

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ДАВИДЕНКО ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 624.21

ДИСЕРТАЦІЯ

МОДЕЛЮВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ

05.23.17 – будівельна механіка

Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших
авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О. О. Давиденко

Науковий керівник –
Лантух-Лященко Альберт Іванович
доктор технічних наук,
професор

Ідентичність усіх примірників дисертації

Засвідчую

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02

_____ В. І. Каськів

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Давиденко О.О. Моделювання життєвого циклу автодорожніх мостів.
– На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – «Будівельна механіка (192 Будівництво та цивільна інженерія).» – Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2017.

У **вступі** обґрунтовано актуальність, новизну та практичне значення дисертаційної роботи, зазначено необхідність розробки апарату моделювання і прогнозування довговічності залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах.

У **першому розділі** розглядається сучасний стан проблеми прогнозування довговічності залізобетонних елементів транспортних споруд. Аналізуються наукові роботи вітчизняних та закордонних науковців.

Результатом аналізу робіт названих вчених є систематизація моделей оцінки життєвого циклу експлуатації залізобетонних елементів мостів, яка виявила соціально-економічну значимість проблеми оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Більшість дослідників, марковські моделі яких розглядаються, вказують, що саме стохастичні моделі марковських ланцюгів сьогодні є найбільш перспективним, універсальним інтегральним апаратом опису поступового руйнування елементів споруд. Відомі в світі автоматизовані системи управління мостами базуються саме на марковських моделях. Марковська модель накопичення пошкоджень є теоретичною базою програмного забезпечення всесвітньо відомої інтегрованої системи управління мостами США – Pontis.

Марковські феноменологічні моделі побудовані на загальних законах теорії ймовірностей і математичної статистики трактують прогнозований час деградації, як випадкову змінну, поведінка якої в майбутньому залежить тільки від сучасного стану системи. Таким чином, довговічність формулюється як поняття функціонально нерозривно зв'язане з надійністю.

Виконаний аналіз моделей життєвого циклу елементів мостів показав, що Україна є єдиною країною на пострадянському просторі, котра має нормативну модель оцінювання і прогнозування технічного стану – марковську стохастичну дискретну модель з неперервним часом. Впровадження моделі в систему

експлуатації автодорожніх мостів у 2002 р. мало суттєвий соціально-економічний ефект, відкрило шлях до стратегічного планування видатків на ремонт і реконструкцію споруд.

Разом з тим, аналіз виявив недоліки чинної моделі. Принципово важливий аспект моделі – питання про визначення користувачем інтенсивності відмов. Принципово важливий тому що, саме цим єдиним параметром управляється в марковській моделі процес деградації. У загальному випадку інтенсивність відмов є випадковою функцією часу. В нормативній моделі застосовується припущення $\lambda(t) = \text{const}$, що призводить до нереалістичного завищеного прогнозу залишкового ресурсу.

У **другому розділі** вперше представлено статистичний прогноз залишкового ресурсу залізобетонних автодорожніх мостів України. Дослідження цього розділу базуються на даних отриманих з галузевої Аналітичної експертної системи управління мостами (АЕСУМ) Укравтодору. Науковий супровід програмного комплексу АЕСУМ веде ДП «ДерждорНДІ».

Вибірка з бази даних АЕСУМ отримана за допомогою вбудованої системи фільтрів і експортована в програму EXCEL. Вибірка містить такі варіаційні ряди: параметр інтенсивності відмов λ ; номер експлуатаційного стану; залишковий ресурс, роки; рік будівництва моста; рік виконання капітального ремонту або реконструкції (якщо такі експлуатаційні заходи мали місце); тип прогонової будови за технологією спорудження (монолітна, збірно-монолітна, збірна). Досліджується варіаційний ряд строків служби автодорожніх мостів підпорядкованих Державному агентству автомобільних доріг України (Укравтодор).

Статистичний аналіз дає середній строк служби в 4 – 5 станах 47 – 50 років. Привертає увагу той факт, що при цьому середнє квадратичне відхилення складає 14 років. Цей значний розкид значень варіаційного ряду строків служби демонструє розмаїття умов експлуатаційного утримання і якості будівництва мостів автодорожньої мережі України. Встановлені тут факти низької довговічності автодорожніх мостів є предосторогою до некритичного застосування чинної моделі оцінки залишкового ресурсу, мотивацією розробки нових моделей прогнозування життєвого циклу.

Третій розділ дослідження присвячено новій парадигмі теорії споруд – пошуку моделей зв'язку фундаментальних нерівностей граничних станів елементів автодорожніх мостів з часом. Розроблені нові моделі призначені розширити

теоретичну і методичну базу оцінювання та прогнозування життєвого циклу елементів та споруд в цілому.

Розглядається задача формулювання стохастичної ймовірнісної моделі деградації елемента споруди у процесі експлуатації. Система відмов, в інших термінах – накопичення пошкоджень, що є наслідком зносу елемента споруди, трактується як потік випадкових дискретних подій марковського ланцюга. Розглядається процес з *«якісними станами»*. Роль випадкової події відіграє *«випадковий дискретний стан системи»*. Система описується марковським дискретним процесом з безперервним часом.

В формулюванні нових марковських моделей накопичення пошкоджень в цьому розділі ми звертаємося, перш за все, до теоретичного дослідження інтенсивності відмов в функції часу. Мотивацією дослідження є принципова важливість цього параметра – єдиного керуючого параметра моделі в оцінці ресурсу елемента. З іншого боку маємо констатувати, що в літературі відсутні дослідження зміни параметра в функції часу експлуатації елементів будівельних конструкцій.

Для дослідження використовується чинна в системі експлуатації мостів марковська модель запропонована професором Лантухом-Лященко А. І. в 1999 р. для нормативного документу ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 [41].

Вводиться відоме в теорії надійності поняття *«функція інтенсивності відмов»*, яке використовується як ще одна *міра надійності* в функції часу. Тут кількісною мірою надійності, параметром надійності, виступає ймовірність того, що відмова елемента споруди не відбудеться *протягом часу експлуатації*. В інших термінах – це функція часу, яка дає аналітичну залежність росту ймовірності відмови протягом життєвого циклу експлуатації.

Виконаний аналіз великої кількості публікацій з проблеми дає підстави стверджувати, що *«U-подібна крива»* функції інтенсивності відмов, наведена в роботах В.В. Болотіна характерна для технічних систем, механічних, електричних, електронних тощо. Що стосується кривої для елементів будівельних конструкцій, то вона має іншу форму – визначити яку саме – і було завданням цієї частини дослідження. В рамках дисертації нами *вперше* було встановлено форму і характеристики функції інтенсивності відмов для елементів будівельних конструкцій.

Аналізуються функції розподілу часу служби якими можливо представити функцію інтенсивності відмов адекватну історичним даним експлуатації залізобетонних мостів України. Для аналізу прийнято три типи розподілів: нормальний, логістичний та Вейбулла.

У рамках дослідження вперше в Україні пропонуються марковські моделі накопичення пошкоджень з «проскоком». В реальності процес старіння елемента споруди складається не тільки з поступових відмов, а також з раптових. Саме такою є модель деградації з «проскоком». Адекватність запропонованих моделей з проскоком перевірялась чисельними експериментами.

Четвертий розділ присвячено практичним аспектам оцінювання технічного стану споруди. Тут, перш за все, наводиться модель марковського ланцюга на засадах статистичних даних з історії експлуатації. Стохастичний процес представляється, як і в розділі 3, інтегральною функцією розподілу $P(t)$ для часу T_n , котрий протікає доки стануться всі n подій процесу – розподілом Пуассона.

У роботі наводиться гіпотетичний ілюстративний приклад який демонструє процедуру реалізації марковської моделі прогнозу стану споруди за відомою матрицею ймовірностей переходів та показує ефективність цього новітнього підходу.

Головною характеристикою моделі, що пропонується є саме матриця перехідних ймовірностей. В закордонній технічній літературі описано декілька способів отримання матриці перехідних ймовірностей з статистичних даних історії експлуатації. В дослідженні ми скористалися найпростішим з них – оцінюванням відносної кількості мостів в кожному із станів.

В рамках дослідження запропоновано новий числовий *критерій технічного стану споруди в цілому* необхідний для практичної методики прогнозування експлуатаційного стану моста. Пропонується нова формула рейтингової оцінки мережевого рівня.

Для нової рейтингової формули були отримані, за методом аналізу ієрархій Т. Сааті, нові значення нормалізованих коефіцієнтів впливу стану на загальний стан споруди.

Дослідження четвертого розділу стали основою для розробки новітньої інженерної методики прогнозування технічного стану споруд за моделлю марковського ланцюга, матриця перехідних ймовірностей якого формується на основі статистичних даних з історії експлуатації.

Окрім реалізації моделі марковського ланцюга для прогнозування технічного стану споруди в цілому запропоновано *критерій ефективності експлуатаційних втручань*, як числову оцінку доцільності капітального ремонту / реконструкції / нового будівництва автодорожніх мостів, що залежить від прийнятої експертної оцінки технічного стану споруди в цілому.

Ключові слова: автодорожній міст, автомобільна дорога, деградація, довговічність, згинаний залізобетонний елемент, інтенсивність відмов, прогнозування, ресурс, транспортна споруда.

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз

1. Давыденко А.А. Выбор оптимальной стратегии эксплуатации железобетонных автодорожных мостов в рамках задачи оптимизации стоимости жизненного цикла. *Журнал «Евразийское научное объединение»*. Москва, 2016. Вып. 17. С. 19–23. ISSN 2411-1899. РИНЦ <http://elibrary.ru/item.asp?id=26142123>.

2. Давиденко О.О. Функція інтенсивності відмов елементів споруд. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків, 2017. Вип. 167. С. 88–96. ISSN 2413-3795, 1994-7852. GICID 71.0000.1500.3635. DOI 10.18664.
<http://scholar.google.com.ua/citations?user=s0hcDhQAAAAJ&hl>

Статті у наукових фахових виданнях

3. Давыденко А.А. Марковские модели накопления повреждений в оценке и прогнозировании технического состояния мостов. *Сборник научных трудов «Мосты и туннели: теория, исследования, практика»*. Днепропетровск, 2014. Вып. 6. С. 40–47.

4. Давиденко О.О. Аналіз довговічності автодорожніх мостів України. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону»*. Київ, 2013. Вип. 78. С. 225–235.

5. Давиденко О.О. Моніторинг безпечної експлуатації автодорожніх мостів України. *Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*. Дніпропетровськ, 2015. Вип. 7. С. 4–12.

6. Давиденко О.О. Оптимізація вартості життєвого циклу автодорожніх мостів. *Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. Київ, 2015. Вип. 94. С. 210–219.

7. Давиденко О.О. Оцінка технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів України. *Автошляховик України*. Київ, 2014. Вип. 237. С. 29–35.

8. Давиденко О.О. Перевірка відповідності обраної моделі розподілу спостережуваним даним термінів служби залізобетонних автодорожніх мостів України. *Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. Київ, 2016. Вип. 99. С. 210–219.

9. Давиденко О.О. Статистичний прогноз технічного стану автодорожніх мостів України. *Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*. Дніпропетровськ, 2016. Вип. 10. С. 4–13.

Опубліковані праці апробаційного характеру

10. Давиденко О.О. Аналіз надійності і довговічності автодорожніх мостів України. *LXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей*. Київ: НТУ, 2011. С. 112.

11. Давиденко О.О. Моделі управління життєвим циклом залізобетонних елементів мостів. *LXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей*. Київ: НТУ, 2012. С. 144.

12. Давиденко О.О. Марковські моделі накопичення пошкоджень в оцінці та прогнозуванні технічного стану залізобетонних мостів України. *LXXII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей*. Київ: НТУ, 2016. С. 166.

13. Давиденко О.О. Функція інтенсивності відмов елементів споруд. *6-та Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті»: тези доповідей*. Харків: УкрДУЗТ, 2017. С. 115–117.

ABSTRACT

Davydenko O.O. Modeling the life cycle of highway bridges. – On the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.23.17 – «Structural Mechanics (192 Building and Civil Engineering).» – National Transport University Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The introduction substantiates the relevance, novelty and practical significance of the dissertation work, the need to develop a modeling apparatus and predicting the durability of reinforced concrete elements of transport constructions on highways.

The first chapter deals with the current state of the problem of predicting the durability of reinforced concrete elements of transport constructions. The scientific work of domestic and foreign scientists is analyzed.

The result of the analysis of the works of the named scientists is the systematization of models for assessing the life cycle of the operation of reinforced concrete elements of the bridges, which revealed the socio-economic significance of the problem of estimating and prediction the technical condition of highway bridges. Most researchers, whose Markov models are considered, indicate that the stochastic models of the Markov chains today are the most promising, universal integral apparatus describing the gradual destruction of the elements of structures. The automated bridging systems known in the world are based on Markov models. The Markov Damage Accumulation model is the theoretical software foundation for the world-famous integrated bridge management system of the United States – Pontis.

Markov phenomenological models built on the general laws of probability theory and mathematical statistics interpret the predicted time of degradation as a random variable, whose behavior in the future depends only on the present state of the system. Thus, durability is formulated as a concept functionally inextricably linked with reliability.

The analysis of models of life cycle elements of bridges has shown that Ukraine is the only country in the post-Soviet space, which has a normative model of estimation and prediction of the technical state – a Markov stochastic discrete model with continuous time. Implementation of the model in the system of operation of highway bridges in 2002 had a significant socio-economic effect, opened the way for strategic planning of expenses for repair and reconstruction of buildings.

However, the analysis revealed shortcomings of the current model. Fundamentally important aspect of the model – the question of the user's determination of the intensity of failures. Fundamentally important as this is the only parameter controlled by the Markov model of the degradation process. In general, the failure rate is a random function of time. In the normative model, an assumption is used $\lambda(t) = \text{const}$, which leads to an unrealistic overestimated prediction of the residual resource.

In **the second chapter** the statistical prediction of the residual resource of reinforced concrete highway bridges of Ukraine is presented for the first time. The research of this section is based on the data obtained from the industry-specific Analytical Expert Bridges Management System (AESUM) of Ukravtodor. The scientific support of the AESUM software complex is conducted by the State Enterprise «DerzhDorNDI».

The sample from the AESUM database is obtained using the built-in filter system and exported to the EXCEL program. The sample contains the following variation series: the parameter of hazard rate λ ; technical state number; remaining resource, years; bridge construction year; year of capital repairs or reconstruction (if such operational measures took place); type of runway structure based on the construction technology. The variational row of terms of service of road bridges subordinated to the State Agency of Highway Roads of Ukraine (Ukravtodor) is researched.

The statistical analysis gives the average life expectancy of 4 – 5 statuses 47 – 50 years. Attention is drawn to the fact that the mean square deviation is 14 years. This significant dispersion of the values of the variation in the number of service life periods demonstrates the diversity of technical state and the quality of the construction of bridges of the Ukrainian road network. The facts of low longevity of road bridges found here are a precaution to uncritical application of the current model of estimation of the remaining resource, motivation for the development of new models of life cycle prediction.

The third chapter of the study is devoted to the new paradigm of the theory of structures – the search for models of connection of fundamental inequalities of boundary states of elements of road bridges over time. The developed new models are intended to broaden the theoretical and methodological basis for estimating and predicting the life cycle of elements and structures in general.

The problem of formulation of a stochastic probabilistic model of degradation of an element of a structure in the process of exploitation is considered. The system of failures, in other terms – the accumulation of damage, which is the result of the wear of an element of the structure, is treated as a stream of random discrete events of the Markov

chain. The process with «qualitative states» is considered. The role of a random event is played by the «random discrete state of the system». The system is described by a Markov discrete process with continuous time.

In the formulation of new Markov models of accumulation of damages in this section, we primarily address the theoretical study of the intensity of failures in the function of time. The motivation of the research is the fundamental importance of this parameter – the only controlling parameter of the model in the evaluation of the resource element. On the other hand, we must state that in the literature there are no studies of changing the parameter in the function of time of operation of elements of building structures.

The study uses the Markov model, which is valid in the system of bridges' exploitation, proposed by professor Lantuch-Lyashenko A.I. in 1999 for the normative document DSTU-N B.V.2.3-23:2012 [41].

The concept of «the hazard rate function» is known in the theory of reliability, which is used as another measure of reliability in the function of time. Here the quantitative measure of reliability, reliability parameter, the probability that the failure of the element of the structure will not occur during the exploitation period. In other terms, it is a function of time, which gives an analytical dependence on the growth of the probability of failure during the life cycle of exploitation.

The analysis of a large number of publications on the problem gives grounds to assert that the "U-curve" of the hazard rate function is given in the works of V.V. Bolotin is characteristic for technical systems, mechanical, electrical, electronic, etc. As for the curve for elements of building structures, it has another form - to determine what exactly – and was the task of this part of the study. In the framework of the dissertation, we first established the form and characteristics of the function of the failure rate for elements of building structures.

The functions of time distribution of service are analyzed, which it is possible to provide a function of the failure rate adequate to the historical data of the operation of reinforced concrete bridges in Ukraine. For analysis, three types of distributions were adopted: normal, logistic and Weibull.

In the framework of the research, for the first time in Ukraine, Markov models of accumulation of injuries with "breakthrough" are offered. In reality, the aging process of an element of a structure consists not only of gradual failures, but also of the sudden ones.

This is precisely the model of the «breakthrough» degradation. The adequacy of the proposed models with a breakdown was verified by numerical experiments.

The fourth chapter is devoted to the practical aspects of assessing the technical condition of the building. Here, above all, the model of the Markov chain is based on the bases of statistical data on the history of exploitation. As in Chapter 3, the stochastic process is represented by the integral distribution function $P(t)$ for the time T_n , which proceeds until all n events occur - the Poisson distribution.

The paper presents a hypothetical illustrative example that demonstrates the implementation of the Markov model of the prediction of the state of a building in a known matrix of probabilities of transitions and shows the effectiveness of this new approach.

The main characteristic of the proposed model is the transition probability matrix. The foreign technical literature describes several ways to obtain a matrix of transitional probabilities from the history of operation statistics. In the study, we used the easiest of them - an estimate of the relative number of bridges in each of the states.

In the framework of the study, a new numerical criterion for the technical state of the building as a whole is required for a practical method of forecasting the operating condition of the bridge. A new formula for rating rating of the network level is proposed.

For the new rating formula were obtained, using the hierarchy analysis method T. Saati, new values of normalized coefficients of state influence on the general condition of the structure.

Studies of the fourth section became the basis for the development of the latest engineering technique for prediction the technical condition of structures on the model of the Markov chain, the matrix of transitional probabilities of which is formed on the basis of statistical data from the history of operation.

In addition to realization of the Markov chain model, the criterion of efficiency of operational interventions as a numerical assessment of expediency of capital repairs / reconstruction / new construction of road bridges is proposed, in view of the accepted expert assessment of the technical condition of the building as a whole, in order to predict the technical state of the building as a whole.

Key words: bending reinforced concrete element, degradation, durability, failure rate, highway bridge, prediction, resource, road, transport structure.

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз

1. Давыденко А.А. Выбор оптимальной стратегии эксплуатации железобетонных автодорожных мостов в рамках задачи оптимизации стоимости жизненного цикла. *Журнал «Евразийское научное объединение»*. Москва, 2016. Вып. 17. С. 19–23. ISSN 2411-1899. РИНЦ <http://elibrary.ru/item.asp?id=26142123>.

2. Давиденко О.О. Функція інтенсивності відмов елементів споруд. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків, 2017. Вип. 167. С. 88–96. ISSN 2413-3795, 1994-7852. GICID 71.0000.1500.3635. DOI 10.18664. <http://scholar.google.com.ua/citations?user=s0hcDhQAAAAJ&hl>

Статті у наукових фахових виданнях

3. Давыденко А.А. Марковские модели накопления повреждений в оценке и прогнозировании технического состояния мостов. *Сборник научных трудов «Мосты и туннели: теория, исследования, практика»*. Днепропетровск, 2014. Вып. 6. С. 40–47.

4. Давиденко О.О. Аналіз довговічності автодорожніх мостів України. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону»*. Київ, 2013. Вип. 78. С. 225–235.

5. Давиденко О.О. Моніторинг безпечної експлуатації автодорожніх мостів України. *Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*. Дніпропетровськ, 2015. Вип. 7. С. 4–12.

6. Давиденко О.О. Оптимізація вартості життєвого циклу автодорожніх мостів. *Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. Київ, 2015. Вип. 94. С. 210–219.

7. Давиденко О.О. Оцінка технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів України. *Автошляховик України*. Київ, 2014. Вип. 237. С. 29–35.

8. Давиденко О.О. Перевірка відповідності обраної моделі розподілу спостережуваним даним термінів служби залізобетонних автодорожніх мостів України. *Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. Київ, 2016. Вип. 99. С. 210–219.

9. Давиденко О.О. Статистичний прогноз технічного стану автодорожніх мостів України. *Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*. Дніпропетровськ, 2016. Вип. 10. С. 4–13.

Опубліковані праці апробаційного характеру

10. Давиденко О.О. Аналіз надійності і довговічності автодорожніх мостів України. *LXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей*. Київ: НТУ, 2011. С. 112.

11. Давиденко О.О. Моделі управління життєвим циклом залізобетонних елементів мостів. *LXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей*. Київ: НТУ, 2012. С. 144.

12. Давиденко О.О. Марковські моделі накопичення пошкоджень в оцінці та прогнозуванні технічного стану залізобетонних мостів України. *LXXII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей*. Київ: НТУ, 2016. С. 166.

13. Давиденко О.О. Функція інтенсивності відмов елементів споруд. *6-та Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті»: тези доповідей*. Харків: УкрДУЗТ, 2017. С. 115–117.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ З ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	25
1.1 Терміни і визначення понять.....	25
1.2 Загальна модель довговічності елементів споруд.....	27
1.3 Детерміністичні моделі оцінки технічного стану залізобетонних елементів транспортних споруд.....	29
1.4 Стохастичні моделі оцінки технічного стану залізобетонних елементів транспортних споруд.....	31
1.5 Оцінка вартості життєвого циклу експлуатації.....	43
1.6 Висновки і формулювання цілі і задач дослідження.....	45
1.6.1 Висновки до розділу 1.....	45
1.6.2 Формулювання задачі наукового дослідження.....	48
РОЗДІЛ 2 СТАТИСТИЧНИЙ ПРОГНОЗ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ...	49
2.1 Загальна характеристика вибірки.....	49
2.2 Терміни служби автодорожніх мостів України.....	52
2.2.1 Алгоритм дослідження варіаційного ряду.....	52
2.3 Статистичні дані швидкостей деградації.....	58
2.4 Аналіз статистичних даних прогонових будов автодорожніх мостів.....	58
2.4.1 Аналіз швидкості деградації.....	58
2.4.2 Аналіз строків служби автодорожніх мостів України....	60
2.5 Статистичний прогноз технічного стану автодорожніх мостів України.....	62
2.6 Регресійний аналіз статистичних даних автодорожніх мостів України.....	64
2.7 Стратегія експлуатації та задачі оптимізації вартості життєвого циклу.....	68

2.8	Висновки до розділу 2.....	70
РОЗДІЛ 3	УЗАГАЛЬНЕННЯ МАРКОВСЬКОЇ ФЕНОМЕНОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ.....	72
3.1	Фундаментальні принципи розбудови марковських моделей накопичення пошкоджень.....	72
3.2	Вплив швидкості деградації на оцінку залишкового ресурсу...	81
3.3	Марковські моделі з проскоками.....	94
3.4	Аналіз розроблених моделей накопичення пошкоджень.....	100
3.5	Висновки до розділу 3.....	103
РОЗДІЛ 4	ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СПОРУДИ.....	105
4.1	Модель марковського ланцюга на засадах статистичних даних з історії експлуатації.....	105
4.2	Формулювання матриці перехідних ймовірностей на основі статистичних даних з історії експлуатації споруд.....	110
4.3	Формула рейтингової оцінки стану споруди в мережі автомобільних доріг.....	112
4.4	Інженерна методика прогнозування технічного стану споруд..	119
4.5	Критерій ефективності експлуатаційних втручань.....	120
4.6	Висновки до розділу 4.....	125
	ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.....	127
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	130
ДОДАТОК А	Дані в базі даних «АЕСУМ» результатів обстеження автодорожніх мостів України.....	146
ДОДАТОК Б	Програма визначення статистичних оцінок вибірки залізобетонних автодорожніх мостів України на внутрішній мові MathCad.....	148
ДОДАТОК В	Програма перевірки гіпотези про розподіл випадкової величини за допомоги критерію Колмагорова-Смірнова на внутрішній мові MathCad	151

ДОДАТОК Д Програма розв’язку звичайних диференціальних рівнянь Колмагорова-Чепмена на внутрішній мові MathCad	153
ДОДАТОК Е Побудова регресійної моделі прогнозу термінів служби мостів на внутрішній мові MathCAD	156
ДОДАТОК Ж Зміна №1 до ДСТУ-Н Б В.2.3-XX:201X «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів»	159
ДОДАТОК И Свідоцтва про реєстрацію авторського права	162
ДОДАТОК К Акти впровадження результатів роботи	165
ДОДАТОК Л Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	168

ВСТУП

Проблема надійності і довговічності мостів. Одним з найважливіших елементів транспортної системи держави є мости. З досвіду розвинених країн Європи відомо, що до 50 відсотків витрат на мостову галузь припадає на утримання споруд, тому природньо постає питання про необхідність визначення довговічності мостів.

Проблема довговічності елементів мостів сьогодні є вкрай актуальною для України. В рішенні від 13 жовтня 2009 р. Міжвідомчої комісії з питань науково-технологічної безпеки при Раді національної безпеки і оборони України відмічається критичний стан автодорожніх мостів та транспортних споруд, що підвищує ризик виникнення надзвичайних ситуацій техногенного і природного характерів та становить, відповідно до статті 7 Закону України «Про основи національної безпеки України», загрозу національній безпеці України в економічній та екологічній сферах. Стосовно технічного стану автодорожніх мостів, що підпорядковані «Укравтодору» в постанові підкреслюється, що 52 % мостів на дорогах загального користування не задовольняють частково чи повністю вимогам чинних норм експлуатації і, тим самим, порушуються вимоги безпечної експлуатації. Значна кількість автодорожніх мостів – біля 25%, потребують капітального ремонту або реконструкції. Середній строк служби прогонових будов є вкрай низьким. Зауважимо, що 93% автодорожніх мостів в Україні є залізобетонними.

Досвід експлуатації залізобетонних мостових споруд показав, що середній мінімальний строк служби більшості прогонових будов складає всього 36 років [21]. По даним обласних експлуатаційних організацій кількість мостів, стан яких не відповідає нормальним умовам експлуатації, вимагають капітального ремонту або реконструкції, в 1996 році становила 220, за станом на 1.01.2001 кількість таких мостів збільшилася до 330, а на 1.01.2004 становила вже 428. Сьогодні 90-95% залізобетонних прогонових будов мостів мають дефекти бетону й арматури, які знижують довговічність і несну здатність.

Причини зниження очікуваного ресурсу є на всіх стадіях життєвого циклу споруд. Низький технічний стан та мала довговічність залізобетонних мостів пояснюються, в першу чергу, низькою якістю будівництва та відсутністю належної системи експлуатації.

Сьогодні все частіше визнається [21, 23], що зниження середнього строку служби до 45 – 50 років закладається ще на стадії вишукування і проектування споруди, тому що в проектному рішенні ніяк не відображається в яких умовах і з якою швидкістю протікатиме деградація залізобетону. На етапі проектування ми не маємо ніяких важелів контролю і прогнозу довговічності, розрахункові нерівності за першим і другим граничними станами не зв'язані із змінною часу [48, 49, 52].

Нормативні документи з розрахунку залізобетонних елементів мостів не мають апарату керування довговічністю, *не мають теоретичних залежностей, які дають змогу вирахувати довговічність елемента*, не містять регламентацій з кількісної оцінки впливу на довговічність елемента фізичних і механічних характеристик матеріалів, кількісної оцінки впливу оточуючого середовища. В результаті з'ясовується що декларований нормами проектування мостів строк служби залізобетонних прогонових будов 80-100 років [33] для України є нереальним, що є загрозою безпеки споруд та значними економічними втратами.

Проблема безпечної експлуатації мостів стала нагальною ще в часи Радянського Союзу. В останнє десятиріччя проблема ще загострилася в силу низки несприятливих причин. Наведемо деякі з них: система експлуатації не відповідає сучасним технічним нормам і не володіє потрібними ресурсами для правильного та своєчасного догляду за спорудами; система фінансування дорожньої мережі України не дає змоги застосовувати сучасні та інноваційні технології з експлуатації і будівництва мостів; В Україні немає чіткого стратегічного плану вдосконалення, підтримання та експлуатації автодорожніх мостів.

В своїй передмові до збірки «Проблеми ресурсу» [69] академік НАН України Б.Є. Патон пише: «...особливої актуальності набувають питання управління експлуатаційною надійністю та довговічністю відповідальних об'єктів

шляхом визначення їх технічного стану і залишкового ресурсу та встановлення науково обґрунтованих строків експлуатації».

Причиною постійного погіршення стану мостів є недосконала система експлуатації, низька якість будівництва та відсутність важелів управління довговічністю мостів, як на стадії вишукування так і в процесі експлуатації.

Нині проектний термін життєвого циклу залізобетонних мостів призначається директивно, розрахункові залежності не мають змінної часу, проблема довговічності цілком залежить від досвіду і інтуїції проектувальника.

Проблема довговічності залізобетонних елементів є предметом вивчення великої кількості науковців, в тому числі і українських. В сучасних умовах з'являється можливість і потреба в поєднанні наукового базису досліджень деградації залізобетону з настановами з проектування, умовами будівництва і експлуатації та отримання теоретичної моделі оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів, які стали б основою в розробці практичного апарату управління життєвим циклом мостів.

Актуальність роботи. Сьогодні визнається науковцями [18, 35, 36, 48, 49, 52, 86] і державними структурами [33, 34, 39], що найбільш тривожною проблемою національної транспортної мережі автомобільних доріг є низька довговічність споруд. Тривалий час лише академічні кола переймалися цією проблемою. Термін «довговічність» в нормах проектування мостів не фігурував взагалі. І тільки, починаючи з 2006 року, з прийняттям першого українського нормативного документу проектування мостів [32], було встановлено нормативний термін служби визначальних елементів в 100 років. У 2009 році нормативом України ДБН В.2.3-22:2009 [33] для збірних та збірно-монолітних залізобетонних мостів термін служби було знижено до 70 і 80 років відповідно.

Вважається, що такий ресурс будуть мати мости, які проектується відповідно чинних нормативних вимог. Термін служби в 100 років фігурує також в нормах Європейського Союзу [40]. Зауважимо, що дослідження, які підтверджують ресурс в 100 років, ніколи не публікувались. До того ж цю норму слід розуміти як «ресурс не менше ніж 100 років».

В дійсності, сьогодні ми констатуємо, що середній термін служби залізобетонних прогонових будов мостів України не перевищує 45 – 50 років [21, 23, 29]. Тривожним і загрозливим є той факт, що за останні 10 років постійно зростає кількість мостів, котрі очікують капітального ремонту або реконструкції.

Так, якщо станом на 1.01.2012 кількість автодорожніх мостів, підпорядкованих Укравтодору, що терміново потребують капітального ремонту або реконструкції, складала 1861 од. (загальною довжиною 53,3 км) – 11,5% від загальної кількості, то на 1.01.2017 їх кількість збільшилась до 1923 од. (загальною довжиною 54,0 км) – 12,1% від загальної кількості.

В порівнянні з 2000 роком, кількість мостів, що потребують першочергової реконструкції або капітального ремонту зросла в 7 разів, тоді як загальна кількість мостів практично не збільшилась.

Причиною постійного погіршення стану мостів є недосконала система експлуатації, низька якість будівництва та відсутність важелів управління довговічністю мостів, як на стадії вишукування, проектування так і в процесі експлуатації.

Проблема прогнозу ресурсу залізобетонних елементів, як на етапі проектування, так і в процесі експлуатації, – завжди була найменш вивченою в теорії споруд, а з іншого боку – найбільш вагомою в соціально-економічному плані. Сьогодні, в умовах вкрай обмеженого фінансування системи експлуатації транспортних споруд, стратегічне планування видатків на утримання споруд має опиратися на реалістичний прогноз ресурсу залізобетонних елементів.

Наукові пошуки останніх років з створення засад оцінювання і прогнозування технічного стану транспортних споруд [36, 38, 53] склали базу перших в Україні і СНД чинних нормативних документів [33, 34, 41], які сьогодні в системі експлуатації мостів регламентують обов'язкову процедуру інтегральної оцінки прогнозу технічного стану конструктивних елементів і споруди цілком в функції часу і, таким чином, прогнозувати її залишковий ресурс. Проте, згадані нормативні документи ще далекі від досконалості і потребуються значні зусилля з подальшого їх розвитку та вдосконалення.

Зв'язок роботи з науковими програмами і планами.

Тема дисертації відповідає актуальним напрямам науково-технічної політики України в галузі управління експлуатаційною надійністю і довговічністю споруд і конструкцій: з Постановою Кабінету Міністрів України від 5 травня 1997 №409 «Про забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж», а також з Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 11 червня 2003 №351-р «Про схвалення Концепції державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних Галузях Економіки», відповідає бюджетній програмі «Фундаментальні дослідження у вищих навчальних закладах та наукових установах» (КПКВ 2201020) та реалізована у держбюджетній темі № 3, номер державної реєстрації теми: 0111U000095 «Теоретичні засади оцінки ресурсу транспортних споруд» 2011-2013 роки, а також відповідає бюджетній програмі «Прикладні дослідження і розробки за напрямками науково-технічної діяльності вищих навчальних закладів та наукових установ» (КПКВ 2201040) реалізовані в держбюджетній темі № 69, номер державної реєстрації теми: 0109U002145 «Прогноз і оптимізація життєвого циклу транспортних споруд» 2009-2010 роки.

Об'єкт дослідження – процеси деградації залізобетонних елементів споруд.

Предмет дослідження – моделі прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів мостів, що знаходяться в експлуатації.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є розробка моделей прогнозування життєвого циклу залізобетонних елементів мостів на автомобільних дорогах.

Для досягнення мети дисертаційного дослідження були поставлені такі задачі:

- виконати аналіз, систематизувати математичні моделі деградації залізобетонних елементів і сформулювати наукову задачу прогнозування життєвого циклу залізобетонних елементів транспортних споруд;
- виконати статистичний аналіз технічного стану автодорожніх залізобетонних мостів України;

- розробити нові стохастичні моделі прогнозування життєвого циклу залізобетонних елементів автодорожніх мостів;
- розробити стохастичну модель об'єктного рівня прогнозування технічного стану автодорожнього моста;
- розробити інженерну методику прогнозування життєвого циклу експлуатації автодорожніх мостів.

Методи дослідження – теорія старіння будівельних матеріалів, теорія ймовірностей та математичної статистики, теорія споруд, марковська теорія випадкових процесів, теорія надійності, класичні методи числового моделювання та сучасних інформаційних технологій.

Наукова новизна отриманих результатів. В дисертаційному дослідженні виконано науковий пошук моделей оцінювання і прогнозування технічного стану залізобетонних елементів мостів протягом життєвого циклу. Отримані нові результати є однією з перших спроб зв'язати фундаментальні нерівності граничних станів з часом, та утворюють у сукупності теоретичну і методичну базу оцінювання довговічності залізобетонних елементів. Наукова новизна найбільш істотних результатів визначається наступним:

- *вперше* виконано статистичний аналіз технічного стану автодорожніх залізобетонних мостів України, що дає можливість розбудови регресійних моделей прогнозування життєвого циклу елементів мостів;
- дістала подальший розвиток марковська стохастична модель прогнозування життєвого циклу елемента моста, *вперше* отримані нові наукові дані стосовно інтенсивності відмов (швидкості деградації) марковського ланцюга;
- *вперше* розроблено узагальнену стохастичну модель об'єктного рівня прогнозування технічного стану залізобетонних мостів;
- розроблена новітня інженерна методика прогнозування технічного стану залізобетонних автодорожніх мостів (споруди в цілому) в процесі експлуатації.

Достовірність отриманих результатів. Достовірність підтверджується використанням строгих методів теорія ймовірностей та математичної статистики,

постановкою числових експериментів, співставленням з достовірними даними натурних спостережень, співставленням з результатами інших авторів.

Практичне значення роботи полягає:

- в розробці інженерної методики оцінювання і прогнозу строку служби моста (споруди в цілому);
- в розробці методики автоматизованого прийняття рішення стосовно продовження експлуатації прогонової будови моста або заміни її новою.
- в розробці пропозицій із змін до нормативного документу ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» [41].

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, моделі, практичний інструментарій оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів є результатом самостійно проведеного дослідження проблеми управління ресурсом залізобетонних елементів автодорожніх мостів на стадії експлуатації. Дисертація містить наукові результати, які були отримані особисто дисертантом. Всі 9 публікацій за результатами дослідження підготовлені автором дисертації одноосібно.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи були представлені на українських і міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах: НТУ, м. Київ. LXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. Тема доповіді: «Аналіз надійності і довговічності автодорожніх мостів України», 2011 рік; ДонНАБА, м. Макіївка. XIII Міжнародна конференція молодих вчених, аспірантів, студентів «Будівлі та споруди із застосування новітніх матеріалів» 2013 рік; НУВГП, м. Рівне. Сьома всеукраїнська конференція «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону» 2013 рік; ДНУЗТ, м. Дніпропетровськ. IV Міжнародна науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» 2014 рік; НТУ, м. Київ. LXXII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету.

Тема доповіді: «Марковські моделі накопичення пошкоджень в оцінці та прогнозуванні технічного стану залізобетонних мостів України», 2016 рік; ДНУЗТ, м. Дніпропетровськ. V-а міжнародна науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» присвячена пам'яті професора О. С. Распопова 5-6 жовтня 2016; XVII міжнародна науково-практична конференція євразійського наукового об'єднання «Стратегії сталого розвитку світової науки», Росія, м. Москва, 26-27 травня 2016 р. <http://elibrary.ru/item.asp?id=26142123>; 6-та Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті», 19–21 квітня 2017 р. УкрДУЗТ, м. Харків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ З ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

1.1 Терміни і визначення понять

У дослідженні використовуються загальноприйняті терміни, що наведені в чинних нормативних документах пакету «Мости і труби» [33, 34, 41], проте сфера дослідження дисертації в останні роки стрімко розвивається, з'являються нові теоретичні підходи, що в свою чергу потребує формулювання нових і уточнення усталених термінів. Щоби наше дослідження мало чітку трактовку нижче вводиться декілька порівняно-нових для теорії споруд термінів.

Деградація – втрата початкових механічних, фізико-хімічних і естетичних характеристик. Рівень деградації в функції часу може прогнозуватись відповідними моделями.

Дефект – відхилення якості, форми, фактичних розмірів елементів та конструкцій від вимог нормативної або проектної документації, яке виникає при проектуванні, виготовленні, транспортуванні, будівництві або в процесі експлуатації.

Довговічність – здатність споруди зберігати протягом певного часу роботоспроможний стан при встановленій системі технічного обслуговування. Довговічність визначається в роках.

Експлуатаційний стан – технічний стан, що описується добіркою загальноприйнятих числових і неформальних лінгвістичних характеристик.

Експлуатаційне утримання – комплекс необхідних заходів із збереження стану конструкцій, за якого вони здатні виконувати функції, передбачені проектом, з параметрами, що визначені проектом та вимогами нормативних документів з експлуатації споруд.

Життєвий цикл експлуатації – період, протягом якого споруда виконує проектні функції.

Життєвий цикл, що прогнозується – термін служби, що передбачається для споруди в заданих умовах оточуючого середовища та чітко визначених експлуатаційних навантаженнях.

Залишковий ресурс – строк роботи елемента в роках від моменту діагностики і оцінки технічного стану, впродовж якого надійність і експлуатаційна придатність задовольняють нормативним вимогам експлуатації.

Знос споруди – погіршення початкових проектних показників, таких як несна здатність, вантажопідйомність, невідповідності розрахункових параметрів споруди сучасним вимогам (наприклад, за габаритом тощо).

Надійність – здатність споруди виконувати задані функції в певних умовах експлуатації, зберігаючи протягом встановленого часу нормативні експлуатаційні показники. Надійність визначається ймовірністю того, що не буде досягнуто граничного стану, що розглядається.

Пошкодження – дефект, відхилення параметрів і/або характеристик елементів та конструкцій від передбачених проектом, що виникли в результаті природного старіння матеріалів та механічних, фізико-хімічних, теплотехнічних впливів у процесі транспортування, монтажу або експлуатації. Пошкодження не може бути прогнозовано моделлю деградації.

Ресурс – строк роботи елемента в роках, впродовж якого надійність і експлуатаційна придатність задовольняють нормативним вимогам.

Стохастична модель – описує процес еволюція якого в часі керується ймовірнісними законами.

Матриця переходів – кожен матричний елемент p_{mn} виражає ймовірність того, що елемент перебуваючи в первісному стані m перейде в стан n *протягом одного року*.

Функція деградації – рівень деградації в функції часу.

Функція інтенсивності відмов (hazard function) – міра надійності яка визначається як ймовірність того, що відмови елемента споруди не відбудеться *протягом часу експлуатації*.

1.2 Загальна модель довговічності елементів споруд

В найбільш загальній формі сучасне формулювання проблеми довговічності наведено в документі Об'єднаного комітету з безпеки споруд (Joint Committee on Structural Safety [148] – 2000 р. та в монографії Р. Мельчерса (Robert E. Melchers) [137] – 1999 р., як ймовірність досягнення граничного стану за час t . Для цього вводиться функція граничного стану, залежна від часу:

$$g(\mathbf{X}, t) = R(\mathbf{X}, t) - Q(\mathbf{X}, t), \quad (1.1)$$

де $R(\mathbf{X}, t)$ – узагальнений опір елемента;

$Q(\mathbf{X}, t)$ – узагальнений навантажувальний ефект;

$\mathbf{X}$ – вектор базових змінних;

t – змінна часу.

Сама функція надійності, як ймовірність досягнення граничного стану за час t має вид:

$$P(t) = \text{Prob}[\min g(\mathbf{X}(\tau), \tau) < 0 \text{ для } 0 < \tau < t], \quad (1.2)$$

або в термінах функції граничного стану

$$P(t) = \text{Prob}[R(\mathbf{X}, t) - Q(\mathbf{X}, t) < 0]. \quad (1.3)$$

Таким чином, залежностями (1.2), (1.3) довговічність формулюється як поняття функціонально зв'язане з надійністю. Максимальне значення t що задовольняє залежностями (1.2), (1.3) і є довговічність T .

Цей загальний підхід було викладено, в дещо іншій формі, в монографії В.В. Болотіна ще в 1971 р. [4]. Так для випадку елемента, експлуатація якого призупиняється після першої відмови, середня довговічність T визначається інтегралом:

$$T = \int_0^{\infty} t \cdot p(t) dt, \quad (1.4)$$

де t – час;

$p(t)$ – частота відмов, щільність часу досягнення граничного стану

$$p(t) = \frac{-dP(t)}{dt}. \quad (1.5)$$

Інтегруванням (1.4) по частинам, з урахуванням (1.2), отримується інтеграл, що дає середнє значення довговічності

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (1.6)$$

де $P(t)$ – випадкова функція надійності.

Безпосереднє обчислення інтеграла (1.6) обмежено складністю формулювання випадкової функції надійності $P(t)$ – тому практичного значення набули числові моделі оцінки довговічності елементів. В рамках цього дослідження, дещо умовно, моделі довговічності класифікуються за двома групами:

- детерміністичні моделі (напівймовірнісні);
- стохастичні моделі.

Детерміністичні моделі – найбільш прості для прогнозування технічного стану елементів мостів. Ці моделі засновані на статистичній, як правило, нелінійній регресії аналізу даних для визначення швидкості зносу. Інший підхід розбудови детерміністичної моделі базується на фізико-механічних аспектах деградації матеріалів під дією зовнішніх навантажень та впливів оточуючого середовища.

Стохастичні моделі представляють процес погіршення технічного стану елементів моста з плином часу, як поняття функціонально зв'язане з надійністю.

Максимальне значення t що задовольняє випадковій функції надійності типу (1.2), (1.3) і є довговічність T .

1.3 Детерміністичні моделі оцінки технічного стану залізобетонних елементів транспортних споруд

Моделі засновані на статистичній нелінійній регресії

Серед детерміністичних моделей оцінки рівня деградації елементів споруд найбільш поширені такі що засновані на статистичній нелінійній регресії аналізу історичних даних системи експлуатації. Наукова ідея таких моделей полягає в наближеному опису процесу деградації за допомогою детермінованих та випадкових даних історії експлуатації елементів транспортних споруд. В інших термінах розбудова такої моделі полягає у пошуку функції яка оптимально віддзеркалює натурні дані. Прийоми регресійного аналізу широко представлені в посібниках з математичної статистики та теорії операцій [9, 10, 12, 15]. Як типові зразки такого підходу пошлемося на роботи [55, 57, 58, 59].

Моделі основані на загальних законах аналітичної теорії дифузії газів.

Моделі засновані на дослідженні швидкості деградації в залежності від часу карбонізації та насичення хлоридами захисного шару бетону [86, 87] стають доволі розповсюдженими. В цих моделях постулюється, що інтенсивна корозія арматури починається після карбонізації або повного насичення хлоридами захисного шару бетону. Процеси деградації описуються відомими рівняння першого і другого законів Адольфа Фіка (1855р.).

Модель Пальмгрена – Майнера накопичення пошкоджень.

У будівельній механіці, з 50-х років минулого століття, панувала модель накопичення пошкоджень відома під назвою «теорія лінійного підсумовування пошкоджень Пальмгрена – Майнера», в якій використовується принцип лінійної суперпозиції [138]:

$$\sum_0^n \frac{N_t}{N(\sigma)} = D_i, \quad (1.7)$$

де D_i – міра пошкоджень;

N_t – число циклів навантаження;

$N(\sigma)$ – число циклів до руйнування при режимі напруги σ ;

n – число ступенів змін режиму вантаження.

Граничне число циклів до руйнування N_R визначається з умови $D=1$ [82]:

$$\int_0^{N_R} \frac{dN}{N_R(\sigma)} = \sum_0^{N_R} \frac{N_i}{N_R(\sigma)} = 1. \quad (1.7a)$$

Цядосить проста і прозора модель набула широкого поширення в машинобудуванні. У меншій мірі модель використовувалася для оцінки життєвого циклу транспортних споруд [82].

Очевидно, що для використання моделі (1.7) необхідно мати достовірну оцінку кількості циклів навантаження, тобто для прогнозу ресурсу в процесі експлуатації необхідно мати повні дані історії навантаження. Стосовно залізобетонних елементів автодорожніх мостів необхідні початкові дані визначаються настільки приблизно, що втрачається достовірність моделі. Є і інші недоліки, які стримують застосування моделі Пальмгрена – Майнера, такі як, наприклад, ігнорування ефектів взаємодії циклів навантаження з малою і великою амплітудами.

Ще однією стороною, що стримує застосування моделі (1.7) є її чітка орієнтація на один матеріал – метал. Ця і, вище зазначена особливість моделі, не дозволяють її безпосереднього застосування для прогнозування довговічності залізобетонних елементів мостів. Професор Іосілевській Л.І. в своїй роботі [43] пише: «модель не применима для железобетона, так как основные механические свойства бетона в большей степени зависят от времени».

В монографії професора Чиркова В.П. [82] напівймовірнісна модель прогнозу ресурсу, що базується на принципах накопичення пошкоджень Пальмгрена – Майнера і враховує специфічні фізико-механічні властивості залізобетону:

$$T_{res} = \frac{N}{n_1} \left(\frac{1 - \gamma V_r}{\eta} \right)^m, \quad (1.8)$$

де $N = 2 \cdot 10^6$ – базова кількість циклів навантажень до досягнення граничного стану;

n_1 – кількість циклів навантажень в одиницю часу;

γ – коефіцієнт заданої забезпеченості;

V_r – коефіцієнт варіації міцності бетону;

η – коефіцієнт, що залежить від рівня напруг в бетоні;

m – показник кривої витривалості бетону.

Інший напрям розбудови моделей накопичення пошкоджень елементів будівельних конструкцій ґрунтується на фундаментальних дослідженнях механіки руйнування. В Україні це дослідження школи академіка НАНУ В.В. Панасюка [61, 62], в Росії – дослідження механіки залізобетонних конструкцій в роботах [65, 66] та ін. Тут модель руйнування, як правило, будується, використовуючи коефіцієнти інтенсивності напружень, що є фізичними константами матеріалу. На жаль, моделі, засновані на класичній теорії механіки руйнування поки що не набули широкого поширення в практичній оцінці ресурсу елементів транспортних споруд.

1.4 Стохастичні моделі оцінки технічного стану залізобетонних елементів транспортних споруд

В цьому підрозділі розглядаються характерні для теорії споруд моделі прогнозування ресурсу основані на характеристиці безпеки вираженої в функції часу, марковській стохастичній теорії та загальній теорії випадкових функцій.

Моделі стохастичної характеристики безпеки.

Досить простими і прозорими моделями оцінки ресурсу залізобетонних елементів споруд є моделі, що описують процес погіршення технічного стану за допомогою характеристики безпеки [33, 72, 73] вираженої в функції часу експлуатації. Ідея такого підходу виражається залежністю:

$$\beta(t) = \beta_0 \cdot F_i(t), \quad (1.9)$$

де $\beta(t)$ – характеристика безпеки на час експлуатації t ;

β_0 – початкова (проектна) характеристика безпеки;

$F_i(t)$ – функція деградації;

t – час.

Наведемо досить типові для таких моделей функції деградації [91, 92]:

$$\text{Білінійна} \quad \beta(t) = \beta_0 - R_L(t - T_L), \quad t > T_L. \quad (1.10)$$

$$\text{Ступенева} \quad \beta(t) = \beta_0 - R_S(t - T_L)^{1/2}, \quad t > T_L. \quad (1.10a)$$

$$\text{Квадратична} \quad \beta(t) = \beta_0 - R_Q(t - T_L)^2, \quad t > T_L. \quad (1.10b)$$

Експоненціальна

$$\beta(t) = (\beta_0 - Q) \exp \left[- \left(\frac{t - T_L}{S} \right)^2 \right] - R_E(t - T_E) + Q, \quad (1.10c)$$

де R_L , R_Q , R_S і R_E є параметрами налаштування моделі;

S – параметр форми, який впливає на стан точки перегину в експоненційній моделі;

Q – параметр швидкості деградації, який налаштовує надійність протягом перших років процесу деградації.

В роботах Д.М. Франгопола (D.M. Frangopol) [108, 109, 110] досліджуються моделі які мають кусочно-лінійні функції деградації основані на історичних даних експлуатації:

$$\beta(t) = \beta_0 - (t - \sum_i^n t_i) \varphi, \quad (1.11)$$

де $\beta(t)$ – характеристика безпеки на час експлуатації t ;

β_0 – початкова (проектна) характеристика безпеки;

t_i – час i – го експлуатаційного втручання, $i = 1, 2, \dots, n$;

n – кількість експлуатаційних втручань;

φ – масштабний коефіцієнт.

На закінчення наведемо ще один, досить характерний приклад, з роботи [124] де визначаються коефіцієнти надійності на основі залежної від часу експлуатації характеристики безпеки (початкове значення $\beta_d = 3,8$ ($P_d = 7,2 \cdot 10^{-5}$):

$$\beta(t) = F[\lambda_0 + (\lambda_{\text{insp}} - \lambda_0)] \frac{t}{t_{\text{insp}}}, \quad (1.12)$$

де λ_0 – початкова швидкість деградації, відповідна проектному значенню характеристики безпеки $\beta_d = 3,8$;

λ_{insp} – швидкість деградації на момент проведення обстеження;

t_{insp} – час проведення обстеження.

Наведені моделі мають обмежене застосування в силу вузького діапазону початкових даних і, з другого боку, їх значного розкиду.

Стохастичні феноменологічні моделі накопичення пошкоджень.

Вагомою альтернативою детерміністичним моделям стали в останні 30-40 років феноменологічні стохастичні моделі, що описують накопичення пошкоджень, як процес, еволюція якого в часі визначається імовірнісними законами. Зараз багато дослідників схиляються до думки, що саме стохастичні моделі марковських ланцюгів є найбільш перспективним, універсальним інтегральним апаратом опису поступового руйнування елементів споруд [9, 21, 91, 107, 152]. Сьогодні більшість автоматизованих систем управління мостами в світі базуються на марковських моделях [156, 157].

Стохастичні феноменологічні моделі накопичення і прогнозу ушкоджень, що розглядаються тут, також базуються на теорії марковських ланцюгів.

Модель накопичення пошкоджень.

Формулювання моделі накопичення пошкоджень викладене нижче для порівняно невеликого класу імовірнісних феноменологічних моделей

кумулятивного накопичення пошкоджень, що виникають в результаті природного зносу елементів споруд протягом життєвого циклу експлуатації.

Знос елемента споруди тут описується марковським дискретним процесом з безперервним часом (*так званий марковський ланцюг*) [2, 9, 137].

Випадковий процес називається марковським (або процесом без післядії), якщо він має таку властивість: для кожного моменту часу t ймовірність появи довільного стану S_t в майбутньому (при $t > t_0$) залежить тільки від стану системи в теперішньому S_{t_0} і не залежить від того, яким чином і коли система прийшла до стану S_{t_0} (тобто: не має значення яким чином розвивався процес у минулому). Таким чином марковський процес може бути вираженим через розподіл в попередній момент часу, незалежно від історії процесу.

Моделювання марковським процесом означає, що для довільного часу t_0 ймовірність кожного із станів системи в майбутньому (при $t > t_0$) залежить тільки від її сучасного стану і не залежить від поведінки системи в минулому (при $t < t_0$). Іншими словами, розподіл марковського процесу в момент часу t може бути вираженим через розподіл в попередній момент часу, незалежно від історії процесу.

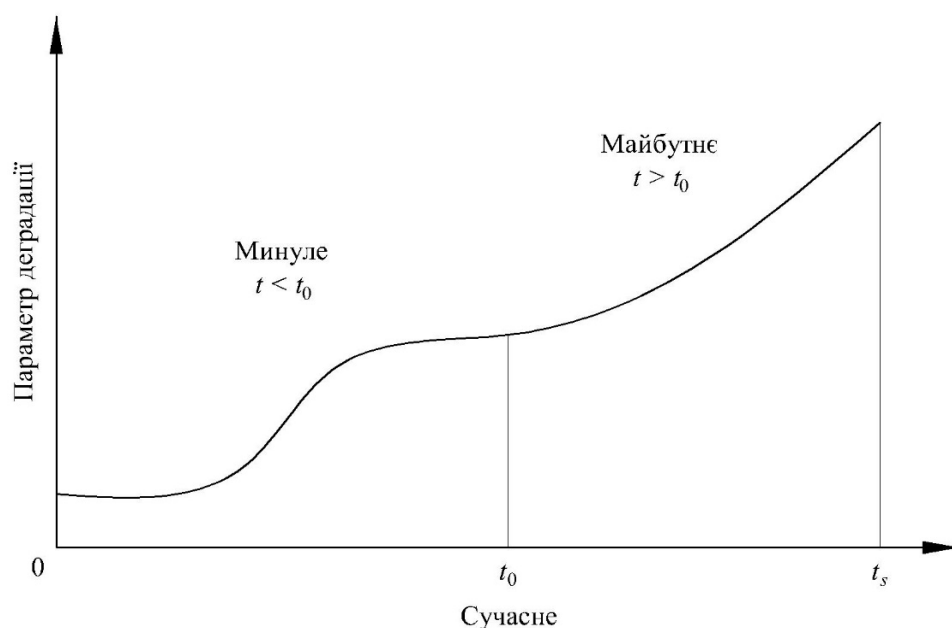


Рисунок 1.1 – Залежність «минуле»-«майбутнє»

В той же час, марковський випадковий процес не є повністю незалежним від минулого. Дещо філософське формулювання цієї залежності є таким [10]: «для марковського випадкового процесу *«майбутнє»* залежить від *«минулого»* тільки через *«сучасне»* (рис.1.1)»

Будемо вважати, що перехід системи із одного стану в інший відбувається як в пуассоновському потоці подій з інтенсивністю $\lambda_{ij}(t)$. (Зауважимо, що пуассоновський потік є типовим марковським процесом [2, 137]). Перехід з стану S_i в стан S_j відбувається в момент коли настає перша подія потоку. Вектор інтенсивностей пуассоновського потоку позначимо E .

Шукані ймовірності марковського ланцюга $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ – функції часу є ймовірностями того, що система в момент t знаходиться в стані S_i , і визначаються інтегруванням звичайних диференціальних рівнянь із змінними, в загальному випадку, коефіцієнтами. Це відомі рівняння Колмогорова – Чепмена, що описують еволюцію дискретного марковського процесу з неперервним часом [2, 137].

В матричній формі рівняння мають вид:

$$\frac{dP(i, t)}{dt} = P(i, t) \cdot E. \quad (1.13)$$

До рівняння (1.13), додаються початкові умови:

$$\text{при } t=0 \quad p_1(t)=1; \quad p_2(t) = p_3(t) = p_4(t) = 0. \quad (1.14)$$

Окрім того, у розв’язку системи диференціальних рівнянь (1.13) використовується умова нормування:

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1, \quad (1.15)$$

яка є наслідком того, що події ланцюгів маркова несумісні і утворюють повну групу.

Матриця ймовірностей переходу $\mathbf{P}(i, t)$ в (1.13) очевидно залежить від часу t . Підкреслимо, що час рахується від початку процесу. Що стосується матриці інтенсивностей переходу (швидкостей деградації) $\mathbf{E}$ – то вона, в загальному випадку, є залежною від часу. Проте, придатні для практичного вжитку моделі отримують з незалежною від часу матрицею $\mathbf{E}$ і навіть у випадках $\mathbf{E} = \text{const}$

Центральним місцем марковської моделі накопичення пошкоджень, як відмічалось вище, є визначення стохастичної матриці ймовірностей переходів $\mathbf{P}$. Сьогодні відомо два розповсюджених способи її отримання – це класичний, що є розв'язком диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена (1.13) та статистичний в основі якого лежать історичні дані системи експлуатації.

Прикладом класичного підходу є матриця переходів отримана для випадку п'яти дискретних станів в роботах [49, 50, 53]. Граф еволюції системи є лінійною послідовністю подій – переходу із одного стану в інший, сусідній.

Система рівнянь (1.13) відповідна такому графу має вид:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \lambda \cdot \begin{bmatrix} -p_1 & 0 \\ -p_2 & p_1 \\ -p_3 & p_2 \\ -p_4 & p_3 \end{bmatrix}, \quad (1.13a)$$

де p_i – ймовірності переходу із стану S_i в стан S_{i+1} (аргумент t випущено для скорочення запису);

λ – інтенсивність потоку.

Так наприклад, розв'язок системи диференціальних рівнянь (1.13a) при $n = 5$ дає матрицю перехідних ймовірностей з такими значеннями:

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} 0,819 & 0,181 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,679 & 0,330 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,549 & 0,451 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,449 & 0,551 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.16)$$

Зауважимо, що цей розв'язок системи рівнянь (1.13а) отримано при заданому постійному параметрі λ – інтенсивності потоку в роботі професора А.І. Лантуха-Лященко [52] в 1999 р.

Формулювання матриці переходів за статистичними даними

В теорії споруд сьогодні поширеним є статистичний підхід формулювання матриці переходів, в основі якого лежать історичні дані системи експлуатації. Вважається, що матриця переходів розбудована за даними системи експлуатації є більш реалістичною основою для прогнозу процесів деградації. Необхідні базові теоретичні визначення стохастичного процесу та матриці переходів наведені в монографіях Дж. Богданов, Ф. Козіна [2] і Х. Таха [78].

Практичному застосуванню матриці переходів розбудованої за статистичними даними присвячена велика кількість зарубіжних досліджень в яких розглядаються особливості матриць переходів пов'язані з системою експлуатації мостів різних країн [90, 91, 92, 99, 100, 120, 119, 134, 132, 133]. Більшість з них базуються на загальних залежностях отриманих Дж. Богдановим і Ф. Козіним [2, 93, 94,], де розподіл дискретних станів для кожного року, $\mathbf{W}(t)$, отримано в результаті множення розподілу попереднього стану на матрицю переходу $\mathbf{P}_0$

$$\mathbf{W}(t) = \mathbf{W}(t-1) \times \mathbf{P}_0, \quad (1.17)$$

де $\mathbf{W}(t-1)$ – вектор розподілу попереднього стану.

В європейських дослідженнях [102, 136] матриці ймовірності переходу для процесу деградації у випадку п'яти дискретних станів мають вид:

Стан	0	1	2	3	4
0	p_{00}	p_{01}	p_{02}	p_{03}	p_{04}
1	0	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}
2	0	0	p_{22}	p_{23}	p_{24}
3	0	0	0	p_{33}	p_{34}
4	0	0	0	0	1

(1.18)

Кожен матричний елемент p_{mn} виражає ймовірність того, що споруда перебуваючи в первісному стані m перейде в стан n протягом одного року. Оскільки не можливим є перехід у вищий дискретний стан без ремонтних робіт – всі елементи матриці деградації нижче діагональної лінії дорівнюють 0. Сума елементів в кожному рядку матриці ймовірності переходу має дорівнювати 1. У правому нижньому кутку матриці значення параметру ймовірності p_{nn} дорівнює 1 (поглинаючий стан), оскільки споруди що знаходяться в нижньому дискретному стані за умовою моделі свій стан не змінюють.

В роботі [142] очікуваний стан елементів мосту в майбутньому визначається залежністю (1.17) в інших позначеннях

$$\pi^{(n)} = \pi^{(0)} \times \mathbf{P}^n, \quad (1.19)$$

де $\pi^{(n)}$ – вектор ймовірностей переходу в стані n ;

$\pi^{(0)}$ – початковий вектор ймовірностей переходу

$\mathbf{P}_0$ – матриця переходів такого формату:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1 & 1-p_1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_{M-1} & 1-p_{M-1} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.20)$$

де p_i – ймовірність того що елемент зостанеться в стані i , $i = 1, 2, \dots, M-1$;

M – номер поглинаючого стану.

В цій же роботі наведено ще два способи формулювання матриць переходів, на основі випадкової функції, в тому числі оснований на випадковій функції (hazard function) [142].

В роботі [159] представлені результати дослідження з використанням системи Louisiana's National Bridge інвентаризації (NBI) для визначення матриць

зносу елементів моста, які можуть бути використані в програмному забезпеченні Pontis [151, 153, 156, 159]. Ці матриці для спрощеної трьохелементної моделі моста, розроблені для Луїзіанського Департаменту транспорту і розвитку. Результати показують, що погіршення стану компонентів моста добре корелює з віком і мостів, що ймовірність переходу Маркова є хорошим інструментом для прогнозування технічного стану моста. При використанні державних NBI даних для генерування марковських матриць погіршення стану елементів моста, отримані ймовірності будуть залежати від середнього віку моста в базі даних і інтервалів обстежень, внесення даних до бази. Цей факт слід враховувати при використанні таких матриць для прогнозування майбутнього погіршення технічного стану моста.

Проблема визначення інтенсивності потоку

Ще один, принципово важливий аспект моделі – питання про визначення розробником функції інтенсивності відмов $\lambda(t)$ – швидкості деградації іншими словами [2, 9]. Принципово важливий тому, що в представленій марковській моделі процес управляється тільки одним параметром.

У загальному випадку швидкість деградації є випадкова функція часу. Однак прийняття швидкості деградації як функції часу, призводить до того, що диференціальні рівняння моделі (1.13) стають нелінійними, не мають розв'язку в замкнутій формі і розробнику доводиться вдатися до досить складного чисельного розв'язку [2]. З іншого боку, сьогодні мало відомо якою насправді є функція інтенсивності відмов елементів споруд $\lambda(t)$. Тому для простоти розв'язку часто застосовується припущення $\lambda(t) = \text{const}$.

Однак отримання значення постійного параметра інтенсивності відмов також є не простим завданням. В принципі можна отримати цей параметр регресивним аналізом даних спостереження накопичення пошкоджень [151, 153], проте в реальних випадках елементів споруд розкид настільки великий, що скористатися отриманим не можна. Тут також немає стандартної процедури і доводиться досліднику шукати спеціальні прийоми визначення цього основного параметра моделі.

Якою в дійсності є $\lambda(t)$ – функція інтенсивності відмов конструкцій споруд невідомо. Популярним є теза про те, що параметр $\lambda(t)$ описується випадковою функцією часу, яка має форму приблизно таку, як показано на рис.1.2 (В.В.Болотін в [6]).

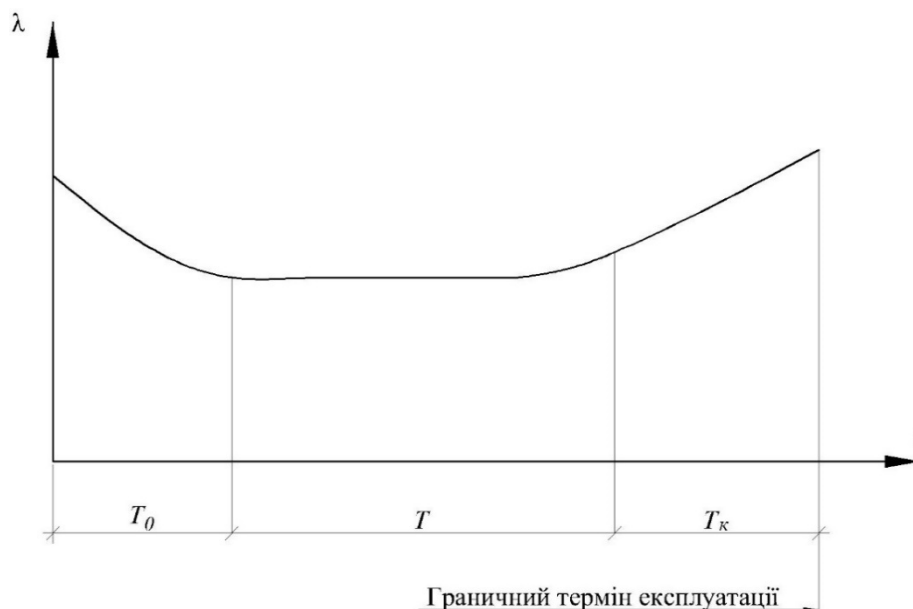


Рисунок 1.2 – Параметр інтенсивності відмов

На рис. 1.2 T_0 – початковий період експлуатації, T – основний період, бездефектної експлуатації, T_k – кінцевий період експлуатації, характерний інтенсивним розвитком пошкоджень.

Ніяких кількісних співвідношень між цими періодами не наводиться в монографії [6]. Складається враження, що наведена графічна залежність є характерною для механічних та електро-технічних систем. Якою є функція $\lambda(t)$ для елементів транспортних споруд відповідь може дати регресивний аналіз виходу із ладу елементів споруд. Сьогодні ми маємо достатньо репрезентативні вибірки для такого аналізу. В роботі [52] була зроблена спроба встановити функцію інтенсивності відмов. Можна вважати, що досить корельованою з статистичними даними є функція виду:

$$\lambda(t) = \alpha t^r \cdot m, \quad (1.21)$$

де α, r – параметри функції;

m – масштабний коефіцієнт приведення аргументу до цілочислової, безрозмірної форми.

Так в роботі [143] така форма функції обґрунтована даними системи управління мостам Нідерландів. Функція інтенсивності відмов у формі (1.21) застосовується досить часто іншими авторами.

В Україні вперше марковська модель деградації була запропонована в роботі проф. А.І. Лантуха-Лященко [52] в 1999 р. В подальшому модель розвивалась і вдосконалювалась в роботах [49, 50, 53] та перевірялась в практичному застосуванні новітнього апарату оцінки і прогнозу технічного стану елементів мостів [8, 54]. З 2009 року модель прийнята, як нормативна в системі експлуатації мостів [41].

Марковська модель роботи [50], яка реалізована в нормативному документі [41], має класичну матрицю переходів для випадку лінійного графа з п'яти дискретних станів (ф. 1.22)

В формулюванні моделі постулюється, що швидкість деградації описується одним параметром λ – показником інтенсивності відмов. Цей показник приймається постійним, незалежним від часу $\lambda = \lambda(t)$. За функцію надійності прийнята інтегральна функція розподілу $P(t)$ для часу T_n , котрий протікає доки стануться всі n подій процесу (розподіл Пуассона):

$$P(t) = 1 - P(T_n > t) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}, \quad (1.22)$$

де λ – параметр процесу інтенсивність відмов (швидкість деградації).

Таким чином, при заданій інтенсивності відмов λ , залежністю (1.22) встановлюється зв'язок між надійністю елемента P_t в i -му стані та часом t , що пройшов від початку експлуатації до стану $i = 2, \dots, 5$. При $k = 5$ функція має вид:

$$P(t) = 1 - 0,008333(\lambda t)^k e^{-\lambda t}, \quad (1.23)$$

де P_t – ймовірність того, що елемент перейде в стан k протягом часу $t < T_k$.

Унікальною новелою моделі, що розглядається, є процедура визначення параметра λ . Вона полягає в специфічному визначенні за даними обстеження початкових умов для розв'язку рівняння (1.22) відносно невідомого параметра λ : за початкових умов для окремого елемента, отриманих за результатами обстеження.

Графічна інтерпретація процедури визначення параметра приведена на рис.1.3.

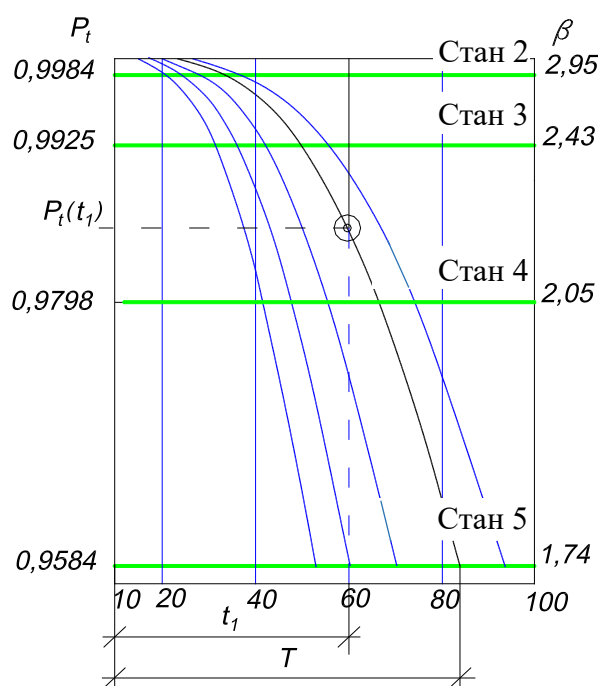


Рисунок 1.3 – Графічна інтерпретація визначення параметра інтенсивності відмов λ .

При відомому значенні параметра інтенсивності відмов λ з моделі життєвого циклу елемента (1.23) визначається час переходу в наступний дискретний стан. Для випадку п'ятого дискретного стану це буде залишковий ресурс. Очевидно, що запропонований прийом визначення параметра моделі життєвого циклу елемента, з «сьогодення», тобто i -го дискретного стану, дає повну інформацію про історію деградації у минулому, і не тільки. Визначений за цією

процедурою параметр інтенсивність відмов, λ несе в собі багато іншої інформації експлуатації, яка відноситься до умов експлуатації споруди, якості будівництва, особливостям конструкції і тому подібне.

За рахунок того, що параметр λ визначається для кожного даного елемента і має уточнюватися всякий раз після чергового обстеження, точність моделі підвищиться.

Модель, що пропонується є інтегральною. Вона не містить теоретичного апарату чуйного до матеріалу елементу, його статичної схеми, технології спорудження, екологічних умов та такого іншого. З другого боку, всі названі фактори і багато інших, другорядних, приймаються в моделі до уваги в момент, коли за допомогою класифікаційних таблиць, що містять фізичні і механічні ознаки деградації, визначається стан елемента.

Марковська стохастична модель накопичення пошкоджень застосовується в європейських системах експлуатації мостів. Так в роботах [121, 122, 123, 143] отримана матриця ймовірності переходу для випадку швидкості деградації залежної від часу як розв'язок системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена такого виду:

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{P}(s, t) = \mathbf{P}(s, t) \mathbf{Q}(t), \quad (1.24)$$

де $\mathbf{Q}(t)$ – матриця швидкостей деградації (інтенсивності відмов) залежних від часу.

Розв'язок системи рівнянь (1.24) дає матрицю ймовірності переходів:

$$\mathbf{P}(t - s) = \mathbf{P}(0) \exp\{(t - s)\mathbf{Q}\}. \quad (1.25)$$

1.5 Оцінка вартості життєвого циклу експлуатації

Однією з поширених моделей групи є моделі вартості життєвого циклу. Сьогодні ми маємо велику кількість зарубіжних досліджень, опублікованих

англійською мовою, в яких пропонуються моделі аналізу, прогнозу та оптимізації життєвого циклу [88, 105, 109, 112, 144]. Принциповою особливістю цих досліджень є моделі які встановлюють вартість життєвого циклу в функції параметру надійності, залежного від часу. Покажемо таку модель запропоновану в роботі [110]. Тут в основі лежить характеристика безпеки залежна від часу. Характеристика безпеки у випадку відсутності експлуатаційного втручання описується залежністю:

$$\beta(t) = \begin{cases} \beta_0 & \text{if } t \leq t_i \\ \beta_0 - \alpha(t - t_i) & \text{if } t > t_i, \end{cases} \quad (1.26)$$

де $\beta(t)$ – характеристика безпеки залежна від часу;

β_0 – початкова характеристика безпеки при $t = 0$;

α – коефіцієнт зниження характеристики безпеки в силу деградації елемента споруди.

В загальній формі модель вартості життєвого циклу, що встановлює зв'язок між параметром надійності і вартістю експлуатаційних втручань записується так:

$$C = f(\gamma, t_d, t_{pd}, \mathbf{X}), \quad (1.27)$$

де γ – різниця між значеннями початкової та на час t характеристик безпеки (тобто різниця в характеристиках безпеки до і після експлуатаційного втручання)
 $\gamma = \beta(0) - \beta(t)$;

t_d – час між двома експлуатаційними втручаннями;

t_{pd} – час першого експлуатаційного втручання;

$\mathbf{X}$ – вектор що містить такі фактори як тип споруди або елемента і форму експлуатаційного втручання.

Моделі вартості життєвого циклу побудована на принципі (1.27) має вид:

$$C = C_1 + C_2 \gamma^{q_1} + C_3 (\gamma^*)^{q_2}, \quad (1.28)$$

де C – загальна вартість експлуатаційних втручань;

C_1 – фіксовані (початкові) витрати;

C_2 – витрати на підвищення надійності;

C_3 – витрати на підтримання надійності на постійному рівні;

q_1 та q_2 – параметри, що встановлюють зв'язок між вартістю експлуатаційного втручання та підвищенням надійності і між вартістю експлуатаційного втручання та підтриманням надійності на постійному рівні відповідно;

γ^* – міра ефективності підтримання надійності на постійному рівні. Цей параметр описується залежністю:

$$\gamma^* = \alpha t_d + \delta(t_{pd} - t_d). \quad (1.29)$$

За умови, що експлуатаційне втручання має незначний вплив на підтримання надійності на постійному рівні і зменшенню падіння надійності (тобто $t_d = 0$ і $t_{pd} = 0$) рівняння (1.29) матиме вид:

$$C = C_1 + C_2 \gamma^{q_1}. \quad (1.30)$$

1.6 Висновки і формулювання цілі і задач дослідження

1.6.1 Висновки до розділу 1

1. Аналіз публікацій направлений на систематизацію моделей оцінки життєвого циклу експлуатації залізобетонних елементів мостів виявив, перш за все, соціально-економічну значимість проблеми оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Значна кількість наукових публікацій присвячених проблемі довговічності [18, 35, 36, 48, 49, 52, 86] містить тезу, що найбільш тривожною проблемою національної транспортної мережі автомобільних доріг України є низька довговічність споруд.

2. Виконаний аналіз моделей життєвого циклу залізобетонних елементів мостів показав, що в останні 30 – 40 років найбільш розповсюдженими в світі стали марковські стохастичні феноменологічні моделі накопичення пошкоджень. Марковські феноменологічні моделі побудовані на загальних законах теорії ймовірностей і математичної статистики трактують прогнозований час деградації, як випадкову змінну, поведінка якої в майбутньому залежить тільки від сучасного стану системи. Таким чином, довговічність формулюється як поняття функціонально зв'язане з надійністю. Максимальне значення t , що задовольняє залежностями (1.2), (1.3) і є довговічність T .

3. Більшість дослідників, марковські моделі яких розглядаються, вказують, що саме стохастичні моделі марковських ланцюгів сьогодні є найбільш перспективним, універсальним інтегральним апаратом опису поступового руйнування елементів споруд [9, 21, 91, 107, 152]. Більшість автоматизованих систем управління мостами в світі базуються саме на марковських моделях [142, 159]. Марковська модель накопичення пошкоджень є теоретичною базою програмного забезпеченні відомої інтегрованої системи управління мостами Pontis [151, 159, 153, 156].

4. Центральним місцем марковської моделі накопичення пошкоджень є матриця ймовірностей переходу із стану i в стан $i + 1$. Існує два засоби формулювання матриці переходів: класичний – як розв'язок системи рівнянь рівняння Колмогорова – Чепмена, що описують еволюцію дискретного марковського процесу з неперервним часом [2, 137] та статистичний підхід формулювання матриці переходів, в основі якого лежать історичні дані системи експлуатації. Вважається, що матриця переходів розбудована за даними системи експлуатації є більш реалістичною основою для інтегрального прогнозу процесів деградації. Необхідні базові теоретичні визначення стохастичного процесу та матриці переходів наведені в монографіях Дж. Богдановфа, Ф. Козіна [2] і Х. Таха [78].

Практичному застосуванню матриці переходів розбудованої за статистичними даними присвячена велика кількість зарубіжних досліджень в яких

розглядаються особливості матриць переходів пов'язані з системою експлуатації мостів різних країн [90, 91, 92, 99, 100, 119, 120, 132, 133].

5. Серед публікацій виділяються моделі українських дослідників, на основі яких реалізовані чіткі методики прогнозування залишкового ресурсу елементів транспортних споруд [49, 53, 85, 86, 87, 88]. Українські науковці ведуть активний пошук розв'язання проблеми прогнозу залишкового ресурсу залізобетонних елементів мостів, а також визначення часу переходу в певний експлуатаційний стан на кожному етапі життєвого циклу споруди.

6. Виконаний аналіз моделей життєвого циклу елементів мостів показав, що Україна є єдиною країною на пострадянському просторі котра має нормативну модель оцінювання і прогнозування технічного стану – марковську стохастичну дискретну модель з неперервним часом [41]. Впровадження моделі в систему експлуатації автодорожніх мостів у 2002 р. [8] мало суттєвий соціально-економічний ефект, відкрило шлях до стратегічного планування видатків на ремонт і реконструкцію споруд.

Разом з тим аналіз виявив недоліки чинної моделі. Принципово важливий аспект моделі – питання про визначення користувачем швидкості деградації (інтенсивності відмов) [2, 9]. Принципово важливий тому, що в нормативній марковській моделі процес деградації управляється тільки одним параметром.

У загальному випадку швидкість деградації є випадковою функцією часу. Однак прийняття швидкості деградації як функції часу, призводить до того, що диференціальні рівняння моделі (1.13) стають нелінійними, не мають розв'язку в замкнутій формі і розробнику доводиться вдаватися до досить складного чисельного розв'язку [47]. Тому для простоти розв'язку в нормативній моделі застосовується припущення $\lambda(t) = \text{const}$, що призводить до нереалістичного завищеного прогнозу залишкового ресурсу.

7. Результати досліджень даного розділу викладено у наступних публікаціях [21, 23, 24, 25, 30].

1.6.2 Формулювання задачі наукового дослідження

Метою роботи є розробка моделей прогнозування життєвого циклу залізобетонних елементів мостів на автомобільних дорогах.

Для досягнення мети дисертаційного дослідження були поставлені такі задачі:

- виконати аналіз, систематизувати математичні моделі деградації залізобетонних елементів і сформулювати наукову задачу прогнозування життєвого циклу залізобетонних елементів транспортних споруд;
- виконати статистичний аналіз технічного стану автодорожніх залізобетонних мостів України;
- розробити нові стохастичні моделі прогнозування життєвого циклу залізобетонних елементів автодорожніх мостів;
- розробити стохастичну модель об'єктного рівня прогнозування технічного стану автодорожнього моста;
- розробити інженерну методику прогнозування життєвого циклу експлуатації автодорожніх мостів.

РОЗДІЛ 2

СТАТИСТИЧНИЙ ПРОГНОЗ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ

2.1 Загальна характеристика вибірки

Дослідження цього розділу базуються на даних отриманих з галузевої Аналітичної експертної системи управління мостами (АЕСУМ) Укравтодору. Науковий супровід програмного комплексу АЕСУМ веде ДерждорНДІ Укравтодору. Починаючи з 2006 р. АЕСУМ функціонує, постійно розвивається і вдосконалюється, накопичується банк даних.

Методичною базою АЕСУМ є новітні нормативні документи системи експлуатації ДБН «Мости та труби. Обстеження і випробування.» [34], ДСТУ «Труби дорожні. Обстеження та оцінювання технічного стану» [39], ДСТУ-Н «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» [41]. Сьогодні ми констатуємо, що програмний комплекс АЕСУМ став центральним методичним ядром системи експлуатації мостів Укравтодору.

Глобальною метою АЕСУМ є автоматизація формалізованої оцінки технічного стану автодорожніх мостів, прогноз залишкового ресурсу споруди, генерація рекомендацій з стратегії експлуатації та оптимізація витрат на ремонт і реконструкцію в умовах обмеженого фінансування.

Цієї мети досягнуто виконанням програмним комплексом в автоматизованому режимі великої кількості задач. Назвемо основні з них:

- зберігання та обробка інформації про споруду в цілому і конструкції елементів споруди (проектна та виконавча документація);
- генерація паспортів споруди;
- зберігання та обробка інформації стосовно нагляду, ремонтів, випробовувань та обстежень, дефектів споруди;
- зберігання та обробка систематизованої інформації стосовно реконструкції та посилення елементів споруди;
- технічна оцінка експлуатаційного стану споруди;
- алгоритми аналізу вантажопідйомності мостів;

- прогноз терміну служби (залишкового ресурсу) елементів споруди;
- оцінка безпеки руху по споруді;
- генерація експертних рекомендацій з планування ремонтів, посилення та реконструкції;
- генерація оптимальної стратегії фінансування капітальних та поточних ремонтів;
- рекомендації з пропуску понаднормативних вантажів;
- техніко-економічний аналіз;
- економічний прогноз, моделювання соціальних наслідків закриття мосту на ремонт;
- підготовка форм статистичного звіту;
- підготовка довідок, які містять будь-які показники, що передбачені банком даних.

Експертна система має сучасну реляційну базу даних, яка складається з великої кількості графічної, текстової, числової інформації. В умовах сьогодення АЕСУМ розглядається як універсальний інструмент системи експлуатації мостів, їх моніторингу і підтримання в безпечному для експлуатації стані.

З іншого боку, міст має бути органічним елементом дорожньої мережі Укравтодору. Слідуючи цій тезі, програмний комплекс АЕСУМ функціонує як система рівня дорожньої мережі, містить необхідну інформацію відносно доріг та передбачає інформаційний зв'язок з програмними комплексами управління дорогами та дорожнім одягом доріг Укравтодору.

АЕСУМ, постійно розвиваючись, сьогодні став одним із взірців інформаційних технологій в галузі мостів. Впровадження програмного комплексу в системі експлуатації автодорожніх мостів Укравтодору, як методичного забезпечення виконавчих підрозділів, що займаються обстеженням, випробовуванням і проектуванням ремонту або реконструкції мостів є революційним кроком, відповідає сьогоденним вимогам управління в експлуатації мостів.

Таблиця 2.1 – Розподіл мостів за експлуатаційним станом за даними від 01.01.2013

Стан	1	2	3	4	5	Всього
В абсолютних показниках, од.показники	896	421	1405	908	335	3965
У відсотках, %	22,6	10,6	35,4	22,9	8,5	100

Таблиця 2.2 – Розподіл мостів за експлуатаційним станом за даними від 01.01.2016

Стан	1	2	3	4	5	Всього
В абсолютних показниках, од.показники	112	758	4288	1751	122	7031
У відсотках, %	1,6	10,8	61,0	24,9	1,7	100

База даних, за станом на 01.01.2012 р. містить 16191 од. автодорожніх мостів підпорядкованих Укравтодору. З цієї загальної кількості паспортизовано і описано в базі даних 3965 мостів. Розподіл паспортизованих мостів за експлуатаційним станом наведено в табл. 2.1.

База даних, за станом на 01.01.2016 р. містить 16191 од. автодорожніх мостів підпорядкованих Укравтодору. З цієї загальної кількості паспортизовано і описано в базі даних 7031 мостів. Розподіл паспортизованих мостів за експлуатаційним станом наведено в табл. 2.2.

Предмет нашого аналізу – вибірка залізобетонних мостів кількістю в 6919 од., що складає 48,4 % від загальної кількості залізобетонних мостів (14305 од.) підпорядкованих Укравтодору. В теорії математичної статистики 48 – відсоткова вибірка вважається достатньо представницькою. Таким чином, результати аналізу вибірки можуть бути достовірно розповсюджені на загальну кількість автодорожніх залізобетонних мостів.

Вибірка з бази даних АЕСУМ отримана за допомогою системи фільтрів і експортована в програму EXCEL. Вибірка містить такі варіаційні ряди:

- параметр швидкості деградації λ ;
- номер експлуатаційного стану;

- залишковий ресурс, роки;
- рік будівництва моста;
- рік виконання капітального ремонту або реконструкції (якщо такі експлуатаційні заходи мали місце);
- тип прогонової будови за технологією спорудження (монолітна, збірно-монолітна).

Нижче, в табл. 2.3 – 2.4 наведені загальні характеристики вибірки.

Таблиця 2.3 – Розподіл мостів по станам в залежності від типу конструкції

Експлуатаційний стан	Стан 2	Стан 3	Стан 4	Стан 5	Всі стани
Монолітні, од.	57	591	301	21	970
Збірно-монолітні, од.	68	199	69	3	339
Збірні, од.	586	3179	1124	63	4952
Немає даних про тип конструкції, од	47	319	257	35	658
Всі типи, од.	758	4288	1751	122	6919

Таблиця 2.4 – Кількість мостів на дорогах державного і місцевого значення

Дороги	Монолітні	Збірно-монолітні	Збірні	Немає даних	Разом
Державного значення					
1. Міжнародні	220 од.	194 од.	1030 од.	121 од.	1565 од.
2. Національні	161 од.	34 од.	739 од.	51 од.	985 од.
3. Регіональні	248 од.	59 од.	1008 од.	117 од.	1432 од.
Загалом	3982 од.				
Місцевого значення					
	354 од.	127 од.	2279 од.	380 од.	3140 од.
Загалом	7060 од.				

2.2 Терміни служби автодорожніх мостів України

2.2.1 Алгоритм дослідження варіаційного ряду

В цьому розділі досліджується варіаційний ряд термінів служби автодорожніх мостів підпорядкованих Державній адміністрації автомобільних доріг України (Укравтодор). Варіаційний ряд термінів служби T , тобто випадкової

величини T , досліджується за класичною схемою оцінки статистичних даних [1]. (Наведену нижче схему оцінки варіаційного ряду в подальшому будемо застосовувати до всіх інших випадкових величин нашої вибірки)

Варіаційний ряд характеризується обсягом вибірки n та розмахом варіювання:

$$R = x_{\max} + x_{\min}, \quad (2.1)$$

де $x_{\max}$, $x_{\min}$ – максимальна і мінімальна варіанти ряду;

n – кількість варіант ряду.

Для варіаційного ряду будемо визначати емпіричну функцію щільності розподілу, яка визначає для кожного значення x відносну частоту подій:

$$F_n(x) = \frac{n_x}{n}, \quad (2.2)$$

де n_x – кількість варіант, які менші від x ;

n – обсяг варіаційного ряду.

Емпірична функція щільності розподілу відображається графічно гістограмою відносних частот – ступінчатим графіком, який складається з прямокутників з основами з частинних інтервалів варіант довжиною $h = x_k - x_{k-1}$ та висот n_k/h . Тут k – кількість інтервалів варіаційного ряду. Для рядів близьких до нормального розподілу орієнтовне значення кількості інтервалів (ціле число) визначається за формулою Стаджерса:

$$k = 1 + 3,322 \lg(n). \quad (2.3)$$

Алгоритм побудови гістограми наведено в таблиці 2.5. В роботі всі обчислення з статистичного аналізу виконуються в програмному комплексі MathCAD. Побудова гістограми реалізується функцією `histogram (nn, sdata)`. Тут `nn`

– кількість інтервалів варіаційного ряду, на які розбивається весь діапазон варіаційного ряду sdata. Ця функція повертає 2 стовбці. У першому містяться середні точки кожного з nn інтервалів, у другому – частоти потрапляння варіант вектора sdata в кожен з nn інтервалів.

Таблиця 2.5 – Алгоритм побудови гістограми

Крок	Операція
1	Ввід початкових даних: рік обстеження та вектор варіаційного ряду років здачі прогонової будови в експлуатацію.
2	Обчислюється вектор термінів служби прогонової будови.
3	За допомогою команди length(sdata) знаходимо кількість елементів вибірки.
4	Призначаємо ім'я для функції histogram(nn, sdata). Ця функція повертає 2 стовбці. У першому містяться середні точки кожного з nn інтервалів, у другому – частоти потрапляння варіант вектора sdata в кожен з nn інтервалів.
5	Використовуючи команду «Графік», задаємо для вісі абсцис значення із першого стовпчика hh ⁽¹⁾ , для вісі ординат із другого стовпця hh ⁽²⁾ .

Алгоритм побудови гістограми на внутрішній мові програмування MathCAD наведено в Додатку Б. Для варіаційного ряду будемо також обчислювати статистичні оцінки:

- медіану – значення середнього елемента варіаційного ряду

$$Me = \begin{cases} x_m; n = 2m - 1 \\ \frac{x_m + x_{m+1}}{2}; n = 2m \end{cases} \quad (2.4)$$

- середнє значення варіант

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i n_i; \quad (2.5)$$

- середнє квадратичне відхилення – квадратний корінь із вибіркової дисперсії

$$\sigma_B = \sqrt{D_B}; \quad (2.6)$$

- вибірккову дисперсію – середня квадратів відхилення варіант від вибіркової середньої з врахуванням відповідних відносних частот

$$D_B = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m n_k (x_k - x_B)^2. \quad (2.7)$$

Всі статистичні оцінки, визначені вище, в програмному комплексі MathCAD мають відповідні стандартні функції:

- медіана (ф. 2.4): `median(sdata)`, де `sdata` – ідентифікатор вектора варіаційного ряду;
- середнє значення варіант (ф. 2.5): `mean(sdata)`, де `sdata` – ідентифікатор вектора варіаційного ряду;
- середнє квадратичне відхилення (ф. 2.6): `stdev(sdata)`, де `sdata` – ідентифікатор вектора варіаційного ряду;
- вибіркова дисперсія (ф. 2.7): `var(sdata)`, де `sdata` – ідентифікатор вектора варіаційного ряду.

Для прикладу наведено варіаційний ряд термінів служби прогонових будов всіх типів в експлуатаційному стані 3, який представлено обсягом $n = 4288$ од. Обчислення статистичних характеристик і побудова гістограми виконані в програмі MathCAD. Результати зведені в таблицю 2.6.

Таблиця 2.6 – Статистичні характеристики вибірки для мостів всіх типів, що знаходяться в 3-у технічному стані

Медіана, років	42
Середній термін служби, років	42
Середнє квадратичне відхилення, років	17
Дисперсія, років ²	278

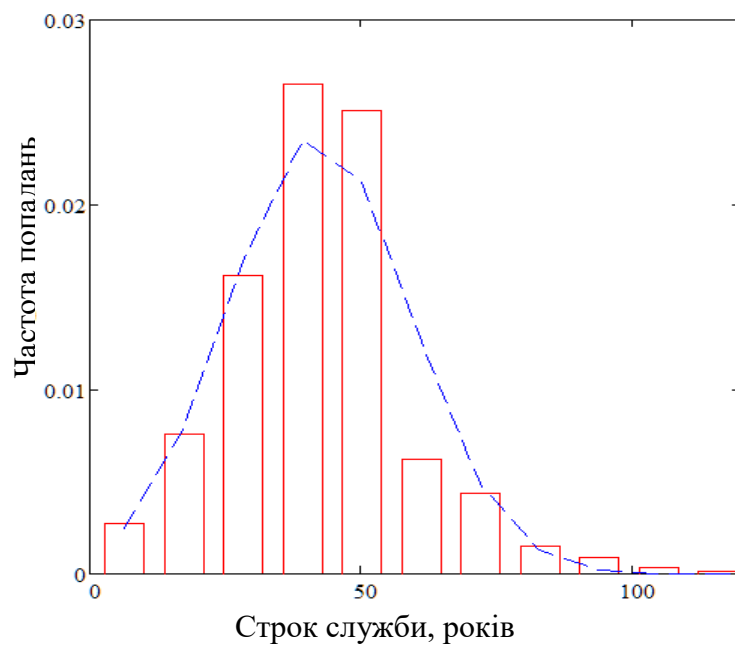


Рисунок 2.1 – Гістограма вибірки строків служби для всіх типів мостів в 3-у технічному стані

Таблиця 2.7 – Статистичні оцінки параметрів для кожної групи даних

	Медіана, роки	$\mu_{\min}$, роки	$\mu_{\max}$, роки	Середнє значення елементів μ , роки	Середнє квадратичне відхилення σ , роки	Дисперсія D , роки ²	Вибірка кількість мостів n , одиниць
	Стан 2						
Монолітні	52	28	66	47	19	375	57
Збірно-монолітні	14	0	42	21	21	428	68
Збірні	32	14	46	30	16	254	586
Всі типи + немає відомостей про тип	33	13	49	31	18	328	758
	Стан 3						
Монолітні	52	39	69	54	15	223	591
Збірно-монолітні	38	22	52	37	15	222	199
Збірні	40	24	56	40	16	242	3179
Всі типи + немає відомостей про тип	42	25	59	42	17	278	4288
	Стан 4						
Монолітні	53	42	68	55	13	171	301
Збірно-монолітні	45	29	63	46	17	393	69
Збірні	44	31	57	44	13	174	1124
Всі типи + немає відомостей про тип	47	33	61	47	14	198	1751
	Стан 5						
Монолітні	60	47	69	58	11	111	21
Збірно-монолітні	-	-	-	-	-	-	3
Збірні	48	35	59	47	12	135	63
Всі типи + немає відомостей про тип	49	37	59	50	12	151	122

2.3 Статистичні дані швидкостей деградації

Статистичні дані швидкостей деградації були занесені до програми MathCAD у вигляді варіаційного ряду швидкості деградації. Для них були отримані статистичні характеристики за формулами (2.1)-(2.7). Алгоритм дослідження варіаційного ряду залишився незмінним відповідно до п.2.3.

Таблиця 2.8 – Середнє значення швидкості деградації

Стан	Швидкість деградації, λ			
	Монолітні мости	Збірно-монолітні мости	Збірні мости	Всі типи
2	0,020	0,090	0,050	0,051
3	0,025	0,045	0,040	0,039
4	0,032	0,041	0,043	0,040
5	0,037	0,077	0,048	0,045
Вибірка кількість мостів, од	970	339	4952	6919

Таблиця 2.9 – Медіана вибірки швидкості деградації

Стан	Швидкість деградації, λ			
	Монолітні мости	Збірно-монолітні мости	Збірні мости	Всі типи
2	0,016	0,045	0,027	0,026
3	0,024	0,033	0,032	0,030
4	0,031	0,037	0,038	0,035
5	0,035	0,064	0,044	0,043

2.4 Аналіз статистичних даних прогонових будов автодорожніх мостів

2.4.1 Аналіз швидкості деградації

Швидкість деградації елементів характеризується показником інтенсивності відмов λ ДСТУ-Н [41]. Цим єдиним параметром визначається марковський стохастичний процес накопичення пошкоджень та модель деградації елемента в функції часу (ф. 2.8):

$$P_i(t) = 1 - 0,008333 \cdot (\lambda t)^5 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (2.8)$$

де P_i – надійність елемента в i -му експлуатаційному стані;

λ – параметр інтенсивності відмов;

e – константа, $e = 2,718$;

t – час.

В нашому випадку марковської стохастичної моделі накопичення пошкоджень та моделі деградації елемента параметр інтенсивності відмов λ прийнято постійним.

Сьогодні немає публікацій українською або російською мовами з досліджень параметра інтенсивності відмов будівельних конструкцій. Тому ми тут, перш за все, звернемося до класичних робіт з теорії надійності де досліджується параметр λ з загальних позицій.

В теорії надійності показано, що у випадку експоненціального закону надійності параметр інтенсивності відмов $\lambda = \text{const}$. Дійсно, експоненціальний закон надійності описується залежністю [9]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (2.9)$$

Для цього закону функція розподілу часу безвідмовної роботи має вид:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (2.10)$$

Відповідно, щільність розподілу часу безвідмовної роботи $f(t) = F(t)$ є

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (2.11)$$

Математичне очікування інтервалу часу t між сусідніми відмовами (експлуатаційними станами) у випадку експоненціального розподілу є перший момент:

$$\mu_t = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt. \quad (2.12)$$

Інтегруванням (2.12) за частинами отримують математичне очікування інтервалу часу t :

$$\mu_t = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.13)$$

Таким чином, для експоненціального закону надійності середнє значення часу експлуатації T виражається залежністю (2.13) при постійній інтенсивності відмов λ .

У випадку пуассонівського потоку відмов – закон розподілу часу T вже не буде експоненціальним. Вид цього закону буде залежати: по перше, від того де на вісі $0t$ розміщується перша відмова i , по друге, від виду функції $\lambda(t)$. Проте, якщо $\lambda(t)$ змінюється в часі незначно, то закон розподілу часу T можна вважати приблизно експоненціальним (2.10) і прийняти середнє значення інтенсивності відмов λ на відрізку часу, що розглядається [9].

2.4.2 Аналіз строків служби автодорожніх мостів України

Вибірка статистичних даних строків служби автодорожніх мостів України, отримана з ПК АЕСУМ, досліджується на відповідність до закону розподілу нормального, логнормального, логістичного та розподілу Коші. Дослідження проводиться за критерієм Колмогорова – Смірнова. Приклад наведено для найчисельнішою вибірки всіх типів мостів в третьому дискретному стані. Далі опишемо алгоритм дослідження.

Маємо вибірку $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ з деякого розподілу F . Провіряємо просту гіпотезу $H_0 = \{ F = F_1 \}$ проти складної альтернативної $H_1 = \{ F \neq F_1 \}$.

Статистика критерію Колмогорова – Смірнова визначається за формулою:

$$T_n = \sqrt{n} \cdot \sup_x (F_n^*(x) - F_1(x)) = \sqrt{n} \cdot \max_{X_i} (F_n^*(X_i) - F_1(X_i)), \quad (2.14)$$

де $F_n^*(x)$ – емпірична функція розподілу;

$F_1(x)$ – теоретична функція розподілу;

n – кількість елементів вибірки, 4288 од.

Критичні значення статистичних критеріїв можна визначити з таблиць або за допомогою функції:

$$C(q) = \sqrt{\frac{-\ln\left(\frac{q}{2}\right)}{2}}, \quad (2.15)$$

де q – рівень значимості, $q = 0,1$.

Основна гіпотеза H_0 приймається у випадку коли $T_n < C(q)$. Для зручності всі отримані дані зводимо в таблицю 2.10.

Таблиця 2.10 – Гіпотеза про вид розподілу

Теоретична функція	Статистика критерію, T_n	Критичні значення статистичного критерію, $C(0,1)$	Гіпотеза, що приймається
Нормального розподілу	3,975	1,224	H_1
Логнормального розподілу	64,613	1,224	H_1
Логістичному розподілу	3,664	1,224	H_1
Розподілу Коші	3,485	1,224	H_1

Статистична вибірка, не відповідає жодному закону розподілу який розглядається. За критерієм Колмогорова – Смірнова найбільша відмінність між теоретичною функцією логнормального розподілу та функцією розподілу вибірки статистичних даних. Найбільшу схожість функція розподілу статистичної вибірки

має з теоретичною функцією розподілу Коші, яка відрізняється на 4 відсотки від функції нормального розподілу, в порівнянні з граничним критерієм. Вид функції Коші і логістичної функції розподілу залежать від двох параметрів: μ – математичне очікування; s – параметр масштабу, що підбирається емпірично. В нашому випадку при мінімальному розходженні зручніше використовувати функцію нормального розподілу яка має два параметри: μ – математичне очікування; σ – середнє квадратичне відхилення, що вже відомі з дослідження варіаційного ряду.

Дослідження виду розподілу показало, що кожна статистична вибірка розподіляється за своїм законом який неможливо описати жодною відомою функцією розподілу. В подальшому будемо використовувати нормальний закон розподілу до статистичних вибірок, як найзручніший і той, що є одним з найбільш наближеним.

Середній термін служби в 4 – 5 станах складає 47 – 50 років. Гістограми і статистичні характеристики випадкової змінної інтенсивності відмов T в 2 – 5 експлуатаційних станах наведені в таблицях п.2.2.

Привертає увагу той факт, що при середньому терміні служби в 47 років середнє квадратичне відхилення складає 14 років. Цей значний розкид значень варіаційного ряду строку служби T демонструє розмаїття умов експлуатаційного утримання і якості будівництва мостів автодорожньої мережі України.

Для інфраструктури України принципово важливою характеристикою є ресурс автодорожніх мостів. З огляду на факт, що середній термін служби залізобетонних мостів складає 47 – 50 років виявляється необхідність детального дослідження в часі процесу погіршення їх технічного стану.

2.5 Статистичний прогноз технічного стану автодорожніх мостів України

В табл. 2.11 представлені систематизовані дані оцінки ресурсу вибірки з 6919 елементів. Таблиця складається з чотирьох трикутних матриць строків служби: залізобетонних мостів всіх типів, монолітних мостів, збірно-монолітних та

збірних. Діагональні елементи матриць представляються натурними даними терміну експлуатації до досягнення i -го експлуатаційного стану. Наддіагональні елементи – значення залишкового ресурсу, обчислені за моделлю деградації (1.27) при натурних середніх значеннях параметра швидкості деградації $\lambda(t)$.

Таблиця 2.11 – Ресурс від початку експлуатації до досягнення стану $i = 2, 3, 4, 5$

Інтенсивність відмов, λ	Ресурс від початку експлуатації до досягнення верхнього рівня стану i , років			
	Стан 2	Стан 3	Стан 4	Стан 5
	Для всіх типів			
0,028	31	45	60	74
0,030		42	56	70
0,036			47	58
0,042				50
	Для монолітних мостів			
0,018	47	70	92	117
0,023		54	73	91
0,031			55	68
0,036				58
	Для збірно-моєтих мостів			
0,040	21	31	42	52
0,034		37	49	62
0,036			46	56
	Для збірних мостів			
0,028	30	42	56	70
0,031		40	54	68
0,038			44	55
0,045				47

Для побудови функції прогнозу технічного стану за фактичними даними середніх значень віку мостів застосуємо кусково-поліноміальну апроксимацію другого степеню (квадратична сплайн функція) у ПЗ MathCAD

$$S(t) = a_i(t - t_i)^2 + b_i(t - t_i) + c_i, t_{i-1} \leq t \leq t_i, i = 2, 3 \dots 5, \quad (2.16)$$

де a_i , b_i , c_i – коефіцієнти функції квадратичної параболи для кожного проміжку.

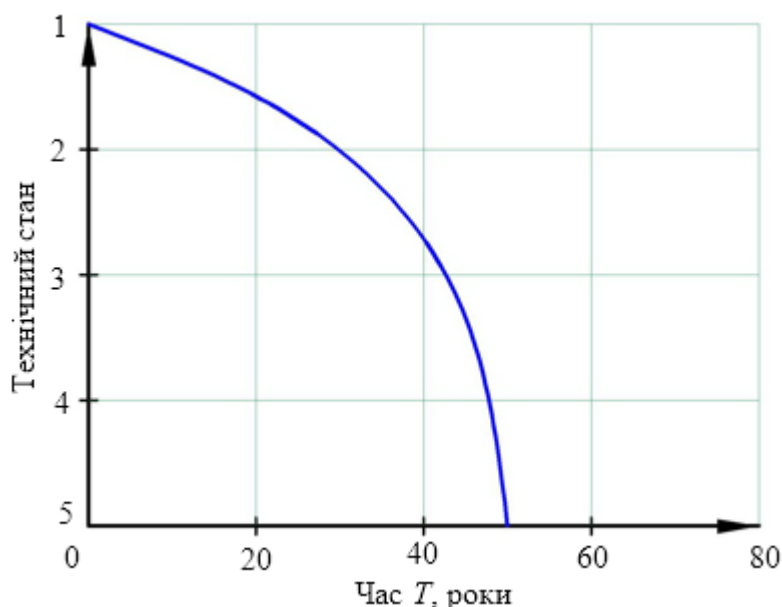


Рисунок 2.2 – Функція прогнозу технічного стану по фактичним даним

2.6 Регресійний аналіз статистичних даних автодорожніх мостів України

Метою регресивного аналізу є вирішення задачі підбору та побудови регресивної моделі прогнозу термінів служби мостів, тобто знаходження виду залежності між незалежною змінною x (технічним станом) та залежною змінною y (віком споруди, роки) та перевірки адекватності і працездатності моделі за критерієм Фішера.

Вихідними даними для регресійної моделі є статистичні дані отримані з Аналітичної експертної системи управління мостами (АЕСУМ).

Розглядаємо парну регресію представлену теоретичною функцією

$$y = f(x), \quad (2.17)$$

де x – незалежна змінна, технічний стан моста $x = 2, 3, 4, 5$;

y – залежна змінна, вік моста в роках.

Пропонуються наступні регресійні моделі табл. 2.12

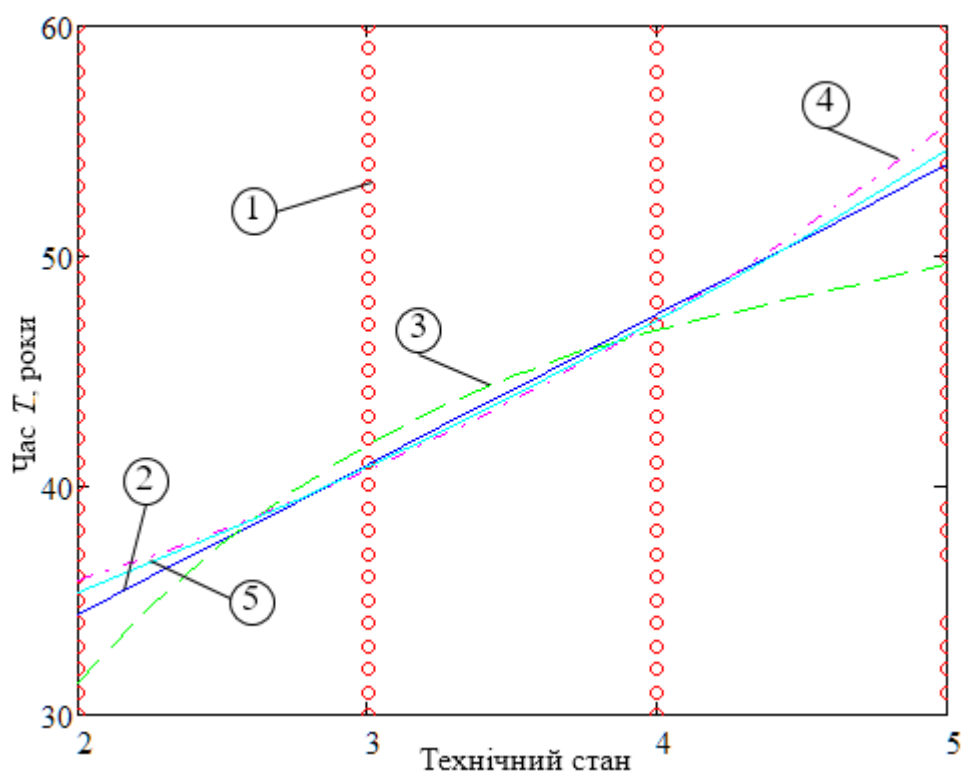
Таблиця 2.12 – Теоретичні регресійні моделі

Лінійна модель	$y = a + bx$	(2.18)
Поліноміальна	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$	(2.19)
Степенева	$y = ax^b$	(2.20)
Експоненційна	$y = ae^{bx}$	(2.21)

де a, b – коефіцієнти регресії (параметри моделі).

Для автоматизації статистичного аналізу даних в ПЗ MathCAD, на вбудованій мові програмування, розроблений алгоритм (Додаток Е) побудови регресійної моделі прогнозу термінів служби мостів.

Порівняння регресійних моделей представлено на рис. 2.3 і табл. 2.13.



1 – натурні дані; 2 – лінійна модель (2); 3 – поліноміальна 3-го степеня (3);
4 – степеневая (4); 5 – експоненційна (5)

Рисунок 2.3 – Теоретичні функції регресійної моделі

Таблиця 2.13 – Прогноз термінів служби всіх типів мостів за регресійною моделлю

Модель	Час досягнення технічного стану, роки			
	2	3	4	5
Лінійна	34	42	47	54
Поліноміальна 3-го степеню	31	42	47	50
Степенева	36	41	47	56
Експоненціальна	35	41	47	55
Середнє значення елементів μ	31	42	47	50

Моделі, що розглядаються не мають суттєвих розходжень, тому для аналізу була обрана регресійна модель, яка наближається до середніх значень елементів для кожного технічного стану. Поліноміальна модель 3-го степеню співпадає з середніми значеннями елементів вибірки. Модель описується функцією

$$f(x) = -20,018 + 39,366 \cdot x - 7,999 \cdot x^2 + 0,583 \cdot x^3, \quad (2.22)$$

де x – номер технічного стану для якого прогнозується вік в роках.

Коефіцієнт детермінації є однією з найбільш ефективних оцінок адекватності регресійної моделі, тобто мірою якості рівняння регресії

$$R^2 = \frac{\sigma_{\text{fact}}^2}{\sigma_y^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (f(x_i) - y_\mu)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - y_\mu)^2}, \quad (2.23)$$

де σ_{fact}^2 – сума квадратів відхилень, обумовлена регресією (факторна дисперсія), роки²;

σ_y^2 – повна сума квадратів (дисперсія залежної змінної), роки²;

y_μ – середній вік мостів за статистичними даними, роки;

$f(x_i)$ – теоретична функція регресійної моделі за якою визначається вік для кожного моста окремо, роки;

y_i – вік кожного моста окремо за статистичними даними, роки;

$N = 6896$ – кількість мостів у вибірці, $i = 1, 2, \dots, N$.

Коефіцієнт детермінації для регресійної моделі прогнозу технічного стану поліномом 3-го степеню $R^2 = 0,072$ наближається до нуля, що означає незначну похибку між прогнозом за регресійною моделлю та апроксимацією середніх значень. В цьому випадку більш доцільно використовувати простіший інструмент прогнозу апроксимацією середніх значень табл. 2.11, форм. 2.16.

Якість рівняння регресії в цілому будемо оцінювати за критерієм Фішера, який застосовується для перевірки статистичних гіпотез. Висуваємо дві гіпотези, що конкурують:

- нульова гіпотеза H_0 полягає в припущенні, що всі коефіцієнти теоретичного рівняння регресії рівні нулю, тобто $a_1 = a_2 = a_3 = 0$, $a_0 = y_{\mu}$;
- альтернативна гіпотеза H_1 полягає в припущенні, що один з коефіцієнтів регресії статистично значимо відрізняється від нуля.

Розрахункове значення критерію Фішера знаходиться за формулою

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{N - k - 1}{k}, \quad (2.24)$$

де R^2 – коефіцієнт детермінації;

$N = 6896$ – кількість мостів у вибірці;

k – кількість незалежних перемінних в рівнянні регресії, $k = 1$ для парної регресії.

Для перевірки гіпотези H_0 розрахункове значення критерія Фішера порівнюється з табличним для ймовірності помилки першого роду $\alpha = 0,05$.

$$F = 533,791 > F_{tabl} = 3,843. \quad (2.25)$$

Таким чином приймається альтернативна гіпотеза H_1 . Побудована модель на основі критерію Фішера в цілому адекватна і всі коефіцієнти регресії значущі. Така модель може бути використана для прийняття рішень і здійснення прогнозів терміну служби автодорожніх мостів.

2.7 Стратегія експлуатації та задачі оптимізації вартості життєвого циклу

Рішення, що пов'язані з реалізацією покращення транспортної мережі, зазвичай вимагають розгляду декілька альтернативних рішень. Ще на стадії проекту, а потім і будівництва, багато факторів впливають на прийняття того чи іншого рішення щодо реалізації зменшення затрат. Витрати на проект і будівництво є початковими протягом життєвого циклу і можуть бути меншими за видатки на обслуговування, ремонт, реконструкцію або заміну моста.

Вибір стратегії експлуатації дорожньої мережі є в рамках політики управління і обирається в залежності від технічного стану транспортних споруд та фінансування. Задачу вибору стратегії необхідно зводити до мінімуму витрат на технічне обслуговування і максимізувати ефективність операцій з технічного обслуговування. Цей вибір цікавий тим, що потім дозволяє ранжувати за пріоритетами об'єкти управління життєвим циклом.

Сьогодні в практиці експлуатації мостів прийнято розглядати три стратегії (рис. 2.4.):

А. Нічого не робити до виходу моста з експлуатації і розробити план його заміни.

В. Нічого не робити, поки технічний стан моста не досягне обмежено працездатного стану, що вимагає ремонту на дорогах державного значення.

С. Здійснення превентивних заходів щодо зниження швидкості деградації.

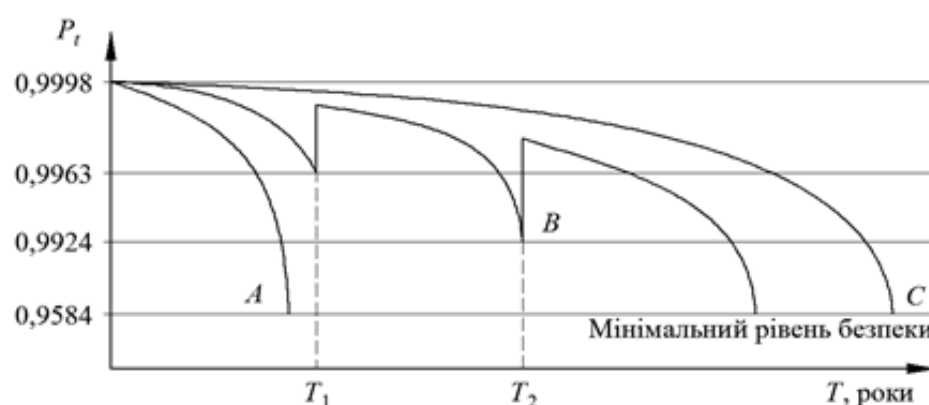
Вибір стратегії експлуатації залежить від:

- поточного технічного стану моста;
- несної здатності елементів моста;

- інформації в базі даних;
- строку в який планується експлуатувати міст;
- кривій деградації для кожного елемента моста;
- моменту коли ремонт моста стає необхідним для подальшої експлуатації;
- кількості витрат на обслуговування в порівнянні з різними стратегіями експлуатації;
- стратегій і історії експлуатації в минулому.

Переваги стратегій експлуатації, що засновані на вартості життєвого циклу:

- можливість оцінки експлуатаційних витрат в майбутньому ще на стадії проектування;
- формування бази даних життєвого циклу мостів, з можливістю оцінки витрат на обслуговування в залежності від вибраної стратегії експлуатації;
- прогнозування бюджету необхідного для обраної стратегії експлуатації мостів на рівні мережі в будь-який проміжок часу;
- створення оптимальної програми експлуатації, мінімізуючи витрати протягом всього строку служби моста.



T_1 – час першого ремонту, роки; T_2 – час другого ремонту, роки.

Рисунок 2.4 – Графік кривих деградації в залежності від обраної стратегії експлуатації

2.8 Висновки до розділу 2

1. Виконаний статистичний аналіз технічного стану автодорожніх мостів України дає можливість стверджувати, що система експлуатації сьогодні має достовірну базу даних яка може слугувати базисом в розробці новітніх моделей оцінювання і прогнозування ресурсу.

2. Статистичний аналіз дає середній строк служби в 4 – 5 станах 47 – 50 років. Привертає увагу той факт, що при цьому середнє квадратичне відхилення складає 14 років. Цей значний розкид значень варіаційного ряду строків служби демонструє розмаїття умов експлуатаційного утримання і якості будівництва мостів автодорожньої мережі України. Встановлені тут факти низької довговічності автодорожніх мостів є предосторогою до не критичного застосування чинної моделі оцінки залишкового ресурсу, мотивацією розробки нових моделей прогнозування життєвого циклу.

3. Виконаний статистичний аналіз строків служби виявив небезпечні завищення залишкового ресурсу моделлю ДСТУ-Н [41] для елементів мостів що знаходяться в 4 – 5 експлуатаційних станах. В чинній моделі показник інтенсивності відмов (швидкість деградації) приймається постійним, незалежним від часу $\lambda = \lambda(t)$. Дослідження виконане в цьому розділі показало, що показник інтенсивності відмов є змінним в часі. Очевидно, що модель ДСТУ-Н потребує модернізації.

4. Нам відомі три найбільш розповсюдженні моделі експлуатації мостів від яких залежить їх надійність та швидкість деградації:

А. Міст після введення в експлуатацію не обслуговують. Термін служби конструкції обмежений, швидкість деградації стрімко зростає в часі протягом всього періоду експлуатації.

В. Після введення в експлуатацію, міст регулярно обстежують і при переході в обмежено працездатний стан ремонтують. Ремонтів може бути декілька за весь життєвий цикл споруди. Термін служби залежить від кількості і якості

ремонтів. Швидкість деградації є постійною до часу проведення експлуатаційних заходів (капітальний ремонт або реконструкція), після чого змінюється.

С. З початку введення мосту в експлуатації він знаходиться під постійним наглядом, виконуються превентивні експлуатаційні заходи. В такому разі швидкість деградації буде постійною протягом всього життєвого циклу. Термін служби найдовший серед всіх згаданих стратегій експлуатації.

5. Результати досліджень даного розділу викладено у наступних публікаціях [21, 23, 25, 27, 29].

РОЗДІЛ 3

УЗАГАЛЬНЕННЯ МАРКОВСЬКОЇ ФЕНОМЕНОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ

3.1 Фундаментальні принципи розбудови марковських моделей накопичення пошкоджень

Більше 100 років тому, було опубліковано стохастичну теорію [60] академіка Російської академії наук А.А. Маркова. За цей час теорія інтенсивно розвивалася по всьому світу і стала базою не тільки для моделей накопичення пошкодження, а і в багатьох інших напрямках науки – від управління економікою до медичних прогнозів.

В загальному випадку випадковий процес $X(t)$, $t \in T$ називається марковським, якщо для будь-яких значень $t_1 < t_2 < \dots < t_N$, що належать T , визначена одновимірна умовна функція розподілу.

$$F_1(x_N; t_N / x_1, \dots, x_{N-1}; t_1, \dots, t_{N-1}) = F_1(x_N; t_N / x_{N-1}; t_{N-1}). \quad (3.1)$$

Тобто, процес є марковським, якщо стан випадкового процесу $X(t)$ в поточний момент часу t_N залежить лише від стану в момент часу t_{N-1} .

Поширеними критеріями класифікації марковських випадкових процесів є тип області T визначення аргументу і тип простору станів S .

В моделях накопичення пошкоджень, що застосовуються для прогнозування довговічності транспортних споруд, прийнято тип області T приймати за час в роках, а тип простору S , приймати за процес деградації, який може бути визначений технічним станом споруди.

Звичайно розрізняють 4 основні класи марковських випадкових процесів (табл. 3.1.): ланцюг Маркова; марковські послідовності; дискретні марковські процеси; неперервні марковські процеси.

Таблиця 3.1 – Класифікація марковських процесів [17]

Область S , технічний стан	Область T , роки	
	Дискретна	Неперервна
Дискретна	Ланцюг Маркова	Марковська послідовність
Неперервна	Дискретний марковський процес	Неперервний марковський процес

Найпоширеніша модель накопичення пошкоджень базується на ланцюгу Маркова. Вважається, що марковські послідовності, з достатньою для практичних цілей точністю, можна розглядати як ланцюги Маркова з неперервним часом [2, 9, 74, 80]. Вибір саме ланцюга Маркова як моделі деградації в дослідженнях багатьох вчених пояснюється такими перевагами:

- розгляд відношення дискретного стану до наслідків деградації в повністю ймовірнісний спосіб;
- можливість опису паралельних процесів деградації, що залежать від часу (наприклад: корозія арматури і одночасно руйнування захисного шару), як захист споруд лакофарбовим покриттям, які знаходяться в процесі зносу;
- можливість ефективно об'єднати послідовно процеси деградації, такі, наприклад, як депасивація арматури від карбонізації та забруднення хлоридами;
- служити інструментом оцінки ризику шляхом чисельного визначення ймовірності виникнення подій (відмов).

В рамках дослідження ставиться задача розбудови стохастичної ймовірнісної моделі деградації елемента споруди у процесі експлуатації. Систему відмов, що є наслідком зносу елемента споруди, будемо розглядати як потік випадкових дискретних подій марковського ланцюга. Розглядається процес з «якісними станами». Роль випадкової події відіграє «випадковий дискретний стан системи».

Еволюцію системи будемо описувати *марковським дискретним процесом з безперервним часом* [2, 10]. Система може знаходитися послідовно у станах $S_1, S_2, \dots, S_n$, а переходи з одного дискретного стану в інший здійснюються у моменти часу $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}$.

Ми сформулюємо марковський процес для моделей, в яких блукання по дискретним станів здійснюється тільки в одному напрямку: від стану з меншим, до стану з більшим номером. При цьому можливий перехід не тільки в сусіднє стан з S_i в S_{i+1} , а й з "проскакуванням" через сусідні стани, наприклад з S_i в S_{i+2} .

У термінах дискретного марковського процесу задача зводиться до пошуку безумовних ймовірностей перебування системи $\mathbf{S}$ на довільному кроці k в стані S_i :

$$p_i(k) = \text{Prob}[S(k) = S_i]; k = 1, 2, \dots, n; i = 0, 1, \dots, n-1. \quad (3.2)$$

Ймовірності $p_i(k)$ виражаються через умовні ймовірності переходу системи $\mathbf{S}$ на кроці k в стан S_j , за умови, що на кроці $k-1$ вона була в стані S_i :

$$p_{ij}(k) = \text{Prob}[S(k) = S_j | S(k-1) = S_i]; i, j = 0, 1, \dots, n-1. \quad (3.3)$$

Як видно, в загальному випадку ймовірності переходу (3.3) складають квадратну *матрицю переходів* розміром $n \times n$, Позначимо її $\mathbf{P}$. На головній діагоналі матриці $\mathbf{P}$ стоять ймовірності затримки системи в даному стані S_i на кроку k , які позначаються $p_{ii}(k)$, на бічних діагоналях стоять $p_{ij}(k)$ – ймовірності переходу системи із стану S_i в стан S_j .

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

В силу того, що на кожному кроку система може знаходитися тільки в одному з двох взаємно виключних станів, сума всіх ймовірностей однієї строки матриці $\mathbf{P}$ дорівнює одиниці:

$$\sum_{j=1}^n p_{ij}(k) = 1. \quad (3.5)$$

До матриці переходів додається вектор початкових ймовірностей, яким задається розподіл абсолютних ймовірностей на початку процесу

$$p_0 = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T. \quad (3.6)$$

Пошук ймовірностей переходу, які містить стохастична матриця $\mathbf{P}$ є домінантою, центральним місцем в розробці моделі за дискретним марковським процесом [2, 9, 94, 93]. Коли матриця $\mathbf{P}$ знайдена, за відомими значеннями умовних ймовірностей переходу і початковому значенню безумовної ймовірності перебування системи в стані S_i всі інші безумовні ймовірності знаходяться за рекурентною формулою:

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_i(k-1)p_{ij}; k = 1, 2, \dots, n; i, j = 0, 1, \dots, n. \quad (3.7)$$

Матрицею $\mathbf{P}$ разом з вектором початкових ймовірностей p_0 повністю характеризується марковський ланцюг.

Далі ставиться задача: знайти ймовірності подій марковського ланцюга $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$, як функцій часу. Зауважимо, що ми розглядаємо *однорідний* марковський ланцюг, тобто такий у якого перехідні ймовірності не є функцією номера кроку [2, 9, 12, 74, 75, 80].

В рамках дослідження розглядається особливий клас марковських моделей характерний тим, що в процесі деградації події відбуваються тільки в одному напрямку від подій з меншим номером до події з більшим номером. В цьому випадку матриця перехідних ймовірностей є наддіагональною і має вид

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ 0 & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Розглянемо ланцюг відмов із п'яти подій. Як характеризується кожна із відмов зараз не має значення. Важливо, по-перше те, що ланцюг має п'ять можливих станів: S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 , а по друге, що стани зв'язані між собою так, як показано графом ланцюга на рис.1.2.

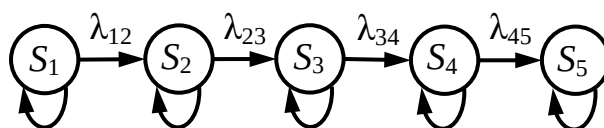


Рисунок 3.1 – Лінійний граф процесу деградації елемента

Ймовірність здійснення кроку k на якому система перейде зі стану S_i до стану S_{i+1} характеризується щільністю ймовірностей переходу: $\lambda_{i,i+1}$.

Знайдемо функцію $p_1(t)$ – ймовірність того, що елемент у момент часу $t+\Delta t$ знаходиться в стані S_1 . Для цього дамо t мале прирощення Δt . Необхідно, щоб за час Δt елемент не залишив стан S_1 , тобто щоб не сталася відмова типу S_2 . Ймовірність цього знаходиться як добуток ймовірності $p_1(t)$ на умовну ймовірність того, що за час Δt елемент перейде в стан S_2 . Ця ймовірність дорівнює $1-\lambda_{12}\Delta t$. Застосовуючи правило додавання ймовірностей отримаємо:

$$p_1(t + \Delta t) = p_1(t)(1 - \lambda_{12}\Delta t). \quad (3.9)$$

Розкриємо дужки у цьому виразі, перенесемо $p_1(t)$ у ліву частину і поділимо обидві частини рівняння на Δt , отримаємо:

$$\frac{p_1(t + \Delta t) - p_1(t)}{\Delta t} = -\lambda_{12} p_1(t). \quad (3.10)$$

Далі спрямуємо Δt до нуля і перейдемо до межі:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_1(t + \Delta t) - p_1(t)}{\Delta t} = -\lambda_{12} p_1(t). \quad (3.11)$$

Ліва частина цього виразу є похідна функції $p_1(t)$:

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = -\lambda_{12} p_1(t). \quad (3.12)$$

Таким чином отримано диференціальне рівняння, якому має задовольняти функція $p_1(t)$.

Диференціальне рівняння для визначення функції $p_2(t)$ отримується аналогічно, з тією різницею, що у момент часу $t + \Delta t$ маємо для стану S_2 дві ситуації:

- в момент t елемент був у стані S_1 , а за час Δt перейшов у стан S_2 ;
- або ж у момент t елемент вже був у стані S_2 і за час Δt не перейшов у стан S_3 .

Враховуючи викладене, диференціальне рівняння для $p_2(t)$ записується у вигляді:

$$\frac{dp_2(t)}{dt} = -\lambda_{23} p_2(t) + \lambda_{12} p_1(t). \quad (3.13)$$

Далі всю систему диференціальних рівнянь складають за одним взірцем:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = -\lambda_{i,i+1} p_i(t) + \lambda_{i-1,i} p_{i-1}(t); i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.14)$$

Для нашого випадку $n = 5$, рівняння для отримання шуканих функцій $p_i(t)$ мають вид:

$$\begin{cases} \frac{dp_1(t)}{dt} = -\lambda_{12} p_1(t); \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = -\lambda_{23} p_2(t) + \lambda_{12} p_1(t); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = -\lambda_{34} p_3(t) + \lambda_{23} p_2(t); \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = -\lambda_{45} p_4(t) + \lambda_{34} p_3(t); \\ \frac{dp_5(t)}{dt} = \lambda_{45} p_4(t). \end{cases} \quad (3.15)$$

Ці рівняння ймовірностей станів відомі як рівнянням Колмогорова – Чепмена, що описують еволюцію дискретного марковського процесу з неперервним часом. У загальному випадку вони мають вигляд:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_k \lambda_{ik} p_k(t); i, j, k = 1, 2, \dots, n. \quad (3.16)$$

В матричній формі рівняння мають вид:

$$\frac{d\mathbf{P}(i, t)}{dt} = \mathbf{P}(i, t) \cdot \mathbf{E}, \quad (3.17)$$

де $\mathbf{P}(i, t)$ – матриця ймовірності подій марковського ланцюга $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ як функцій часу;

$\mathbf{E}$ – матриця інтенсивності переходів (швидкості деградації).

До рівнянь 3.15 – 3.16 приєднуються початкові умови:

$$\text{при } t = 0 \quad p_1(t) = 1; p_2(t) = p_3(t) = p_4(t) = 0. \quad (3.18)$$

Крім того, в розв'язку системи диференціальних рівнянь (3.15 – 3.16) використовується умова нормування:

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1, \quad (3.19)$$

яка є наслідком того, що події марковського ланцюга не сумісні і створюють повну групу.

Процес деградації залізобетонних мостів (рис. 3.1) прийнято, як нормативний [41]. Для цього графу (рис. 3.1) та системи звичайних диференціальних рівнянь (3.15) отримаємо аналітичний розв'язок при початкових умовах (3.18).

Інтенсивність відмови нам відома з статистичних даних, тому виражаємо через неї надійність:

$$\lambda(t) = -\frac{\frac{dp(t)}{dt}}{p(t)} = -\frac{d \ln p(t)}{dt}. \quad (3.20)$$

Проінтегруємо вираз, отримаємо

$$\ln p(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt, \quad (3.21)$$

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (3.22)$$

В нашому випадку для графа рис. 3.1 та системи рівнянь 3.15

$$p_1(t) = e^{-\lambda_{12}t}. \quad (3.23)$$

Рівняння (4) підставляємо в друге із системи (3.15) та інтегруємо с початковими умовами $p_2(0) = 0$

$$p_2(t) = \frac{\lambda_{12}(p_1(t) - p_1(t)e^{-\lambda_{23}t})}{\lambda_{23}}. \quad (3.24)$$

Повторюємо для третього та четвертого рівняння системи

$$p_3(t) = \frac{\lambda_{23}(p_2(t) - p_2(t)e^{-\lambda_{34}t})}{\lambda_{34}}. \quad (3.25)$$

$$p_4(t) = \frac{\lambda_{34}(p_3(t) - p_3(t)e^{-\lambda_{45}t})}{\lambda_{45}}. \quad (3.26)$$

Для пошуку функції $p_5(t)$ не потрібно інтегрувати останнє рівняння системи (3.15) – її знайдемо з умови (3.5)

$$p_5(t) = 1 - (p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t)). \quad (3.27)$$

Матриця ймовірності подій марковського ланцюга (матриця переходів) $\mathbf{P}(i, t)$ в (3.16) очевидно залежить від часу t . Підкреслимо, що тут час (роки) рахується від початку процесу. Що стосується матриці інтенсивності переходів (швидкості деградації) $\mathbf{E}$ – то вона, в загальному випадку, також є залежною від часу. Однак, придатні для практичного застосування моделі отримують з незалежною від часу матрицею $\mathbf{E}$ і навіть у випадках $\mathbf{E} = \text{const}$.

Інтегруванням системи рівнянь (3.16) отримують шукані ймовірності станів – функції часу. Початкові умови для інтегрування наведені в (3.18).

Розв'язок рівнянь (3.19) дає змогу записати *матрицю ймовірності переходів* в формі, де ймовірності залежать від змінної часу:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1(t) & 1-p_1(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_2(t) & 1-p_2(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3(t) & 1-p_3(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_4(t) & 1-p_4(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Надійність елементу визначається, як ймовірність того, що у момент часу t елемент вийде зі стану S_i , тобто спричиниться відмова $i + 1$. Для обчислень використовуються залежність

$$p_k(t) = \sum_{k=i-1}^n p_{k-1} p_{ik}(t), \quad (3.29)$$

де i – номер поточного стану;

n – кількість дискретних станів протягом життєвого циклу елемента;

p_k – абсолютна надійність елемента у k -тому дискретному стані;

$p_{ik}(t)$ – перехідна ймовірність k -того дискретного стану.

3.2 Вплив швидкості деградації на оцінку залишкового ресурсу

В цьому підрозділі ми звертаємося до теоретичного дослідження швидкості деградації (інтенсивності відмов) в функції часу марковської моделі накопичення пошкоджень. Мотивацією дослідження є принципова важливість цього параметра – єдиного керуючого параметра моделі в оцінці ресурсу елемента. З іншого боку маємо констатувати, що в літературі відсутні дослідження зміни параметра в функції часу експлуатації елементів будівельних конструкцій.

Для дослідження скористаємося сучасним підходом в теорії надійності в функції часу (*time-dependent reliability*), так званою «*функцією інтенсивності відмов*» (*hazard function*) [1, 2, 5, 6, 4, 9, 78, 89, 107, 113, 123, 137]. В сучасній класичній теорії надійності поняття випадкової функції вводиться як ще одна *міра надійності* [137]. Дослідження обмежується залізобетонними елементами мостів.

Визначення понять. В сучасній теорії надійності поняття *«функція інтенсивності відмов»* сьогодні є класичним і вводиться як ще одна *міра надійності* в функції часу [137, 155]. Тут кількісною мірою надійності, параметром надійності, виступає ймовірність того, що відмова елемента споруди не відбудеться *протягом часу експлуатації* [89, 127, 142, 145, 149]. В інших термінах – це функція часу, яка дає аналітичну залежність росту ймовірності відмови протягом життєвого циклу експлуатації.

Поняття «функція інтенсивності відмов» відомо давно, застосовувалось вже на початку минулого сторіччя в багатьох сферах, починаючи з електротехнічних пристроїв або медичних прогнозів до соціальних проблем, наприклад в такій екзотичній задачі як «прогноз часу повернення рецидивіста до тюрми». Проте в оцінці надійності конструкцій термін вперше з'являється в аеронавтиці США тільки в 50-х роках [104].

В російській технічній літературі поняття функції інтенсивності відмов фігурує в монографіях В.В. Болотіна [4] (1971р.) та [6] (1982 р.), Е.С. Вентцель [9] (1972 р). Типовий графік функції інтенсивності відмов» наведено в монографії Болотіна В.В. [4, 5]. Цей символічний графік (рис. 3.2) має три характерних відтинки:

- відносно невеликий відтинок часу t_0 , так званий, період *«пристосування»* системи коли інтенсивність відмов зменшується до приблизно постійного значення;

- центральний великий відтинок часу $t_1 - t_0$, що відповідає практично всьому життєвому циклу безпечної експлуатації, характерний приблизно постійним значенням функції інтенсивності відмов;

- нарешті невеликий кінцевий відтинок часу $t_2 - t_1$ різкого збільшення значення функції інтенсивності відмов, тобто збільшення ризику відмови системи.

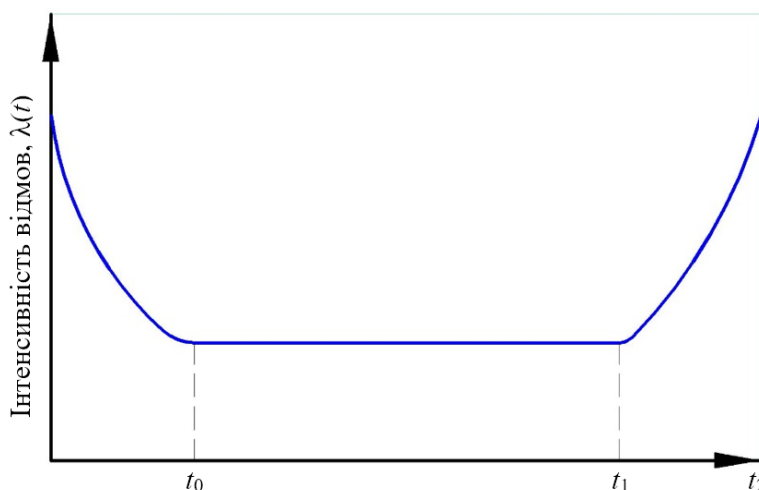


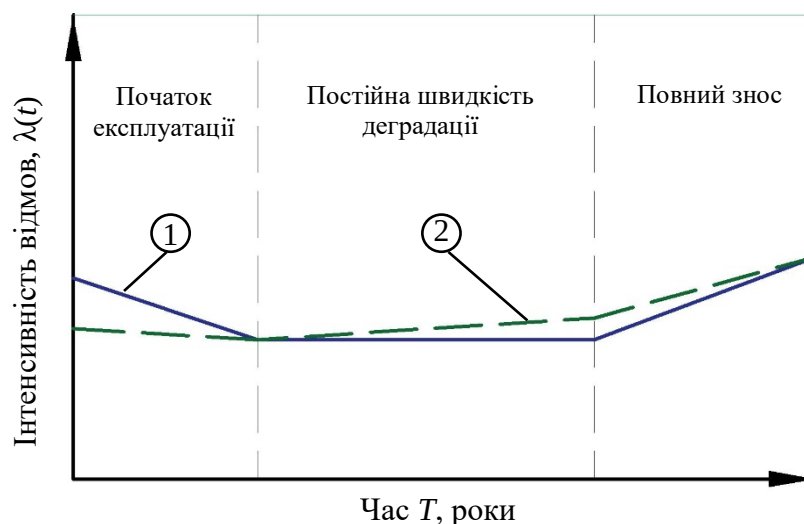
Рисунок 3.2 – Типова крива функції інтенсивності відмов [4, 5]

Подібний вид мають криві функції інтенсивності відмов в класичних зарубіжних монографіях з надійності систем [89, 127, 142, 145, 149]. В англomовній літературі крива має усталену назву – «*U-подібна крива*» (*bathtub curve*).

Виконаний аналіз великої кількості публікацій з проблеми дає підстави стверджувати що *U-подібна крива* функції інтенсивності відмов наведена В.В. Болотіним характерна для технічних систем механічних, електричних, електронних тощо. Що стосується кривої для елементів будівельних конструкцій то вона має дещо іншу форму – визначення яку саме – і є завданням цього дослідження.

В літературі англійською, французькою, російською мовами ми не знайшли прикладу кривої функції інтенсивності відмов елементів споруд. Показово, що навіть в монографії В.В. Болотіна [4] яка має назву «Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений» не наведено ні одного прикладу кривої з числовими параметрами для елементів будівельних конструкцій.

Натомість є публікації в яких взагалі виключається з розгляду період пристосування, а сама крива апроксимується ломаною лінією з двох відтинків, як наприклад, в монографіях [5, 145] (рис.3.3) де показані графіки функції інтенсивності відмов для електричних та механічних систем.



1 – функція інтенсивності відмов для електричних систем; 2 – функція інтенсивності відмов для механічних систем

Рисунок 3.3 – Функції інтенсивності відмов для електричних та механічних систем [145]

Очевидно, що параметричні характеристики функції інтенсивності відмов є ключом для коректного реалістичного прогнозу залишкового ресурсу елементів споруд. Нам необхідні теоретичні знання не тільки середньої інтенсивності відмов, а і визначення часу (періоду) життєвого циклу експлуатації протягом якого інтенсивності відмов є постійною. Для цього є потреба у визначенні не тільки виду функції інтенсивності відмов, а також її числових параметрів. Ці і деякі супутні завдання дослідження вирішуються за моделлю представленою нижче.

Модель. Скористаємося достатньо відомою сьогодні моделлю теоретичні принципи якої наведено в монографіях [5, 4, 9, 137]. Тут ми приведемо детальний виклад отримання формули функції. Введемо необхідні змінні та функції розподілу:

- t – значення випадкової змінної часу;
- $f(t)$ – щільність розподілу часу;
- $f(t)dt$ – ймовірність відмови на відтинку $[t, t + dt]$;
- $F_T(t)$ – інтегральна функція часу на відтинку $[0, t]$

$$F_T = \int_0^t f(\tau) d\tau = P(T \leq t), \quad (3.30)$$

де T – очікуваний час життєвого циклу експлуатації;

P – ймовірність;

$R(t)$ – функція надійності – ймовірність того, що *не відбудеться відмова* на відтинку $[0, t]$

$$R_T = \int_t^\infty f(\tau) d\tau = P(T > t). \quad (3.31)$$

Визначення надійності протягом життєвого циклу експлуатації обертається навколо ідеї, що час служби елемента, тобто час до відмови (це еквівалентні поняття), є випадковою величиною і її значення описується інтегральною функцією розподілу (3.22) та щільністю ймовірності життєвого циклу експлуатації в термінах часу:

$$f(t) = \frac{d}{dt} [F_T(t)]. \quad (3.32)$$

Очікуваний час життєвого циклу T виражається як інтеграл від функції надійності [9, 155]:

$$T = \int_0^\infty \tau f(\tau) d\tau = \int_0^\infty R(t) dt. \quad (3.33)$$

Тут, в залежності (3.25), другий інтеграл отримано шляхом інтегрування першого по частинам.

Інтенсивність відмов є мірою того, як ймовірність відмови змінюється в залежності від часу. Ймовірність відмови в будь-якому заданому інтервалі $[t, t+\delta t]$ є ймовірність того, що час життєвого циклу T знаходиться в заданому інтервалі

$$P(t < T \leq t + \delta t) = F(t + \delta t) - F(t) = R(t) - R(t + \delta t). \quad (3.34)$$

Зауважимо, що вираз $[R(t_1) - R(t_2)]$ є еквівалентом $[F(t_2) - F(t_1)]$.

Аналітично параметр умовної ймовірності $\lambda(t)$ відмови може бути інтерпретованим як миттєва частота відмов

$$\lambda(t) \cdot \delta t \approx P(T \leq t + \delta t \mid T > t). \quad (3.35)$$

Таким чином, функція інтенсивності відмов представляється як відношення ймовірності відмови на відтинку $[t, t + \delta t]$ до ймовірності того, що не відбудеться відмова на відтинку $[0, t]$

$$\lambda(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \delta t)}{\delta t P(T > t)} = \frac{f(t)}{R_t(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}. \quad (3.36)$$

З викладеного можна бачити, що чотири функції $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ та $\lambda(t)$ які залучаються до визначення інтенсивності відмов аналітично зв'язані між собою. Три з цих типових співвідношень наводяться нижче, в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Формули визначення інтенсивності відмов

$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R_t(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$	(3.37)
$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d[1 - R(t)]}{dt} = -R'(t)$	(3.38)
$\lambda(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{d \ln R(t)}{dt}$	(3.39)

Функція інтенсивності відмов залізобетонних елементів мостів України. Аналізуються функції розподілу часу служби якими можливо представити функцію інтенсивності відмов адекватну історичним даним експлуатації залізобетонних мостів України. Для аналізу прийнято три типи розподілів: нормальний; логістичний та Вейбулла (табл. 3.3). Нормальний та логістичний закони розподілу добре відомі в теорії споруд, традиційно застосовуються в аналізі надійності будівельних конструкцій. Що стосується закону розподілу Вейбулла то він, як правило, застосовується для специфічних задач теорії ризиків – задачі розбудови функції інтенсивності відмов в тому числі [9, 127].

Вважається, що найбільш адекватним розподілом часу очікування в кожному стані, який дає можливість включити до розгляду ефекти природного старіння елемента, є саме розподіл Вейбулла. Інтегральна функція двохпараметричного розподілу Вейбулла задається виразом

$$F(t) = 1 - \exp[-(\Psi t)^\varphi], \quad (3.40)$$

і щільність ймовірності (диференціальна функція розподілу) – виразом

$$f(t) = \Psi \varphi (\Psi t)^{\varphi-1} \exp[-(\Psi t)^\varphi], \quad (3.41)$$

де Ψ – коефіцієнт масштабу, $\Psi > 0$;

φ – коефіцієнт форми;

$\varphi > 1$ – випадок росту інтенсивності відмов з часом.

Коефіцієнти визначаються через середні значення μ та середньоквадратичне відхилення σ .

Внесемо залежності (3.40) та (3.41) в формулу (3.37) і отримаємо функцію інтенсивності відмов в якій час очікування представлено розподілом Вейбулла

$$\lambda w(t) = \frac{\psi \varphi(\psi t)^{\varphi-1} \exp(-\psi t)^{\varphi}}{\exp(-\psi t)^{\varphi}} = \psi \varphi(\psi t)^{\varphi-1}. \quad (3.42)$$

Звід моделей що розглядаються наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Моделі визначення інтенсивності відмов

Тип розподілу	Модель визначення інтенсивності відмов	
Нормальний	$\lambda_{\text{norm}}(t) = \frac{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt}$	(3.43)
Логістичний	$\lambda_{\text{logis}}(t) = \frac{1}{\sigma \left(1 + \exp\left(\frac{-(t-\mu)}{\sigma}\right)\right)}$	(3.44)
Вейбулла	$\lambda w(t) = \psi \varphi(\psi t)^{\varphi-1}$	(3.45)

У випадку застосування експоненціального розподілу в класичній формі інтенсивність відмови має постійне значення:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\lambda \cdot \exp(-\lambda t)}{\exp(-\lambda t)} = \lambda. \quad (3.46)$$

Адекватність моделі функції інтенсивності відмов. Для побудови функції інтенсивності відмов автодорожніх мостів України використаємо статистичні дані для всіх типів мостів отримані в розділі 2.

Група збірно-монолітних мостів є найменшою – 5% всієї статистичної вибірки. Тому натурні дані швидкості деградації для групи збірно-монолітних мостів суттєво відрізняються від інших груп мостів. Надалі в нашому дослідженні будемо використовувати середні значення елементів мостів всіх типів табл.3.4.

Таблиця 3.4 – Швидкість деградації змінна у часі для всіх типів мостів

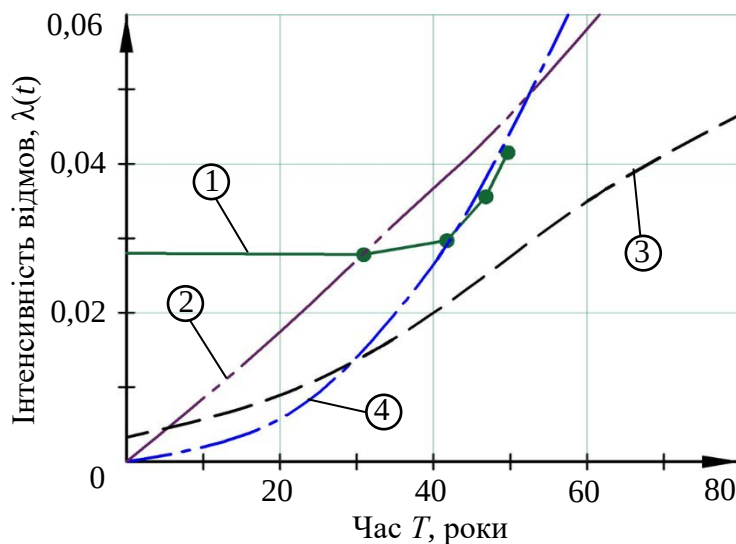
Швидкість деградації, λ			
Стан 2	Стан 3	Стан 4	Стан 5
0,028	0,030	0,036	0,042

Змінна швидкість деградації в часі (табл. 3.4) для кожної групи мостів, що поділені за технічними станами, пояснюється наступними факторами: особливостями проекту, якістю будівництва, умовами експлуатації та ін.

Далі для функцій 3.35 – 3.37 побудуємо графіки інтенсивності відмов за умови, що для кожної з них існує довільна вибірка значень випадкової величини, яка відповідає розподілу нормальному, логістичному та Вейбулла відповідно. Параметри функції підбираються емпірично для кращої збіжності з натурними інтенсивностями відмов: $\sigma = 18$ роки², $\mu = 50$ роки, $\psi = 0,021$, $\phi = 2,15$.

Таблиця 3.5 – Порівняння результатів обчислення інтенсивності відмов з отриманих при статистичному аналізі [23] натурними даними

Натурні дані	Нормальний розподіл		Логістичний розподіл		Розподіл Вейбулла	
	Інтенсивність	Відхилення	Інтенсивність	Відхилення	Інтенсивність	Відхилення
0,028	0,015	46	0,014	50	0,028	0
0,030	0,03	0	0,022	27	0,039	-30
0,036	0,039	-8	0,025	31	0,044	-22
0,042	0,044	-5	0,028	33	0,048	-14



1 – за натурними даними $\lambda T(t)$; 2 – за функцією Вейбулла $\lambda w(t)$ розподілу часу; 3 – за логістичною функцією $\lambda \logis(t)$ розподілу часу; 4 – за нормальною функцією $\lambda norm(t)$ розподілу часу
Рисунок 3.4 – Криві «інтенсивність відмови-час»

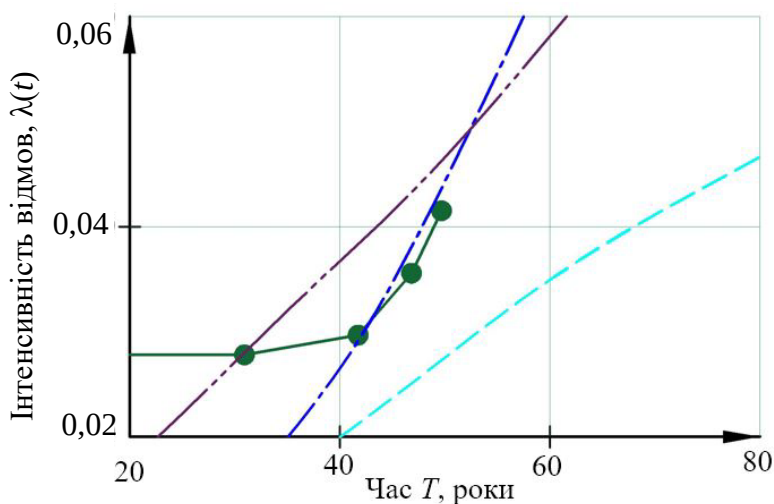


Рисунок 3.5 – Криві «інтенсивність відмови-час» на відтинку $t = 20-80$ та $\lambda = 0,02-0,06$

Порівняльний аналіз моделей (3.43) – (3.45) показав, що дві з них – з нормальним розподілом часу (3.43) та розподілом Вейбулла (3.45) є досить близькими за параметром інтенсивності відмови на відтинку часу $[0 - 50]$ років. (Вид кривих «інтенсивність відмови - час» показано на рис.3.4, 3.5).

Порівняння моделей цих двох між собою приводить до висновку що модель за нормальним розподілом часу є більш реалістичною, має кращу збіжність з

натурними даними статистичного аналізу історії експлуатації автодорожніх мостів України.

Враховуючи, що швидкість деградації змінюється з часом, пропонується наступна модель прогнозу інтенсивності відмов за фактичними термінами служби мостів (рис. 3.8) побудована в програмі інтерполяцією кубічного сплайна по заданим точкам з табл. 3.2:

$$\lambda(t) = a_i + b_i(t - t_i) + \frac{c_i}{2}(t - t_i)^2 + \frac{d_i}{6}(t - t_i)^3, t_{i-1} \leq t \leq t_i, i = 2, 3, 4 \quad (3.47)$$

де a_i, b_i, c_i, d_i – коефіцієнти сплайн-функції для кожного проміжку.

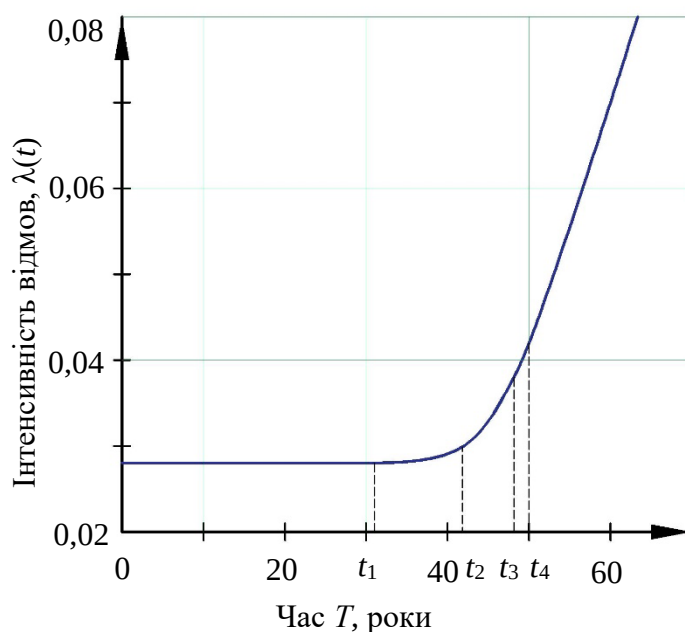


Рисунок 3.6 – Інтенсивність відмов за натурними даними

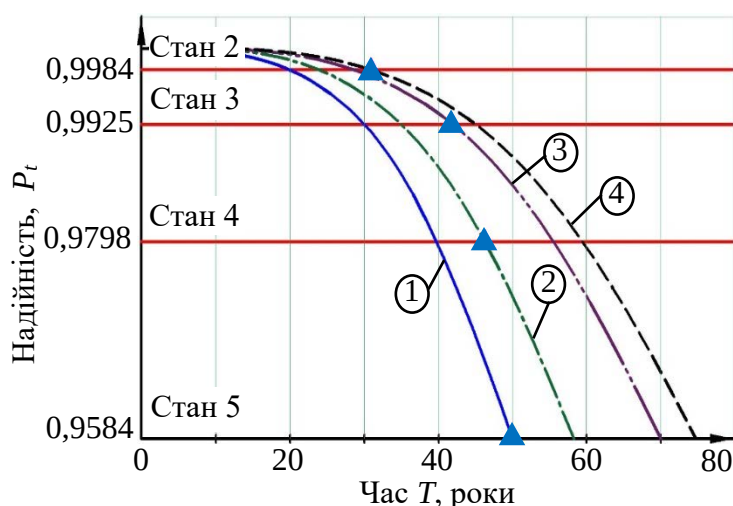
З статистичних даних (Розділ 2) не можливо отримати швидкість деградації для проміжку часу від $t_1=0$ до $t_2=31$ років. Для цього відтинку часу приймемо, що швидкість деградації є сталою, а на проміжку $t < 50$ років продовжує зростати відповідно до запропонованою моделі (3.47).

Щоб дослідити вплив швидкості деградації на прогноз залишкового ресурсу для кожної групи мостів, що поділені за технічним станом, для середнього терміну

служби, визначену інтенсивність відмов (табл. 3.2) внесемо в функцію деградації (2.8).

$$P_t = 1 - 0,00833 \cdot (\lambda t)^k e^{-\lambda t} \quad (2.8)$$

За результатом розв'язку побудовано теоретичні криві при умові, що інтенсивність відмов є постійною на кожному з експлуатаційних станів.



▲ – статистичні дані; 1 – крива прогнозу деградації для стану 5, $\lambda=0,042$; 2 – крива прогнозу деградації для стану 4, $\lambda=0,036$; 3 – крива прогнозу деградації для стану 3, $\lambda=0,030$; 4 – крива прогнозу деградації для стану 2, $\lambda=0,028$.

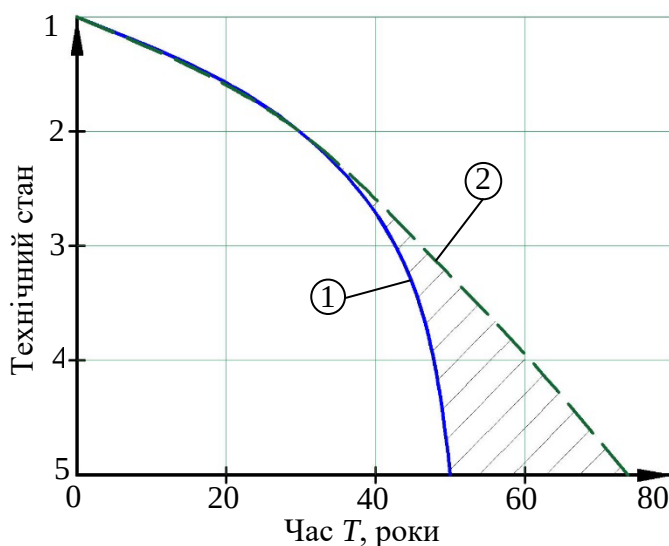
Рисунок 3.7 – Теоретичні криві деградації за моделлю ДСТУ-Н [41]

Фактичні терміни служби і прогнозовані за моделлю ДСТУ-Н [41] для мостів в другому технічному стані наведені в табл. 3.5. Прогноз ресурсу для другого експлуатаційного стану було обрано для регламентованих строків в ДБН [33].

Таблиця 3.6 – Прогноз технічного стану всіх типів мостів за ДСТУ-Н [41] та фактичні терміни служби

Стан	Прогноз за ДСТУ [41], роки	Фактичні терм. служ., роки	Розходження, %
2	31	31	0
3	45	42	7
4	60	47	22
5	74	50	48

Прогноз інтенсивності відмов в табл. 3.6 представлений для всіх станів, крім другого, в діапазоні 3 – 24 роки. Це зумовлено тим, що в першому технічному стані знаходяться тільки нові мости, кількість яких недостатня для прогнозу з очікуваною достовірністю, так як історія експлуатації для цієї групи відсутня. Тому на рис. 3.8 та рис. 3.9 фактичні терміни служби збігаються з прогнозованими за моделлю ДСТУ-Н [41].



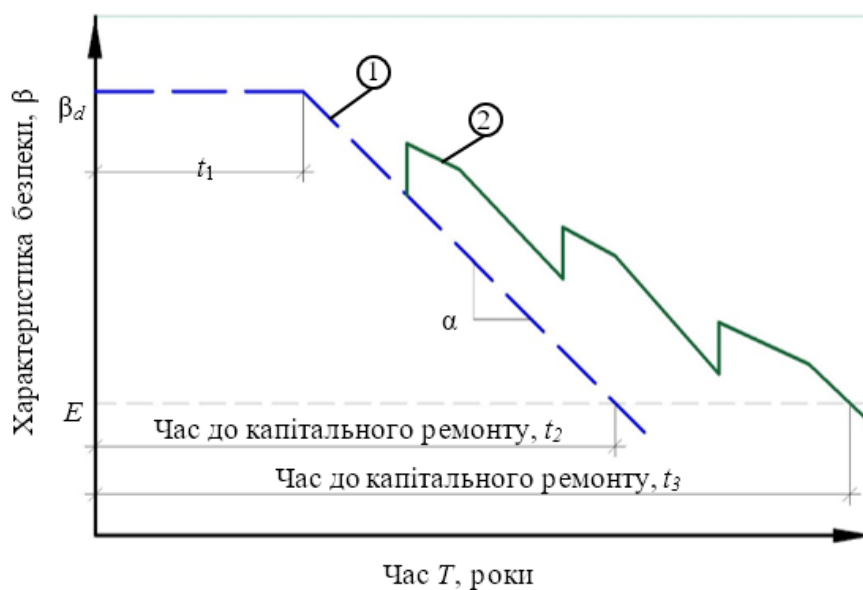
1 – крива моделі прогнозу по фактичним термінам служби; 2 – крива моделі прогнозу [41] залишкового ресурсу;  – заштрихована область графіку, це діапазон прогнозу.

Рисунок 3.8 – Графік моделей прогнозу інтенсивності відмов

Діапазон прогнозу в 3 – 24 роки (рис. 3.10) та розходження до 48% для станів 3 – 5 пояснюється змінною швидкістю деградації λ (рис. 3.2 – 3.9), для кожної групи мостів, які відрізняється багатьма факторами: особливостями проекту, якістю будівництва, умовами експлуатації та ін.

Виконаємо порівняння з роботами американського вченого Д. Франгопола [109] в яких представлені криві деградації (рис. 3.11). Основна відмінність підходу полягає в тому, що враховується вплив експлуатаційних заходів на прогноз терміну служби моста. На рис. 3.8 β_E – гранично допустимий рівень експлуатації, що для мостів України $\beta_E = 1,72$, після досягнення якого необхідно виконати капітальний ремонт або реконструкцію споруди. Час досягнення граничного рівня

характеристики безпеки для мостів за відсутності експлуатаційних заходів – t_2 ; для мостів з врахуванням експлуатаційних заходів – t_3 .



1 – крива деградації з експлуатаційними заходами; 2 – крива деградації без експлуатаційних заходів; t_1 – час до початку накопичення пошкоджень; α – показник швидкості деградації (кут нахилу лінії) при відсутніх експлуатаційних заходів.

Рисунок 3.9 – Графік деградації за Д. Франгополом [108]

3.3 Марковські моделі з проскоками

Моделлю описується стохастичний процес поступового накопичення пошкоджень. В реальності процес старіння елемента споруди складається не тільки з поступових відмов, а також з раптових. Саме такою є модель деградації з раптовим «проскоком». В ній процес накопичення пошкоджень містить раптові «проскоки» через один стан, як показано на графі процесу на рис. 3.12.

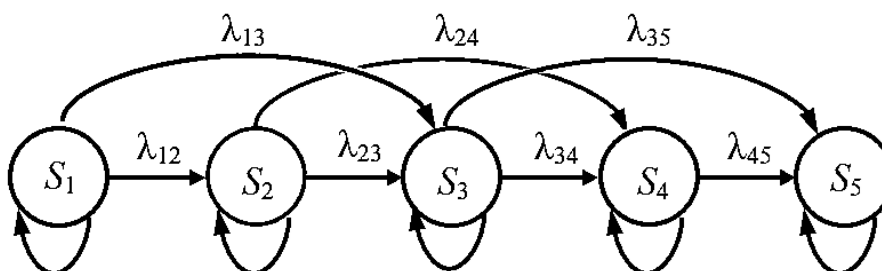


Рисунок 3.10 – Граф процесу деградації з раптовим «проскоком»

В процесі експлуатації мостів при нерегулярних обстеженнях можливий перехід одразу в поглинаючий стан S_5 . Наприклад, при першому обстеженні міст знаходиться в стані S_2 , при наступному через 20 років вже в поглинаючому стані S_5 , такий процес деградації описується графом на рис. 3.13.

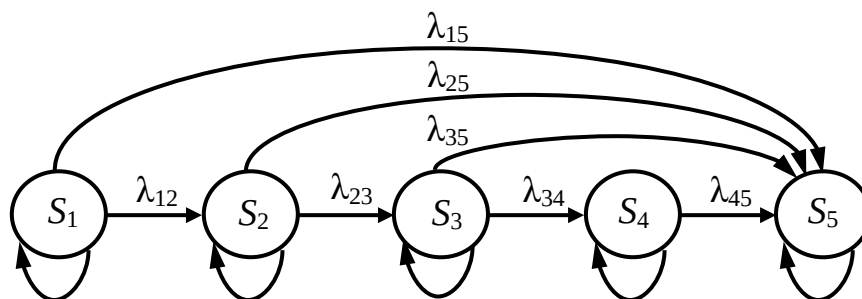


Рисунок 3.11 – Граф процесу деградації з раптовим «проскоком» до 5-го технічного стану

Це також дискретний процес з неперервним часом, з рівномірно розподіленими проміжками часу між станами. Система може залишатися в будь-якому з них, послідовно переходити із одного сусіднього стану S_i в інший з більшим номером S_{i+1} , чи перескочити через сусідній стан S_{i+1} до наступного S_{i+2} . Стан 5 – поглинаючий.

Система рівнянь Колмогорова – Чепмена у випадку рис. 3.10 має вид

$$\begin{cases} \frac{dp_1(t)}{dt} = -\lambda_{12}p_1(t) - \lambda_{13}p_1(t); \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = -\lambda_{23}p_2(t) - \lambda_{24}p_2(t) + \lambda_{12}p_1(t); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = -\lambda_{34}p_3(t) - \lambda_{35}p_3(t) + \lambda_{23}p_2(t) + \lambda_{13}p_1(t); \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = -\lambda_{45}p_4(t) + \lambda_{34}p_3(t) + \lambda_{24}p_2(t); \\ \frac{dp_5(t)}{dt} = \lambda_{45}p_4(t) + \lambda_{35}p_3(t); \end{cases} \quad (3.48)$$

Система рівнянь Колмогорова – Чепмена для графа рис. 3.11 має вид

$$\begin{cases} \frac{dp_1(t)}{dt} = -\lambda_{12} p_1(t) - \lambda_{15} p_1(t); \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = -\lambda_{23} p_2(t) - \lambda_{25} p_2(t) + \lambda_{12} p_1(t); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = -\lambda_{34} p_3(t) - \lambda_{35} p_3(t) + \lambda_{23} p_2(t); \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = -\lambda_{45} p_4(t) + \lambda_{34} p_3(t); \\ \frac{dp_5(t)}{dt} = \lambda_{45} p_4(t) + \lambda_{35} p_3(t) + \lambda_{25} p_2(t) + \lambda_{15} p_1(t); \end{cases} \quad (3.49)$$

Наведемо чотири чисельні експерименти с заданими швидкостями деградації.

Розв'язок системи звичайних диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена в аналітичному вигляді для лінійного графу рис. 3.1 без проскоку наведено в підрозділі 3.1. Для систем 3.48 та 3.49 розв'язок отримано з програми, що написана на внутрішній мові ПЗ MathCad (Додаток Д) за методом Рунге-Кутта із змінним кроком інтегрування. Величина кроку адаптується до швидкості зміни функції розв'язку. Даний метод дозволяє ефективно знаходити розв'язок рівнянь, у разі якщо вони містять як плавні, так і швидко змінні ділянки. Там, де рішення змінюється слабо, кроки вибираються більш рідкими, а в областях його сильних змін – частішими.

Метою експерименту є встановлення впливу швидкостей деградації в місцях «проскоку» на прогноз технічного стану для моделей деградації рис. 3.10 та 3.11 та порівняння прогнозу з моделлю деградації за фактичним даними форм. 2.16 та 2.22.

Експерименти для моделі прогнозу технічного стану за графом рис. 3.40.

Експеримент 1. Для λ_{12} , λ_{23} , λ_{34} , λ_{45} приймаємо інтенсивність відмов змінну по статистичним даним. Так як, «проскок» це раптова відмова, і встановити швидкість деградації для нього по статистичним даним не можливо, для наближення до моделі прогнозу за фактичними даними будемо підбирати інтенсивність відмов в

місцях «проскоку» емпірично – в десять разів меншими за інтенсивність відмов λ_{12} , λ_{23} , λ_{34} .

Експеримент 2. Для λ_{12} , λ_{23} , λ_{34} , λ_{45} приймаються аналогічно до експерименту 1. Швидкості в місці «проскоку», приймаються $\lambda_{12} = \lambda_{13}$, $\lambda_{23} = \lambda_{24}$, $\lambda_{34} = \lambda_{35}$.

Експерименти для моделі прогнозу технічного стану за графом рис. 3.41.

Експеримент 3. Швидкості інтенсивності відмов приймаються аналогічно до експерименту 1, відмінність складає лише в самій моделі де «проскок» відбувається одразу в поглинаючий стан S_5 .

Експеримент 4. Швидкості інтенсивності відмов приймаються аналогічно до експерименту 2, відмінність складає лише в самій моделі де «проскок» відбувається одразу в поглинаючий стан S_5 .

Прийняті для експерименту числові значення швидкості деградації приведені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Інтенсивність відмов для моделей з «проскоком»

Модель рис.3.12	Інтенсивність відмов						
	λ_{12}	λ_{23}	λ_{34}	λ_{45}	λ_{13}	λ_{24}	λ_{35}
Експеримент 1	0,028	0,030	0,036	0,042	0,0028	0,003	0,0042
Експеримент 2	0,028	0,030	0,036	0,042	0,0280	0,030	0,0420
Модель рис.3.13	λ_{12}	λ_{23}	λ_{34}	λ_{45}	λ_{15}	λ_{25}	λ_{35}
Експеримент 3	0,028	0,030	0,036	0,042	0,0028	0,003	0,0042
Експеримент 4	0,028	0,030	0,036	0,042	0,0280	0,030	0,0420

Матриця ймовірностей переходу для експерименту 1

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0,969669 & 0,027121 & 0,003210 & 0 & 0 \\ 0 & 0,940259 & 0,052539 & 0,007202 & 0 \\ 0 & 0 & 0,911740 & 0,076334 & 0,011926 \\ 0 & 0 & 0 & 0,884087 & 0,115913 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.50)$$

Матриця ймовірності переходу для експерименту 2

$$\mathbf{p2} = \begin{bmatrix} 0,945539 & 0,026422 & 0,028039 & 0 & 0 \\ 0 & 0,894044 & 0,049867 & 0,056089 & 0 \\ 0 & 0 & 0,845354 & 0,070585 & 0,084061 \\ 0 & 0 & 0 & 0,799315 & 0,200685 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.51)$$

Матриця ймовірностей переходу для експерименту 3

$$\mathbf{p3} = \begin{bmatrix} 0,969669 & 0,027121 & 0 & 0 & 0,003210 \\ 0 & 0,940259 & 0,052539 & 0 & 0,007202 \\ 0 & 0 & 0,911740 & 0,076334 & 0,011926 \\ 0 & 0 & 0 & 0,884087 & 0,115913 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.52)$$

Матриця ймовірності переходу для експерименту 4

$$\mathbf{p4} = \begin{bmatrix} 0,945539 & 0,026422 & 0 & 0 & 0,028039 \\ 0 & 0,894044 & 0,049867 & 0 & 0,056089 \\ 0 & 0 & 0,845354 & 0,070585 & 0,084061 \\ 0 & 0 & 0 & 0,799315 & 0,200685 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.53)$$

З матриць перехідних ймовірностей 3.50 – 3.53 знайдемо абсолютній ймовірності для прогнозу технічного стану за формулою:

$$p_k(t) = \sum_{k=i-1}^n p_{k-1} p_{ik}(t), \quad (3.54)$$

де i – номер поточного стану;

n – кількість дискретних станів протягом життєвого циклу елемента;

p_k – абсолютна надійність елемента у k -тому дискретному стані;

$p_{ik}(t)$ – перехідна ймовірність k -того дискретного стану.

За формулою 3.54 абсолютні ймовірності для моделей рис. 3.12 та 3.13 будуть однакові. Відмінність лише у матрицях перехідних ймовірностей 3.50 – 3.53. Ймовірність переходу буде однаковою але для різних станів в які здійснюється «проскок». Тобто моделі рис. 3.12 та 3.13 прогноз технічного стану за цими моделями залежить тільки від інтенсивності відмов і не відрізняється при їх однакових значеннях.

Параметри теоретичних кривих деградації, які були отриманні числовим експериментом для моделей рис.3.10 та 3.11, приведені в табл. 3.8 – 3.9, графіки – на рис.3.12.

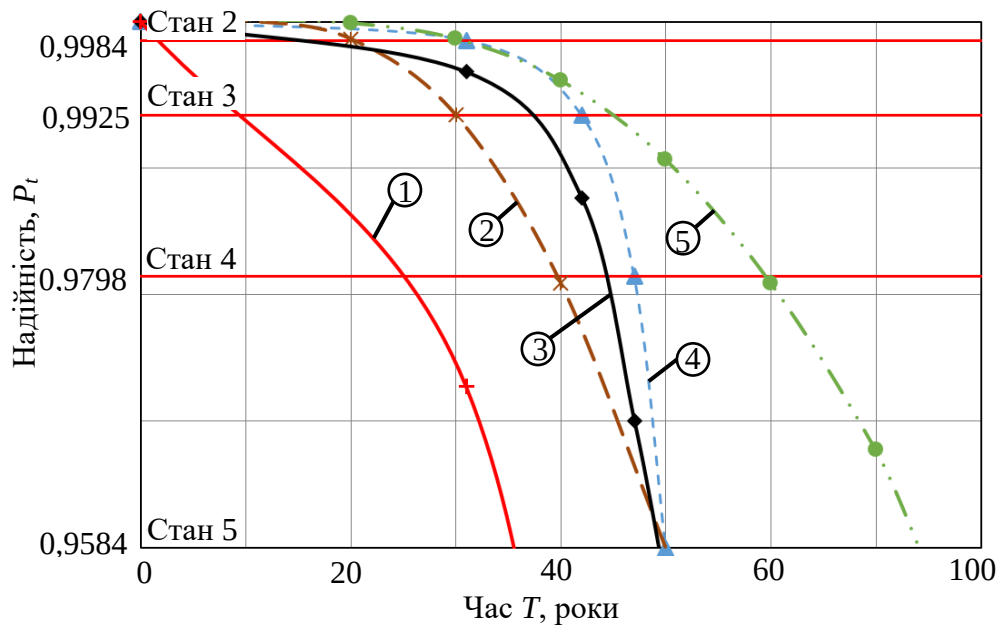
Далі прогноз технічного стану наводимо тільки для експериментів 1 та 2, який не відрізняється при однакових інтенсивностях відмов від прогнозу експериментів 3 та 4.

Таблиця 3.8 – Криві деградації. Модель з «проскоком»

№	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Експ. 4	Натурна крива	Роки
	P_i	P_i	P_i	P_i	P_i	
1	0,999844	0,999844	0,999844	0,999844	0,999844	0
2	0,995897	0,971071	0,995897	0,971071	0,998363	31
3	0,985953	0,913902	0,985953	0,913902	0,992461	42
4	0,968370	0,831687	0,968370	0,831687	0,979771	47
5	0,955359	0,798191	0,955359	0,798191	0,958351	50

Таблиця 3.9 – Прогнозовані терміни служби

Стан	Абсолютні ймовірності, P_i	Прогнозовані терміни служби, роки				
		Експ. 1, 3	Експ. 2, 4	Фактичні дані	Модель $\lambda=0,042$	Модель $\lambda=0,028$
2	0,998363	15	3	31	20	31
3	0,992461	37	9	42	30	45
4	0,979771	44	25	47	39	60
5	0,958351	49	36	50	50	74



1 – експеримент 2,4; 2 – крива прогнозу деградації для стану 5, $\lambda=0,042$ ($\lambda = \text{const}$); 3 – експеримент 1, 3; 4 – модель прогнозу по фактичним даним; 5 – крива прогнозу деградації для стану 2, $\lambda=0,042$ ($\lambda = \text{const}$);

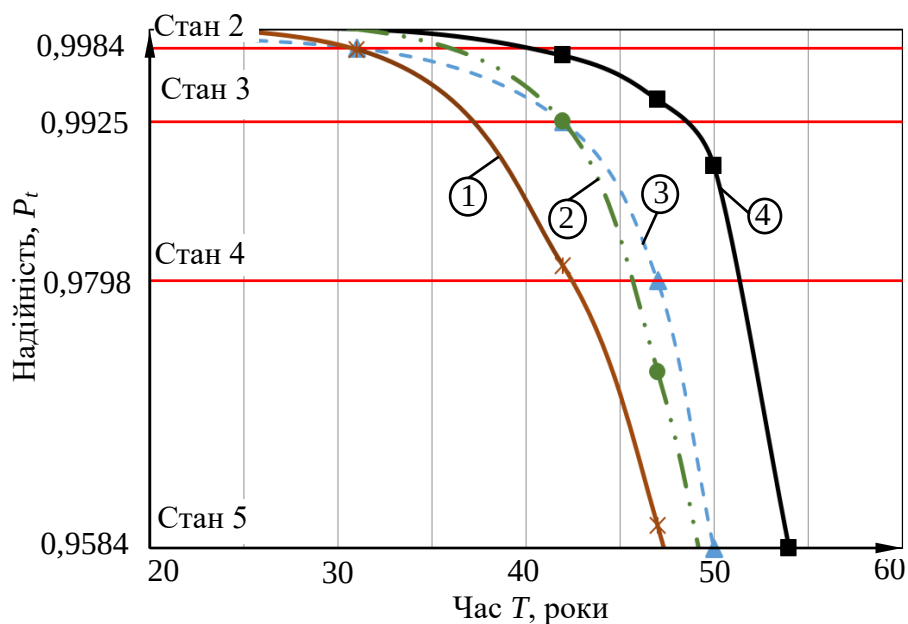
Рисунок 3.12 – Теоретичні криві деградації для моделей з «проскоком»

3.4 Аналіз розроблених моделей накопичення пошкоджень

Наше дослідження показує, що марковська стохастична модель накопичення пошкоджень, яка прийнята для оцінки і прогнозу технічного стану автодорожніх мостів України адекватна реальному процесу деградації залізобетонних елементів. Розходження в прогнозі ресурсу по нормативній кривій, теоретичній кривій, натурним даним та в роботах [21, 25, 28] не є недоліком моделі. Причина в неправильному виборі швидкості деградації. Крива деградації с постійною швидкістю, що прийнята в нормативній методиці, може коректно відображати реальний процес деградації тільки при умові регулярних експлуатаційних заходів. В умовах України теоретична крива деградації, яка наближається к натурній, може бути отримана тільки при змінній швидкості деградації.

Побудуємо криві деградації за моделлю ДСТУ-Н [41] для змінної інтенсивності відмов за табл. 3.5. Для цього отримаємо розв'язок рівняння для:

$$P(t) = 1 - 0,008333 \cdot (\lambda(t)t)^5 e^{-\lambda(t)t}. \quad (2.8)$$



1 – теоретична модель прогнозу за розподілом Вейбулла; 2 – теоретична модель прогнозу за нормальним розподілом; 3 – модель прогнозу по фактичним даним; 4 – теоретична модель прогнозу за логістичним розподілом

Рисунок 3.13 – Криві прогнозу залишкового ресурсу для моделей деградації із змінною інтенсивністю відмов

Таблиця 3.10 – Абсолютні ймовірності для моделей із змінною швидкістю деградації

Модель визначення залишкового ресурсу	Абсолютні ймовірності, P_i			
	$t_1=31$	$t_2=42$	$t_3=47$	$t_4=50$
Фактичні дані	0,998363	0,992461	0,979771	0,958351
Нормальний розподіл	0,999886	0,992493	0,972423	0,952415
Логістичний	0,999917	0,997772	0,994236	0,988948
Вейбулла	0,998276	0,980902	0,96015	0,939806

Таблиця 3.11 – Прогнозовані терміни служби для моделей ДСТУ-Н [41] та «проскоком» (3.50-3.53) із змінною швидкістю деградації

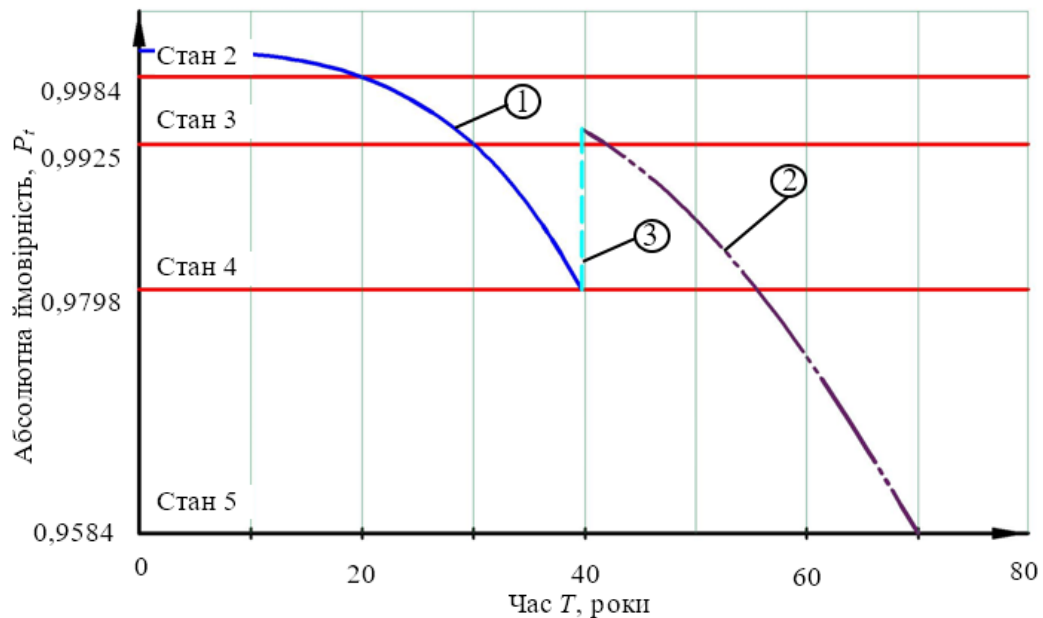
Стан	Абсолютні ймовірності, P_i	Прогнозовані терміни служби, роки				
		Нормальний розподіл	Логістичний розподіл	Розподіл Вейбулла	Експ. 1, 3	Фактичні дані
2	0,998363	36	40	31	15	31
3	0,992461	42	47	37	37	42
4	0,979771	46	52	43	44	47
5	0,958351	49	54	47	49	50

Як видно з рисунку 3.12 та 3.13 теоретичні криві прогнозу деградації для моделей без «проскоку» ДСТУ-Н [41] і з «проскоком» не мають суттєвих відмінностей, їх вид цілком залежить від швидкості деградації таблиця 3.5 (Швидкість деградації змінна у часі для всіх типів мостів) та таблиця 3.7 (Швидкості деградації для моделі з «проскоком»).

В умовах України теоретична крива деградації, близька до натурних даних, може бути отримана тільки при змінній швидкості деградації. Варіанти, представлених вище марковських моделей зі змінною швидкістю деградації, мають теоретичні криві табл. 3.11 які близько (1 – 5 років) збігаються з натурними рис. 3.12 та рис. 3.13.

Виконане дослідження містить результати, які дозволяють коригувати нормативно методику прогнозу залишкового ресурсу автодорожніх мостів України.

Як видно з рис. 3.12-3.13 до натурних даних найбільш наближені моделі із змінною швидкістю деградації, а саме теоретична модель прогнозу за нормальним розподілом. Також моделі прогнозу на основі змінної швидкості деградації можуть враховувати експлуатаційні втручання при прогнозі залишкового ресурсу (рис. 3.14).



1 – крива прогнозу залишкового ресурсу, $\lambda=0,042$; 2 – крива прогнозу залишкового ресурсу, $\lambda=0,030$; 3 – покращення технічного стану завдяки експлуатаційним заходам.

Рисунок 3.14 – Прогноз залишкового ресурсу за умови проведення експлуатаційних заходів

3.5 Висновки до розділу 3

В цьому розділі представлена марковська модель накопичення пошкоджень, прогноз ресурсу за якою базується на єдиному параметрі – інтенсивності відмов. Модель є феноменологічна, в функції неперервного часу. Проведені теоретичні та числові експериментальні дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Цим дослідженням доведено, що модель деградації основана на засадах марковської феноменологічної моделі накопичення пошкоджень може бути ефективним інструментом оцінки і прогнозу ресурсу елементів залізобетонних мостів в системі експлуатації автодорожніх мостів.

2. *Вперше* виконане теоретичне та числове експериментальне дослідження інтенсивності відмов (швидкості деградації) в функції часу марковської моделі накопичення пошкоджень для залізобетонних елементів автодорожніх мостів.

3. Дослідження, що базується на натурних даних з експлуатації залізобетонних мостів легко узагальнюється на всі типи залізобетонних будівельних конструкцій.

4. Прогнозування життєвого циклу з застосуванням моделі інтенсивності відмов привносить в марковську модель історичний досвід експлуатації мостів.

5. Цим дослідженням доведено, що крива інтенсивності відмов протягом життєвого циклу монотонно зростає, в ній немає відтинку «пристосування елемента».

6. Аналіз розглянутих вище моделей деградації, дає можливість стверджувати, що прийнята модель накопичення пошкоджень для оцінки і прогнозу технічного стану автодорожніх мостів України адекватна реальному процесу деградації залізобетонних елементів. Значне розходження в прогнозі ресурсу по нормативній кривій і фактичними даними, не є недоліком моделі. Причина в неадекватному заданні інтенсивності. Крива деградації з постійною швидкістю, прийнята в нормативній методиці ДСТУ-Н [41] для елементів мостів, може коректно відображати дійсний процес деградації тільки при умові виконання регулярних експлуатаційних заходів щодо підтримання належного технічного стану споруди [109, 110, 111] рис. 3.8, 3.14.

7. Результати досліджень даного розділу викладено у наступних публікаціях [25, 26, 27, 28].

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СПОРУДИ

4.1 Модель марковського ланцюга на засадах статистичних даних з історії експлуатації

В попередньому розділі розглядаються марковські стохастичні моделі накопичення пошкоджень в *елементах мостів*. В цьому розділі ми переходимо до ймовірнісних моделей які описують еволюцію в часі *системи елементів*, тобто споруду в цілому [2, 96, 123, 122, 130, 131, 132, 133, 134, 156, 157]. В інших словах, якщо попередні моделі були рівня окремих елементів то тут розглядаються *об'єкти* – *мости*. Феноменологічною базою моделей є статистичні дані з історії експлуатації споруд. Кінцевою прикладною метою цих моделей є оцінювання і прогнозування технічного стану моста в цілому.

Теоретичне формулювання моделі

Розглянемо сімейство випадкових величин $\{S_{tk}\}$, що утворюють стохастичний процес в момент часу t_k , в яких може перебувати в цей момент система, і формують повну групу подій. Число станів системи є кінцевим.

Гіпотези.

А. Система визначається набором кінцевих станів і може бути в тільки в одному з них в певний момент часу.

Б. Початковий стан системи і розподіл ймовірностей початкового стану відомі.

В. Ймовірності переходів передбачається стаціонарним часом і не залежить від того, як стан i було досягнуто.

Г. Стохастичний процес тут представляється, як і в розділі 3, інтегральною функцією розподілу $P(t)$ для часу T_n , котрий протікає доки стануться всі n подій процесу – розподілом Пуассона:

$$P(t) = 1 - P(T_n > t) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}, \quad (1.22)$$

де λ – параметр процесу інтенсивність відмов (швидкість деградації);
 P_t – ймовірність того, що елемент перейде в стан k протягом часу $t < T_k$.

Таким чином, стани системи в будь-який момент t задаються своїм номером $k = 1, 2, \dots, n$. В нашому випадку приймається $n = 5$.

Перехід з стану S_j в стан S_n рівно за k кроків може відбуватися різними шляхами. Ми розглядаємо *окремий випадок* марковського ланцюга в якому рух по станам відбувається тільки в одному напрямку, послідовно від стану з номером j до стану з номером $j + 1$:

$$j < j_1 < j_2 \dots < j_{n-1} < j_n. \quad (4.1)$$

В інших термінах, розглядається граф процесу в якому допускається перехід тільки в сусідній стан, тобто виключаються «проскоки».

Умовна ймовірність того що перехід відбувається по шляху (4.1) за умови що в фіксований момент часу система знаходилася в стані S_j :

$$p_{jk} = p_{jj_1} p_{j_1 j_2} \dots p_{j_{n-1} k}. \quad (4.2)$$

Якщо відома матриця переходів $\mathbf{P}$ і вектор початкових ймовірностей $\mathbf{p}_0$ то можна визначити абсолютні ймовірності станів системи після фіксованої кількості кроків переходу. Так позначаючи $p_i^{(n)}$ абсолютні ймовірності станів системи після n переходів, запишемо вираз абсолютної ймовірності системи за один крок:

$$p_i^{(1)} = p_1^{(0)} p_{1j} + p_2^{(0)} p_{2j} + \dots + p_n^{(0)} p_{nj} = \sum_i p_i^{(0)} p_{ij}, \quad (4.3)$$

де $p_i^{(1)}$ – абсолютна ймовірність переходу системи із стану в стан за один крок;

$p_i^{(0)}$ – початкові ймовірності, компоненти вектору $\mathbf{p}_0$;

p_{ij} – перехідні ймовірності системи.

Аналогічно (4.3), за індукцією можна показати що

$$p_j^{(n)} = \sum_i p_i^{(0)} p_{ij}^{(n)}, \quad (4.4)$$

де n – крокова перехідна ймовірність, яка визначається рекурентною формулою:

$$p_{ij}^{(n)} = \sum_k p_{ik}^{(n-1)} p_{kj}, \quad (4.5)$$

В іншій, більш зручній формі, рекурентна залежність для визначення абсолютної ймовірності наведена в [2]:

$$p_i^{(k)} = \sum_{j=1}^n p_j^{(k-1)} p_{ji}; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n, \quad (4.6)$$

де p_{ki} – перехідні ймовірності, елементи матриці $\mathbf{P}$;

k – номер кроку;

n – кількість станів.

Формулою (4.6) зручно користуватись коли на початку процесу відома тільки одна перша компонента вектору $\mathbf{p}_0$, тобто початкова ймовірність в першому стані.

Залежності 4.2 – 4.6 дають можливість формулювати модель прогнозу стану споруди на довільний час.

Для формулювання моделі вводиться матриця переходів $\mathbf{P}$ залежна від часу. Кожен елемент цієї матриці p_{ij} є ймовірність того, що система перейде від стану i до стану j протягом *певного періоду часу*. Тоді якщо відомий початковий стан, $\mathbf{p}_0$, то майбутній стан системи може бути передбаченим на будь-який довільний час t .

Майбутній вектор стану $\mathbf{p}_t$ може бути отримано шляхом множення початкового стану вектору $\mathbf{p}_0$ на матрицю переходів $\mathbf{P}$ в ступені t (число років) [2, 80].

Початковий стан системи задається матрицею-стрічкою $\mathbf{p}_0$ розміром $[1 \times n]$

$$\mathbf{p}_0 = [p_1, p_2, \dots, p_n], \quad (4.7)$$

де p_i – ймовірність перебування в стані $i = 1, 2, \dots, n$;

n – кількість дискретних станів.

Вектор стану системи на час t визначається як добуток матриці переходів $\mathbf{P}$ на вектор початкового стану системи

$$\mathbf{p}_t = \mathbf{p}_0 \times \mathbf{P}^t, \quad (4.8)$$

де $\mathbf{P}^t$ – матриця переходів $\mathbf{P}$ в ступені t ;

$\mathbf{p}_0$ – вектор ймовірностей перебування в початковому стані.

Далі вводиться вектор визначених станів $\mathbf{d}$ розміром $[n \times 1]$ (вектор рейтингових оцінок безпечної експлуатації)

$$\mathbf{d} = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T, \quad (4.9)$$

тут T – знак транспонування;

r_i – дійсні числа, $i = 1, 2, \dots, n$.

Технічний стан споруди на довільний час t визначається залежністю

$$D_t = \mathbf{p}_0 \times \mathbf{P}^t \times \mathbf{d}, \quad (4.10)$$

де D_t – рейтингова оцінка споруди на час t – скаляр;

$\mathbf{p}_0$ – матриця-стрічка розміром $[1 \times n]$ ймовірностей перебування в початковому стані t_0 ;

$\mathbf{P}^t$ – матриця ймовірностей переходів $\mathbf{P}$ в ступені t розміром $[n \times n]$.

Приклад

Наведемо гіпотетичний ілюстративний приклад який демонструє процедуру реалізації марковської моделі ф. 4.7 – 4.10 прогнозу стану споруди за відомою матрицею ймовірності переходів.

Нехай задано для споруди вектор початкових станів (вектор рейтингових оцінок безпечної експлуатації)

$$\mathbf{d} = [10 \ 8 \ 6 \ 4 \ 2]^T. \quad (4.9a)$$

Матриця-стрічка розміром $[1 \times n]$ $\mathbf{p}_0$ ймовірностей перебування в початковому стані t_0

$$\mathbf{p}_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (4.7a)$$

Матриця ймовірності переходів

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,939 & 0,061 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,679 & 0,330 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,549 & 0,451 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,449 & 0,551 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

Знайти прогноз рейтингу споруди після 5 років експлуатації.

$$D_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,730 & 0,137 & 0,079 & 0,039 & 0,018 \\ 0 & 0,144 & 0,240 & 0,266 & 0,374 \\ 0 & 0 & 0,050 & 0,143 & 0,808 \\ 0 & 0 & 0 & 0,018 & 0,982 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 10 \\ 8 \\ 6 \\ 4 \\ 2 \end{bmatrix} = 9,066. \quad (4.10a)$$

4.2 Формулювання матриці перехідних ймовірностей на основі статистичних даних з історії експлуатації споруд

В технічній літературі описано декілька способів отримання матриці перехідних ймовірностей з статистичних даних історії експлуатації [95, 96, 98, 99, 100, 119, 120]. Ми скористаємося найпростішим з них – оцінюванням відносної кількості мостів в кожному із станів.

Будемо визначати ймовірність p_{ij} переходу мостового елемента зі стану i в стан j за формулою [119]

$$p_{ij} = n_{ij} / n_i. \quad (4.12)$$

де n_{ij} – кількість переходів зі стану i в стан j протягом заданого періоду часу;

n_i – загальна кількість мостів в стані на початок заданого періоду часу.

В такій постановці кожен елемент матриці перехідних ймовірностей $\mathbf{P}$ є ймовірність того, що система яка була в стані i перейде в стан j за один крок (за один рік). При цьому вважається що відсутні експлуатаційні втручання, тому піддіагональні елементи є нульовими. Як і раніше сума елементів одної строки дорівнює 1 і елемент $p_{jj} = 1$ тому як стан j є поглинаючим.

Покажемо процедуру отримання матриці перехідних ймовірностей на прикладі статистичних даних отриманих в розділі 2. Розглянемо історичні дані експлуатації залізобетонних мостів всіх типів. Розподіл по станам автодорожніх мостів всіх типів наведено нижче в таблиці 2.2 (Розділ 2).

Таблиця 2.2 – Розподіл автодорожніх мостів за експлуатаційним станом за даними від 01.01.2016

Стан	1	2	3	4	5	Всього
В абсолютних показниках, од.	112	758	4288	1751	122	7031
У відсотках, %	1,6	10,8	61,0	24,9	1,7	100

З таблиці 2.2 отримаємо вектор наддіагональних елементів матриці перехідних ймовірностей **P**: $\mathbf{p}_{ij}$, $i = 1, 2, 3, \dots, 4; j = i + 1$

$$\mathbf{p}_{ij} = [0,016 \ 0,108 \ 0,610 \ 0,249]^T. \quad (4.13)$$

Відповідна матриця перехідних ймовірностей матиме значення

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,984 & 0,016 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,892 & 0,108 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,390 & 0,610 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,751 & 0,249 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.14)$$

Матриця перехідних ймовірностей одного року експлуатації обчислюється як $\mathbf{P}^2$

$$\mathbf{P}^2 = \begin{bmatrix} 0,968 & 0,030 & 0,002 & 0 & 0 \\ 0 & 0,796 & 0,138 & 0,066 & 0 \\ 0 & 0 & 0,152 & 0,696 & 0,152 \\ 0 & 0 & 0 & 0,564 & 0,436 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.14a)$$

Матриця перехідних ймовірностей, що прогнозується після 5 років експлуатації матиме значення

$$\mathbf{P}^5 = \begin{bmatrix} 0,923 & 0,062 & 0,008 & 0,006 & 0,001 \\ 0 & 0,565 & 0,120 & 0,220 & 0,096 \\ 0 & 0 & 0,009 & 0,388 & 0,603 \\ 0 & 0 & 0 & 0,239 & 0,761 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.146)$$

4.3 Формула рейтингової оцінки стану споруди в мережі автомобільних доріг

Для практичної методики прогнозування технічного стану споруди необхідно прийняти числовий *критерій технічного стану споруди в цілому*. Тут скористуємося ідеєю інтегральної формалізованої рейтингової оцінки прийнятою в системі експлуатації автодорожніх мостів за нормативним документом ДСТУ-Н [41].

Експлуатаційна оцінка моста в цілому є узагальненою характеристикою експлуатаційної придатності за станом всіх його елементів. Кількісним показником технічного стану споруди (мостового переходу в цілому) є формалізована експертна оцінка (рейтинг), що служить для визначення потреб у ремонті або реконструкції мостів та для планування експлуатаційних заходів у рамках певної дорожньої мережі.

За нормативним документом ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 [41] експлуатаційна оцінка технічного стану споруди E визначається за шкалою безрозмірних коефіцієнтів у 100 балів, обчислюється за формулою

$$E = \frac{80 \left(5 - \sum_{i=1}^{i=7} \alpha_i D_i \right)}{4} + 20, \quad (4.15)$$

де α_i – нормалізовані коефіцієнти впливу стану (вагові коефіцієнти) i -ї групи елементів на загальний стан споруди, $i = 1, 2, \dots, 7$;

D_i – номер експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди згідно з класифікаційною таблицею документу [41].

Експертна експлуатаційна оцінка є середньозваженим значенням визначеного експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди, що розглядаються. Однак скористатися безпосередньо формулою (4.15) в рамках нашого дослідження неможливо. Формула ДСТУ-Н [41] не охоплює всіх можливих комбінацій середньозваженого значення номера експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди:

$$\mathbf{D}_c = \sum_{i=1}^{i=7} w_i D_i, \quad (4.16)$$

де w_i – нормалізовані коефіцієнти впливу стану (вагові коефіцієнти) i -ї групи елементів на загальний стан споруди, $i = 1, 2, \dots, 7$. (Позначення коефіцієнтів впливу змінено відносно ф. (4.15) для зручності подальших викладок).

Очевидно, що формула (4.16) сьогодні вже не відповідає вимогам коректного оцінювання експлуатаційного стану споруди в цілому. Ці обставини і були мотивацією розробки *нової формули* рейтингової мережевої оцінки.

Для нової формули виконаємо аналіз можливих комбінацій середньозваженого значення номера експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди $\mathbf{D}_c$ (дійсні числа). Обчислимо для кожного номера експлуатаційного стану N_c , $c = 1, 2, 3, 4$ (цілі числа) за формулою (4.16) два гіпотетичні можливі випадки середньозваженого значення номера експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди $\mathbf{D}_c$ – мінімальне і максимальне.

Мінімальні значення вектора $\mathbf{D}_c$ співпадають з номером стану N_c в силу нормалізації коефіцієнтів впливу стану w_i (див. табл. 4.1). Максимальні значення для номерів стану N_c , $c = 1, 2, 3, 4$ обчислюються за умови: $D_2 = D_3 = D_4 = 4$; $D_1 = D_5 = D_6 = D_7 = 5$. Так наприклад, для варіанту споруди «Міст через водну перешкоду»

вектор середньозважених значень номерів експлуатаційного стану D_c буде мати значення:

$$D_c = [5, N_c, 4, 4, 5, 5, 5]. \quad (4.17)$$

Обчислення для цього варіанту споруди зведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Середньозважені значення номера експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди.

Стан, N_c	Середньозважене значення, D_c	
	Мінімальні значення $\text{Всі } D_c = N_c$	Максимальні значення
1	1	3,0
2	2	3,4
3	3	3,8
4	4	4,2

де D_c – середньозважене значенням експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди;

N_c – номер експлуатаційного стану визначального елемента групи.

Аналіз даних табл. 4.1 дає можливість сформулювати вимоги до вхідних даних нової формули:

А. Експлуатаційний стан групи елементів приймається в функції *стану найбільш слабого визначального елемента* в групі. Визначальних елементів в групі три: прогонова будова; опора та опорні частини; фундамент.

Б. Рейтинг споруди призначається не вище ніж такий що відповідає найнижчому стану одного з трьох визначальних елементів – прогонової будови, опори, фундаменту:

$$E \leq F(\max D_i), i = 1, 2, 3, 4. \quad (4.18)$$

В. Якщо хоча би один з визначальних елементів має найнижчий стан (п'ятий) то споруді призначається рейтинг відповідний *стану п'ять*.

Г. Вихідні дані обмежуються граничними значеннями наведеними в табл. 4.1.

$$\begin{aligned} \text{при } N_c = 1 \quad 1 \leq D_c \leq 3.0; \\ \text{при } N_c = 2 \quad 2 \leq D_c \leq 3.4; \\ \text{при } N_c = 3 \quad 3 \leq D_c \leq 3.8; \\ \text{при } N_c = 4 \quad 4 \leq D_c \leq 4.2. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Відповідна рейтингова формула наводиться нижче.

$$E = 100 - \frac{20(D_c - N_c)}{D_c - \frac{N_c \times D_c}{0,45(5 - N_c) + N_c}} - 20(N_c - 1). \quad (4.20)$$

В новій рейтинговій формулі потребується корегувати значення нормалізованих коефіцієнтів впливу стану на загальний стан споруди. Для визначення коефіцієнтів ваги використаємо підхід відомий як метод аналізу ієрархій Т. Сааті [75]. Метод являє собою процедуру розкладання задачі порівняння на прості складові критерії та прийняття експертних рішень відносно цих складових шляхом, так званих, попарних порівнянь. За результатами попарних порівнянь формується матриця переваг, яка відображає відносні переваги кожного з тверджень за прийнятими критеріями.

Для попарних порівнянь застосовується шкала відносних переваг наведена в таблиці 4.2

Таблиця 4.2 – Шкала відносних переваг методу ієрархій

$w_{ij} = 1$	якщо критерій i однаково важливий по відношенню до критерію j
$w_{ij} = 3$	якщо критерій i більш важливий по відношенню до критерію j
$w_{ij} = 5$	якщо критерій i явно важливіший по відношенню до критерію j
$w_{ij} = 7$	якщо критерій i суттєво важливіший по відношенню до критерію j
$w_{ij} = 9$	якщо критерій i безумовно важливіший критерію j
$w_{ij} = 2, 4, 6, 8$ в проміжних випадках	

Розглянемо матрицю попарних порівнянь, яка відображає думку експерта, що приймає рішення, відносно вагомості прийнятих критеріїв. В нашому випадку її розмір $n = 7$, що відповідає кількості груп елементів моста. Позначимо матрицю порівнянь $\mathbf{W}$. Формується матриця в такий спосіб.

Наддіагональні елементи матриці переваг $\mathbf{W}$ отримуються шляхом парних порівнянь таким чином, що критерій у рядку $i = 1, 2, \dots, n$, оцінюється щодо кожного із критеріїв, представлених у стовпцях. Діагональні елементи $w_{ii} = w_{jj} = 1$, що є наслідком прийнятої шкали відносних переваг. Піддіагональні елементи приймаються обернено-симетричними відносно наддіагональних:

$$w_{ij} = 1/w_{ji}, \quad i \geq j, \quad i = 2, 3, \dots, 7; \quad j = 1, 2, \dots, 7, \quad (4.21)$$

де w_{ij} – показники відносних переваг компонентів матриці $\mathbf{W}$

Матриця переваг має такий вид:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & w_{14} & w_{15} & w_{16} & w_{17} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & w_{24} & w_{25} & w_{26} & w_{27} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & w_{34} & w_{35} & w_{36} & w_{37} \\ w_{41} & w_{42} & w_{43} & w_{44} & w_{45} & w_{46} & w_{47} \\ w_{51} & w_{52} & w_{53} & w_{54} & w_{55} & w_{56} & w_{57} \\ w_{61} & w_{62} & w_{63} & w_{64} & w_{65} & w_{66} & w_{67} \\ w_{71} & w_{72} & w_{73} & w_{74} & w_{75} & w_{76} & w_{77} \end{bmatrix}. \quad (4.22)$$

де w_{ij} – критерії відносної важливості компонентів матриці; рядки й стовпці відповідають такому порядку: $i = j = 1$ – елементи прогонової будови; $i = j = 2$ – опори та опорні частини; $i = j = 3$ – фундаменти; $i = j = 4$ – підмостове русло; $i = j = 5$ – регуляційні споруди; $i = j = 6$ – елементи проїзної частини; $i = j = 7$ – підходи.

Числові елементи сформованої матриці переваг $\mathbf{W}$ мають такі значення:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{3}{2} & \frac{4}{2} & \frac{5}{2} & \frac{6}{2} & \frac{7}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 1 & \frac{4}{3} & \frac{5}{3} & \frac{6}{3} & \frac{7}{3} \\ \frac{1}{4} & \frac{2}{4} & \frac{3}{4} & 1 & \frac{5}{4} & \frac{6}{4} & \frac{7}{4} \\ \frac{1}{5} & \frac{2}{5} & \frac{3}{5} & \frac{4}{5} & 1 & \frac{6}{5} & \frac{7}{5} \\ \frac{1}{6} & \frac{2}{6} & \frac{3}{6} & \frac{4}{6} & \frac{5}{6} & 1 & \frac{7}{6} \\ \frac{1}{7} & \frac{2}{7} & \frac{3}{7} & \frac{4}{7} & \frac{5}{7} & \frac{6}{7} & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.22a)$$

Вектор коефіцієнтів впливу $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n]^T$ знаходиться з рівняння

$$\mathbf{W}\mathbf{w} = n \mathbf{w}, \quad (4.23)$$

де n – кількість критеріїв на заданому рівні ієрархії і одночасно *розмір квадратної матриці попарних порівнянь*, $n = 7$.

Рівняння (4.23) є подібним до класичного рівняння, яке зв'язує квадратну матрицю з власним числом і власним вектором:

$$\mathbf{A}\mathbf{w} = \lambda_{\max} \mathbf{w}, \quad (4.24)$$

де $\lambda_{\max}$ – максимальне власне число матриці $\mathbf{A}$;

$\mathbf{w}$ – максимальний власний вектор.

Звідси витікає, що шуканий вектор коефіцієнтів впливу $\mathbf{w}$ є максимальним власним вектором матриці $\mathbf{W}$, якщо максимальне власне число $\lambda_{\max}$ дорівнює порядку матриці n .

Отриманий з матричного рівняння (4.24) максимальний власний вектор – вектор переваг нормалізується:

$$w_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j}, \quad (4.25)$$

Очевидно, що вектор w_i за формулою (4.24) задовольняє умові нормалізації

$$\sum_{i=1}^7 w_i = 1. \quad (4.26)$$

Вектори коефіцієнтів впливу $\mathbf{w}$ нами обчислені для трьох варіантів споруд: міст через водну перешкоду; міст без регуляційних споруд; шляхопровід, естакада, віадук. Ці три вектори представлені в табл. 4.4 нижче.

Таблиця 4.3 – Вагові коефіцієнти w_i у формулі (4.20) експертної оцінки технічного стану споруди

Вид споруди	Групи елементів						
	Проїзна частина	Прогонова будова	Опора та опорні частини	Фундамент	Підмостове русло	Регуляційна споруда	Підходи
Міст через водну перешкоду	0,04	0,42	0,24	0,16	0,07	0,05	0,02
Міст без регуляційних споруд	0,04	0,46	0,25	0,15	0,08	-	0,02
Шляхопровід, естакада, віадук	0,04	0,56	0,26	0,12	-	-	0,02

Експлуатаційний стан споруди в цілому за рейтинговою оцінкою наведена в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Експлуатаційна оцінка експлуатаційного стану споруди

Експлуатаційний стан	Оціночна шкала, балів
Стан 1. Справний	100 - 79
Стан 2. Обмежено справний	80 - 59
Стан 3. Працездатний	60 - 39
Стан 4. Обмежено працездатний	40 - 19
Стан 5. Непрацездатний	≤ 20

4.4 Інженерна методика прогнозування технічного стану споруд.

Метою цього підрозділу є розробка інженерної методики прогнозування технічного стану споруди за моделлю марковського ланцюга матриця перехідних ймовірностей якого формується на основі статистичних даних з історії експлуатації. Теоретичні засади моделі викладені вище.

Алгоритм прогнозування технічного стану споруд

Алгоритм реалізації моделі марковського ланцюга для прогнозування технічного стану споруди в цілому наводиться в табл. 4.3. Вихідними даними є:

1. Статистичні дані розподілу мостів по станам на час прогнозу.
2. Рейтингова оцінка споруди обчислена за формулою 4.15.
3. Час прогнозу в роках.

Таблиця 4.5 – Алгоритм прогнозування технічного стану споруд

Крок	Операція
1	Обчислення наддіагональних елементів матриці ймовірностей переходу за формулою (4.11): $p_{ij} = n_{ij} / n_i$ де n_{ij} – кількість переходів зі стану i в стан j протягом заданого періоду часу; n_i – загальна кількість мостів в стані i на початок заданого періоду часу.
2	Задається початковий стан системи матрицею-стрічкою p_0 формою (4.7).
3	Обчислюється вектор стану системи на час t як добуток матриці переходів P в ступені t на вектор початкового стану системи за формулою (4.8) $p_t = p_0 \times P^t$.
4	Вводиться вектор визначених станів d розміром $[n \times 1]$ (вектор рейтингових оцінок безпечної експлуатації) за формулою (4.9) $d = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T$
5	Технічний стан споруди на довільний час t визначається залежністю (4.10) $D_t = p_0 \times P^t \times d$, де D_t – рейтингова оцінка споруди на час t – скаляр; p_0 - матриця-стрічка розміром $[1 \times n]$ ймовірностей перебування в початковому стані t_0 ; P^t – матриця ймовірностей переходів P в ступені t розміром $[n \times n]$;

4.5 Критерій ефективності експлуатаційних втручань

Введемо *критерій ефективності експлуатаційних втручань* як числову оцінку доцільності капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва автодорожнього мостів, що виражений в безрозмірних одиницях і залежить від прийнятої в попередньому підрозділі експертної оцінки технічного стану споруди в цілому.

Проблема оптимізації витрат на утримання, ремонт і реконструкцію протягом життєвого циклу моста завжди була центральною в теорії експлуатації. Всі дослідники цієї оптимізаційної задачі сходяться в думці, що цільова функція задачі є нелінійною, зростаючою з часом, по мірі того як деградують елементи споруди. Ця задача сьогодні принципово вирішена. Є велика кількість наукових публікацій, особливо закордонних [35, 37, 106, 103], в яких досліджується економічна доцільність продовження експлуатації моста. В загальному вигляді це

оптимізаційна задача, де необхідно відшукати таку стратегію експлуатації, в якій приведені витрати сягають мінімуму:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \rightarrow \min, \quad (4.27)$$

де C – цільова функція;

C_i – складові вартості життєвого циклу;

n – кількість складових вартості життєвого циклу.

Наведемо основні складові вартості життєвого циклу:

- C_1 – витрати на будівництво споруди;
- C_2 – поточні витрати на моніторинг і утримання;
- C_3 – транспортні витрати;
- C_4 – транспортні витрати, викликані затримками руху під час виконання ремонтних робіт або реконструкції;
- C_5 – інші витрати користувачів дороги;
- C_6 – соціальні витрати, викликані можливою аварією споруди;
- C_7 – витрати на охорону оточуючого середовища;
- C_8 – витрати власника споруди на матеріально-технічну базу та адміністрування.

В світі широкого розповсюдження набули Системи Управління Мостами (англ.: BMS), які в своїй більшості, мають модуль оптимізації експлуатаційних витрат. Модель згадана вище, за якою можливо спрогнозувати доцільність ремонту/капітального ремонту/ реконструкції або нового будівництва та вирішити оптимізаційну задачу, має низку суттєвих недоліків, які ускладнюють її використання в рамках програмного комплексу, що обробляє технічну інформацію про стан споруди. По-перше, в базі даних відсутні більшість із наведених вище витрат. По-друге, для визначення витрат на будівництво моста попередньо необхідно скласти проект ремонту/реконструкції або проект нової споруди для

техніко-економічного порівняння. Це довготривалі і досить дорогі процедури, навіть у випадку складання кошторисів в укрупнених показників.

Таким чином, пропонується підхід, що базується на моделі критерію доцільності виконання капітального ремонту, реконструкції або нового будівництва мостів, що знаходяться в п'ятому експлуатаційному стані, згідно класифікації [41, табл. 4.1]. Науково-технічним базисом моделі є наступні два твердження:

1. Визначальними параметрами з бази даних АЕСУМ для розбудови критерію доцільності можуть бути показники технічного стану споруди [41]: інтенсивність відмов λ та експертна оцінка технічного стану споруди E (рейтинг).

2. Формалізованим критерієм доцільності подальшої експлуатації є безрозмірна величина K_E – функція інтенсивності відмов λ та експертної оцінки технічного стану споруди E .

Критерій визначається за формулою:

$$K_E = \frac{E}{\lambda \cdot 100}, \quad (4.28)$$

де E – експертна оцінка технічного стану моста (рейтинг);

λ – інтенсивність відмов (швидкість деградації).

Експертна оцінка технічного стану споруди тут визначається за чинною формулою (4.15)

Обґрунтування граничних значень критеріїв моделі

Для визначення граничних значень використовується статистичні оцінки вибірки терміну служби автодорожніх залізобетонних мостів України (табл. 2.7).

Для всіх типів мостів, що поділені за технічним станом знайдено критерій доцільності за натурними даними по формулі (4.29). Граничні значення критерію доцільності табл. 4.6 були отримані на основі даних табл. 2.11.

Таблиця 4.6 – Критерій доцільності за натурними даними

Інтенсивність відмов	Критерій доцільності			
	Стан 2 (E=94-80)	Стан 3 (E=79-60)	Стан 4 (E=59-40)	Стан 5 (E=39-20)
0,028	34-29	28-21	20-14	13-7
0,030	31-27	26-20	19-13	12-7
0,036	26-22	21-17	16-11	10-6
0,044	21-18	17-14	13-9	8-5

Таблиця 4.7 – Поділ мостів на групи за значенням коефіцієнту доцільності

Експлуатаційний стан	Група А	Група Б	Група В
	$K_E < 8$	$8 \leq K_E < 14$	$K_E \geq 14$
1-3	Припиняються поточні ремонти. Рекомендується постійний нагляд.	Рішення про припинення/продовження експлуатації моста приймається шляхом спеціального обстеження та експертного обґрунтування	Приймається рішення про продовження експлуатації моста
4-5	Приймається рішення про припинення експлуатації моста		Призначається капітальний ремонт або реконструкція

Рішення щодо доцільності подальшої експлуатації приймається в залежності від значення K_E відповідно до табл. 4.7.

Критерій доцільності K_E залежить від інтенсивності відмов $\lambda(t)$. Якщо в формулу (4.20) підставити теоретичну функцію інтенсивності відмов залежну від часу (3.37) тоді

$$K_E(t) = \frac{E}{\frac{f(t)}{1 - F(t)} \cdot 100}, \quad (4.29)$$

де t – значення випадкової змінної часу;

$f(t)$ – щільність розподілу часу;

$F(t)$ – інтегральна функція часу на відтинку $[0, t]$

Таким чином можливо зробити прогноз необхідності капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва при змінній функції інтенсивності відмов для всіх мостів з однаковим рейтингом по різним віком.

При нормальному розподілі теоретичної функції інтенсивності відмов (ф.3.35) при статистичних оцінках $\mu=42$ роки, $\sigma=17$ роки в межах довірчого інтервалу $25 \text{ роки} \leq \mu \leq 60 \text{ роки}$ для мостів всіх типів в третьому технічному стані функція критерію доцільності при $E = 60$ має вид

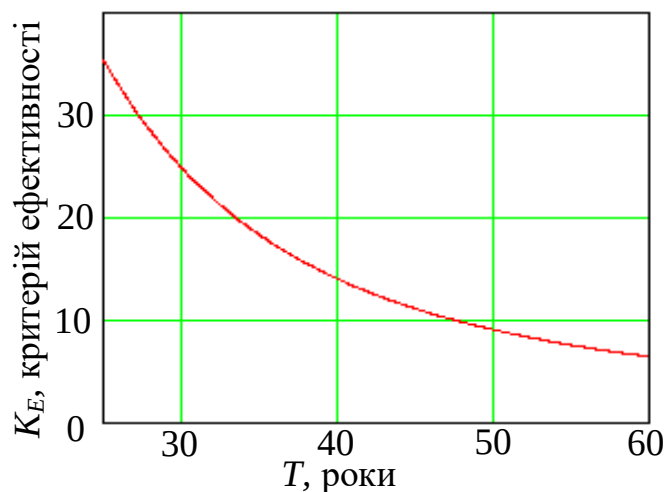


Рисунок 4.1 – Графік функції критерію ефективності для мостів в третьому експлуатаційному стані

Рекомендації, щодо експлуатаційних заходів в табл. 4.7 для прикладу рис.4.1 пояснюються наступним чином: при терміні служби $42 < t \leq 55$ роки в третьому технічному стані та $K_E = 13$ призначається обстеження та експертне обґрунтування (ТЕО) про вид ремонту; при $t > 55$ пропонується припинення поточних ремонтів та розробка проекту на нове будівництво та демонтаж старого мосту в термін $t = 15$ років до досягнення $K_E = 5$; при $t \leq 42$ та $K_E \geq 14$ приймається рішення про продовження експлуатації моста без додаткових заходів з утримання.

Якщо термін служби мосту виходить за нижню межу довірчого інтервалу $t < 25$, то пропонується класифікувати міст до групи Б.

Опис способу визначення доцільності капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва автодорожніх мостів :

- з історії експлуатації визначається інтенсивність відмов λ або приймається за теоретичною функцією інтенсивності відмов;
- за нормативним документом експлуатації мостів ДСТУ-Н [41] визначається експертна оцінка (рейтинг) технічного стану споруди E ;
- за формулою 2 визначається критерій доцільності виконання капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва автодорожніх мостів;
- на основі значення K_E визначають необхідність капітального ремонту, або реконструкції, або припинення експлуатації і необхідності в новому будівництві для кожного автодорожнього мосту в дорожній системі України.

4.6 Висновки до розділу 4

В цьому розділі розглядаються марковські ймовірнісні моделі які описують еволюцію в часі *системи елементів*, тобто розглядаються *об'єкти – мости*. Феноменологічною базою моделей є статистичні дані з історії експлуатації споруд. Кінцевою прикладною метою цих моделей є оцінювання і прогнозування технічного стану моста в цілому.

1. Стохастичний в дослідженнях розділу представляється інтегральною функцією розподілу $P(t)$ для часу T_n , котрий протікає доки стануться всі n подій процесу – розподілом Пуассона. Таким чином, стани системи в будь-який момент t задаються своїм номером $k = 1, 2, \dots, n$. Розглядається випадок $n = 5$, еволюція системи відбувається тільки в одному напрямку – від стану i до стану $i + 1$.

2. Отримані вперше на терені пострадянських країн залежності дають можливість оцінити технічний стан споруди в цілому на кожному році експлуатації.

3. Розроблена новітня інженерна методика прогнозування технічного стану споруди на перспективу в 5 – 10 років дає реалістичні результати та може бути рекомендована для реалізації в АЕСУМ.

4. Дослідження і досвід натурних обстежень показали що експлуатаційна оцінка технічного стану споруди за визначенням нормативного документу ДСТУ-Н [41] має низку недоліків які знижують ефективність оцінки, формула оцінки (4.15) сьогодні вже не відповідає вимогам коректного визначення експлуатаційного стану споруди в цілому. Нами розроблена *новітня формула* рейтингової мережевої оцінки (ф. 4.20), яка пропонується як зміна до чинного нормативного документу ДСТУ-Н [41].

5. В рамках досліджень розділу 4 розроблено *критерій ефективності експлуатаційних втручань* як числову оцінку доцільності капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва автодорожнього мостів, що виражений в безрозмірних одиницях і залежить від експертної оцінки технічного стану споруди в цілому. Критерій дозволяє прогнозувати необхідності капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва при змінній функції інтенсивності відмов для мостів всіх типів.

Введений критерій доцільності в 2015 році був реалізований в ПК Укравтодору АЕСУМ, його застосування має суттєвий соціально-економічний ефект.

6. Результати досліджень даного розділу викладено у наступних публікаціях [21, 22, 23, 25, 28, 29, 30].

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача пошуку нових моделей накопичення пошкоджень та прогнозування життєвого циклу елементів автодорожніх мостів та споруд в цілому. Отримані нові результати є однією із перших спроб зв'язати фундаментальні нерівності граничних станів з часом та утворюють у сукупності теоретичну і методичну базу оцінки довговічності залізобетонних елементів мостів.

Проведені теоретичні та числові експериментальні дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Виконано аналіз сучасного стану проблеми прогнозування довговічності залізобетонних елементів мостів. Аналіз публікацій направлений на систематизацію моделей оцінки життєвого циклу експлуатації залізобетонних елементів мостів виявив, перш за все, соціально-економічну значимість проблеми оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Значна кількість наукових публікацій присвячених проблемі довговічності містить тезу, що найбільш тривожною проблемою національної транспортної мережі автомобільних доріг України є низька довговічність транспортних споруд.

2. Аналіз публікацій показав, що саме стохастичні моделі марковських ланцюгів сьогодні є найбільш перспективним, універсальним інтегральним апаратом опису поступового руйнування елементів споруд. Більшість автоматизованих систем управління мостами в світі базуються на марковських моделях.

3. Виконаний вперше в рамках дослідження статистичний аналіз технічного стану автодорожніх мостів України дає можливість стверджувати, що система експлуатації сьогодні має достовірну базу даних яка може слугувати базисом в розробці новітніх моделей оцінювання і прогнозування ресурсу.

Виконаний статистичний аналіз строків служби виявив небезпечні завищення залишкового ресурсу моделлю ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 [41] для елементів мостів що знаходяться в 4 – 5 експлуатаційних станах. Залишковий ресурс, що прогнозується, може бути завищеним на 25 – 30 %.

В чинній моделі показник інтенсивності відмов (швидкість деградації) приймається постійним, незалежним від часу $\lambda = \lambda(t)$. Виконане дослідження показало, що показник інтенсивності відмов є змінним в часі. Очевидно, що модель ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 [41] потребує модернізації.

5. Дістала подальший розвиток марковська стохастична модель оцінювання життєвого циклу елемента моста, *вперше* отримані нові наукові дані стосовно інтенсивності відмов (швидкості деградації) марковського ланцюга. Показано, що поточний ремонт прогонової будови в третьому експлуатаційному стані може збільшити ресурс моста на 15 – 18 %.

6. *Вперше* розроблено в рамках дисертації узагальнену стохастичну модель *об'єктного рівня* прогнозування технічного стану залізобетонних мостів.. Доведено, що запропонована модель, є реалістичною, прогнозування ресурсу дає прийнятні для практики результати, які не різняться з фактичними строками служби більше ніж на 8 – 12 % і дозволяє прогнозувати експлуатаційний стан споруди протягом всього життєвого циклу експлуатації.

7. Розроблена новітня інженерна методика прогнозування технічного стану автодорожніх мостів в процесі експлуатації.

8. Встановлений в рамках дослідження зв'язок узагальненої стохастичної моделі *об'єктного рівня* прогнозування технічного стану залізобетонних мостів з нормативним документом ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» відкриває шлях до паралельного прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів всіх типів.

9. Результати дисертаційного дослідження знайшли застосування в експлуатації транспортних споруд на автомобільних дорогах України. Підготовлені пропозиції щодо включення розробленої моделі *об'єктного рівня* прогнозування технічного стану залізобетонних мостів в програмному комплексі «АЕСУМ» Укравтодору. Дослідженням доведено, що розроблену модель після експериментального застосування можна пропонувати до нормативного документу ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 як паралельну до чинної.

10. За результатами дослідження запропоновано до включення в АЕСУМ *критерія ефективності експлуатаційних втручань* як числову оцінку доцільності капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва автодорожнього мостів, що виражений в безрозмірних одиницях і залежить від експертної оцінки технічного стану споруди в цілому. Критерій дозволяє прогнозувати необхідності капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва при змінній функції інтенсивності відмов для мостів всіх типів.

11. Виконане дослідження показало що запропоновані моделі прогнозування технічного стану є досить універсальними, можуть бути рекомендованими для мостів всіх типів незалежно від матеріалу, і більш того, для мостів не тільки автодорожніх, а й залізничних. Розроблені марковські моделі прогнозування ресурсу мостів можуть бути узагальненими для використання на етапі проектування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании / пер. с англ. Ю.Д. Сухова. Москва: Стройиздат, 1988. 584 с.
2. Богданов Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений / пер. с англ. С.А. Тимашева / под. ред. С.А. Тимашева. Москва: Мир, 1989. 344 с.
3. Боднар Л.П. Программний комплекс АЕСУМ. *Сучасний стан та концепція подальшого розвитку. Дороги і мости*: зб. наук. пр. Київ: ДерждорНДІ, 2010. Вип. 12. С. 31–39.
4. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Москва: Стройиздат, 1971. 255 с.
5. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. Москва: Машиностроение, 1984. 312 с.
6. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. Москва: Машиностроение, 1990. 446 с.
7. Васильев А.И. Вероятностная оценка остаточного ресурса физического срока службы железобетонных мостов. *Проблемы нормирования и исследования потребительских свойств мостов*: сборник УЦНИИС. Москва, 2002. Вып. 208. С. 101–121.
8. ВБН В.3.1-218-174-2002. Мости та труби. Оцінка технічного стану мостів, що експлуатуються. Вид. офіц. Київ: Державна служба автомобільних доріг України, 2002. 74 с.
9. Вентцель Е.С. Исследование операций. Москва: Советское радио, 1972. 552 с.
10. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие для студ. вузов. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Издательский центр «Академия», 2003. 464 с.
11. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. 2-е изд. Москва: Высш. шк., 2000. 383 с.

12. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учебник для студ. вузов. 10-е изд., стер. Москва: Издательский центр «Академия», 2005. 576 с.
13. Гамеляк І.П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.11. Київ, 2005. 26 с.
14. Гамеляк І.П. Оценка эксплуатационной надежности конструкций дорожных одежд городских улиц и дорог. *Материалы международной НПК «Проблемы надежности дорожных одежд городских улиц и дорог»*. Минск: БНТУ, 2005.
15. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для студ. вузов. Москва: Высшая школа, 1971. 368 с.
16. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. Москва: Наука, 1965. 524 с.
17. Горбань І.І. Теорія ймовірностей і математична статистика для наукових працівників та інженерів. НАН України, Ін-т пробл. мат. машин і систем. Київ, 2003. 244 с.
18. Гордеев В.Н. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, А.В. Махинько, В.А. Пашинский, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин / под общ. ред. А.В. Перельмутера. 4 изд. переработ. Москва: издательство СКАД СОФТ, издательство АСВ, издательство ДКМ Пресс, 2014. 250 с.
19. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Москва, 1990. 37 с.
20. ГОСТ 27751-88 [СТ СЭВ 384-87]. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. Москва, 1988. 10 с.
21. Давиденко О.О. Аналіз довговічності автодорожніх мостів України. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону»*. Київ, 2013. Вип. 78. С. 225–235.
22. Давиденко О.О. Критерій ефективності експлуатаційних втручань автодорожніх мостів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків, 2017. Вип. 170. С. 127–131. ISSN 2413-3795, 1994-7852. GICID 71.0000.1500.3635. DOI 10.18664.

23. Давиденко О.О. Моніторинг безпечної експлуатації автодорожніх мостів України. *Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*. Дніпропетровськ, 2015. Вип. 7. С. 4–12.
24. Давиденко О.О. Оптимізація вартості життєвого циклу автодорожніх мостів. *Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. Київ, 2015. Вип. 94. С. 210–219.
25. Давиденко О.О. Оцінка технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів України. *Автошляховик України*. Київ, 2014. Вип. 237. С. 29–35.
26. Давиденко О.О. Перевірка відповідності обраної моделі розподілу спостережуваним даним термінів служби залізобетонних автодорожніх мостів України. *Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. Київ, 2016. Вип. 99. С. 210–219.
27. Давиденко О.О. Статистичний прогноз технічного стану автодорожніх мостів України. *Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*. Дніпропетровськ, 2016. Вип. 10. С. 4–13.
28. Давиденко О.О. Функція інтенсивності відмов елементів споруд. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків, 2017. Вип. 167. С. 88–96. ISSN 2413-3795, 1994-7852. GICID 71.0000.1500.3635. DOI 10.18664.
29. Давыденко А.А. Выбор оптимальной стратегии эксплуатации железобетонных автодорожных мостов в рамках задачи оптимизации стоимости жизненного цикла. *Журнал «Евразийское научное объединение»*. Москва, 2016. Вип. 17. С. 19–23. ISSN 2411-1899.
30. Давыденко А.А. Марковские модели накопления повреждений в оценке и прогнозировании технического состояния мостов. *Сборник научных трудов «Мосты и туннели: теория, исследования, практика»*. Днепропетровск, 2014. Вип. 6. С. 40–47.
31. ДБН В.1.2–14:2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. [Чинні від 2009–12-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 73 с.

32. ДБН В.2.3-14:2006. Мости і труби. Правила проектування. [Чинні від 2007-02-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2006. 217 с.
33. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Вводяться на заміну ДБН В.2.3-14:2006. [Чинні від 2010-03-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 52 с.
34. ДБН В.2.3-6:2009. Мости та труби. Обстеження і випробування. [Чинні від 2010-03-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 43 с.
35. Дехтяр А.С. Оптимальна експлуатація залізобетонних мостів. *Системні методи керування, технології та організації виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів*. Київ, 2001. Вип. 12. С. 385–392.
36. Дехтяр А.С. Оптимальні терміни і об'єми ремонту залізобетонних мостів. *Ремонт та експлуатація мостів*: наук. праці фізико-технічного інституту НАНУ ім. Карпенка. Львів, 2001. С.17–24.
37. Дехтяр А.С. Планування експлуатації залізобетонних мостів. *«Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій»*: наук. праці семінару (Луцьк, 16-19 вересня 2002). Луцьк, 2002.
38. Дехтяр В.Г., Лантух-Лященко А.І. До проблеми оцінки зносу елементів моста. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: зб. наук. пр. Київ: Український транспортний університет, 2000. Вип. 59. С. 33–36.
39. ДСТУ Б.В.2.3-24:2009. Труби дорожні. Обстеження та оцінювання технічного стану. [Чинні від 2010-08-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 29 с.
40. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008. Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT). Введено вперше. [Чинний від 2013-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2012. 116 с.
41. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012. Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. [Чинний від 2013-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2012. 116 с.

42. Експлуатація і реконструкція мостів: підручник. 2-ге видання. Н.Є. Страхова та ін. / наукове редагування А.І. Лантух-Лященко. УТУ, ТАУ. Вид.: «Донеччина», 2002. 402 с.
43. Иосилевский Л.И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов: моногр. Москва: НИЦ «Инженер», 1999. 294 с.
44. Иосилевский Л.И., Антропова Е.А. Вероятностный подход к оценке трещиностойкости бетона преднапряженных конструкций. *Труды МИИТ*. Москва: Транспорт, 1969. Вып. 275. С. 33–50.
45. Иосилевский Л.И., Чирков В.П. О прогнозировании долговечности мостовых железобетонных конструкций. *Транспортное строительство*. Москва, 1993. Вып. 10. С. 41–43.
46. Кожушко В. П. Моделювання споруд на автомобільних дорогах для оцінки їх напружено-деформованого стану: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Харків, 2007. 30 с.
47. Лантух-Лященко А.И. Феноменологическая модель деградации элементов сооружений. *Труды международной научно-технической конференции «Вычислительная механика деформируемого твердого тела»*. Москва: МИИТ, 2006. С. 259–265.
48. Лантух-Лященко А.И. Вероятностная модель оценки технического состояния и прогноза остаточного ресурса элементов автодорожных. *Дороги и мосты*. Москва: Российский дорожный научно-исследовательский институт. 2007. С. 103–111.
49. Лантух-Лященко А.І. До проекту державних будівельних норм з оцінки технічного стану мостів. *Збірник «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій»*. Львів: Каменярь, 2000. Вип. 1. С. 78–83.
50. Лантух-Лященко А.И. Марковские модели накопления повреждений. Наука и искусство. *Науково-виробничий журнал «Промислове будівництво та інженерні споруди»*. Київ, 2009. № 2. С. 22–25.
51. Лантух-Лященко А.І. Нормативне регулювання у сфері проектування і експлуатації мостів. *Вісник ХНАДУ*. Харків, 2015. № 58. С. 7 – 15.

52. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: зб. наук. пр. Київ: Український транспортний університет, 1999. Вип. 57. С. 183–188.

53. Лантух-Лященко А.І. Оцінка технічного стану транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації. *Вісник Транспортної Академії України*. Київ, 1999. № 3. С. 59–63.

54. Лантух-Лященко А.І. Сучасні теоретичні засади визначення надійності мостів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: зб. наук. пр. Київ: Національний транспортний університет, 2002. Вип. 64. С. 155–165.

55. Лантух-Лященко А.І. Уточнення оцінки експлуатаційного стану мостів. *Збірник «Дороги і мости»*. Київ: ДерждорНДІ, 2008. Вип. 9. С. 12–18.

56. Майстренко И.Ю. Оценка надежности несущих конструкций металлических мостов методом статистического моделирования. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета «Теория инженерных сооружений и строительных конструкций»*. Казань: КазГАСУ, 2008. Вып. 1. С. 295–301.

57. Майстренко И.Ю., Манапов А.З. Моделирование процесса изменения во времени уровня надежности конструктивной системы. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета «Строительные конструкции, здания и сооружения»*. Казань: КазГАСУ, 2010. Вып. 1. С. 132–140.

58. Майстренко И.Ю., Манапов А.З. Оценка резервов несущей способности и долговечности эксплуатируемых мостов с учетом индивидуальных особенностей. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»*. Казань: КазГАСУ, 2009. Вып. 2. С. 295–301.

59. Мамажанов Р.К. Вероятностное прогнозирование ресурса железобетонных пролетных строений. Ташкент: ФАН, 1993. 156 с.

60. Марков А.А. Исчисление вероятностей. 2-е изд. Санкт-Петербург: тип. Имп. акад. наук, 1908. 284 с.
61. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов: моногр. Киев: Наук. думка, 1991. 416 с.
62. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Партон В.З. Механика разрушения и прочности материалов: справ. пособие в 4 т. Киев: Наук. думка, 1988. Т. 1. 487 с.
63. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. Москва: Издательство ассоциации строительных вузов, 2007. 185 с.
64. Перельмутер А.В. Эксплуатационная надежность конструкций зданий и сооружений и нормы проектирования при реконструкции. Киев: Общ-во «Знание», 1991. 19 с.
65. Пирадов А.Б., Гвелесиани Л.О., Пирадов К.А. Длина и ширина раскрытия трещин в бетонных элементах при длительном нагружении. *Известия вузов. Строительство*, 1991. № 12. С.88–90.
66. Пирадов К.А., Гузеев Е.А. Механика разрушения железобетона. Москва: Новый век, 1998. 190 с.
67. Пискунов С.О., Гуляр О.І., Мицюк С.В. Визначення ресурсу з використанням параметра пошкоджуваності при багаточикловому навантаженні. *Опір матеріалів і теорія споруд*: науково-технічний збірник. Київ: КНУБА, 2009, Вип. 84. с. 20–31. ISSN 0132–1471.
68. Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий. Полтава: ООО «АСМИ», 2009. 452 с.
69. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин*: зб. наукових статей / наук. кер. академік НАН України Б.Є. Патон. Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2006. 85 с.
70. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании: моногр. Москва: изд-во АСВ, 1998. 304 с.

71. Рекомендации по оценке и обеспечению надежности транспортных сооружений. Москва: Всесоюзный Ордена Октябрьской революции Научно-исследовательский Институт Транспортного Строительства, 1989. 58 с.

72. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. Москва: Стройиздат, 1978. 239 с.

73. Ржаницын А. Р. Применение статистических методов в расчётах сооружений на прочность и безопасность. *Строительная промышленность*. 1952. № 6. С. 22–25.

74. Романовский В.И. Дискретные цепи Маркова. Москва, Ленинград, 1949. 436 с.

75. Саати Т.Л. Математические методы исследования операций / под. ред. А.П. Гришина / пер. с англ. Ю.М. Певницкого, В.С. Томжевского, Н.Ф. Трубицына. Москва: Военное изд. министерства обороны СССР, 1963. 420 с.

76. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. Киев: Техника, 1977. 768 с.

77. Стрелецкий Н.С. Об исчислении запасов прочности сооружений / Н. С. Стрелецкий. *Сборник трудов МИСИ*. Москва: Стройиздат, 1938. №1. С. 4–32.

78. Таха Хемди А. Введение в исследование операций. Москва: МИР, 1985. Т. 1. 479 с.

79. Усаковский С.Б. Прикладные задачи теории сооружений. О новой парадигме теории расчета сооружений: монография. Киев: КНУСА, 2014. 145 с.

80. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения: в 2-х т. / пер. с англ. Москва: Мир, 1984. Т. 1. 528 с.

81. Чернявский В.Л., Гиль Ю.Б. Оценка остаточного ресурса по мере функционального состояния эксплуатирующихся железобетонных конструкций. *Зб. наукових праць Луганського національного університету*. Луганськ: вид. ЛНАУ. 2004. № 40 (52). С. 279–285.

82. Чирков В.П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций. Москва: Транспорт, 1980. 133 с.

83. Шестериков В.И. Оценка и прогнозирование состояния мостов на автомобильных дорогах в системе управления их эксплуатацией: автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. РосдорНИИ. Москва, 2008.

84. Янчук Л.Л. Детерміністична модель прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів мостового переходу. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: науково-технічний збірник. Київ: НТУ, 2010. Вип. 78. С. 80–90.

85. Янчук Л.Л. Моделювання життєвого циклу залізобетонних елементів мостів, що знаходяться в експлуатації. *Вісник ХНАДУ*. Харків, 2015. № 58. С. 118–123.

86. Яцко Ф.В. Ймовірнісна модель прогнозу терміну служби залізобетонних мостів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. Рівне, 2011. № 22. С. 114–121.

87. Яцко Ф.В. Практична інженерна методика оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів в процесі проектування. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2014. № 25. С. 138–147.

88. Яцко Ф.В., Медведев К.В. Прочность, надежность и долговечность железобетонных элементов автодорожных мостов. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*. Дніпропетровськ, 2013. № 4. С. 52–61. ISSN 2227-1252.

89. Ang A. H-S., Tang, W.H. Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Decision, Risk and Reliability. Vol. II. New York: John Wiley and Sons, 1984. 562 pp.

90. Augusti G., Ciampoli M., Frangopol D.M. Optimal planning of retorting interventions on bridges in a highway network. *Engineering Structures*. 1998. Vol. 20. No. 11. P. 933–939.

91. Bocchini P., Frangopol D. M., Deodatis G. A random field based technique for the efficiency enhancement of bridge network life-cycle analysis under uncertainty. *Engineering Structures*. 2001. Vol. 33. No. 12. P. 3208–3217.

92. Bocchini P., Miranda M., Christou V. Life-Cycle of Structural Systems – Furuta, Frangopol & Akiyama (Eds). London: Taylor & Francis Group, 2015.
93. Bogdanoff J. L. A New Cumulative Damage Model. *Journal of Applied Mechanics*. 1978. Part 1. Vol. 45. P. 246–250.
94. Bogdanoff J. L., Krieger W. A New cumulative damage model. *Journal of Applied Mechanics*. 1978. Part 2. Vol. 45. P. 251–257.
95. Collins L. An introduction to Markov chain analysis. CATMOG (Concepts and Techniques in Modern Geography). Norwich: Geo Abstracts Ltd., Univ. of East Anglia, 1972.
96. Collins L. Estimating Markov Transition Probabilities from Micro-Unit Data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*. 1974. Vol. 23. P. 355–371.
97. Cornell A.C. A Probability Based Structural Code. *ACI Journal*. 1969. Vol. 66. No. 12. P. 46–52.
98. Das P.S. New Development in Bridge Management Methodology. *Structural Engineering International*. 1998. Vol. 8. No. 4. P. 299–302.
99. Debrito, J., Branco, F.A., Thoft-Christensen, P., Sorensen, J.D. An expert system for concrete bridge management. *Engineering Structures*. 1997. Vol. 19. No. 7. P. 519–526.
100. Destefano, P.D., Grivas, D.A. Method for Estimating Transition Probability in Bridge Deterioration Models. *Journal of Infrastructure Systems*. 1998. Vol. 4. No. 2. P. 56–62.
101. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural Reliability Methods. Chichester: John & Wiley Sons Ltd, 1996. 185 p.
102. DuraCrete, Probabilistic Methods for Durability Design, Document BE95 – 1347/R0, The European Union – Brite EuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, CUR, Gouda, 1999.
103. Durairaj S.K., Ong S.K., Nee A.Y.C., Tan R.B.H. Evaluation of Life Cycle Cost. Analysis Methodologies. *Corporate Environmental Strategy*. 2002. Vol. 9. No. 1. P. 30–39.

104. Enright, M.P., Frangopol, D.M. Failure Time Prediction of Deteriorating Fail-Safe Structures. *Journal of Structural Engineering*. ASCE, 1998. Vol. 124 No. 12. P. 1448–1457.

105. Estes, A.C., Frangopol, D.M. Bridge lifetime system reliability under multiple limit states. *Journal of Bridge Engineering*. ASCE, 2001. Vol. 6. No. 6. P. 523–528.

106. ETSI PROJECT (Stage 1) Bridge Life Cycle Optimisation. Editors: Jutila A. & Sundquist H. Helsinki University of Technology Publications in Bridge Engineering. Espoo, 2007. URL: etsi.aalto.fi/Etsi3/PDF/Reports/ETSI_Stage1.pdf (Last accessed: 09.05.2017).

107. Faber M.H. Basics of Structural Reliability Federal Highway Administration (FHWA). Recording and coding guide for the structure in venture and appraisal of the nation's bridges, U.S. Department of Transportation Washington D. C., 1988.

108. Frangopol D.M. A probabilistic model based on eight random variables for preventive maintenance of bridges. Presented at the progress meeting on optimum maintenance strategies for different bridge types, Highways Agency, London, U.K., 1998.

109. Frangopol D.M. Life-cycle cost analysis for bridges. *Bridge Safety and Reliability*. ASCE, Reston, Virginia, 1999. P. 210–236.

110. Frangopol D.M. Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges. *Journal Of Computing In Civil Engineering*. ASCE, 2001. Vol. 15. No. 1. P. 27–34.

111. Frangopol D.M., Kallen M.J., van Noortwijk J. M. Probabilistic Models for Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures: Review and Future Directions. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2004. Vol. 6. P. 197–212.

112. Frangopol D.M., Okasha N.M. Life-cycle performance and redundancy of structures. Proceedings of the Sixth International Probabilistic Workshop, Darmstadt, Germany, 26–27 November, 2008 (Keynote Lecture), 2008. P. 1–14.

113. Freudenthal A.M. Safety and the probability of Structural Failure. *Transactions Of ASCE*. 1956. Vol. 112. P. 1337–1397.

114. General principles on reliability for structures. Geneva: International Organization for Standardization, 1998. 73 p. ISO 2394:1998.

115. Hasofer A.M., Lind N.C. Exact and Invariant First Order Reliability Format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. Proc. ASCE, 1974. Vol. 100. No. 1. P. 111–121.

116. Hearn. G. Condition Data and Bridge Management System. *Structural Engineering International*. 1998. Vol. 3. No. 8. P. 216–221.

117. Iatsko F., Lantoukh-Liaschenko A., Medvediev K. Comparative analysis of carrying capacity and reliability of reinforced concrete beams in accordance with National Regulations and Eurocode 2. *Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures*: 8-th International Conference AMCM 2014, Wroclaw, 2014. P. 194.

118. Jean-Armand Calgaro. Calibration des codes de conception et de calcul des constructions : approches fiabilistes. *Fiabilite des Materiaux et des Structures 2010*. 6ieme Journees Nationales de Fiabilite. Toulouse. URL: http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/jfms10/JFMS_PRE/Conferences_invitees/Calgaro.pdf (Last accessed: 11.05.2017).

119. Jiang Y., Saito M., Sinha K.C. Bridge Performance Prediction Model Using The Markov Chain. *Transportation Research Rececord*. 1988. No. 1180. P. 25–32.

120. Jiang Y., Sinha K.C. Bridge Service Life Prediction Model Using The Markov Chain. *Transportation Research Rececord*. 1989. No. 1223. P. 24–30.

121. Kallen M.J., van Noortwijk J.M. Optimal maintenance decisions under imperfect inspection. *Reliability Engineering and System Safety*. 2005. Vol. 90. No. 2-3. P. 177–185.

122. Kallen M.J., van Noortwijk J.M. Statistical inference for Markov deterioration models of bridge conditions in the Netherlands. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost*: Proceedings of the Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Porto, Portugal, 16–19 July, 2006. London: Taylor & Francis, 2006. P. 535–536.

123. Kallen M.J., van Noortwijk, J.M. A study towards the application of Markovian deterioration processes for bridge maintenance modelling in the Netherlands. *Advances in Safety and Reliability: Proceedings of the European Safety and Reliability Conference*, Esrel, 2005, Tri City, Gdynia-Sopot-Gdansk, Poland, 27–30 June, 2005. Leiden, Netherlands, 2005. P. 1021–1028.

124. Kotes P., Vican J. Partial safety factors for evaluation of existing bridges according to Eurocodes. *Engineering Mechanics: 18-th International Conference*, Svratka, Czech Republic, 14–17 May 2012. P. 681–690.

125. Lantoukh-Liachtchenko A.I. Reliability based Service Life Prediction of Concrete Bridge Superstructures. *Proceeding EKO MOST 2006. Durable bridge structures in the environment*, Kielce, 16–17 May, 2006. Warszawa, 2006. P. 255–261. ISBN 83-89252-85-6

126. Lauridsen J., Bjerrun J., Andersen N.H., Lassen B. Creating a bridge management system. *Structural Engineering International*. 1998. Vol. 3. No. 8. P. 216–221.

127. Leemis, L.M. *Reliability, Probabilistic Models and Statistical Methods*. NJ: Prentice Hall, 1995. 288 p.

128. Lewis E.E. Introduction to Reliability Engineering. Wiley, New York, 1994.

129. Li L., Lijun S., Guobao N. Deterioration Prediction of Urban Bridges on Network Level Using Markov-Chen Model. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. Vol. 2014. No. 16. 10 p.

130. Lounis Z. Reliability-based life prediction of aging concrete bridge decks. *Life prediction and aging management of concrete structures*. Paris: Rilem Publications, 2000. P. 229–238.

131. Lounis Z., Mirza M.S. Reliability-based service life prediction of deteriorating concrete structures. *3-rd Int. Conf. on Concrete Under Severe Conditions*, UBC, Vancouver, Canada. 2001.

132. Madanat S.M., Karlaftis M.G., McCarthy P.S. Probabilistic Infrastructure Deterioration Models with Panel Data. *Journal of Infrastructure Systems*. 1997. Vol. 3. No. 1. P. 4–9.

133. Madanat S.M., Mishalani R., Ibrahim, W.H.W. Estimation of Infrastructure Transition Probabilities from Condition Rating Data. *Journal of Infrastructure Systems*. 1995. Vol. 1. No. 2. P. 120–125.
134. Madanat, S.M., Ibrahim W. Poisson Regression Models of Infrastructure Transition Probabilities. *Journal of Transportation Engineering*. 1995. Vol. 121. No. 3. P. 267–272.
135. Madsen H.O., Krenk S., Lind N.C. *Methods of Structural Safety*, Prentice-Hal. NJ: Inc. Englewood Cliffs, 1986.
136. Markov Chain Based Life Cycle Cost (LCC) Analysis. Part 2: Reference Structure Models for Prediction of Degradation. LIFECON Deliverable D2.2. URL: <http://lifecon.vtt.fi/d22.pdf> (Last accessed: 13.05.2017).
137. Melchers R.E. *Structural Reliability Analyses and Prediction*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 1999. 437 p.
138. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*. 1945. Vol. 12. No. 3. P. 159–164.
139. Morcous G. 2006. Performance prediction of bridge deck systems using Markov chains. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006. Vol. 20. No. 2. P. 146-155.
140. Mori Y., Ellingwood B.R. Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures. *Journal of Structural Engineering*. ASCE, 1992. Vol. 119. No. 5. P. 1600–1621.
141. Neves L.A. Life-cycle analysis of bridges considering condition, safety and maintenance cost interaction. Thesis Of University Of Minho. Portugal, 2005. 191 p.
142. NG, S-K., Moses F. Prediction of bridge service life using time-dependent reliability analysis. *Bridge Management. Inspection, Maintenance, Assessment and Repair*: Proceedings of the Third International Conference. New York: Taylor & Francis, 1996. P. 26–33.
143. Noortwijk J.M., Klatte H.E. The use of lifetime distributions in bridge maintenance and replacement modelling. *Computers & Structures*. 2004. Vol. 82. No. 13–14. P. 1091–1099.

144. Ozbay K., Parker A., Jawad D., Hussain S., Guidelines for Life Cycle Cost Analysis. Final report. Department of Civil Engineering, City College of the City University of New York, 2003. 130 p.
145. Patev R.C. Introduction to Engineering Reliability. URL: <http://www.palisade.com/downloads/pdf/EngineeringReliabilityConcepts.pdf>. (Last accessed: 09.05.2017).
146. Peng J., Shao X., Jin X. Research on lifetime performance-based bridge design method. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance*. London: Taylor & Francis Group, 2006.
147. Petcherdchoo Aruz., A., Neves Luis A.C., Frangopol D.M. Optimizing Lifetime Condition and Reliability of Deteriorating Structures with Emphasis on Bridges. *Journal Of Structural Engineering*. ASCE, 2008. Vol. 134. No. 4. P. 544–552.
148. Probabilistic Model Code. 12-th draft. Joint Committee on Structural Safety. PART I. BASIS OF DESIGN. JCSS-OSTI/DIA/VROC–10.11.2000, ETH Zurich, 64 p.
149. Sánchez-Silva M., Klutke G.-A. Reliability and Life-Cycle Analysis of Deteriorating Systems. Springer Series in Reliability Engineering. Springer International Publishing Switzerland, 2016. 351 p.
150. Sarja A., Vesikari E. Durability design of concrete structures. E&FN Spon, Chapman&Hall, 1996. 165 p.
151. Shirole A.M., Winkler W.J., Hill J.J. Bridge management system state soft. *Transportation Research Record*. Washington D.C., TRB, 1991. No. 1180.
152. Sinha Kumares C. The Development of Optimal Strategies for Maintenance Rehabilitation and Replacement of Highway Bridges. Final Report Vol. 6: Bridge Performance and Optimization 1989. 101 p. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2520&context=jtrp> (Last accessed: 09.05.2017).
153. Sobanjo J.O. Cost Estimating Under Uncertainty: Issues in Bridge Management. *8-th International Bridge Management Conference*, April, 1999. Structures. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1998. Vol. 124. No. 12. P. 1448–1457

154. Thoft-Christensen P. Assessment of the reliability profiles for concrete bridges. *Engineering Structures*. 1998. Vol. 20. No. 11. P. 1004–1009.

155. Thoft-Christensen P., Baker M.J. Structural Reliability Theory and Its Applications. Springer-Verlag, 1982. 267 p.

156. Thompson P., Small E.P., Johnson M., Marshall A.R. The Pontis Bridge Management System. *Structural Engineering International*. 1998. Vol. 8. No. 4. P. 303–308.

157. Thompson, P.D., Shepard, R.W. Pontis. *Transportation Research Record*. Washington: Transportation Research Board, D.C. 1994. Vol. 324. P. 35–42.

URL: <http://www.cait.rutgers.edu/finalreports/FHWANJ-2003-012.pdf> (Last accessed: 15.05.2017).

158. Yasunari Inamura. Estimating continuous time transition matrices from discretely observed data. Financial Systems and Bank Examination Department, Bank of Japan. 2006. 40 p. URL: https://www.boj.or.jp/en/research/wps_rev/wps_2006/data/wp06e07.pdf (Last accessed: 05.05.2017).

159. Zhang Z., Sun X., Wang X. Determination of Bridge Deterioration Matrices with State National Bridge Inventory Data. *9-th International Bridge Management Conference*, Orlando, Florida, 28 April, 2003. P. 207–219.

ДОДАТОК А

**Дані в базі даних «АЕСУМ» результатів обстеження
автодорожніх мостів України**

Таблиця А.1 – Вигляд експорту даних з «АЕСУМ» в EXCEL

Область	Адміністративне значення	Рік обстеження	Індекс дороги	Назва дороги	Тип споруди	Рік будівництва	Спосіб будівництва	Технічний стан	Рейтинг
Полтавська область	1	2014	М-22	Полтава-Олександрія	Міст на км 74 + 111	1952	2	4	49
Сумська область	5	2009	О190908	Панасівка-Столярове-Ромни-Л.Долина-Лебедин-Мезенівка/	Міст на км 10 + 740	1984	2	3	65
Тернопільська область	1	2009	М-19	Доманове(на Брест)-Ковель-Чернівці-Тереблече(на Бухарест)	Шляхопровід на км 331 + 753	1987	2	3	67
Харківська область	3	2013	Р-24	Татарів-Косів-Коломия-Борщів-Кам'янець-Подільський	Міст на км 220 + 450	1965	2	3	69

Пояснення до таблиці:

спосіб будівництва: 0 – монолітний; 1 – збірно-монолітний; 2 – збірний.

адміністративне значення: 1 – на міжнародних дорогах; 2 – на національних; 3 – регіональних; 4 – територіальних;

5 – обласних; 6 – районних.

ДОДАТОК Б

**Програма визначення статистичних оцінок вибірки залізобетонних
автодорожніх мостів України на внутрішній мові MathCAD**

file :=  введення даних з файлу
 C:\Us...\ЖБ 3.txt file⁽¹⁾ - рік призначення технічного стану (обстеження) мосту;
 data := file⁽¹⁾ - file⁽²⁾ file⁽²⁾ - рік введення мосту в експлуатацію рік призначення технічного стану (обстеження) мосту.

c(x) := $x \geq 1$

```
sdata :=
  i ← 1
  for j ∈ 1..rows(data)
    if c(dataj) = 1
      Ui ← dataj
      i ← i + 1
  W(1) ← U
  W
```

sdata := sort(sdata)

Кількість елементів у векторі sdata nn := длина(sdata) = 4288

$\frac{\text{длина(sdata)}}{16191} 100 = 26.48$ % від загальної кількості мостів на автомобільних дорогах загального користування по Укравтодору.

L := round(1 + 3.222·log(nn)) - формула Старджесса для визначення "оптимальної" кількості інтервалів.

L = 13

hh := histogram(L, sdata) int := hh⁽¹⁾ h := hh⁽²⁾

p := int₂ - int₁ = 10.923 p_N := $\frac{1}{nn \cdot p} \cdot h$ m := 0..L

Медіана Me := median(sdata) = 42

Середнє значення елементів μ := mean(sdata) = 42.109

Середнє квадратичне відхилення σ := stdev(sdata) = 16.697

Дисперсія D := var(sdata) = 278.805

Щільність вірогідності нормального розподілення d(int) := dnorm(int, μ , σ)

hi := mean(sdata) + stdev(sdata) = 58.807

lo := mean(sdata) - stdev(sdata) = 25.412

Рисунок Б.1 – Фрагмент програми на внутрішній мові MathCAD

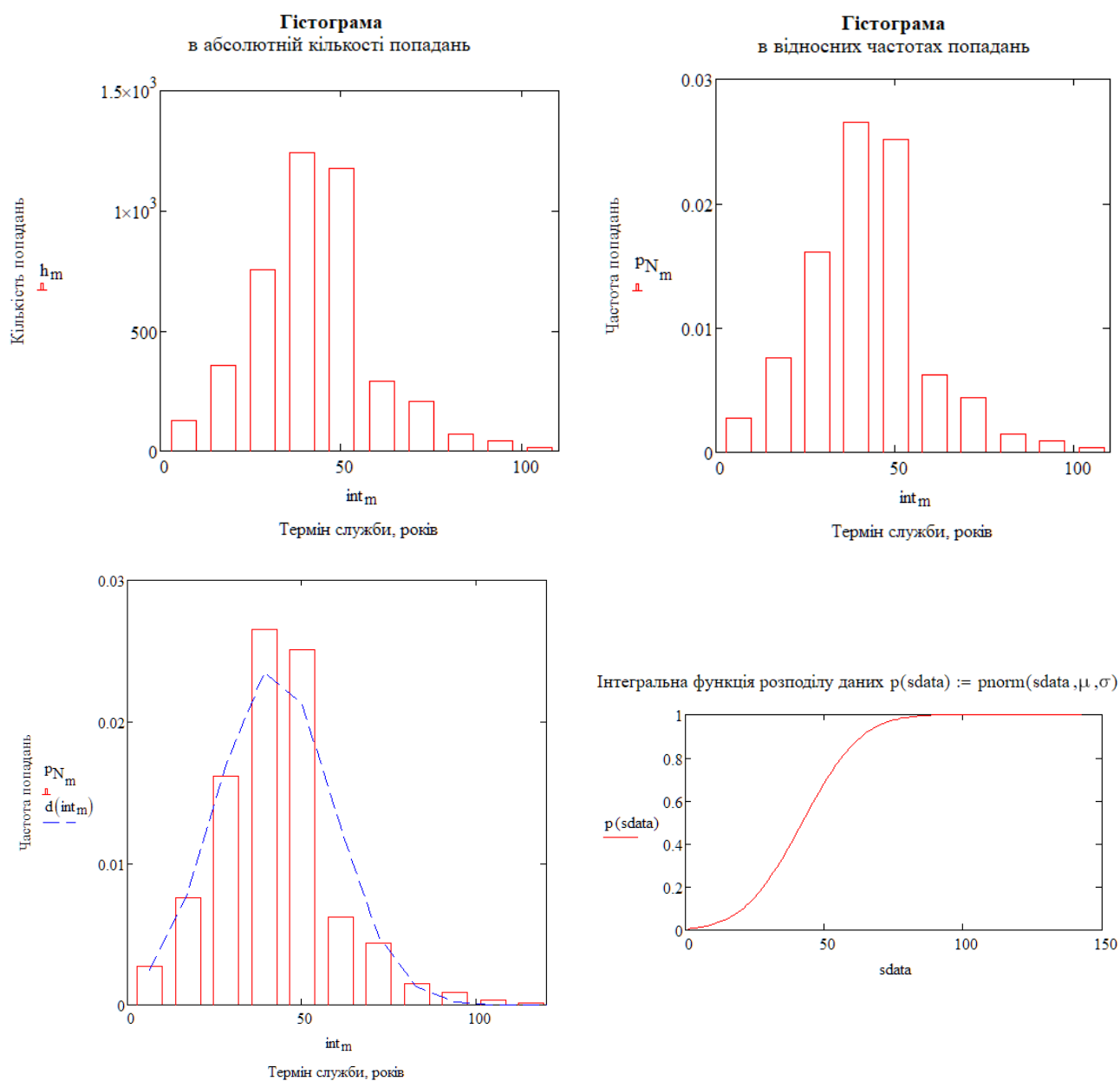


Рисунок Б.2 – Фрагмент результату програми побудови гістограм та інтегральної функції розподілу на внутрішній мові MathCAD

ДОДАТОК В

**Програма перевірки гіпотези про розподіл випадкової величини за допомоги
критерія Колмагорова - Смірнова на внутрішній мові MathCAD**

$\text{file} :=$  Вибірка зчитується з файла
 ЖБ 3.txt
 $\text{data} := \text{file}^{(1)} - \text{file}^{(2)}$ $\text{file}^{(1)}$ - ддата обстеження і призначення технічного стану; $\text{file}^{(2)}$ - дата будівництва моста.
 $c(x) := x \geq 1$
 $\text{sdata} :=$ $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ \text{for } j \in 1 \dots \text{rows}(\text{data}) \\ \quad \text{if } c(\text{data}_j) = 1 \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} U_i \leftarrow \text{data}_j \\ i \leftarrow i + 1 \end{array} \right. \\ W^{(1)} \leftarrow U \\ W \end{array} \right.$
 $x := \text{sdata}$
 $n := \text{длина}(\text{sdata}) = 4288$ Задається об'єм вибірки
 $\sigma := 16.697$ Задається відоме середнє квадратичне відхилення
 $\mu := 42.109$ Задається відоме математичне очікування
 $F(y) := \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^y e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} dt$ Задається теоретична функція розподілу
 $I(t, y) := t < y$ $F_n(y) := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} I(x_i, y)$ Визначається емпірична функція розподілу
 $\text{MAX}(x, F) := \left| \begin{array}{l} c \leftarrow F_n(x_1) - F(x_1) \\ \text{for } i \in 1 \dots n \\ \quad c \leftarrow F_n(x_i) - F(x_i) \text{ if } F_n(x_i) - F(x_i) > c \\ c \end{array} \right.$
 $T(x) := \sqrt{n} \cdot \text{MAX}(x, F)$ $T(x) = 3.975$ Будується статистика і визначається її значення
 $C(q) := \sqrt{-\ln\left(\frac{q}{2}\right)} \cdot \frac{1}{2}$ $q := 0.05$ $C(q) = 1.358$ Знаходиться значення $C(q)$ - критичне значення статистики Колмагорова-Смірнова, де q - рівень значимості.

В даному випадку $T(x) > C(q)$, тому гіпотеза про те, що випадкова величина має нормальний розподіл **не приймається**.

Рисунок В.1 – Фрагмент програми на внутрішній мові MathCAD

ДОДАТОК Д

**Програма розв'язку звичайних диференціальних рівнянь
Колмагорова - Чепмена на внутрішній мові MathCAD**

1. Задамо швидкість деградації (може бути постійною або змінною)

$$\lambda := \begin{pmatrix} 0.04 \\ 0.04 \\ 0.04 \\ 0.04 \end{pmatrix}$$

Система рівнянь Колмогорова

$$\frac{d}{dt}p_1(t) = -\lambda_1 \cdot p_1(t)$$

$$\frac{d}{dt}p_2(t) = -\lambda_2 p_2(t) + \lambda_1 \cdot p_1(t)$$

$$\frac{d}{dt}p_3(t) = -\lambda_3 p_3(t) + \lambda_2 \cdot p_2(t)$$

$$\frac{d}{dt}p_4(t) = -\lambda_4 p_4(t) + \lambda_3 \cdot p_3(t)$$

$$\frac{d}{dt}p_5(t) = \lambda_4 \cdot p_4(t)$$

Для розв'язку системи рівнянь використаємо функцію:

rkfixed(y,x1,x2,u,F) – повертає матрицю рішень системи рівнянь методом Рунге-Кутта 4-го порядку при фіксованому кроці по x ; де y – вектор початкових умов; $x1$, $x2$ – межі інтервалу для пошуку розв'язку; n – кількість точок в інтервалі; $F(x,y)$ – вектор-функція перших похідних.

2. Запишемо початкові умови та систему рівнянь.

$$p \equiv \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D(t,p) := \begin{pmatrix} -\lambda_1 \cdot p_1 \\ \lambda_1 \cdot p_1 - \lambda_2 \cdot p_2 \\ \lambda_2 \cdot p_2 - \lambda_3 \cdot p_3 \\ \lambda_3 \cdot p_3 - \lambda_4 \cdot p_4 \\ \lambda_4 \cdot p_4 \end{pmatrix}$$

Рисунок Д.1 – Перший фрагмент програми на внутрішній мові MathCAD

3. Отримаємо розв'язок у вигляді матриці

$Z := \text{rkfixed}(p, 0, 5, 5, D)$

$$Z = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.960789 & 0.038432 & 0.000769 & 0.00001 & 0 \\ 2 & 0.923116 & 0.073849 & 0.002954 & 0.000079 & 0.000002 \\ 3 & 0.88692 & 0.10643 & 0.006386 & 0.000255 & 0.000008 \\ 4 & 0.852144 & 0.136343 & 0.010907 & 0.000582 & 0.000024 \\ 5 & 0.818731 & 0.163746 & 0.016375 & 0.001092 & 0.000057 \end{pmatrix}$$

4. Задамо початкову абсолютну ймовірність переходу P_0 відповідно до ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 при $\beta=3,8$. Далі отримаємо абсолютну ймовірність для станів 2,3,4,5.

$P_1 := 0.999844$

$P_2 := P_1 \cdot Z_{2,2} + P_1 \cdot Z_{2,2} \cdot (1 - Z_{2,2}) \quad P_2 = 0.998307$

$P_3 := P_2 \cdot Z_{3,2} + P_2 \cdot (1 - Z_{3,2}) \cdot Z_{3,2} \quad P_3 = 0.992406$

$P_4 := P_3 \cdot Z_{4,2} + P_3 \cdot (1 - Z_{4,2}) \cdot Z_{4,2} \quad P_4 = 0.979716$

$P_5 := P_4 \cdot Z_{5,2} + P_4 \cdot (1 - Z_{5,2}) \cdot Z_{5,2} \quad P_5 = 0.958298$

Рисунок Д.2 – Другий фрагмент програми на внутрішній мові MathCAD

ДОДАТОК Е

Побудова регресійної моделі прогнозу термінів служби мостів на внутрішній мові MathCAD

file :=  Введення даних з файлу
 Редакт.txt file^{<1>} - рік призначення технічного стану
 (обстеження) мосту;
 file^{<2>} - рік введення мосту в експлуатацію;
 file^{<3>} - технічний стан моста.

data := file^{<1>} - file^{<2>} - вік мостів на час останнього обстеження

Кількість елементів у векторі data m := длина(data) = 6896

$\frac{\text{длина}(\text{data})}{16191} 100 = 42.59$ % від загальної кількості мостів на автомобільних
 дорогах загального користування по Укравтодору.

Призначаємо незалежну змінну X, технічний стан

vx := file^{<3>}

Призначаємо залежну змінну Y, вік моста в роках

vy := data

Обираємо регресійну модель

1. Регресійна модель - лінійна +

p := line(vx,vy) line(x) := p₁ + p₂·x

2. Регресійна модель - поліноміальна n-степеня

n := 3 - степені полінома

p1 := regress(vx,vy,n)

polinom(x) := interp(p1,vx,vy,x) polinom(5) = 49.656

3. Регресійна модель - фрагменти полінома 2-го степеня

span := 1 - призначаємо параметр визначення розмірів відтинку поліномів

p2 := loess(vx,vy,span)

fragpolinom(x) := interp(p2,vx,vy,x)

Рисунок Е.1 – Перший фрагмент програми на внутрішній мові MathCAD

4. Регресійна модель - степенев

$$G(x, C) := \begin{pmatrix} C_1 \cdot x^{C_2 \cdot x} \\ x^{C_2 \cdot x} \\ C_1 \cdot x^{C_2 \cdot x + 1} \end{pmatrix} \quad g := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C := \text{genfit}(vx, vy, g, G)$$

$$\text{stepeneva}(x) := C_1 \cdot x^{C_2 \cdot x}$$

5. Регресійна модель - експоненціальна

$$\exp(x, \alpha, \beta) := \alpha \cdot e^{\beta \cdot x}$$

$$\text{dfd}\alpha(x, \alpha, \beta) := e^{\beta \cdot x}$$

$$\text{dfd}\beta(x, \alpha, \beta) := x \cdot \alpha \cdot e^{\beta \cdot x}$$

$$F(x, a) := \begin{pmatrix} \exp(x, a_1, a_2) \\ \text{dfd}\alpha(x, a_1, a_2) \\ \text{dfd}\beta(x, a_1, a_2) \end{pmatrix} \quad a := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} := \text{genfit}(vx, vy, a, F)$$

Графік регресійних моделей

$r := 2, 2.25 \dots 5$ призначаємо крок побудови графіка

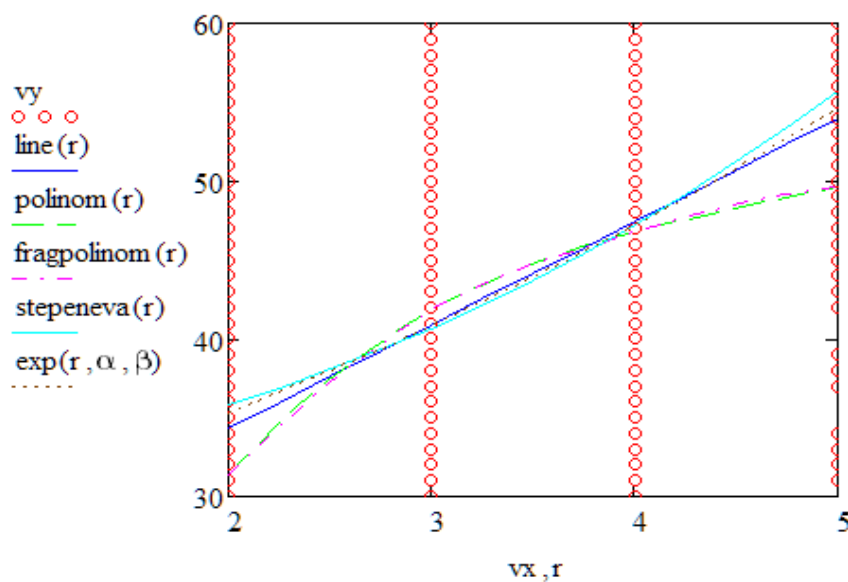


Рисунок Е.2 – Другий фрагмент програми на внутрішній мові MathCAD

ДОДАТОК Ж

Зміна №1

**до ДСТУ-Н Б В.2.3-XX:201X «НАСТАНОВА З ОЦІНЮВАННЯ І
ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ**

Викласти п.п. 7.7 – 7.8 в такій редакції

7.7 Обчислюється експертна оцінка E технічного стану споруди за формулою

$$E = 100 - \frac{20(D_c - N_c)}{D_c - \frac{N_c \times D_c}{0,45(5 - N_c) + N_c}} - 20(N_c - 1) \quad (\text{Ж.1})$$

Тут D_c – середньозважене значенням експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди; N_c – номер експлуатаційного стану визначального елементу групи

$$D_c = \sum_{i=1}^{i=7} w_i D_i, \quad (\text{Ж.2})$$

де w_i – нормалізовані коефіцієнти впливу стану (вагові коефіцієнти) i -ї групи елементів на загальний стан споруди, $i = 1, 2, \dots, 7$

При користуванні формулою експертної оцінки (7.1) слід дотримуватись таких правил:

А. Експлуатаційний стан групи елементів приймається в функції *стану найбільш слабкого визначального елемента* в групі. Визначальних елементів в групі три: прогонова будова; опора та опорні частини; фундамент.

Б. Рейтинг споруди призначається не вище ніж такий що відповідає найнижчому стану одного з трьох визначальних елементів – прогонової будови, опори, фундаменту:

В. Якщо хоча би один з визначальних елементів має найнижчий стан (п'ятий) то споруді призначається рейтинг відповідний *стану п'ять*.

Значення вагових коефіцієнтів надано в таблиці Ж.1.

Таблиця Ж.1 – Вагові коефіцієнти α_i у формулі експертної оцінки технічного стану споруди

Вид споруди	Групи елементів						
	Проїзна частина	Прогонова будова	Опора та опорні частини	Фундамент	Підмостове русло	Регуляційна споруда	Підходи
Міст через водну перешкоду	0,04	0,42	0,24	0,16	0,07	0,05	0,02
Міст без регуляційних споруд	0,04	0,46	0,25	0,15	0,08	-	0,02
Шляхопровід, естакада, віадук	0,04	0,56	0,26	0,12	-	-	0,02

Експлуатаційний стан споруди в цілому за рейтинговою оцінкою наведена в табл. 7.2.

7.8. У залежності від стану споруди за таблицею 7.2 визначається необхідність у виконанні експлуатаційних заходів.

Таблиця Ж.2 – Необхідність у виконанні експлуатаційних заходів

Експлуатаційний стан	Оціночна шкала балів	Експлуатаційні заходи
Стан 1 Справний	100 - 79	Ведуться планові обстеження та догляд
Стан 2 Обмежено справний	80 - 59	Ведуться планові обстеження, догляд та поточні ремонти без обмеження руху
Стан 3 Працездатний	60 - 39	Ведуться планові обстеження, скорочуються терміни між періодичними оглядами, виконуються поточні ремонти. За необхідності, обмежується швидкість руху
Стан 4 Обмежено працездатний	40 - 19	Ведуться обстеження за спеціальним графіком, виконується капітальний ремонт. Відповідно до дефектів конструкцій обмежується рух транспортних засобів за вагою, швидкістю та габаритними параметрами. За необхідності, розробляються спеціальні заходи із забезпечення безаварійної експлуатації моста
Стан 5 Непрацездатний	≤ 20	Ведеться постійний нагляд та контроль за виконанням обмежень руху з залученням спеціалізованої організації. Терміново вирішується питання про реконструкцію споруди або про її закриття. Вживаються тимчасові заходи до запобігання аварії

ДОДАТОК И

Свідоцтва про реєстрацію авторського права

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 68904

Науковий твір "Критерій доцільності виконання капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва автодорожніх мостів"

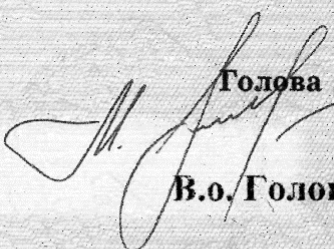
(вид, назва твору)

Автор(и) Боднар Лариса Петрівна, Давиденко Олександр Олександрович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 06.12.2016




Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
В.О. Голови А.А. Малиш

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 68663

Комп'ютерна програма "Оптимізація стратегії експлуатації мостів"
(вид, назва твору)

Автор(и) Канін Олександр Петрович, Боднар Лариса Петрівна, Давиденко Олександр Олександрович
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 16.11.2016



Голова Державної служби інтелектуальної власності України

В.З. Голови А.А. Малиш

ДОДАТОК К

Акти впровадження результатів роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник директора
з наукової роботи

ДП «ДерждорНДІ», к.т.н.

 В.К. Вирожезький

«___» 2017 р.

**А К Т**

впровадження «Інженерної методики прогнозування технічного стану споруд», розробленої в рамках дисертаційної роботи О.О. Давиденко, в Аналітичну експертну систему управління мостами ДерждорНДІ

Складено комісією у складі:

Голова комісії – завідувач сектору управління станом мостів Боднар Лариса Петрівна.

Члени комісії: –провідний науковий співробітник відділу транспортних споруд та цементобетонних конструкцій, кандидат технічних наук, професор Коваль Петро Миколайович;
–провідний науковий співробітник відділу транспортних споруд та цементобетонних конструкцій, кандидат технічних наук, с.н.с. Бабяк Ігор Петрович.

Комісія констатує, що у ДП «ДерждорНДІ» використовується «Інженерна методика прогнозування технічного стану споруд», яка є результатом досліджень дисертаційної роботи «Моделювання життєвого циклу автодорожніх мостів» О.О. Давиденко, для тестування нових модулів прогнозу ресурсу мостів в ПК АЕСУМ. Застосування паралельної моделі оцінки ресурсу елементів мостів підвищує достовірність роботи ПК АЕСУМ.

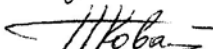
Цей акт складено для пред'явлення у спеціалізовану Вчену раду по захисту дисертаційних робіт.

Голова комісії

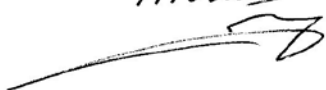


Л.П. Боднар

Члени комісії



П.М.Коваль



І.П. Бабяк

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Інститут комплексного проектування об'єктів будівництва»



І.І. Войтович

» _____ 2017 р.

А К Т

про використання моделі прогнозу життєвого циклу автодорожніх мостів,
розробленої в рамках дисертаційної роботи О.О. Давиденко

Складено комісією у складі:

Голова комісії – головний інженер, к.т.н., ст.наук.співр., Фаль Андрій Євгенійович.

Члени комісії: – головний інженер проектів, к.т.н. Лотоцький Юрій Львович
– головний інженер проектів Рожко Сергій Вікторович.

Комісія констатує, що у ТОВ «Інститут комплексного проектування об'єктів будівництва» використовується модель прогнозу життєвого циклу автодорожніх мостів, яка є результатом досліджень дисертаційної роботи «Моделювання життєвого циклу автодорожніх мостів» О.О. Давиденко. Модель застосовується в техніко-економічних порівняннях варіантів проектів мостів на автомобільних дорогах для прогнозу термінів служби. Очікується значний соціально-економічний ефект.

Цей акт складено для пред'явлення у спеціалізовану Вчену раду по захисту дисертаційних робіт.

Голова комісії

Члени комісії

А.Є. Фаль

Ю.Л.Лотоцький

С.В. Рожко

ДОДАТОК Л

**Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію
результатів дисертації**

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз

1. Давыденко А.А. Выбор оптимальной стратегии эксплуатации железобетонных автодорожных мостов в рамках задачи оптимизации стоимости жизненного цикла. *Журнал «Евразийское научное объединение»*. Москва, 2016. Вып. 17. С. 19–23. ISSN 2411-1899. РИНЦ <http://elibrary.ru/item.asp?id=26142123>.
2. Давиденко О.О. Функція інтенсивності відмов елементів споруд. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків, 2017. Вип. 167. С. 88–96. ISSN 2413-3795, 1994-7852. GICID 71.0000.1500.3635. DOI 10.18664.
<http://scholar.google.com.ua/citations?user=s0hcDhQAAAAJ&hl>

Статті у наукових фахових виданнях

3. Давыденко А.А. Марковские модели накопления повреждений в оценке и прогнозировании технического состояния мостов. *Сборник научных трудов «Мосты и туннели: теория, исследования, практика»*. Днепропетровск, 2014. Вып. 6. С. 40–47.
4. Давиденко О.О. Аналіз довговічності автодорожніх мостів України. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону»*. Київ, 2013. Вип. 78. С. 225–235.
5. Давиденко О.О. Моніторинг безпечної експлуатації автодорожніх мостів України. *Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*. Дніпропетровськ, 2015. Вип. 7. С. 4–12.
6. Давиденко О.О. Оптимізація вартості життєвого циклу автодорожніх мостів. *Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. Київ, 2015. Вип. 94. С. 210–219.
7. Давиденко О.О. Оцінка технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів України. *Автошляховик України*. Київ, 2014. Вип. 237. С. 29–35.
8. Давиденко О.О. Перевірка відповідності обраної моделі розподілу спостережуваним даним термінів служби залізобетонних автодорожніх мостів України. *Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. Київ, 2016. Вип. 99. С. 210–219.
9. Давиденко О.О. Статистичний прогноз технічного стану автодорожніх мостів України. *Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*. Дніпропетровськ, 2016. Вип. 10. С. 4–13.

Опубліковані праці апробаційного характеру

10. Давиденко О.О. Аналіз надійності і довговічності автодорожніх мостів України. *LXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету*: тези доповідей. Київ: НТУ, 2011. С. 112.
11. Давиденко О.О. Моделі управління життєвим циклом залізобетонних елементів мостів. *LXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету*: тези доповідей. Київ: НТУ, 2012. С. 144.
12. Давиденко О.О. Марковські моделі накопичення пошкоджень в оцінці та прогнозуванні технічного стану залізобетонних мостів України. *LXXII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету*: тези доповідей. Київ: НТУ, 2016. С. 166.
13. Давиденко О.О. Функція інтенсивності відмов елементів споруд. *6-та Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті»*: тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2017. С. 115–117.