

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ДАВИДЕНКО ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 624.21

МОДЕЛЮВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОДОРОЖНИХ МОСТІВ

05.23.17 – будівельна механіка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному транспортному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Лантух-Лященко Альберт Іванович,
Національний транспортний університет,
професор кафедри мостів та тунелів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Чибіряков Валерій Кузьмич,
Київський національний університет будівництва та
архітектури МОН України,
завідувач кафедри вищої математики;

кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник **Шалінський Валерій Володимирович**,
ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій
ім. В.М. Шимановського», заступник завідувача
відділу «Мости та спеціальні споруди».

Захист відбудеться «___» _____ 2017 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02 у Національному транспортному університеті за адресою: 01001, Україна, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, ауд. 333.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного транспортного університету за адресою: 01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42.

Автореферат розіслано «___» _____ 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.І. Каськів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Сьогодні визнається науковцями і державними структурами, 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 з проектування мостів, було встановлено нормативний термін служби визначальних елементів в 70 – 100 років. У 2009 році нормативом України ДБН В.2.3-22:2009 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 проектуються відповідно чинних нормативних вимог. Термін служби в 100 років фігурує також в нормах Європейського Союзу. 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».

У дійсності, сьогодні ми констатуємо, що середній термін служби залізобетонних прогонових будов мостів України не перевищує 45 – 50 років. 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 01.01.2012 р. 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 01.01.2017 р. їх кількість збільшилась до 1923 од. (загальною довжиною 54,0 км) – 12,1 % від загальної кількості.

У 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.

Вже у 2009 р. Міжвідомчою комісією з питань науково-технологічної безпеки при Раді національної безпеки і оборони України констатувався критичний стан автодорожніх мостів та транспортних споруд.

Проблема безпечної експлуатації мостів стала нагальною ще в часи Радянського Союзу. В останнє десятиріччя проблема загострилась 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 системи України не дає змоги застосовувати сучасні та інноваційні технології з експлуатації і будівництва мостів. В Україні немає чіткого стратегічного плану вдосконалення, підтримання та експлуатації дорожньої мережі.

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.

Зв'язок роботи з науковими програмами і планами. Тема дисертації відповідає актуальним напрямкам науково-технічної політики України в галузі управління експлуатаційною надійністю і довговічністю споруд і конструкцій: згідно з Постановою Кабінету Міністрів України від 05.05.1997 р. № 409 «Про забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж», а також з Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 11.06.2003 р. № 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) та реалізована 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 автодорожніх мостів, що знаходяться в експлуатації.

Мета і задачі 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.

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. У 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 елементів 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 теорії ймовірностей та математичної статистики, постановкою числових експериментів, співставленням з достовірними даними натурних спостережень, співставленням з результатами інших авторів.

Практичне значення роботи полягає:

- в розробленні інженерної методики оцінювання і прогнозу строку служби моста (споруди в цілому);
- в розробленні методики автоматизованого прийняття рішення стосовно продовження експлуатації прогнаної будови моста або заміни її новою;

- в розробленні пропозицій із змін до нормативного документу ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» (далі ДСТУ-Н).

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 р.; ДонНАБА, м. Макіївка. XIII Міжнародна конференція молодих вчених, аспірантів, студентів «Будівлі та споруди із застосування новітніх матеріалів», 2013 р.; НУВГП, м. Рівне. Сьома всеукраїнська конференція «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону», 2013 р.; ДНУЗТ, м. Дніпропетровськ. IV Міжнародна науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», 2014 р.; 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 р.; 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 р.; 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.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 170 сторінок, зокрема 113 сторінок основного тексту, 31 таблицю та 22 рисунки, список використаних джерел (159 найменувань) на 16 сторінках і 25 сторінки додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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. Перш за все, назвемо вчених, роботи яких з проблем надійності і довговічності споруд сьогодні стали класичними: В.В. Болотін, О.С. Венцель, Л.І. Юсілевській, О.Р. Ржаніцин, М.С. Стрелецький, В.П. Чирков. Цей список був би далеко не повним, якби ми не назвали їх українських учнів і послідовників: І.П. Гамеляк, В.П. Кожушко, А.І. Лантух-Лященко, В.В. Панасюк, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин, В.Л. Чернявський, Ф.В. Яцко. Серед численних робіт з проблеми закордонних вчених безпосередньо використовувались розробки Г. Аугусти, О. Дитлевсена, А.С. Корнелла, Р.Е. Мельчерса, Д. Франгопола, М. Фабера, П. Тофт-Крістенсена, Дж. Богданоффа, Ф. Козіна.

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».

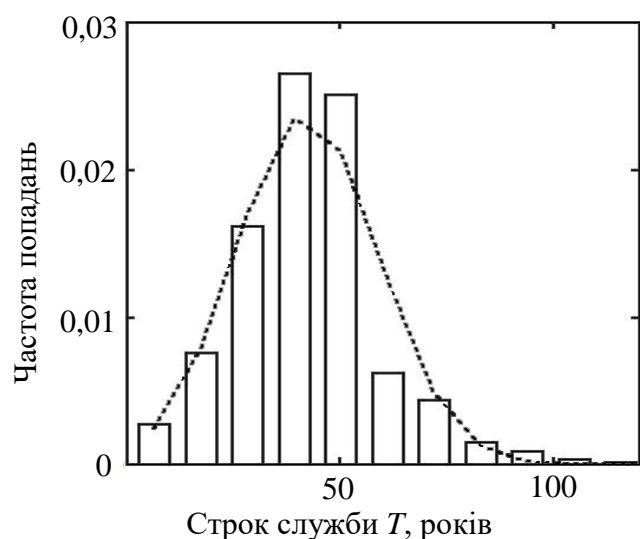
Вибірка з бази даних АЕСУМ отримана за допомогою вбудованої системи фільтрів і експортована в програму EXCEL. Вибірка містить такі варіаційні ряди: параметр інтенсивності відмов λ ; номер експлуатаційного стану; залишковий ресурс, роки; рік будівництва моста; рік виконання капітального ремонту або реконструкції (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).

Нижче в табл. 1, наведені загальні характеристики вибірки.

Таблиця 1 – 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

Варіаційний ряд строків служби T , тобто випадкової величини T , досліджується за класичною схемою оцінки статистичних даних. На рис. 1, для прикладу, представлено гістограму та основні статистичні характеристики вибірки обсягом 4288 од. строків служби прогонових будов всіх типів мостів в експлуатаційному стані 3. Аналіз типу розподілу показав, що кожна статистична вибірка розподіляється за своїм законом. Виявилось що найбільш наближеним до натурних даних є нормальний закон розподілу.



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

Рисунок 1 – Гістограма вибірки строків служби для всіх типів мостів в 3-у експлуатаційному стані

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

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

Статистичний аналіз дає середній строк служби в 4 – 5 станах 47 – 50 років (табл. 2). 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.

Ключовим моментом в описі процесу деградації марковською моделлю є матриця перехідних ймовірностей. Кожен елемент цієї матриці є ймовірність того, що система перейде від стану i до стану $i + 1$ протягом певного періоду часу. В загальному випадку еволюція дискретного марковського процесу з неперервним часом описується відомими рівняннями Колмогорова – Чепмена:

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

де t – час, вимірюється в роках; λ – інтенсивність відмов.

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. Граф моделі представлено на рис. 2.

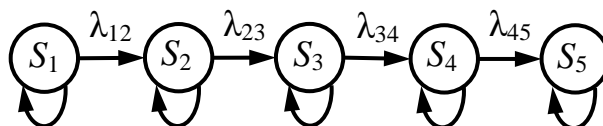


Рисунок 2 – Граф моделі процесу деградації за ДСТУ-Н

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

$$\lambda(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t) + \delta t}{\delta t P(T > t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}, \quad (2)$$

де P – ймовірність відмови; T – очікуваний час життєвого циклу експлуатації; $f(t)$ – щільність розподілу часу; $R(t)$ – функція надійності – ймовірність того, що *не відбудеться відмова* на відтинку $[0, t]$; $F(t)$ – інтегральна функція часу на відтинку $[0, t]$.

Таблиця 3 – Формули визначення інтенсивності відмов

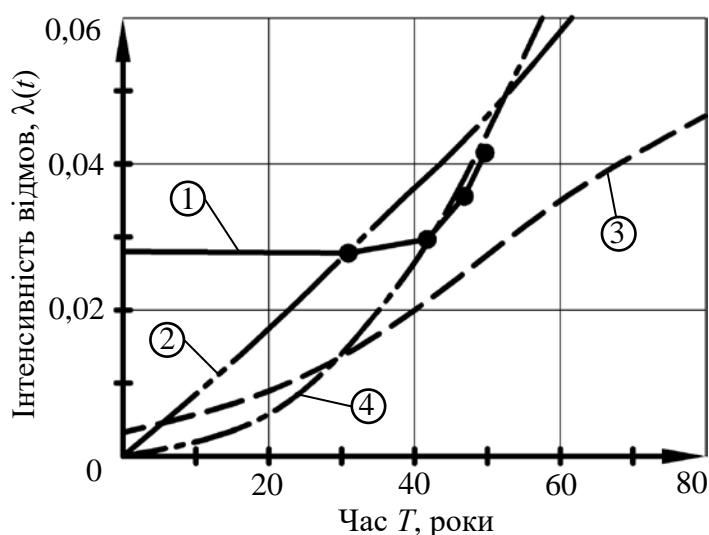
$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}.$	(3)
$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d[1 - R(t)]}{dt} = -R'(t).$	(4)
$\lambda(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{d \ln R(t)}{dt}.$	(5)

З співвідношення (2) 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, що наводяться в табл. 3, використані в роботі при дослідженні функції.

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. 4).

Таблиця 4 – Порівняння результатів обчислення інтенсивності відмов з отриманих при статистичному аналізі натурних даних

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	0,030	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



розподіл часу: 1 – за натурними даними; 2 – за функцією Вейбулла; 3 – за логістичною функцією; 4 – за нормальною функцією

Рисунок 3 – Криві «інтенсивність відмови-час»

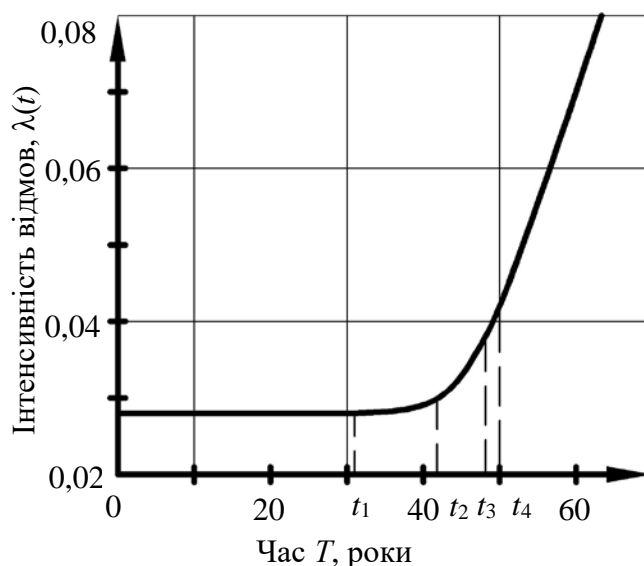


Рисунок 4 – Інтенсивність відмов за натурними даними

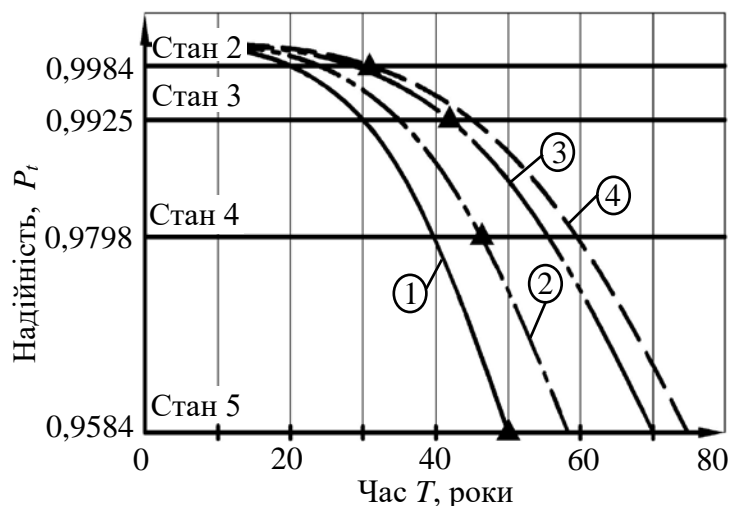
Порівняльний аналіз функції (2) за розподілом нормальним, логістичним та Вейбулла показав (рис. 3), що дві з них – з нормальним розподілом часу та розподілом Вейбулла є досить близькими за параметром інтенсивності відмови на відтинку часу [0 – 50] років. Це порівняння приводить до висновку, що модель за нормальним розподілом часу є більш реалістичною, має кращу збіжність з натурними даними статистичного аналізу історії експлуатації автодорожніх мостів України. Натурні дані на проміжку часу від $t_1=0$ до $t_2=31$ років апроксимуються прямою $\lambda(t) = \text{const}$, далі кубічним сплайном (рис. 4):

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

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

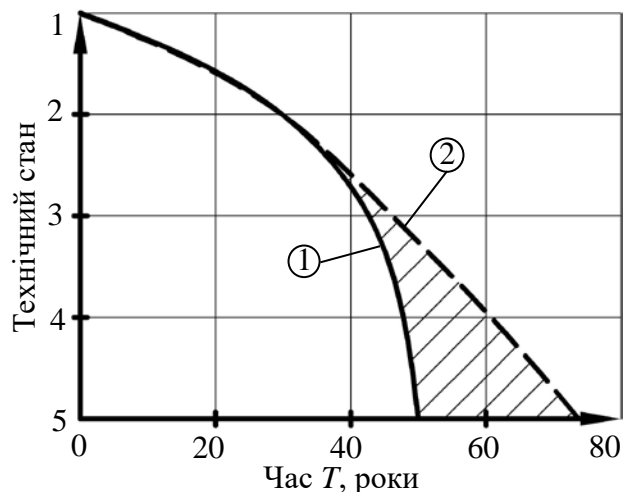
Виконані в цьому розділі чисельні експерименти з прогнозування залишкового ресурсу за ДСТУ-Н при змінній інтенсивності відмов мають високу

збіжність з натурними статистичними даними, тоді як при постійній – розходження сягають в п'ятому експлуатаційному стані до 48 % (рис. 5, 6, табл. 5).



▲ – 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 5 – Вплив інтенсивності відмов на прогноз технічного стану



1 – крива моделі прогнозу по фактичним термінам служби; 2 – крива моделі прогнозу ДСТУ-Н залишкового ресурсу; ш – заштрихована область графіку, це діапазон прогнозу.

Рисунок 6 – Графік моделей прогнозу інтенсивності відмов

Таблиця 5 – Прогноз технічного стану всіх типів мостів за ДСТУ-Н та фактичні терміни служби

Стан	Прогноз за ДСТУ-Н, роки	Фактичні строки служби, роки	Розходження, %
2	31	31	0
3	45	42	7
4	60	47	22
5	74	50	48

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». Графи процесу наведено на рис. 7.

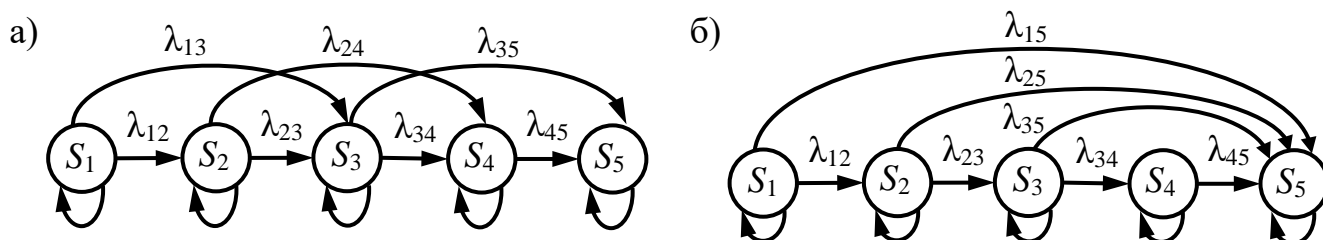


Рисунок 7 – Графи процесу деградації елемента з «проскоком»

Матриця перехідних ймовірностей описується рівняннями Колмогорова – Чепмена. Для моделі 1 за рис. 7 а) рівняння мають вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_1(t)}{dt} = -\lambda_{12}p_1(t) - \lambda_{13}p_1(t); \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = -\lambda_{23}p_2(t) - \lambda_{24}p_2(t) + \lambda_{12}p_1(t); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = -\lambda_{34}p_3(t) - \lambda_{35}p_3(t) + \lambda_{23}p_2(t) + \lambda_{13}p_1(t); \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = -\lambda_{45}p_4(t) + \lambda_{34}p_3(t) + \lambda_{24}p_2(t); \\ \frac{dp_5(t)}{dt} = \lambda_{45}p_4(t) + \lambda_{35}p_3(t); \end{array} \right. \quad (7)$$

і для моделі 2 за рис. 7 б):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_1(t)}{dt} = -\lambda_{12}p_1(t) - \lambda_{15}p_1(t); \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = -\lambda_{23}p_2(t) - \lambda_{25}p_2(t) + \lambda_{12}p_1(t); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = -\lambda_{34}p_3(t) - \lambda_{35}p_3(t) + \lambda_{23}p_2(t); \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = -\lambda_{45}p_4(t) + \lambda_{34}p_3(t); \\ \frac{dp_5(t)}{dt} = \lambda_{45}p_4(t) + \lambda_{35}p_3(t) + \lambda_{25}p_2(t) + \lambda_{15}p_1(t). \end{array} \right. \quad (8)$$

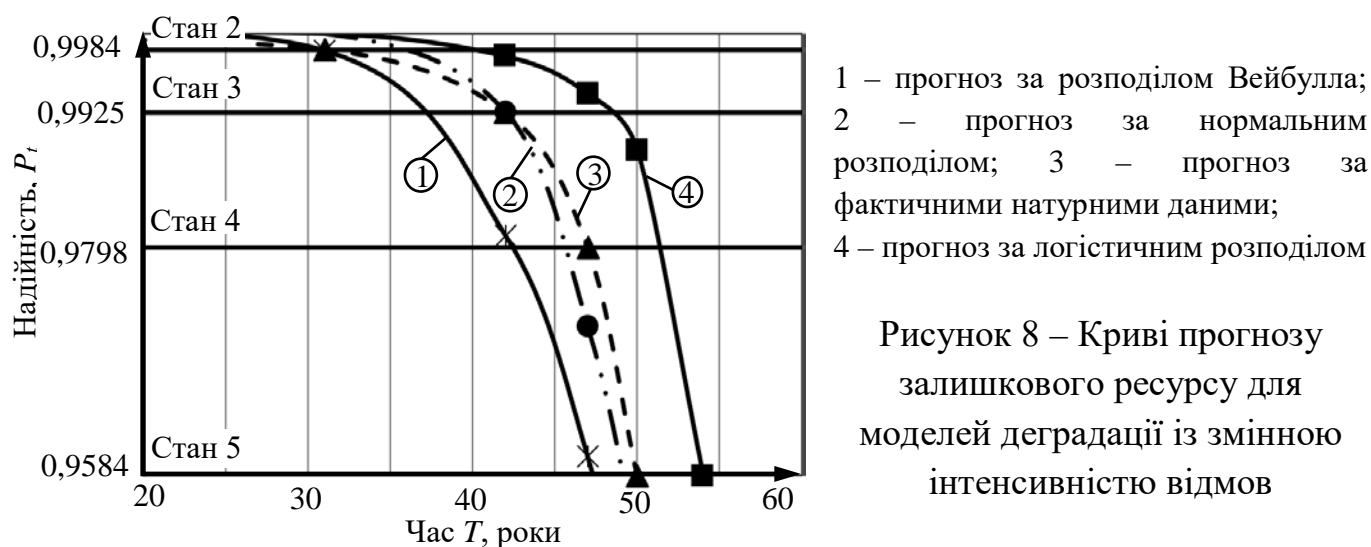
Не складно отримати аналітичний розв'язок модельних систем рівнянь, проте в дослідженні, ми користуємося більш зручним чисельним розв'язком Рунге-Кутта із змінним кроком інтегрування, величина якого адаптується до швидкості зміни функції розв'язку. Так, наприклад, матриця перехідних ймовірностей Моделі 2 має значення:

$$\mathbf{p2} = \begin{bmatrix} 0,945539 & 0,026422 & 0,028039 & 0 & 0 \\ 0 & 0,894044 & 0,049867 & 0,056089 & 0 \\ 0 & 0 & 0,845354 & 0,070585 & 0,084061 \\ 0 & 0 & 0 & 0,799315 & 0,200685 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Адекватність запропонованих моделей з проскоком перевірялась чисельними експериментами. Встановлено, що теоретична крива деградації за ДСТУ-Н

$$P(t) = 1 - 0,008333 \cdot (\lambda(t)t)^5 e^{-\lambda(t)t}, \quad (10)$$

практично співпадає з натурною при змінній інтенсивності відмов (рис. 8).



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.

Процес деградації визначається за гіпотези, що є відомою матриця переходів \mathbf{P} і вектор початкових ймовірностей \mathbf{p}_0 на кроці n . В цих умовах абсолютні ймовірності станів системи після фіксованої кількості кроків переходу визначаються так:

$$p_i^{(1)} = p_1^{(0)} p_{1j} + p_2^{(0)} p_{2j} + \dots + p_n^{(0)} p_{nj} = \sum_i p_i^{(0)} p_{ij}, \quad (11)$$

де $p_i^{(n)}$ абсолютні ймовірності станів системи після n переходів; $p_i^{(1)}$ – 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 (11), за індукцією можна показати що

$$p_j^{(n)} = \sum_i p_i^{(0)} p_{ij}^{(n)}, \quad (12)$$

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

$$P_{ij}^{(n)} = \sum_i P_{ik}^{(n-1)} P_{ki} \quad (13)$$

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 отримується шляхом множення початкового стану вектору \mathbf{p}_0 на матрицю переходів \mathbf{P} в ступені t (число років).

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

$$\mathbf{p}_0 = [p_1, p_2, \dots, p_n], \quad (14)$$

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:

$$\mathbf{p}_t = \mathbf{p}_0 \times \mathbf{P}^t, \quad (15)$$

де \mathbf{p}_0 – вектор ймовірностей перебування в початковому стані; \mathbf{P}^t – матриця переходів \mathbf{P} в ступені t .

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

$$\mathbf{d} = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T, \quad (16)$$

де r_i – дійсні числа, $i = 1, 2, \dots, n$; T – знак транспонування.

Технічний стан споруди на довільний час t визначається залежністю

$$D_t = \mathbf{p}_0 \times \mathbf{P}^t \times \mathbf{d}, \quad (17)$$

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 $[n \times n]$.

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. Ймовірність p_{ij} переходу мостового елемента зі стану i в стан j визначається за формулою:

$$p_{ij} = n_{ij} / n_i, \quad (18)$$

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.

Відповідна наддіагональна матриця перехідних ймовірностей матиме діагональні елементи, обчислені за формулою (17), і наддіагональні, як доповнення до одиниці.

В рамках дослідження запропоновано новий числовий *критерій технічного стану споруди в цілому* необхідний для практичної методики прогнозування експлуатаційного стану моста. Формула рейтингової оцінки мережевого рівня, що пропонується, має вид:

$$E = 100 - \frac{20(D_c - N_c)}{D_c - \frac{N_c \times D_c}{0,45(5 - N_c) + N_c}} - 20(N_c - 1), \quad (19)$$

де E – експлуатаційна оцінка технічного стану споруди, визначається за шкалою безрозмірних коефіцієнтів у 100 балів; D_c – середньозважене значення експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди; N_c – номер експлуатаційного стану визначального елемента групи.

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 (19).

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:

$$K_E = \frac{E}{\lambda \cdot 100}, \quad (20)$$

де E – експертна оцінка технічного стану моста (рейтинг); λ – інтенсивність відмов (швидкість деградації).

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. Виконаний в роботі аналіз сучасного стану проблеми прогнозування довговічності залізобетонних елементів мостів, систематизація моделей оцінки життєвого циклу експлуатації залізобетонних елементів мостів виявили соціально-економічну значимість проблеми оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів, показали, що саме стохастичні моделі марковських ланцюгів сьогодні є найбільш перспективним, універсальним інтегральним апаратом опису поступового руйнування елементів споруд.

2. Статистичний аналіз технічного стану автодорожніх залізобетонних мостів України, виконаний вперше в рамках дослідження, показує небезпечні завищення залишкового ресурсу за чинною моделлю системи експлуатації автодорожніх мостів, що знаходяться в 4 – 5 експлуатаційних станах. Залишковий ресурс, що прогнозується, може бути завищеним на 25 – 30 %. Очевидно, що чинна модель ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 потребує модернізації.

3. 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 %.

4. Вперше розроблено, в рамках дисертації, узагальнену стохастичну модель об'єктного рівня прогнозування експлуатаційного 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.

5. Розроблена новітня інженерна методика прогнозування технічного стану автодорожніх мостів в процесі експлуатації, яка включає стохастичну модель об'єктного рівня прогнозування експлуатаційного стану та модель експертної оцінки. Можна стверджувати, що нова методика відкриває шлях до більш

реалістичного прогнозування ресурсу транспортних споруд, які знаходяться в експлуатації.

6. Дослідженням доведено, що розроблені марковські моделі прогнозування ресурсу залізобетонних елементів автодорожніх мостів, можна пропонувати до нормативного документу ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 як модернізацію чинної моделі.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНО У ПРАЦЯХ

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

1. Давиденко, А.А. Выбор оптимальной стратегии эксплуатации железобетонных автодорожных мостов в рамках задачи оптимизации стоимости жизненного цикла [Текст] / А.А. Давиденко // Евразийское научное объединение. – М., 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 [Текст] / О.О. Давиденко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ – Х., 2017. – Вип. 167. – С. 88–96. – ISSN 2413-3795, 1994-7852. – GICID 71.0000.1500.3635. – DOI 10.18664. <https://scholar.google.com.ua/citations?user=s0hcDhQAAAAAJ&hl>.

Статті у наукових фахових виданнях

3. Давиденко, О.О. Аналіз довговічності автодорожніх мостів України [Текст] / О.О. Давиденко // Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону: міжвід. наук.- техн. зб. – К.: ДП НДІБК, 2013. – Вип. 78. Кн.2 – С. 225–235.

4. Давиденко, А.А. Марковские модели накопления повреждений в оценке и прогнозировании технического состояния мостов [Текст] / А.А. Давиденко // Сборник научных трудов «Мосты и туннели: теория, исследования, практика». – Д., 2014. – Вып. 6. – С. 40–47.

5. Давиденко, О.О. Оцінка технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів України [Текст] / О.О. Давиденко // Автошляховик України. – К., 2014. – Вип. 237. – С. 29–35.

6. Давиденко, О.О. Моніторинг безпечної експлуатації автодорожніх мостів України [Текст] / О.О. Давиденко // Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика». – Д., 2015. – Вип. 7. – С. 4–12.

7. Давиденко, О.О. Оптимізація вартості життєвого циклу автодорожніх мостів [Текст] / О.О. Давиденко // Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». – К., 2015. – Вип. 94. – С. 210–219.

8. Давиденко, О.О. Статистичний прогноз технічного стану автодорожніх мостів України [Текст] / О.О. Давиденко // Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика». – Д., 2016. – Вип. 10. – С. 4–12.

9. Давиденко, О.О. Перевірка відповідності обраної моделі розподілу спостережуваним даним термінів служби залізобетонних автодорожніх мостів України [Текст] / О.О. Давиденко // Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». – К., 2016. – Вип. 99. – С. 210–219.

Опубліковані праці апробаційного характеру

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

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

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

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

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. – Національний транспортний університет Міністерство освіти і науки України, Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена розробці моделей прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах.

У дисертації вирішена актуальна наукова задача пошуку моделей оцінювання і прогнозування технічного стану залізобетонних елементів мостів протягом життєвого циклу.

Розроблено *вперше*, на основі статистичного аналізу технічного стану автодорожніх залізобетонних мостів України, регресійну модель прогнозування життєвого циклу елементів мостів. *Вперше* отримані нові наукові дані стосовно інтенсивності відмов (швидкості деградації) марковського ланцюга для транспортних споруд. Розроблено *вперше* 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. Модель включено до програмного комплексу «АЕСУМ» Укравтодору.

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

АННОТАЦІЯ

Давыденко А.А. Моделирование жизненного цикла автодорожных мостов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – строительная механика. – Национальный транспортный университет Министерство образования и науки Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена разработке моделей прогноза жизненного цикла железобетонных элементов транспортных сооружений на автомобильных дорогах.

В диссертации решена актуальная научная задача поиска моделей оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов мостов в течение жизненного цикла.

Разработано впервые, на основе статистического анализа технического состояния автодорожных железобетонных мостов Украины, регрессионную модель прогнозирования жизненного цикла элементов мостов. Впервые получены новые научные данные о интенсивности отказов (скорости деградации) марковской цепи для транспортных сооружений.

Разработано впервые обобщенную стохастическую модель объектного уровня прогнозирования технического состояния железобетонных мостов. Доказано, что предложенная модель является реалистичной, дает приемлемые для практики результаты и позволяет прогнозировать техническое состояние сооружения в течение жизненного цикла эксплуатации. Анализ рассмотренных выше моделей деградации, дает возможность утверждать, что принятая модель накопления повреждений для оценки и прогноза технического состояния автодорожных мостов Украины адекватна реальному процессу деградации железобетонных элементов. Значительное расхождение в прогнозе ресурса по нормативной кривой и

фактическими данными, не является недостатком модели. Причина в неадекватном назначении интенсивности отказов.

Установлена процедура получения коэффициента эффективности эксплуатационных вмешательств, использование которого позволяет прогнозировать необходимость капитального ремонта / реконструкции / нового строительства при переменной функции интенсивности отказов для мостов всех типов.

Разработана новейшая инженерная методика прогнозирования технического состояния железобетонных автодорожных мостов (сооружения в целом) в процессе эксплуатации. Модель включено в программный комплекс «АЕСУМ» Укравтодора.

Ключевые слова: автомобильная дорога, автодорожный мост, деградация, долговечность, изгибаемый железобетонный элемент, прогнозирование, ресурс, транспортное сооружение, интенсивность отказов.

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 – construction mechanics. – National Transport University Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The dissertation is devoted to the development of life cycle prediction models of reinforced concrete elements of transport constructions on highways.

In the thesis the relevant scientific problem of search models estimation and prediction of a technical condition of reinforced concrete elements of bridges during a life cycle is solved.

It was developed for the first time, on the basis of statistical analysis of the technical condition of highway reinforced bridges of Ukraine, a regression model for predicting the life cycle of bridges. For the first time new scientific data were obtained concerning the hazard rate (degradation rate) of the Markov chain for transport facilities. The first generalized stochastic model of the object level prediction of the technical condition of reinforced concrete bridges was developed.

The newest engineering technique of prediction the technical condition of reinforced concrete road bridges (structures in general) was developed in the course of operation. The model is included in the developed software program "AESUM" Ukravtodor.

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