

4. Козодой Д.С., Сколото А.С. До питання дослідження факторів, що обумовлюють рівень професійного ризику на залізничному транспорті // Проблеми охорони праці в Україні. – К: ДУ «ННДІПБОП», 2014. – Вип. 27. – С. 48 – 52.
5. Водяник А.О. Методологічні основи врахування фактора ризику в профілактиці виробничого травматизму: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук / А.О. Водяник. – К.: ННДІПБОП, 2008. – 36 с.

Надійшло до редакції 20.07.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Яковенко В.Б.

УДК 629.017(07)

В.І. Лесько¹, доцент,

Л.Г. Лесько², доцент,

Я.Ю. Лобков¹, ст.викладач

¹Київський національний університет будівництва і архітектури (КНУБА)

²Національний медичний університет ім. О.О. Богомольця (НМУ)

НАДІЙНІСТЬ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ ТА СПЕЦИФІКА ЇЇ ОЦІНКИ

АНОТАЦІЯ. Розглянуто основні складові надійності логістичних систем, її специфіка та деякі підходи до оцінки основних показників надійності. Визначено випадки доцільності і ефективності використання методів статистичного та імітаційного моделювання на основі імовірнісно-фізичних та імовірнісно-статистичних моделей надійності елементів системи та системи в цілому з урахуванням мінливої структури логістичних систем при її функціонуванні і кореляційних зв'язків між її елементами.

Ключові слова: надійність, логістичні системи, коефіцієнт кореляції, інтенсивність відмов.

АННОТАЦИЯ. Рассмотрены основные составляющие надежности логистических систем, ее специфика и некоторые подходы к оценке основных показателей надежности. Определены случаи целесообразности и эффективности использования методов статистического и имитационного моделирования на основе имовірнісно-фізических и имовірнісно-статистических моделей надежности элементов системы и системы в целом с учетом меняющейся структуры логистических систем при ее функционировании и корреляционных связей между ее элементами.

Ключевые слова: надежность, логистические системы, коэффициент корреляции, интенсивность отказов.

ABSTRACT. The main components of the reliability of logistics systems, its specificity and some approaches to assess osnovnyz reliability. Detected cases of expediency and efficiency of statistical methods and simulation-based imovirnistno imovirnistno physical and statistical models of reliability of the system and the system as a whole, taking into account the changing structure of logistics systems in its functioning and the correlation between its elements.

Key words: reliability, logistic systems, the correlation coefficient, the failure rate

Актуальність проблеми. Логістичні системи є одними з ключових ланок в будівельній індустрії і представляють собою сукупність взаємопов'язаних елементів, між якими існує певний зв'язок. Логістичні системи (ЛС) функціонують в умовах чітко вираженої невизначеності, турбулентності зовнішнього середовища, кон'юнктури ринку, постійного підвищення вимог споживачів, для її роботи характерні випадкові процеси і т.п. Логістична система характеризується специфічним різноманіттям зв'язків між її



структурними елементами, неоднозначністю алгоритмів поведінки при різних умовах, наявністю зворотних зв'язків, випадкових впливів та збурень, кореляційним впливом між великою кількістю параметрів. Як складний техніко-економічний об'єкт, ЛС піддається впливу широкого спектру різноманітної кількості факторів, що можуть змінювати її характеристики, знижуючи чи підвищуючи ефективність системи.

Ефективність і якість ЛС великою мірою визначається її надійністю, тобто комплексною властивістю системи, яка полягає в її здатності в певних умовах зберігати протягом заданого терміну часу та в у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність ЛС виконувати необхідні функції та зберігати їх ефективність на встановленому рівні в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання і транспортування. Надійність ЛС визначається ймовірнісними показниками, що характеризують реакцію логістичної системи на відмову – тобто подію, яка полягає в порушенні роботоздатності системи по причині раптових або поступових змін її параметрів.

Мета і постановка задачі. Для вирішення проблем надійності логістичних систем, враховуючи їх специфіку функціонування, можуть застосовуватися інструменти теорії надійності, основними задачами якої є виявлення причин виникнення відмов, моделювання та розробка методів визначення і оцінки показників надійності, визначення напрямків та шляхів підвищення надійності, оптимізації надійності ЛС з урахуванням додаткових затрат, пов'язаних із підвищенням їх надійності та втратами внаслідок відмов. Проблема підвищення надійності логістичних систем має соціальний, економічний, науково-технічний, організаційно-технічний та інші аспекти і на сьогоднішній день все більше привертає до себе велику увагу спеціалістів, а теоретичні і методологічні аспекти даної проблеми отримали достатньо широке висвітлення в наукових працях, де підкреслюється доцільність та необхідність впровадження методів теорії надійності в практику ЛС.

Для забезпечення надійності логістичних систем необхідно керувати процесами планування та проектування всіх ланок системи в різних умовах функціонування. Важливим є процес контролю логістичних процесів для недопущення втрати надійності її функціонування. З метою забезпечення надійності логістичної системи, її оцінку слід здійснювати за всіма елементами, що її складають, виділяючи основні показники ефективності та надійності. Надійність ЛС визначається логістичними показниками, кожний з яких кількісно характеризує, в якій ступені конкретній системі властиві певні властивості, що обумовлюють її надійність.

Основна частина. Надійність логістичної системи в залежності від її призначення і умов застосування може бути обумовлена такими показниками як безвідмовність, довговічність, стійкість, керованість, живучість, ремонтпридатність і збереженість її елементів або певними сполученнями цих властивостей.

Основними характеристиками логістичної системи, як правило є кількісні показники, які визначають ефективність виконання заданих функцій. Задані функції при цьому визначаються цільовим призначенням системи. Для визначення поняття надійності логістичних систем можуть бути використані декілька підходів. При першому підході використовують загальноприйняте визначення надійності складних технічних систем, а в якості визначення несправного стану системи приймають встановлену заздалегідь долю втрат ефективності її функціонування. При цьому під імовірністю безвідмовної роботи системи розуміють імовірність того, що узагальнений показник W ефективності системи протягом заданого часу не нижче його критичного значення $W_{кр}$, тобто:

$$R = P\{W \geq W_{кр}\} \quad (1)$$

де R – узагальнений показник надійності системи.

Значення $W_{кр}$ визначають із умови сумісної роботи системи, яка розглядається, із іншими системами. При другому підході замість характеристики надійності системи розглядають абсолютне або відносне зниження її ефективності внаслідок недостатньої надійності елементів системи, тобто:

$$\Delta W = W_0 - W_n \quad (2)$$

або

$$\overline{\Delta W} = (W_0 - W_n) \cdot W_0, \quad (3)$$

де: W_0 – значення узагальненого показника ефективності системи при абсолютній надійності її елементів; W_n – значення узагальненого показника ефективності СТС при надійності її елементів.

Показники ΔW і $\overline{\Delta W}$ в формулах (2, 3) характеризують надійність систем в цілому. При третьому підході узагальнений показник ефективності систем W визначають як функцію характеристик надійності їх елементів:

$$W = \varphi(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N), \quad (4)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента системи ($i = 1, 2, \dots, N$).

Іноді під надійністю складних систем розуміють властивість зберігати ефективність при появі відмов її елементів на рівні ефективності ідеальної системи, елементи котрої абсолютно надійні. В якості показника надійності при цьому приймають величину:

$$\Delta R_n^o = R_n^o - R_n^* \quad (5)$$

або

$$\Delta R_n^o = |R_n^o - R_n^*|, \quad (6)$$

де: R_n^o і R^o - показники ефективності системи, які вираховуються в припущенні, що всі її елементи абсолютно надійні (інтенсивності відмов елементів дорівнюють нулеві); R_n^* - показник ефективності системи, обчислений в припущенні, що інтенсивність відмов елементів системи відповідає їх розрахунковим значенням.

Показники ΔR_n^o , що визначені за формулами (5) та (6), не характеризують надійності СТС з точки зору виконання системою заданих функцій і рішення поставлених перед нею задач а також відповідності фактичної (реальної) ефективності системи ідеальній ефективності, оскільки показник ефективності R_n^o враховує не фактичну (реальну) інтенсивність відмов елементів, - а тільки розрахункову. При цьому під надійністю системи розуміють ступінь відповідності показників її ефективності при заданих характеристиках надійності елементів значенням цих показників при абсолютно надійних елементах системи.

Розглянуті в деяких роботах підходи до визначення надійності СТС як властивості відповідності показників реальної та ідеальної (потенційної) ефективностей системи не являються універсальними, оскільки вони не відображають безпосередньо надійності виконання системою заданих функцій і рішення поставлених задач.

Крім того, визначення узагальненого показника ефективності системи W як функції інтенсивності відмов елементів λ_i , розрахованої звичайними методами оцінки надійності, - це забезпечує необхідної точності і вірогідності. Справа в тому, що сучасні логістичні системи характеризуються не тільки великим числом елементів, але і складністю структури, її мінливістю, взаємозв'язками. У зв'язку з цим, для логістичних систем використання класичних методів теорії надійності не завжди може бути коректним і прийнятним. Як відомо, класичні методи визначення показників надійності виробів за відомими показниками надійності елементів оснований, як правило, на гіпотезі повної незалежності відмов елементів системи, що не завжди підтверджуються практикою, а в логістичних системах – тим більше. При цьому не враховуються також фізика та принципи формування відмов, специфіка функціонування кожного окремого елемента системи чи об'єкту.

Відомо, що при експлуатації складних технічних систем можливі випадки, коли відмови окремих елементів системи або незначні зміни їх робочих параметрів можуть



призводити не до повного виходу системи з ладу, а лише до деякого погіршення якості її функціонування. Наприклад, навіть певеликі зміни параметрів окремих підсистем та їх елементів в межах допустимих значень можуть дати такі поєднання, які несприятливо відображуються на працездатності всієї системи і призведуть до недопустимого для конкретно заданих умов зниження рівня ефективності функціонування. Навіть при безвідмовній роботі всіх елементів системи не завжди можна говорити про стовідсоткову імовірність виконання заданих функцій (задач), так як складні системи можуть не виконувати заданих функцій внаслідок зміни певних умов або їх недотримання. Це пояснюється, зокрема, тим, що надійність систем в дуже великій мірі залежить від умов, в яких вони функціонують. Так, система, яка є роботоздатною в одних умовах і при вирішенні одного кола задач, може бути нероботоздатною в інших умовах при вирішенні нових задач (зміна умов експлуатації, підвищення вимог споживача, впливу навколишнього середовища і т. і.).

Тому, в деяких випадках, має місце сенс говорити не про ефективність або надійність складної системи взагалі, а про її ефективність при виконанні певних задач в певних умовах. Таким чином, необхідні принципово нові методи та підходи при визначенні надійності логістичних систем в реальних умовах будівельної індустрії, враховуючи специфіку структури і її поведінки в залежності від виконуваних функцій, умов експлуатації, ризиків і т. д. При визначенні надійності показників надійності логістичних систем важливі не тільки причинно – наслідкові описи і пояснення поведінки її окремих елементів, але й узагальнена картина переходу системи з одного стапу в другий, тобто оцінка якості функціонування і рівня ефективності. Це викликає необхідність встановлення нового критерію для оцінки надійності (роботоздатності) складних логістичних систем такого виду.

Критерієм або узагальненим показником надійності логістичних систем повинна слугувати деяка міра, котра могла би бути характеристикою ступеню доцільності її застосування (використання) і кількісно виявляла би ступінь об'єктивної можливості виконання системою заданих функцій (рішення поставлених задач) в заданих реальних умовах будівельної індустрії.

В багатьох випадках достатньою кількісною мірою надійності логістичних систем виявляється імовірність виконання поставлених задач, тобто імовірність отримання деякого корисного ефекту. В загальному випадку ефект функціонування ЛС є розмірною величиною Y , але її можна представити у безрозмірному вигляді (Y_0), як пропонується в деяких роботах, пронормувавши Y відносно максимального корисного ефекту y_{\max} , тобто:

$$Y_0 = Y/y_{\max}. \quad (7)$$

Узагальнений показник надійності R системи в цьому випадку представляють як імовірність отримання корисного ефекту Y_0 в деяких межах $[y_0'', y_0'']$, тобто:

$$R = P(y_0'' \leq Y_0 \leq y_0'). \quad (8)$$

Отже, надійність логістичних систем необхідно оцінювати не тільки за його внутрішніми властивостями (надійністю елементів системи), але й із урахуванням імовірності виконання системою конкретних задач, тобто за ефектом її функціонування. Рівень ефективності функціонування (результативність) логістичних систем або ступінь їх роботоздатності в цьому випадку можна оцінювати за інтегральними показниками їх роботи в реальних заданих умовах виробництва та при конкретних вимогах споживача.

Таким чином, можна виділити два аспекти надійності логістичних систем – внутрішній і зовнішній. Внутрішній аспект торкається надійності елементів системи і, в кішчевому підсумку, – ступеня об'єктивної можливості її безвідмовного функціонування при вирішенні поставлених перед нею задач в заданих умовах виробництва. Зовнішній аспект надійності відображає взаємодію елементів системи із зовнішнім середовищем, тобто реальні можливості досягнення цілі в реальних умовах виробництва будівельної індустрії.

Надійність логістичних систем проявляється в їх результативності (продуктивності) і економічності досягнення кішцевих результатів функціонування, тому у відповідності до вимог системного підходу при визначенні, контролі і забезпеченні надійності ЛС необхідно враховувати її місце і роль в системі інших визначаючих характеристик ефективності функціонування.

Оскільки ефективність системи визначається головним чином її надійністю, продуктивністю та економічністю експлуатації, модель формування кішцевого результату логістичної системи можна записати у вигляді:

$$A = ANPE, \quad (9)$$

де A – подія, яка позначає отримання деякого кінцевого результату функціонування; N – подія, яка позначає надійність системи; P – подія, яка позначає продуктивність; E – подія, яка позначає економічність системи.

Оскільки будь-яка логістична система відноситься до класу випадкових систем, - то події A , N , P , E є випадковими, і тому характеристикою кожної з них є імовірність виконання або збереження певних умов, що характеризують її з точки зору відповідності до заданих вимог. На основі моделі (9) можна записати:

$$P(A) = P(A / NPE) \cdot P(N) \cdot P(P / N) \cdot P(E / NP), \quad (10)$$

де $P(A)$ – повна імовірність отримання кінцевого результату функціонування системи (узагальнений показник ефективності системи);

$P(A/NPE)$ – умовна імовірність отримання кінцевого результату функціонування системи, визначеної при умові, що система надійна, продуктивна і економічна; $P(N)$ – імовірність безвідмовного функціонування системи з заданими показниками якості (узагальнений показник системи); $P(P/N)$ – умовна імовірність забезпечення продуктивності системи при умові, що система безвідмовно функціонує з заданими показниками якості (узагальнений показник продуктивності системи); $P(E/NP)$ – умовна імовірність забезпечення економічності системи при умові, що вона надійна і продуктивна (узагальнений показник економічності системи).

Аналіз виразу (10) показує, що надійність входить в усі складові означення ефективності і в той же час виступає в якості безумовного фактору ефективності логістичної системи, визначеного узагальненим показником надійності $P(N)$. При $P(N) = 0$ інші складові ефективності СТС втрачають своє значення, оскільки при цьому $P(A) = 0$.

Надійність логістичної системи як подію, можна представити у вигляді:

$$N = NCF, \quad (11)$$

де C – подія, яка означає збереження параметрів, визначаючих стан системи в заданих обмеженнях протягом заданого часу; F – подія, що визначає факт якісного виконання системою заданих функцій.

За аналогією з (10) можна записати:

$$P(N) = P(N/CF) \cdot P(C) \cdot P(F/C), \quad (12)$$

де $P(N/CF)$ – умовна імовірність безвідмовного функціонування системи, визначена за умови збереження заданого рівня технічного стану елементів системи і виконання системою заданих функцій; $P(C)$ – імовірність збереження заданого технічного стану ЛС протягом заданого часу; $P(F/C)$ – умовна імовірність виконання системою заданих функцій, визначеної за умови збереження заданого технічного стану елементів логістичної системи.

Всі складові надійності логістичної системи (12) є функціями технічного стану її елементів. Це свідчить про те, що надійність логістичних систем C за технічним станом її складових елементів (структурна надійність системи) повинна бути головним об'єктом в плані вирішення задач по забезпеченню надійності логістичних систем будівельної індустрії, а методи визначення показників надійності логістичних систем повинні базуватися на реальних моделях надійності конкретної логістичної системи з урахуванням її структурної схеми надійності, взаємодії елементів системи та зв'язків між ними і т.п. Оскільки вирази (9-12) описують надійність системи у формі подій, то їх можна прийняти за основний аналітичний запис структурної схеми надійності логістичної системи, а її



аналітичну форму представити як систему із послідовним з'єднанням елементів у вигляді добутку подій.

Застосувавши правило визначення імовірності добутку випадкових подій, запишемо в загальному вигляді:

$$P(A) = P(A_1) \prod_{j=2}^N P(A_j / A_1 A_2 \dots A_{j-1}), \quad (13)$$

де $P(A)$ – імовірність безвідмовного функціонування ЛС при виконанні поставленої задачі та заданому рівні ефективності; $P(A_1)$ – імовірність безвідмовного функціонування елемента ЛС $j=1$ або імовірність збереження умови його роботоздатності при виконанні поставленої задачі; $P(A_j / A_1 A_2 \dots A_{j-1})$ – умовна імовірність збереження j -ої умови роботоздатності або безвідмовного функціонування j -го елемента ЛС, яка вираховується при умові безвідмовного функціонування всіх елементів від першого до j -го, з'єднаних послідовно, та збереження всіх умов роботоздатності.

Формулу (13) в розгорнутому вигляді можна записати так:

$$P(A) = P(A_1) \cdot P(A_2 / A_1) \cdot P(A_3 / A_1 A_2) \dots P(A_j / A_1 A_2 \dots A_{j-1}) \dots P(A_N / A_1 A_2 \dots A_{N-1}) \quad (14)$$

Формула (14) дозволяє враховувати не тільки безвідмовність функціонування елементів системи та умови збереження заданого рівня ефективності, але й наявність взаємозв'язків між ними.

Кількісною характеристикою лінійного зв'язку між подіями \bar{A}_i та \bar{A}_j є коефіцієнт кореляції:

$$\rho(\bar{A}_i, \bar{A}_j) = \frac{P(\bar{A}_i \bar{A}_j) - P(\bar{A}_i) \cdot P(\bar{A}_j)}{\sqrt{P(A_i) \cdot P(A_i) \cdot P(A_j) \cdot P(A_j)}}, \quad (15)$$

де $P(\bar{A}_i \bar{A}_j)$ – імовірність добутку подій \bar{A}_i та \bar{A}_j ; $P(\bar{A}_i)$ та $P(\bar{A}_j)$ – імовірність подій \bar{A}_i та \bar{A}_j ; $P(A_i)$ та $P(A_j)$ – імовірність подій A_i та A_j , протилежних подіям \bar{A}_i та \bar{A}_j .

У формулі (15) події A_i та A_j означають безвідмовне функціонування i -го та j -го елементів (збереження умов роботоздатності), \bar{A}_i та \bar{A}_j – відмови i -го та j -го елементів (порушення умов роботоздатності).

Значення коефіцієнта кореляції $\rho(\bar{A}_i \bar{A}_j)$ знаходиться в межах:

$$-1 \leq \rho(\bar{A}_i \bar{A}_j) \leq 1, \quad (16)$$

або

$$0 \leq |\rho(\bar{A}_i \bar{A}_j)| \leq 1. \quad (17)$$

При $\rho(\bar{A}_i \bar{A}_j) = 1$ відмови елементів ЛС (або умови) повністю залежні (лінійно), при $\rho(\bar{A}_i \bar{A}_j) = 0$ відмови елементів ЛС (або умови) повністю незалежні. При незалежних відмовах елементів ЛС для всіх пар елементів $\rho(\bar{A}_i \bar{A}_j) = 0$, і формула (14) приймає вигляд:

$$P(A) = P(A_1) P(A_2) \dots P(A_j) \dots P(A_N), \quad (18)$$

або

$$P(A) = \prod_{j=1}^N P(A_j), \quad (19)$$

де $P(A)$ – імовірність безвідмовного функціонування ЛС при виконанні поставленої задачі; $P(A_j)$ – імовірність безвідмовної роботи j -го елемента ЛС ($j = \overline{1, N}$).

Якщо відмови всіх N елементів ЛС залежні повністю, то $|\rho(\bar{A}_i \bar{A}_j)| = 1$, то імовірність безвідмовної роботи ЛС залежить від імовірності $P(A_j)_{\min}$ безвідмовної роботи її найменш надійного елемента (модель «слабкої ланки»). В цьому випадку формула (14) має вигляд:

$$P(A) = P(A_j)_{\min}. \quad (20)$$

Оскільки в дійсності таких реальних логістичних систем, в яких відмови елементів системи є повністю залежними або повністю незалежними, немає, то формули (19) та (20) не відображають структурної надійності реальних логістичних систем. Насправді, імовірність безвідмовної роботи логістичної системи $P(A)$ знаходиться в межах інтервалу:

$$\prod_{j=1}^N P(A_j) < P(A) < P(A_j)_{\min} \quad (21)$$

Для зменшення невизначеності в кількісній оцінці імовірності $P(A)$ необхідно отримати інформацію щодо кореляції відмов, тобто про коефіцієнт кореляції відмов. Складність визначення коефіцієнта парної (15) або множинної кореляції відмов елементів ГП полягає у вирахуванні імовірності добутку подій:

$$P(\overline{A_i} \overline{A_j}) = P(\overline{A_i})P(\overline{A_j} / \overline{A_i}) = P(\overline{A_j})P(\overline{A_i} / \overline{A_j}). \quad (22)$$

Крім цього моменту, в теорії надійності існує проблема відсутності більш-менш прийнятних методів визначення умовних ймовірностей $P(\overline{A_i} / \overline{A_j})$ та $P(\overline{A_j} / \overline{A_i})$. А тому доволі часто, щоб уникнути розрахункових проблем, безпідставно вважають, що з достатньою для практики точністю можна використовувати модель незалежності відмов, заздалегідь знаючи, що застосування спрощеної моделі за виразами (18, 19) при оцінці показників надійності таких складних систем як логістична система - може привести до великих помилок.

Висновок.

В таких випадках доцільним і ефективним, мабуть, буде використання методів статистичного, імітаційного моделювання на основі імовірнісно-фізичних та імовірнісно-статистичних моделей надійності елементів системи та системи в цілому з урахуванням мінливої структури логістичних систем при її функціонуванні, кореляційних зв'язків між її елементами, їх роботоздатності та умовами роботоздатності системи, аналізу процесів формування відмов в залежності від заданих умов роботоздатності та рівня ефективності. Окреслені задачі і специфіка оцінки надійності ЛС припускають розробку відповідних моделей надійності та методів визначення і прогнозування показників надійності логістичних систем на всіх стадіях їх життєвого циклу. Вирішення цих проблем та впровадження їх кішцевих результатів дозволить: суттєво розширити рамки застосування логістики в будівельній індустрії, сформуванню ефективної структури по логістичному керуванню надійністю систем, дасть можливість успішно реалізовувати управлінські рішення, вирішувати проблеми по підвищенню надійності ЛС, що суттєво впливатиме на інтегральні економічні результати діяльності логістичних систем.

Література

1. Анисимов С. Н., Колобов А. А., Омельченко И. Н. [и др.]. Проектирование интегрированных производственно-корпоративных структур: эффективность, организация, управление / под. ред. А. А. Колобова, А. И. Орлова. - М.: Изд-во МГТУ им. П. Э. Баумана, 2006. - 728 с.
2. Аникин Б. А., Тягухин А. П. Коммерческая логистика. - М.: ТК Велби ; Проспект, 2008. - 432 с.
3. Гарантийный надзор за сложными техническими системами / Г. Е. Алпаидзе, Л. Г. Романов, А. А. Червоный, Ф. К. Шахтарин. - М.: Машиностроение, 1988. - 232 с.
4. Калашников В.В. Сложные системы и методы их анализа. - М.: Знание, 1980. - 61 с.
5. Николайчук В.Е. Логистика. - СПб.: Питер, 2002. - 160 с.
6. Червоный А.А., Лукьященко В. И., Котин Л. В. Надежность сложных систем. - М.: Машиностроение, 1976. - 288 с.
7. Федюкин В. К. Управление качеством процессов. - СПб. : Питер, 2004. - 208 с.

Надійшло до редакції 10.06.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Яковенко В.Б.