УДК 624.21

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОСТІВ

Канін О. П., *канд. техн. наук, професор*
Національний транспортний університет (НТУ)

Боднар Л. П., *завідувач сектору*
Панібратець Л. Г., *науковий співробітник*
Степанов С. М., *інженер*
Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»)

Аналітична експертна система управління мостами (АЕСУМ) – універсальний інструмент системи експлуатації мостів України на дорогах загального користування, їх моніторингу і підтримання в безпечному для експлуатації стані. Від широкого впровадження АЕСУМ очікується значний соціально-економічний ефект за рахунок оптимального використання коштів на ремонт та реконструкцію, контролю безпечної експлуатації споруд, подовження їх залишкового ресурсу і, тим самим, збільшення пропускної спроможності транспортної мережі України.

В 2004 році за підтримки Укравтодору інститут ДП «ДерждорНДІ» разом з професорами НТУ А.І. Лантухом-Лященко та Каніним О.П. почали розробку цієї системи. А вже з 2006 року почалося її поступове впровадження. Нині АЕСУМ використовується в усіх Службах автомобільних доріг України та застосовується на всіх рівнях управління в системі експлуатації Укравтодору [1,9].

За даними АЕСУМ станом на 01.01.2016 року відсоток наповнення інформацією з обстежень/паспортизації представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Аналіз наповнення бази АЕСУМ станом на 01.01.2016 р.

Область	Кількість мостів	На дорогах державного значення			На дорогах місцевого значення		
		Кількість мостів всього	Кількість внесених мостів	% заповнення	Кількість мостів всього	Кількість внесених мостів	% заповнення
Автономна республіка Крим	349	198	94	47	151	26	17
Вінницька область	847	330	307	93	517	7	1
Волинська область	388	182	175	96	206	13	6
Дніпропетровська область	663	351	241	69	312	1	0,3
Донецька область	556	177	164	93	379	117	31
Житомирська область	551	228	146	64	323	2	1
Закарпатська область	1298	471	62	13	827	5	1
Запорізька область	392	180	179	100	212	212	100
Івано-Франківська область	1172	424	288	68	748	11	1
Київська область	492	254	171	67	238	4	2
Кіровоградська область	525	181	49	27	344	0	0
Луганська область	563	209	201	96	354	352	99
Львівська область	1644	460	66	14	1184	0	0
Миколаївська область	257	107	61	57	150	1	0,7
Одеська область	872	472	118	25	400	0	0
Полтавська область	571	202	199	98	369	71	19
Рівненська область	555	299	121	40	256	0	0
Сумська область	501	216	216	100	285	283	99
Тернопільська область	827	245	74	30	582	0	0
Харківська область	799	242	241	99	557	41	7
Херсонська область	99	56	56	100	43	43	100
Хмельницька область	564	235	194	83	329	0	0
Черкаська область	509	188	165	88	321	1	0,3
Чернівецька область	616	295	96	33	321	0	0
Чернігівська область	502	266	258	97	236	4	2
місто Севастополь	36	25	24	96	11	11	100
Всього	16148	6493	3966	61,1	9655	1205	12,5

Завдяки науковому супроводу, який здійснюється на базі ДП «ДерждорНДІ», система динамічно розвивається, доповнюється новими аналітичними функціями, наповнюється та розширюється її база даних.

На рис. 1, 2 представлено ретроспективний аналіз проведених обстежень/паспортизації.

№	Область	Фактично обстежено										Σ
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
1	Автономна республіка Крим	8	10	22	18	13	4	32	6			113
2	Вінницька область		86	80			45	50	56			317
3	Волинська область	7	11	5	123			19	17		28	210
4	Дніпропетровська область	22	29	31	48	48		36	32	3	2	251
5	Донецька область	83	92	70	42		3	13			34	337
6	Житомирська область	45	32	26		4		12	5	26	10	160
7	Закарпатська область	2	3	35	8	1		2	18	7		76
8	Запорізька область	33	111	97	51	94		3	4	3		396
9	Івано-Франківська область	42	15	91	12	4	5	3	4	6	6	188
10	Київська область	12	120	16			20	26	2	4	18	218
11	Кіровоградська область	8	4	34		1				4	1	52
12	Луганська область	57	275	221	76	1	1		7	2	5	645
13	Львівська область	24	22	52				6	10	8	7	129
14	Миколаївська область	20	11		4		1	1	12	2		51
15	Одеська область	15	16				1			8	2	42
16	Полтавська область		1	3	90			60	50	71	70	345
17	Рівненська область		6	17	9		18	4	65	7		126
18	Сумська область	18	68	105	212	62	49	2	1		4	521
19	Тернопільська область	6	25	4	28		13		15		13	104
20	Харківська область	57	47	100				31	56	4	3	298
21	Херсонська область	4	24	10	3	18	22	18	14	1	2	116
22	Хмельницька область	15	49		72	1		36	21	7	1	202
23	Черкаська область	1	5	107	32			1		1	5	152
24	Чернівецька область	18	38	22	14			8			3	103
25	Чернігівська область	97	29	19	15	4	10	23	28		5	230
26	місто Севастополь		35				1					36
	Разом	594	1164	1167	857	251	193	386	423	164	219	5418
	з них з випробуванням	2	6	2	4	2	5	0	1	0	1	23

Рисунок 1 – Ретроспективний аналіз проведених обстежень/паспортизації

При співставленні фактично проведених обстежень та планів з обстежень, які складаються згідно нормативних вимог [11], слід зауважити, що відбувається значне відставання та порушення періодичності обстежень. Між тим, повторні обстеження надають цінну інформацію для відстеження зміни технічного стану мосту, оцінки впливу проведення або відсутності ремонтних робіт на технічний стан, довговічність тощо. Проте, так чи інакше, цей процес триває, нехай і не в таких масштабах, як це передбачено нормами.

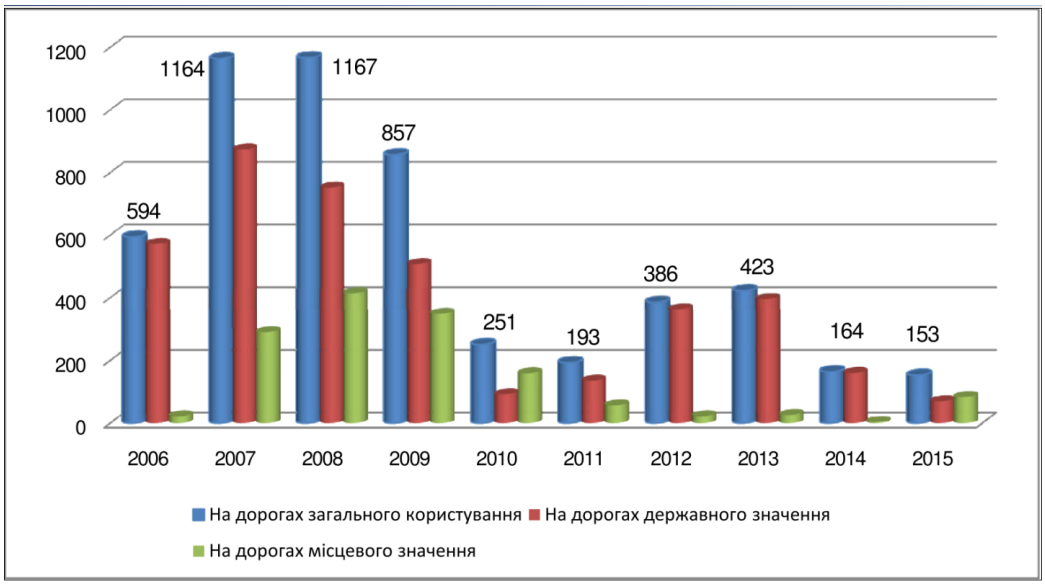

Рисунок 2 – Графік проведених обстежень/паспортизації

Згідно ДСТУ-Н [12] прийнято, що міст та його елементи протягом життєвого циклу перебувають послідовно в одному з 5 експлуатаційних станів.

Таблиця 2 – Класифікація експлуатаційних станів елементів

Експлуатаційний стан	Назва експлуатаційного стану	Узагальнена характеристика стану
Стан 1	Справний	Елемент відповідає всім вимогам проекту та чинних норм експлуатації
Стан 2	Обмежено справний	Елемент частково не відповідає вимогам проекту, проте не порушуються вимоги ані першої, ані другої груп граничних станів
Стан 3	Працездатний	Елемент частково не відповідає вимогам проекту, проте не порушуються вимоги першої групи граничних станів. Можливе часткове порушення вимог другої групи граничних станів, якщо це не обмежує нормального функціонування споруди
Стан 4	Обмежено працездатний	Можливе часткове порушення вимог першої групи граничних станів. Порушуються вимоги другої групи граничних станів. Споруда експлуатується в обмеженому режимі і вимагає спеціального контролю за станом її елементів
Стан 5	Непрацездатний	Елемент не відповідає вимогам першої групи граничних станів і з’ясовується неможливість їх задоволення, що свідчить про необхідність припинення експлуатації споруди

Розподіл обстежених мостів на автомобільних дорогах загального користування за їх експлуатаційним станом наведено на рис. 3.

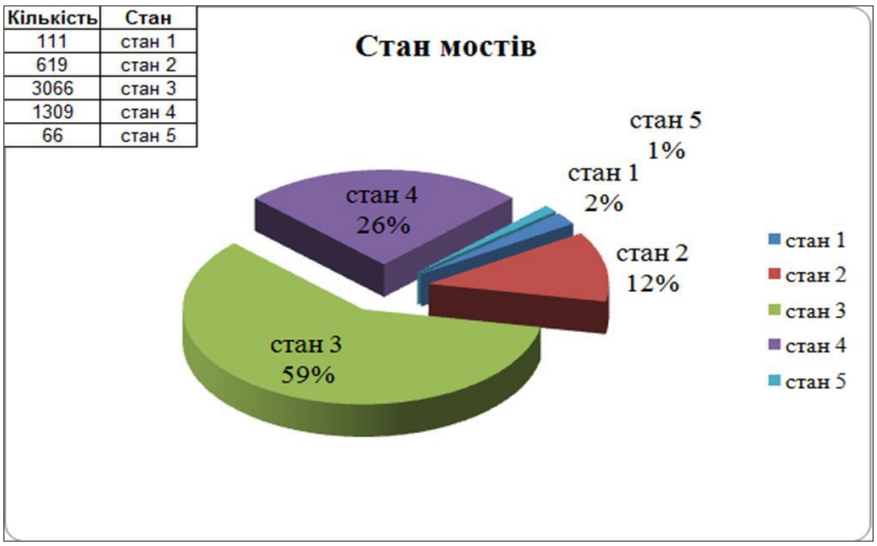

Рисунок 3 – Розподіл обстежених мостів на автомобільних дорогах загального користування за їх експлуатаційним станом

Аналіз цих даних свідчить про те, що частка мостів, які потребують невідкладного ремонту або реконструкції (4 і 5 стан) досить значна (близько 27% від кількості обстежених мостів). Слід зауважити, що дана статистика ґрунтується на результатах обстежень мостів, які переважно знаходяться на дорогах державного значення. Треба розуміти, що ситуація по мостах на дорогах місцевого значення значно гірша, відповідно відсоток мостів, які перебувають у 4, 5 експлуатаційному стані буде ще вищим.

На рис. 4 представлено дані щодо зміни фактичного стану мостів в межах прийнятої класифікації за останні 10 років, які наведено в табл. 2:

– зміни кількості мостів в межах експлуатаційного стану;
– зміни протяжності мостів в межах експлуатаційного стану;
– зміни кількості мостів в межах експлуатаційного стану (з відображенням даних по необстеженим мостам);
– зміни протяжності мостів в межах експлуатаційного стану (з відображенням даних по необстеженим мостам).

Аналіз зміни експлуатаційного стану мостів, особливо за останні роки, показує приріст частки мостів в 3, 4 та 5 експлуатаційних станах. Простежується динаміка зменшення кількості мостів з невизначеним експлуатаційним станом.

Стан	2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015	
	шт	п.м.	шт	п.м.	шт	п.м.	шт	п.м.	шт	п.м.	шт	п.м.	шт	п.м.	шт	п.м.	шт	п.м.	шт	п.м.
1	43	3742,94	74	5849,53	83	6702,37	87	7109,37	88	7172,77	91	7308,02	91	7000,22	110	8057,81	112	8181,85	111	8145,25
2	213	11977,43	374	19241,10	518	24213,49	563	27701,56	574	27980,86	576	28050,08	585	28739,08	617	29002,78	617	28641,25	617	28426,86
3	741	27326,47	1202	45039,23	1832	63526,11	2358	79079,84	2506	82375,32	2608	84657,06	2759	90264,76	2982	99285,32	3017	100788,79	3066	102468,36
4	172	6013,88	523	14148,20	782	20089,87	936	24883,67	1015	26276,20	1036	26920,39	1146	30303,46	1233	32544,36	1265	33527,65	1311	34888,62
5	11	189,13	12	207,58	17	300,07	29	1099,88	32	1221,78	39	1405,38	52	2279,57	56	2523,29	62	3001,09	66	3167,38
не вказ.	14880	328714,88	13912	295889,56	12891	266476,12	12158	241686,31	11933	237473,58	11827	236060,72	11525	225008,82	11154	212167,59	11078	209395,12	10977	206388,07
разом	16060	377964,73	16097	380375,20	16123	381308,03	16131	381560,63	16148	382500,51	16177	384401,65	16158	383595,91	16152	383581,15	16151	383535,75	16148	383484,54

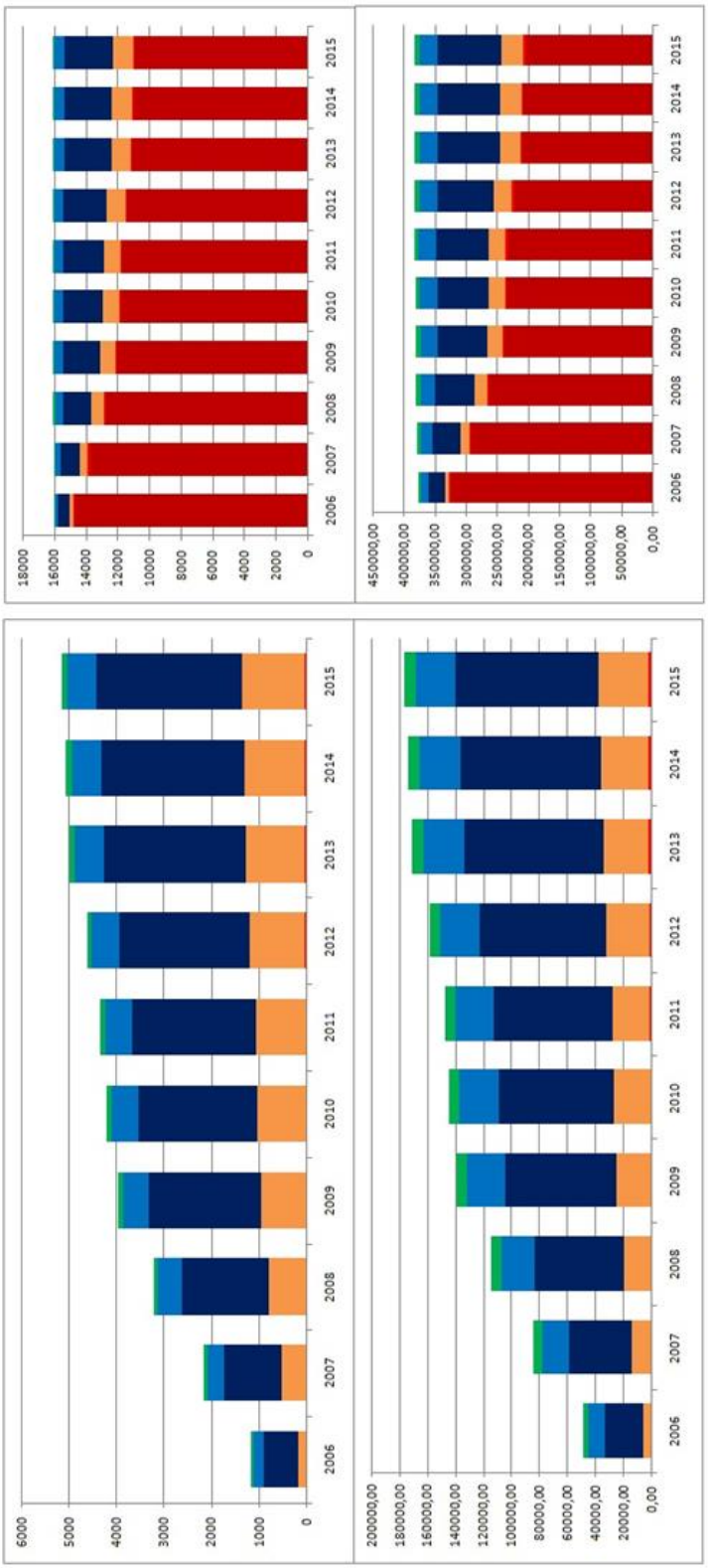

Рисунок 4 – Відстеження зміни експлуатаційного стану мостів за 2006-2015 рр.

Таблиця 3 – Фактичні ремонтні роботи по мостах за 2015 рік

№	Область	Експлуатаційне утримання	ПДР	ПСР	Капітальний ремонт	Реконструкція
1.	Автономна республіка Крим	-	-	-	-	-
2.	Вінницька область	-	-	-	-	-
3.	Волинська область	-	8	-	-	-
4.	Дніпропетровська область	16	-	-	-	-
5.	Донецька область	-	-	-	-	-
6.	Житомирська область	-	-	1	-	-
7.	Закарпатська область	-	2	1	-	-
8.	Запорізька область	-	-	-	-	-
9.	Івано-Франківська область	59	2	1	-	-
10.	Київська область	-	-	1	-	-
11.	Кіровоградська область	-	-	1 (розпоч.)	-	-
12.	Луганська область	-	-	-	-	-
13.	Львівська область	-	-	1 (розпоч.)	-	-
14.	Миколаївська область	-	-	-	-	-
15.	Одеська область	-	-	-	-	-
16.	Полтавська область	-	2	-	-	-
17.	Рівненська область	-	-	-	-	-
18.	Сумська область	-	38	2	-	-
19.	Тернопільська область	-	-	-	-	-
20.	Харківська область	-	-	-	-	-
21.	Херсонська область	-	-	-	-	-
22.	Хмельницька область	-	-	-	-	-
23.	Черкаська область	-	-	1	-	-
24.	Чернівецька область	-	-	1	-	-
25.	Чернігівська область	-	-	-	-	-
26.	місто Севастополь	-	-	-	-	-
		75	52	8/10	-	-
	Всього:	**135/137**				

В табл. 3 представлено статистику ремонтів за 2015 рік. Дані красномовно свідчать про недостатній рівень фінансування необхідних ремонтних заходів - жодного проведеного капітального ремонту, реконструкції. Поточним середнім ремонтом (ПСР) відремонтовано всього 10 споруд. Нагадуємо, що загальна кількість мостів становить 16 148 одиниць. Ситуація цього року не є винятковим явищем, в останні часи це, скоріше, тенденція. Таким чином, є факт накопичення об'ємів ремонтних робіт, які не були виконані в попередні роки, а кількість мостів, які потребують ремонту або реконструкції постійно збільшується. Необхідно усвідомлювати, що витрати на експлуатацію різко зростають при відкладанні ремонтів [5, 6, 7].

Вважаємо, що в таких умовах, необхідно терміново створювати стратегічну програму виходу з такого становища. Вона має базуватися на науково обґрунтованих оптимізаційних моделях.

Домінуюча ідея управління ремонтами полягає в наступному:

– раціональним чином розподілити кошти на ремонти між спорудами дорожньої мережі в умовах обмеженого фінансування;
– планувати виконання ремонтних робіт в науково обґрунтовані строки;
– відповідати на питання "Які втрати понесе система експлуатації через перенесення ремонту на пізніші строки?".

Науково обґрунтована методологія оцінки впливу ремонтних робіт на експлуатаційний стан споруди в цілому має стати інструментом підтримання роботоспроможності споруди, важливою складовою управління довговічності і подовження її ресурсу.

Розробка стратегії ремонтів мостів являє собою складну наукову задачу, ефективне розв'язання якої потребує залучення сучасних новітніх наукових методів, інформаційних технологій, в першу чергу, швидкодіючих алгоритмів математичної оптимізації [8]. Один з них – метод еволюційного моделювання для оптимізації стратегії ремонтів мостів [13].

Алгоритми оптимізації стратегій ремонтів автодорожніх мостів розглядались, наприклад, в роботах [2, 3,4,10]. Ці моделі, як правило, складаються з двох головних модулів – модуля деградації елементів моста і модуля оптимізації стратегії ремонтів за одним [2] або багатьма [3] (переважно двома) критеріями, причому в останньому випадку частіш за все знаходиться оптимальне за Парето рішення [3] за критерієм стану моста і витрат на ремонти. В процесі оптимізації стану мостів в умовах недостатнього фінансування потрібно спиратись на вітчизняні моделі деградації і прогнозу майбутнього стану мостів. В Україні цими питаннями займаються ряд вчених під керівництвом професора А. І. Лантуха-Лященка [14, 15].

Обґрунтування оптимальної стратегії ремонтів елементів мостів являє собою NP - складну комбінаторну задачу, яка може бути розв'язана наближеними методами – в методі еволюційного моделювання часто пропонуються так звані генетичні алгоритми (ГА) пошуку оптимальних рішень [3, 4], а, іноді, методи нелінійного програмування [4]. Проте, останні потребують визначення градієнтів, тобто накладають досить жорсткі обмеження на формулювання задачі, тому, на нашу думку, вони менш перспективні для розв'язання задачі.

Загальна проблема оптимізації стану мостів включає ряд специфічних проблем: оцінки стану моста; моделювання деградації стану моста в часі; оцінки впливу різних заходів на підтримку та відновлення стану моста; оцінки вартості заходів на підтримку та відновлення стану моста; вибору критерію або критеріїв оптимізації стану моста; врахування обмежень на застосування заходів на підтримку та відновлення стану моста; вибору моделі і алгоритму оптимізації стану мостів.

Критерієм оптимальності програми ремонтів мостів на мережі автомобільних доріг вважаємо за доцільне прийняти такий показник – мінімум середнього експлуатаційного стану мостів (максимум середнього рейтингу моста), тому що в умовах обмеженого фінансування

витрати власника мостів дорівнюють виділеному бюджету, а зовнішні позитивні ефекти обернено пропорційні меншому значенню показника стану мостів.

$$Z_S = \frac{1}{T \cdot \sum_{i=1}^{N}(B_i \cdot L_i)} \sum_{i=1}^{N}(D_{i,0} \cdot B_i \cdot L_i \sum_{t=1}^{T} D_{i,t}(X_{i,t}) => \min, \tag{1}$$

де Z_S – середній показник експлуатаційного стану мостів на мережі автомобільних доріг за плановий період;

T – плановий період, років;

N – кількість мостів;

$D_{i,0}$ – початковий рівень деградації;

B_i – ширина моста, м;

Li – довжина моста i-го моста, м;

$D_{i,t}$ – рівень деградації i-го моста на кінець t-го року виконання плану;

$X_{i,t}$ – код виду ремонту і утримання моста.

Щорічні бюджетні обмеження математичної моделі:

$$\sum_{i=1}^{N} f(X_{i,t}) \le B_t, \tag{2}$$

де f – вартість (штрафна функція) заходу X_{it} по i–му мосту в рік $t = 1, \dots, T$;

B_t – бюджет на ремонти та експлуатаційне утримання мостів на заданій мережі автомобільних доріг в рік $t = 1, \dots, T$.

Всього число обмежень виду (2) дорівнює T.

Інша цільова функція – вартісна при виконанні обмежень (2) [3]:

$$Z_C = \sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} C_{i,t} \cdot \left[1 + p \cdot \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N} \frac{D(t,i) - D_{\max}(A_{t,i})}{D_{\max}(A_{t,i})}\right], \tag{5}$$

де Z_C – приведена вартість стратегії;

$C_{i,t}$ – приведена вартість робіт;

p – коефіцієнт, який враховує важливість рівня деградації мосту;

$D(t,i)$ – рівень деградації моста;

$D_{max}(A_{t,i})$ – максимально допустимий рівень деградації моста, який залежить від його віку $A_{t,i.}$.

Майже кожна реальна проблема пов'язана з одночасною оптимізацією декількох несумісних і часто конкуруючих цілей. Якщо в задачах з одним критерієм оптимізації оптимальне рішення, як правило, чітко визначено, в задачах оптимізації з багатьма критеріями це не так. Замість одного оптимуму є множина альтернативних компромісів, відомих як Парето − оптимальні рішення. Ці рішення є оптимальними в тому сенсі, що ніякі інші рішення в просторі пошуку не перевищують їх.

Слід зауважити, що оптимізація програми ремонтів мостів є *np*-повною задачею, у даному випадку, про одномірний ранець (Knapsack problem). При обмеженнях бюджету в річний бюджет можуть не бути включені ремонти, вартість яких перевищує розміри бюджету, отже середній стан мостів не буде достатньо зменшений (рис. 5).

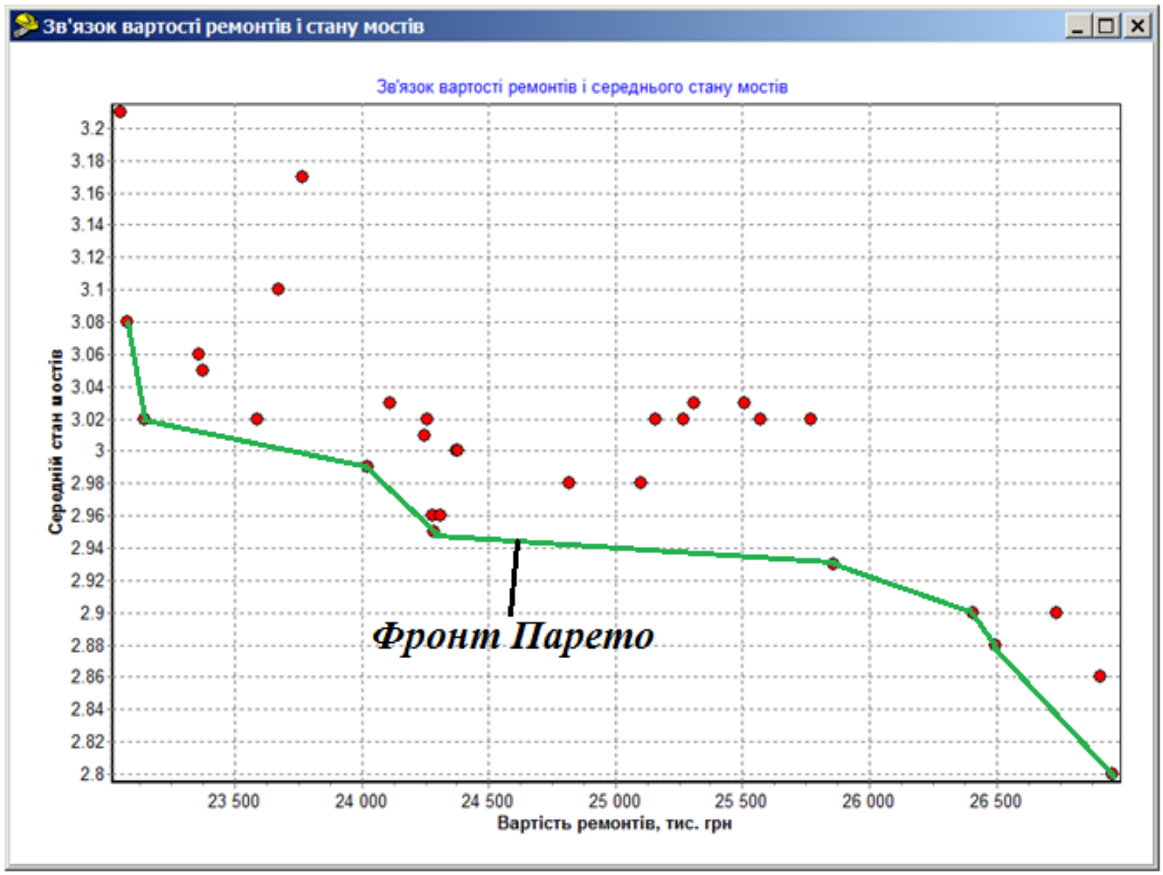

Рисунок 5 – Пошук оптимального за Парето рішення (зв'язок вартості ремонтів і стану мостів)

Висновки

1. Загальна проблема оптимізації стану мостів включає ряд специфічних проблем: оцінки стану моста; моделювання деградації стану моста в часі; оцінки впливу різних заходів на підтримку та відновлення стану моста; оцінки вартості заходів на підтримку та відновлення стану моста; вибору критерію або критеріїв оптимізації стану моста; врахування обмежень на застосування заходів на підтримку та відновлення стану моста; вибору моделі і алгоритму оптимізації стану мостів.

3. Проведено аналіз поточного експлуатаційного стану та його змін на мостах по мережі доріг загального користування на основі даних з Аналітичної експертної системи управління мостами. Проаналізовано інформацію щодо проведених ремонтів.

4. Наявність двох протилежно діючих процесів, що відбуваються на протязі життєвого циклу моста, – погіршення стану і його відновлення в суперпозиції обумовлюють поточний стан моста. Реконструкція, ремонти та експлуатаційне утримання моста – це управляючі впливи, які підтримують стан моста не нижче визначеного рівня.

5. В якості критерію оптимальності програми ремонтів мостів на мережі автомобільних доріг доцільно прийняти показник мінімум середнього експлуатаційного стану мостів (максимум середнього рейтингу моста), тому що в умовах обмеженого фінансування

витрати власника мостів дорівнюють виділеному бюджету, а зовнішні позитивні ефекти обернено пропорційні до меншого значення показника стану мостів.

6. Запропоновано математичну модель оптимізації стану мостів та принципова схема оптимізації програм ремонтів мостів як рекурентна процедура, що включає оптимізацію річної програми ремонтів і всієї стратегії за допомогою алгоритму на основі пріоритезації стану мостів та алгоритму на основі методу еволюційного моделювання.

7. Рішення проблеми відкладених ремонтів мостів та проблеми управління станом мостів потребують великої кількості наукових досліджень з удосконалення моделі деградації мостів в залежності від виконаних ремонтів і моделей прогнозування складу робіт з ремонту і їх вартості, а також математичного апарату оптимізації середньострокових і довгострокових програм ремонту та експлуатаційного утримання мостів.

Література

1. Боднар Л. П. Програмний комплекс АЕСУМ. Сучасний стан та концепція подальшого розвитку. "Дороги і мости" : зб. наук. пр. – К.: ДерждорНДІ, 2010. – Вип. 12. – С. 31-39.
2. Liu Chunlu., Hammad Amin, Iton Yoshito. Cost optimization of Bridge Decks Using Genetic Algorithm. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://users.encs.concordia.ca/~hammad/papers/J11.pdf
3. Maintenance optimization of infrastructure networks using genetic algorithms / G. Morcous, Z. Lounis, Automation in Construction 14 (2005), pp. 129– 142.
4. Дингес Э. В. Методы оптимального планирования ремонта мостовых сооружений в условиях недостаточного финансирования / Э. В. Дингес, Е. В. Лукин Новости в дорожном деле. Научно-технический информационный сборник, выпуск 4. М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Информационный центр по автомобильным дорогам», 2007. – С. 1-24.
5. Дехтяр А. С. Оптимальні терміни й об’єми ремонтів залізобетонних мостів / А. С. Дехтяр // Зб. Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів, 2001. - Вип. 3. - С. 83 - 86.
6. Дехтяр А. С. Планування експлуатації залізобетонних мості / А. С. Дехтяр // Зб. Наукових праць V Наукового міжнародного симпозіуму «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій». – Львів, 2002. - №5. - С. 162 - 168.
7. Дехтяр А. С. Оптимальна експлуатація залізобетонних мостів / А. С. Дехтяр // Системні методи керування, технології та організації виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів. – 2001, Вип. 12. - С.385 – 392.
8. Боднар Л. П. Управління утриманням елементів залізобетонних мостів на основі моделей нечіткої логіки / Л. П. Боднар // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип.33. - С. 39-42.
9. Боднар Л. П. Аналитическая экспертная система управления мостами Украины / Л. П. Боднар // "Автомобильные дороги и мосты": научно-технический журнал – Минск: Министерство транспорта и коммуникаций республики Беларусь, 2015. – Вып. № 2 (16). – С. 18-23.

10. Боднар Л. П., Канін О. П., Халай Т. О. Модель обґрунтування стратегії ремонтів мостів // Вісник Національного транспортного університету: В 2-х частинах: Ч.1. – К.: НТУ, 2012. – Випуск 26. – 47-52 с.
11. ДБН В.2.3-6:2009 Мости та труби. Обстеження та випробування.
12. ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів.
13. Боднар Л. П. Генетичні алгоритми в оптимізації стратегії ремонтів мостів. Збірник наукових праць Дніпропетровського університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – Вип. 6. – С. 18-23.
14. Боднар Л. П. Теоретичні засади управління довговічністю автодорожніх мостів / Л. П. Боднар // Автошляховик України, №4(240), 2014. – С.37-40.
15. Лантух-Лященко А. И. Феноменологическая модель деградации элементов сооружений / А. И. Лантух-Лященко // Труды международной научно-технической конференции «Вычислительная механика деформируемого твердого тела», М.: МИИТ – 2006. – С. 259-265.