

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 658.3

Особливості марковського моделювання для оцінювання надійності технічних систем

Геселева Н.В.

кандидат технічних наук,
доцент кафедри економічної кібернетики та маркетингу
Київського національного університету технологій та дизайну

Пронюк Г.В.

кандидат технічних наук,
доцент кафедри охорони праці
Харківського національного університету радіоелектроніки

Дана робота присвячена дослідженню особливостей застосування марковських процесів для визначення надійності технічних систем. Розглянуто марковське моделювання для систем дискретного та безперервного часу з дискретними станами. Застосування даного підходу дозволить оцінити ризики аварій на підприємствах, що сприяє підвищенню економічної ефективності технічних систем.

Ключові слова: надійність системи, ризик-менеджмент, марковські процеси, економічна ефективність, професійна безпека.

Геселева Н.В., Пронюк А.В. ОСОБЕННОСТИ МАРКОВСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Данная работа посвящена исследованию особенностей применения марковских процессов для определения надежности технических систем. Рассмотрено марковское моделирование для систем дискретного и непрерывного времени с дискретными состояниями. Использование данного подхода позволит оценить риски аварий на предприятии, что способствует повышению экономической эффективности технических систем.

Ключевые слова: надежность системы, риск-менеджмент, Марковские процессы, экономическая эффективность, профессиональная безопасность.

Geselyeva N.V., Proniuk G.V. FEATURES OF MARKOV MODELING FOR ESTIMATION OF TECHNICAL SYSTEMS RELIABILITY

The given work is devoted to research of features of Markov processes application for determination of the technical systems reliability. The markov modeling for the systems of discrete and continuous time with the discrete states is considered. The use of the given approach will allow to estimate the accident risks in industry, which result to the rise of economic efficiency of the technical systems.

Keywords: system reliability, risk-management, Markov process, economical efficiency, professional safety.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Забезпечення надійності технічних систем, а значить безпеки працівників та скорочення ризиків, на будь-якому підприємстві має переважати решту видів діяльності компаній, що експлуатують виробничі об'єкти, тому має найвищий соціальний пріоритет [1, с. 35]. Безпека – це стан захищеності життєво важливих інтересів особистості, суспільства, держави від внутрішніх та зовнішніх загроз. Виходячи з поняття небезпеки, надійність та безпеку системи пов'язують не тільки зі станом технічних, але й соціально-економічних процесів, що відбуваються, рівнем їх рів-

новаги та здатності до стійкого виробництва основних системних елементів, які забезпечують її функціонування. Тобто увесь комплекс управління діяльністю технічної системи має бути спрямованим на збереження цілісності та стійкості, тобто забезпечувати певну надійність роботи системи [2, с. 54].

Робота будь-якої технічної системи може характеризуватися її ефективністю (рис. 1), під якою розуміється сукупність властивостей, що визначають здатність системи виконувати певні задачі.

Відправною точкою аналізу надійності та безпеки технічних систем є поняття ризику,

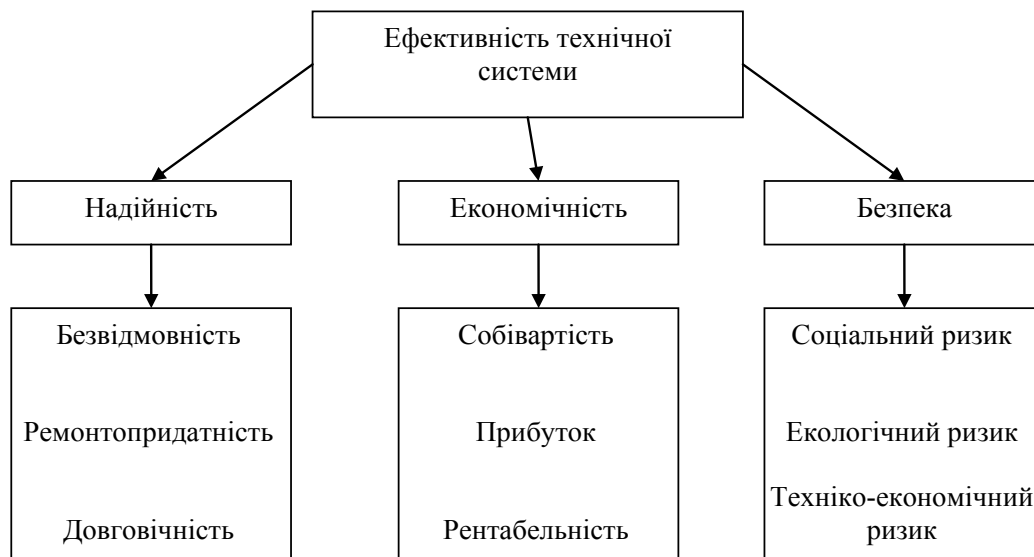


Рис. 1. Основні характеристики ефективності технічних систем

пов'язаного з даною технологією. Історичний досвід показує, що насамперед ризик почали вивчати виходячи із недоотримання намічених результатів, що особливо проявлялось при товарно-грошових відносинах, конкуренції учасників господарського обороту. Для зниження втрат від можливих аварійних ситуацій передбачаються спеціальні процедури, що допомагають врахувати невизначеності і ризику на всіх етапах експлуатації технічних систем. Однак, при цьому загострюється проблема збереження балансу економічної доцільності та соціальної прийнятності будь-яких проектів та управлінських рішень.

Таким чином, на сучасному етапі планування та управління виробництвом найважливішою складовою забезпечення професійної безпеки є система управління ризиками, інакше ризик-менеджмент [3], тобто процес прийняття і виконання управлінських рішень, спрямованих на зниження ймовірності виникнення несприятливого результату і мінімізацію можливих втрат, викликаних його реалізацією.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Вчені по-різному трактують поняття ризику. Наприклад, Л.І. Донець у [4, с. 34] визначає ризик як діяльність, що пов'язана з подоланням невизначеності в ситуації неминучого вибору, в процесі якого є можливість кількісно і якісно оцінити ймовірність досягнення передбаченого результату, невдачі й відхилення від мети. У роботі [5] стверджують, що ризик – імовірність події чи групи споріднених випадкових подій, які спричиняють збитки об'єкта, який володіє цим ризиком.

Існує різні групи стратегій визначення надійності технічних систем [6, 7], тобто технічного обслуговування і ремонту устаткування, акцентовані або на підтримці робочого стану конкретного устаткування, або на збереженні надійності системи з урахуванням можливих відмов устаткування, що викликає втрату або різке зниження цієї надійності. Звичайно, по-перше, на основі технічної інформації (термін служби устаткування, режими навантажень, нештатні дії, результати попередніх випробувань і діагностики) розробляються декілька сценаріїв технічного обслуговування і ремонту устаткування, оцінюється технічна ефективність і реалізованість кожного з них.

На другому етапі технічні фахівці прогнозують залишковий ресурс, а економісти розраховують витрати, які необхідні для технічного обслуговування і ремонту протягом розрахункового терміну служби. У результаті другого етапу прогнозування надійності обираються можливі варіанти рішень.

На третьому етапі менеджери на основі механізму управління ризиками і з урахуванням соціальної обстановки вибирають оптимальну стратегію і ухвалюють рішення: продовжувати експлуатацію або міняти устаткування на нове, проводити діагностику або ставити систему моніторингу, робити ремонт і в якому об'ємі.

Однак, не зважаючи на обрану стратегію при аналізі надійності будь-якої технічної системи, в основі прийняття управлінських рішень лежить оцінка ризику даного обладнання. Оцінка ризику є частиною процесу менеджменту ризику згідно з ISO 31000:2009 "Risk

management – Principles and guidelines” і є структурованим процесом, в рамках якого ідентифікують способи досягнення поставленої мети, проводять аналіз наслідків і ймовірності виникнення небезпечних подій для прийняття рішення про необхідність обробки ризику.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Методи дослідження ризиків не є універсальним апаратом, який придатний для прийняття управлінських рішень на всі випадки життя. Оцінка ризиків – це набір математичних методів, об'єднаних спільним завданням обґрунтування найкращих рішень. Принциповими особливостями дослідження ризиків є:

- багатокритерійність задачі вибору;
- не тільки кількісний, але і якісний (нечіткий) опис показників ризикованості, що задаються у вигляді вимог;
- при нечіткій постановці задачі визначення стратегії управління ризиками великий вплив на вибір методу її розв'язання експертної інформації, що визначає перевагу того або іншого показника.

Складнощі управління ризиками в технічних системах зумовлені наявністю множини факторів і їх взаємною залежністю. Для таких систем відсутні моделі і методи для відображення інформації про динаміку процесів. Турбулентність оточення і мінливість характеру процесів у часі заважають виділенню і детальному аналізу окремих елементів системи. Зазначені особливості визначають необхідність оцінки надійності технічних системах не по окремим елементам, а для усїєї системи в цілому [8]. Множина чинників системи утворює складне «павутиння» зв'язків і станів, причин і наслідків, що змінюються в часі. Розвиток і хід подій в такій багатофакторній слабо структурованій системі не є детермінованим. Тому для опису і моделювання надійності технічних систем у фазовому просторі ймовірностей станів пропонується застосовувати феноменологічні моделі. До класу феноменологічних моделей можна віднести марковські процеси, які дозволяють відобразити зв'язок між вихідними і вхідними параметрами без урахування фізичної сутності процесів в системі. Марковські процеси відображають структуру через визначення перехідних ймовірностей між станами на основі практичних даних.

Однак, незважаючи на створений фундамент досліджень у цій сфері, окремі питання використання математичного апарату дослідження ризиків, на наш погляд, залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, це стосу-

ється ряду теоретичних питань використання математичних методів контролю надійності технічних систем, методики математичного аналізу при застосуванні довгострокового ризик-менеджменту суб'єктів підприємництва, тощо.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою роботи є дослідження особливостей застосування марковських процесів для оцінки надійності технічних систем, складання алгоритму застосування марковського аналізу для систем дискретного та безперервного часу з дискретними станами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Контроль і діагностика технічного стану устаткування в процесі експлуатації є одним з елементів оцінки технічних ризиків. При цьому контроль матеріалу деталей і вузлів виконується на зібраних конструкціях, як правило, без яких-небудь демонтажних робіт. Він проводиться в процесі використання устаткування.

Існує багато методів оцінки ризиків, вони можуть бути кількісними і якісними, базуватися на математичних, статистичних чи графічних моделях. На жаль, не існує універсального методу оцінки ризиків, який би підходив для оцінки безпеки будь-якої технічної системи. Одним з методів кількісної оцінки ризиків, згідно ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 «Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику», є математичний апарат марковських процесів.

Відомо, що випадковий процес називається марковським, якщо ймовірність переходу системи в новий стан залежить тільки від поточного стану системи і не залежить від того, коли і яким чином система перейшла до цього стану. Таким чином, даний метод можна використовувати для оцінки ризику (або надійності) технічних систем з різною структурою [9], що мають тільки два стани – відмови та відновлення, включаючи:

- системи з паралельними незалежними компонентами;
- системи з послідовними незалежними компонентами;
- системи з розподіленим навантаженням;
- резервовані системи, включаючи випадок, коли може відбутися відмова функцій перемикання;
- деградуючі системи.

Марковський аналіз також може бути використаний для розрахунку експлуатаційної готовності, включаючи розрахунок необхідних компонентів запчастин для ремонту, необхідної працездатності технічної системи.

Аналіз за допомогою марковських процесів заснований на понятті «стану» (наприклад, працездатний і непрацездатний стани) і переходу між цими станами у часі, припускаючи вірогідність переходу не тільки постійною. Система у цілому може існувати у різних станах, кожний з яких визначається специфічною комбінацією працездатного і непрацездатного станів її елементів. Таким чином, у момент відмови або відновлення елемента система переходить з одного стану до наступного. Звичайно таку модель називають Марковським процесом з дискретними станами і безперервним або дискретним часом.

Випадок марковського аналізу для систем дискретного часу з дискретними станами.

Розглянемо ситуацію, коли модельований процес характеризується дискретним часом. Система S має n можливих дискретних станів: S_1, S_2, \dots, S_n . Зміна станів відбувається миттєво і в строго певні моменти часу $t_i, i=1,2, \dots$. Аналіз марковських процесів звичайно проводиться за допомогою графа станів і переходів (рис. 2), який графічно зображає не тільки можливі стани системи і можливі переходи із стану до стану, але також і значення ймовірності такого переходу.

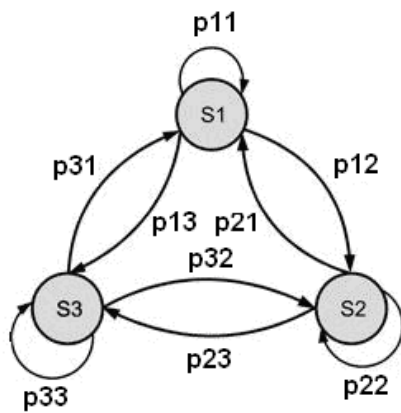


Рис. 2. Граф станів і переходів

Графу системи, що містить n вершин, можна поставити у відповідність матрицю розміром $n \times n$, елементами якої є ймовірності переходів p_{ij} між вершинами графа, так звану матрицю ймовірностей переходів:

$$\|p_{ij}\| = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{pmatrix}, \quad 0 \leq p_{ij} \leq 1, \quad \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1.$$

При цьому під *переходом* розумітимемо зміну одного стану системи на інший, що зви-

чайно відбувається у результаті відмови або відновлення елемента системи. Перехід може бути також викликаний іншими подіями, такими як людські помилки, зовнішні події, реконфігурації програмного забезпечення і т. ін.

Ймовірність затримки (тобто елементи головної діагоналі) для кожного із станів, як правило, невідома. Її визначають з умови рівності одиниці всіх елементів у рядку $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$.

Хай у будь-який момент часу (після будь-якого кроку) досліджувана система може перебувати в одному із станів S_1, S_2, \dots, S_n , тобто в результаті кроку k здійсниться одна з повної групи несумісних подій $S_1^{(k)}, S_2^{(k)}, \dots, S_n^{(k)}$. Позначивши ймовірність цих подій для k -го кроку через

$$p_1(k) = p(S_1^{(k)}), p_2(k) = p(S_2^{(k)}), \dots, p_i(k) = p(S_i^{(k)}), \dots, p_n(k) = p(S_n^{(k)}),$$

легко бачити, що для кожного кроку k

$$p_1(k) + p_2(k) + \dots + p_i(k) + \dots + p_n(k) = 1$$

Ймовірності $p_i(k), i = \overline{1, n}$ називають ймовірностями станів.

При оцінці ризику поломки (аварії) деякої технічної системи під станами S_1, S_2, \dots, S_n будемо розуміти працездатність системи. Звичайно при цьому відомі ймовірності переходу p_{ij} системи за один крок із стану S_i до стану S_j .

Необхідно визначити ймовірності станів системи (що і є величиною ризику) після k -го кроку, тобто $p_i(k), j = \overline{1, n}$.

Математичною моделлю знаходження ймовірностей станів однорідного марковського ланцюга є рекурентна залежність:

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_i(k-1)p_{ij},$$

де $p_j(k)$ – ймовірність j -го стану системи після k -го кроку, $j = \overline{1, n}$;

$p_i(k-1)$ – ймовірність i -го стану системи після $(k-1)$ -го кроку, $i = \overline{1, n}$;

p_{ij} – ймовірності переходів системи із стану S_i до стану S_j ;

n – кількість станів системи.

Продемонструємо застосування Марковського аналізу для оцінки ризиків деякої системи, яка може знаходитися у працездатному і непрацездатному стані, причому у разі непрацездатності одного з елементів відбувається відмова системи в обслуговуванні, але даний елемент може відновлюватися. Стан системи у початковий момент часу $t=0$ називатимемо початковим станом. Після відмови система може бути відновлена до початкового стану.

Звичайно система починає функціонувати у момент часу $t=0$ з працездатного стану, в якому всі елементи системи функціонують, і переходить до непрацездатного стану через інші функціональні стани, що мають меншу кількість функціонуючих елементів.

Підводячи підсумок вищесказаному, сформулюємо **методику оцінки ризиків за схемою дискретних марковських процесів**.

1. Зафіксувати властивість системи, що досліджується (визначити стани системи S_1, S_2, \dots, S_n). Це залежить від цілей дослідження. Наприклад, якщо досліджується завантаження системи, то як властивість обирається ступінь завантаження.

2. Визначити кінцеве число можливих станів системи.

3. Скласти і розмітити граф станів.

4. Визначити початковий стан.

5. За рекурентною залежністю визначити ймовірності $p_j(k), j = \overline{1, n}$.

Випадок марковського аналізу для систем безперервного часу з дискретними станами.

Безперервним марковським процесом є випадковий процес, для якого при $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_{n+1}$ виконується умова:

$$P(S(t_{n+1}) = S_{n+1} | S(t_1) = S_1, \dots, S(t_n) = S_n) = P(S(t_{n+1}) = S_{n+1} | S(t_n) = S_n)$$

У цьому випадку, як й у випадку процесу з дискретним часом, розглядається ряд дискретних станів S_1, S_2, \dots, S_n , однак перехід системи з стану до стану може відбуватися у будь-який момент часу.

Позначимо $p_i(t)$ – ймовірність того, що у момент часу t система буде знаходитися в стані S_i ($i=1, \dots, n$). Очевидно, для будь-якого моменту t сума ймовірностей станів дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1$$

В цьому випадку задаються не ймовірності переходів, а інтенсивності переходів:

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t},$$

де $p_{ij}(\Delta t)$ – ймовірність того, що система, яка знаходилася у момент часу t у стані S_i , за час Δt перейде до стану S_j .

Розглянемо ситуацію, коли деяка технічна система складається з двох послідовних елементів, тобто для надійної працездатності системи обидва елементи мають працювати. Елементи можуть бути в працездатному стані

або в стані відмови. Працездатність усієї системи залежить від стану складових елементів. У даному випадку можливі наступні стани елементів:

– стан 0. Обидва елементи знаходяться в працездатному стані;

– стан 1. Один елемент відмовив і знаходиться на відновленні, а інший знаходиться в працездатному стані;

– стан 2. Обидва елементи відмовили і знаходяться на відновленні.

Якщо інтенсивність відмови кожного елемента прийняти рівній λ , а інтенсивність відновлень рівною μ , і вони є постійними, то діаграму стану переходів можна представити в наступному вигляді (рис. 3). При цьому інтенсивність переходу із стану 0 до стану 1 дорівнює 2λ , оскільки відмова будь-якого з двох елементів приводить систему до стану 1. Припущення, пов'язані з ймовірністю переходу, можна сформулювати таким чином: переходи станів є статистично незалежними подіями та інтенсивність відмов λ і інтенсивність відновлень μ постійні.

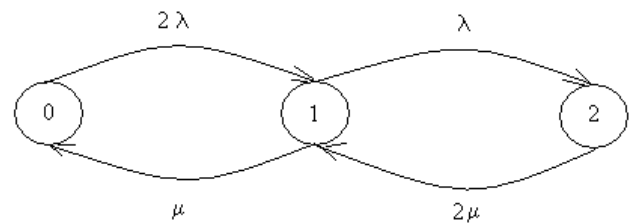


Рис. 3. Граф станів і переходів

Матриця переходів для даної системи приймає наступний вигляд:

$$\|p_{ij}\| = \begin{vmatrix} -2\lambda & 2\lambda & 0 \\ \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda \\ 0 & 2\mu & -2\mu \end{vmatrix}$$

В цьому випадку система рівнянь для стійкого стану має наступний вигляд:

$$\begin{cases} -2\lambda p_0 + \mu p_1 = 0 \\ 2\lambda p_0 - (\lambda + \mu) p_1 + 2\mu p_2 = 0 \\ \lambda p_1 - 2\mu p_2 = 0 \\ p_0 + p_1 + p_2 = 1 \end{cases}$$

Рішення даної системи рівнянь будуть такими:

$$p_0 = \frac{\mu^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2}, \quad p_1 = \frac{2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2},$$

$$p_2 = \frac{\lambda^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2}$$

Очевидно, що необхідна працездатність системи можна виразити як

$$A(t) = p_0 + p_1 = \frac{\mu^2 + 2\lambda\mu}{(\mu + \lambda)^2}.$$

Аналогічний підхід можна застосовувати для оцінки ризиків технічних систем, що складаються з декілька елементів, що включені паралельно чи послідовно, мають певні причини для відмов та відновлень.

Сформулюємо **методику оцінки ризиків технічних систем за схемою безперервних марковських процесів:**

1. Визначити стани системи і інтенсивності переходів (відмови та відновлення).

2. Скласти і розмітити граф станів.

3. Скласти систему диференціальних рівнянь Колмогорова. Число рівнянь у системі дорівнює числу станів. В лівій частині рівняння стоїть сума добуток ймовірностей усіх станів, з яких йдуть стрілки до i -го стану, на інтенсивності відповідних потоків мінус сума інтенсивностей усіх потоків, що виводять систему з даного (j -го) стану, додана на вірогідність даного (j -го) стану. У правій частині рівняння стоїть 0

4. Визначити початкові умови і вирішити систему диференціальних рівнянь.

Висновки. Для успішного застосування математичного апарату марковських процесів з дискретними станами для оцінки надійності будь-якої технічної системи необхідно опрацювати повний перелік всіх станів системи (наприклад, повне функціонування, часткове функціонування (погіршення стану), відмова, відновлення). Також необхідно розуміти можливі переходи із стану до стану сис-

теми (наприклад, при відмові шини автомобіля необхідно досліджувати стан запасного колеса i , отже, частоти його перевірок) та знати ймовірність переходів (p_{ij}) для систем з дискретним часом або інтенсивність відмови (λ) і інтенсивність відновлення (μ) для систем з безперервним часом.

Головною перевагою застосування методів марковського аналізу з урахуванням всіх обмежень є те, що стратегії технічного обслуговування, наприклад, пріоритети відновлення, можна легко змодельовати. Крім того, в моделі можна відобразити порядок, в якому відбуваються багатократні відмови.

Проте, даний підхід до оцінки ризиків технічних систем має ряд недоліків. Спочатку нами передбачалося, що існує тільки два можливі стани елементів системи – відмова і відновлення, що істотно зменшує область застосування даного методу, та ймовірності/інтенсивності переходів постійні. Також застосування даного методу і інтерпретація результатів вимагають певної спеціальної підготовки і кваліфікаційного рівня персоналу.

Іншою проблемою є те, що кількість станів системи та можливих переходів зростає з збільшенням кількості елементів системи. У разі великої кількості станів технічної системи, що розглядається, існує велика вірогідність помилок та неточностей при застосуванні даного методу оцінки безпеки системи.

Таким чином, прогнозування надійності технічних систем за допомогою математичного апарату марковських процесів підвищить ефективність їх роботи, забезпечить професійну безпеку працівників, отже скоротить економічні ризики підприємства [10].

ЛІТЕРАТУРА:

1. Мягченко О. П. Безпека життєдіяльності людини та суспільства: навч. пос. К.: Центр учбової літератури, 2010. 384 с.
2. Управління проектами: підручник / за заг. ред. Л. В. Ноздріної. К.: Центр учбової літератури, 2010. 432 с.
3. Вербіцька І.І. Ризик-менеджмент як сучасна система управління ризиками підприємницьких структур // Сталій розвиток економіки. 2013. № 5. С. 282-291.
4. Донець Л.І. Економічні ризики та методи їх вимірювання: навчальний посібник. К.: Центр навчальної літератури, 2006. 312 с.
5. Останкова Л.А., Шевченко Н.Ю. Аналіз, моделювання та управління економічними ризиками: навч. посіб. К.: Центр учбової літератури, 2011. 256 с.
6. Тимошенко С., Симонов Б., Горошко В. Основы теории надежности: учебник и практикум. М.: Юрайт, 2017. 446 с.
7. Васілевський О.М., Поджаренко В.О. Нормування показників надійності технічних засобів: навч. пос. Вінниця: ВНТУ, 2010. 129 с.
8. Bushuyev S., Jaroshenko R. Proactive Program Management for Development National Finance System in Turbulence Environment //Procedia – Social and Behavioral Sciences, Published by Elsevier Ltd, 2013. № 74. P. 61–70.

9. Application of Markov techniques. – The International Standard IEC 61165 (1995-01). 45 p.

10. Кіржецька М.С., Кіржецький Ю.І. Методичні засади оцінювання економічної безпеки підсистем реального сектору економіки //Економіка і суспільство, 2018. № 14. С. 195-201.

REFERENCES:

1. Myakhchenko O.P. (2010) Bezpeka zhyttiediyalnosti ludyny ta suspilstva [Life safety of human and society], tutorial. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury. (in Ukrainian). 384 p.

2. Nozdrina L.V. (ed.) (2010) Upravlinnia proektamy [Project management], tutorial. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury. (in Ukrainian). 432 p.

3. Verbitska I.I. (2013) Ryzyk-menedzhment yak suchasna systema upravlinnia ryzykamy pidpriumnytskykh struktur [Risk management as modern control system of business structures risk], Stalyy rozvytok ekonomiky, no. 5. pp. 282-291.

4. Donets, L.I. (2006) Ekonomichni ryzyky ta metody yikh vymiryuvannia [Economic risks and methods of measurement], tutorial. Kyiv: Tsentr navchalnoi literatury. (in Ukrainian). 312 p.

5. Ostankova L.A., Shevchenko N.Yu. (2011) Analiz, modelyuvannia ta upravlinnia ekonomichnykh ryzykamy [Analysis, modeling and management of economic risks], tutorial. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury. (in Ukrainian). 256 p.

6. Timoshenkov S., Simonov B., Horoshko V. (2017) Osnovy teorii nadezhnosti [Basics of reliability theory], textbook and practice. Moscow: Yurait. (in Russian). 446 p.

7. Vasilevskyy O.M., Podzharenko V.O. (2010) Normuvannia pokaznykiv nadiynosti tekhnichnykh zasobiv [Standardization of reliability indexes of technical means], tutorial. Vinnytsya: VNTU. (in Ukrainian). 129 p.

8. Bushuyev S., Jaroshenko R. (2013) Proactive Program Management for Development National Finance System in Turbulence Environment. Procedia – Social and Behavioral Sciences, Published by Elsevier Ltd., no. 74. pp. 61–70.

9. Application of Markov techniques. – The International Standard IEC 61165 (1995-01). 45 p.

10. Kirzhetsky Yu.I., Kirzhetska M.S. (2018) Metodychni zasady otsiniuvaniya ekonomichnoi bezpeky pidsystem realnoho sektoru ekonomiky [Methodological principles for assessing the economic security of the subsystems of the real economy], Economy and society, vol. 14. pp. 195-201.