Viktoria Dyachenko**, post-graduate, **Artem Zamurenko**, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnyts'kyi, Ukraine

Theoretical Approach to Estimating the Probabilities of Trouble-free Operation of Transport and Production Systems and Supply Chains Based on Their Logical Structural Schemes of Reliability

The purpose of the work is to develop a method of estimating the probability of failure-free operation of transport systems on the basis of their logical structural diagrams of reliability, which makes it possible to evaluate their dependence on the level of probability and the number of elements and to predict and prevent failure of a chain or system as a whole.

The theoretical substantiation of reliability estimation of functioning of transport systems using logical structural schemes of reliability is given and it is revealed that their construction is based on the analysis of consequences of failures of individual elements. Properties of elements and systems for their working and inoperable states are highlighted. The formulas for calculating the probability of failure-free operation and failure of the chain or the transport system as a whole, as well as their time to failure. The dependence of the probability of failure-free operation of the transport system on the level of probability and the number of its elements is shown. Cases of serial and parallel connection of elements in the transport system chain are considered. Methods of calculation of structural reliability schemes are presented and formulas are used for estimating the probability of trouble-free operation of technical and transport systems, as well as the probability of their failures. Dependencies of reliability indicators on number of elements are constructed. It shows the reliability estimation of bridged structural diagrams using the methods of minimum paths, minimum cross sections, transformation of the connection of elements "triangle" - "asterisk", a key element.

It is found that complex technical and transport systems have a large number of elements, and therefore the reliability of such systems depends not only on the reliability of the individual elements, but also on the nature of the connections between them. Carrying out the reliability analysis of transport systems is possible with the help of their structural functional circuits of reliability and unlike physical circuits that reproduce physical connections between elements, logical reliability circuits are built to show what combinations of failures of individual elements of the system lead to failure of a circuit or system in general. Thus, the construction of logical reliability schemes is based on the analysis of the consequences of the causes of failures of individual elements, which can later be used in the development of theoretical bases for improving the reliability of the functioning of road transport systems.

transport system, production system, supply chain, trouble-free operation, probability, reliability assessment, block diagram, elements, methods

Одержано (Received) 30.04.2020

Прорецензовано (Reviewed) 19.05.2020

Прийнято до друку (Approved) 19.10.2020