

ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОПОР КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ

Визначено фактори, що впливають на довговічність залізобетонних опор контактної мережі. Розраховано числові характеристики товщини опор.

Определены факторы, которые воздействуют на долговечность железобетонных опор контактной сети. Рассчитаны числовые характеристики толщин стоек опор.

The authors determined the factors, which have impact on durability of contact lines racks. The numeric characteristics of thicknesses of concrete racks are counted.

На довговічність залізобетонних опор контактної мережі впливають багато факторів на різних етапах: проектування, виготовлення, транспортування, монтажу та експлуатації.

На етапі проектування можуть виникнути помилки при розрахунку внаслідок неточно розробленого технічного завдання або помилки самого проектувальника. Метою проектування опор контактної мережі є розробка таких конструкцій, виготовлення і експлуатація яких здійснювалась при найменших витратах і гарантованому терміну службі. Рішення цих задач регламентується рядом нормативних документів [1, 2, 3]. Однак, з часом умови експлуатації опори можуть змінитися і не відповідати існуючим нормам і правилам проектування опор контактної мережі для яких вони проектувались. Наприклад:

1) поряд з залізницею побудували завод по виробництву шкідливих речовин, які впливають на корозію бетону і арматури;

2) внаслідок деяких причин піднявся рівень ґрунтових вод і таким чином змінився хімічний склад ґрунту в якому знаходиться підземна частина опори, наприклад з нейтрального на агресивний;

3) при зміні схеми живлення, або зміні рівня напруги для більш доцільного живлення на ділянці опора може опинитися в анодній або в знакозмінній зоні;

4) при виходу з ладу пристроїв захисту від електрокорозії та їх несвоєчасному виявленні і усуненні;

5) на одній з ділянок Придніпровської залізниці експлуатувались опори без вентиляційних отворів в нижній частині опори і виявити, хто винен виробник чи проектувальник не вдалося. Виправляв недолік експлуатаційник.

Під час масової електрифікації було розроб-

лено та встановлено близько десятка різновидів опор контактної мережі [4], які були з проєктовані на термін служби близько сорока років. Одні різновиди опор зарекомендували себе з позитивної сторони, інші - практично всі були замінені на нові. На сьогоднішній день термін експлуатації багатьох опор майже вичерпався. Інженерний розрахунок лише дає гарантію про ненастання того чи іншого граничного стану при деякій ймовірності. Але в процесі експлуатації деякі чинники можуть змінюватися так, що це не можна врахувати під час проектування.

На сьогоднішній день прийняті розрахункові схеми залізобетонних опор не відповідають фактичному характеру руйнування. Наприклад, в розрахунках на прогин (відрив, утворення тріщин) розрахунковий кут руйнування не відповідає експериментальним даним. При розрахунках за похилими до поздовжньої осі напружена розтягнута арматура не враховується, а в конструктивних вимогах вказується лише на необхідність її анкерування. Вище зазначені розрахунки не відтворюють реальну роботу опор та не дозволяють встановити їх фактичну, а не розрахункову, несучу здатність, що необхідна не лише для раціонального конструювання, але й для встановлення причин руйнування (пошкоджень) опор, що знаходяться в експлуатації.

Вказаних недоліків можна уникнути, якщо розрахунки будуть базуватись на позиціях механіки крихкого руйнування з використанням такої характеристики матеріалу, як в'язкість руйнування бетону. Інші характеристики матеріалу пов'язані з вище зазначеною; вибір тієї чи іншої характеристики не має принципового значення. В'язкість руйнування бетону залежить від багатьох факторів. Цими факторами являються: склад бетону, його вік, технологія виготовлення, температура, вологість та інше.

Аналіз випадків передчасного виходу залізобетонних опор з ладу, що зумовлені помилками на етапі проектування свідчить про наступні недоліки:

- включення в проект інженерних рішень без достатньої перевірки, що приводить до передчасного виходу з ладу опорних конструкцій та їх заміні,

- невідповідність розрахункової моделі дійсним умовам роботи опор при експлуатації, які змінились в наслідок непередбачених обставин.

Етапі виготовлення. На сьогоднішній день опори контактної мережі на території України виготовляються згідно до міждержавного стандарту [3] за робочою і технологічною документацією. За узгодженням з замовником дозволено виготовляти залізобетонні опори, які відрізняються габаритними розмірами і розмірами окремих деталей опор. Кожен виробник розробляє свої робочі креслення під свою вже існуючу технологію. Аналіз параметрів опор, що виготовляються провідними виробниками (залізобетонні центрифуговані з попередньо напруженою арматурою опори, розраховані на нормативний згинальний момент 80 кН·м), показує, що нормативні значення показників в усіх виробників схожі і відповідають нормативним вимогам. Але суттєво відрізняються передавальною міцністю бетону, міцністю бетону на стис в проектному віці, типом та кількістю застосованої арматури на виготовлення арматурного каркасу. Крім того, найбільші відмінності між стояками виявлені в геометричних параметрах та конструктивних елементах, таких як: довжина стояка, діаметр стояка в оголовку та комлі, наявність та розташування отворів для встановлення закладних деталей, товщина внутрішнього та зовнішнього захисного шару, матеріал та вид бетонної заглишки [5]. Кожен виробник вирішує проблему якості своєї продукції різними шляхами. Виходячи з цього потрібно привести виробництво опор до єдиного стандарту по всім показникам. При цьому, необхідно застосовувати нові технології виробництва, а також нові технології контролю якості на кожній технологічній операції виготовлення опор.

Згідно до положень нормативної документації [6] виробник зобов'язаний виготовляти опори терміном служби 70 років. А це в свою чергу вимагає від проектувальників і виробників обґрунтованих рішень, прийняття і застосування нових технологій та матеріалів, нового обладнання для виробництва.

Одним з найважливіших факторів на етапі

виготовлення опори є товщина стінки опори. Вона нормується ДСТУ Б.В.2.6-21-2000 (ГОСТ 19330). На кафедрі «Електропостачання залізниць» ДІТУ проведено аналіз дотримання ДСТУ. Допустимі границі товщини стінки опори знаходяться в межах $-5 \dots +30$ мм. від нормативної.

Для аналізу взята партія опор СК 13.6-02.8жд, що надійшла в експлуатацію на Донецьку залізницю і була відправлена Миронівським ЗАТ заводом-виробником «Бетон нова». Статистичні дані опор наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні дані для аналізу показників надійності опор

№ опори	Товщина стінок, мм	Відхилення від норми, мм	№ опори	Товщина стінки, мм	Відхилення від норми, мм
1	60/60	+10/0	33	56/60	+6/0
2	51/54	+1/-6	34	54/55	+4/-5
3	57/60	+7/0	35	48/53	-2/-7
4	58/68	+8/+8	36	50/55	0/-5
5	50/53	0/-7	37	50/55	0/-5
6	50/55	0/-5	38	49/53	-1/-7
7	55/60	+5/0	39	50/55	0/-5
8	58/61	+8/+1	40	54/60	+4/0
9	60/60	+10/0	41	60/62	+10/+2
10	58/60	+8/0	42	49/53	-1/-7
11	54/60	+4/0	43	50/55	0/-5
12	50/60	0/0	44	49/53	-1/-7
13	55/60	+5/0	45	60/60	+10/0
14	54/60	+4/0	46	50/60	0/0
15	49/54	-1/-6	47	50/54	0/-6
16	50/60	0/0	48	50/56	0/-4
17	49/52	-1/-8	49	50/61	0/+1
18	56/60	+6/0	50	54/58	+4/-2
19	48/54	-2/-6	51	49/53	-1/-7
20	49/54	-1/-6	52	48/52	-2/-8
21	47/50	-3/-10	53	50/55	0/-5
22	49/55	-1/-5	54	48/59	-2/-1
23	54/60	+4/0	55	50/55	0/-5
24	60/62	+10/+2	56	48/55	-2/-5
25	60/60	+10/0	57	49/53	-1/-7
26	50/66	0/+6	58	51/55	+1/-5
27	48/52	-2/-8	59	56/60	+6/0
28	49/53	-1/-7	60	54/62	+4/+2
29	50/55	0/-5	61	60/62	+10/+2
30	50/55	0/-5	62	54/60	+4/0
31	55/58	+5/-2	63	50/54	0/-6
32	60/65	+10/+5	64	50/55	0/-5

Примітка. В чисельнику приведена товщина стінки опори у вершині, в знаменнику товщина стінки опори основи.

Введемо позначення a – товщина стінки

опори, n – об’єм вибірки (загальна кількість членів варіаційного ряду). Далі зведемо у вигляді варіаційного ряду, $a_1, a_2, a_3, \dots, a_i, \dots, a_n$ і занесемо в табл. 2.

Таблиця 2

Варіаційний ряд верхніх товщин стінок опор

47	48	48	48	48	48	49	49	49	49
49	49	49	49	49	49	50	50	50	50
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
50	50	50	50	50	51	51	54	54	54
54	54	54	54	54	55	55	55	56	56
56	57	58	58	58	60	60	60	60	60
60	60	60	60						

Поділимо варіаційний ряд на k інтервалів за формулою

$$k \approx 5 \cdot \lg n. \quad (1)$$

Довжина інтервалів (Δa) вибирається постійною.

В цьому випадку:

$$\Delta a \approx \frac{a_n - a_1}{k} \quad (2)$$

В кожному інтервалі повинно бути не менше 4-5 значень, тобто повинна виконуватись умова

$$n_j^* \geq 4 \quad (3)$$

де n_j^* – кількість значень товщин стінок в j -му інтервалі.

Оцінки математичного очікування, дисперсії та середньоквадратичного відхилення знаходяться за спрощеними формулами (7):

$$m_a^* \approx \frac{\sum_{i=1}^k a_j \cdot n_j^*}{n} = \sum_{j=1}^k a_j \cdot P_j^*, \quad (4)$$

$$D_a^* \approx \sum_{j=1}^k (a_j^2 \cdot P_j^*) - m_a^{*2}, \quad (5)$$

$$\sigma_a^* = \sqrt{D_a^*}, \quad (6)$$

де a_j – i -й член варіаційного ряду,

$$P_j^* = \frac{n_j^*}{n} \text{ – статистична імовірність знаходження випадкової величини в } j\text{-му інтервалі.}$$

Коефіцієнт варіації товщини стінки визначається за формулою

$$K_B = \frac{\sigma_a^*}{m_a^*} \quad (7)$$

В даній статті приведено розрахунок для верхніх товщин стінок опори. Розіб’ємо варіаційний ряд на k інтервалів, визначимо границі та середини a_j кожного інтервалу. Результати розрахунків занесемо в табл. 3.

Таблиця 3

Результати обробки варіаційного ряду для верхніх товщин опор

Інтервал	Ліва границя інтервалу, мм	Права границя інтервалу, мм	Довжина інтервалу Δa_j , мм	Середина інтервалу a_j , мм	n_j^*	P_j^*
1	47	48,5	1,5	47,75	6	0,0938
2	48,5	50	1,5	49,25	10	0,4531
3	50	54,5	4,5	52,25	10	0,1563
4	54,5	56	1,5	55,25	6	0,0938
5	56	59	3	57,5	4	0,0625
6	59	60,5	1,5	59,75	9	0,1406

Результат розрахунків за формулами (4)–(7) наступний $m_a^* = 52,133$; $D_a^* = 16,439$; $\sigma_a^* = 4,055$; $K_B = 0,078$; $\delta = 0,953$.

Розрахунок статистичних диференційної та інтегральної функцій розподілення товщини стінок опор.

Функція щільності імовірності випадкової величини визначається за формулою

$$f^*(a_j) = \frac{P_j^*}{\Delta a_j}. \quad (8)$$

Функція розподілу випадкової величини являється інтегральним законом її розподілення і знаходиться за формулою

$$F^*(a_j) = \sum_{i=1}^j P_i^*. \quad (9)$$

Результати розрахунків занесемо в табл. 4.

Таблиця 4

Статистичні функціональні характеристики товщин стінок опор

Інтервал	Для верхніх товщин стінок				Для нижніх товщин стінок			
	P_j^*	Δa_j мм	$f^*(a_j)$ 1/мм	$F^*(a)$	P_j^*	Δa_j мм	$f^*(a_j)$ 1/мм	$F^*(a)$
1	0,093	1,5	0,062	0,093	0,062	4	0,031	0,062
2	0,451	1,5	0,302	0,546	0,218	2	0,109	0,281
3	0,156	4,5	0,034	0,703	0,234	2	0,117	0,515
4	0,093	1,5	0,062	0,797	0,343	4	0,086	0,859
5	0,062	3	0,020	0,859	0,140	6	0,017	1
6	0,140	1,5	0,093	1				

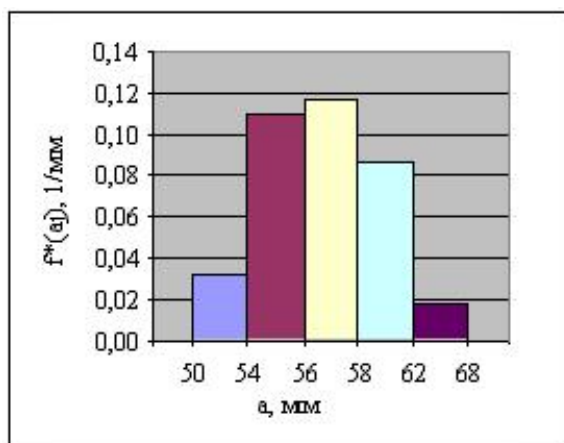


Рис. 1. Диференціальна функція розподілу нижніх товщин стінок опор

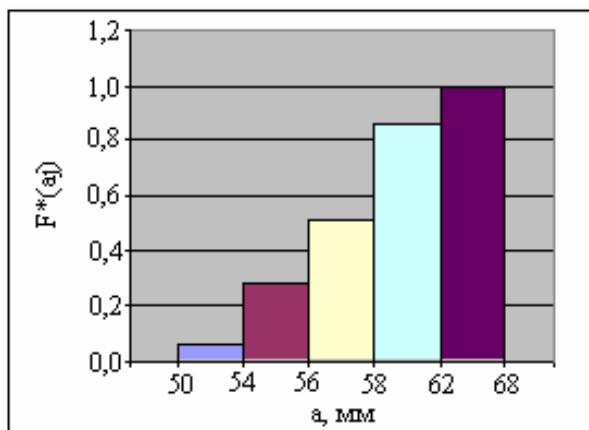


Рис. 2. Інтегральна функція статистичного розподілу нижніх товщин стінок опор

При розрахунку теоретичних функціональних характеристик товщин стінок опори. Висуваємо гіпотезу, що закон розподілу нормальний. Користуючись (7) розраховано функціональні теоретичні характеристики товщини стінок опор.

Результати розрахунків теоретичних функ-

ціональних характеристик верхніх та нижніх товщин стінок опор представлені у табл. 5.

Таблиця 5

Розрахунок теоретичних функціональних характеристик товщин стінок опор

№ інтервалу	Для верхніх товщин стінок			Для нижніх товщин стінок		
	$f(a)$ 1/мм	$F(a)$ мм	$P(a)$	$f(a)$ 1/мм	$F(a)$ мм	$P(a)$
1	0,0549	0,1195	0,8805	0,0624	0,0624	0,9376
2	0,0764	0,2132	0,7868	0,1501	0,1501	0,8499
3	0,0984	0,4027	0,5973	0,2945	0,2945	0,7055
4	0,0732	0,7704	0,2296	0,5817	0,5817	0,4183
5	0,041	0,9057	0,0943	0,9554	0,9554	0,0446
6	0,0168	0,9708	0,0292			

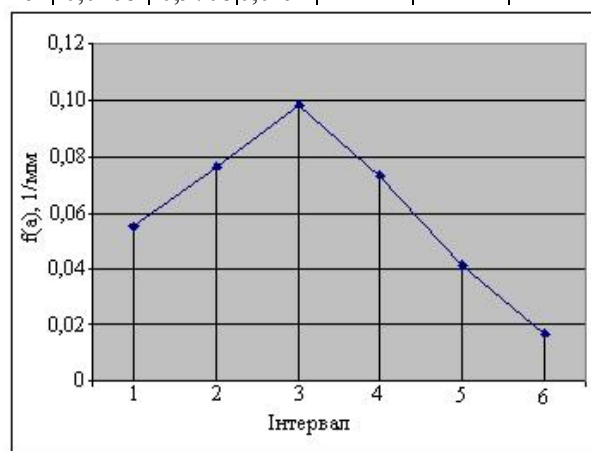


Рис. 3. Теоретична диференціальна функція розподілу верхніх товщин стінок опор

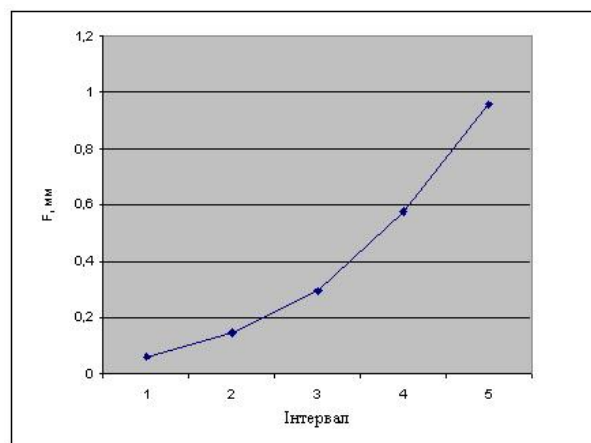


Рис. 4. Інтегральна функція теоретичного розподілу нижніх товщин стінок опор

Перевірка правдоподібності гіпотези про вид закону розподілення за допомогою критерію Пірсона

Розходження між теоретичним та статистичним розподіленням знаходиться за формулою (7)

$$X_{\text{розр}}^2 = \sum_{j=1}^k X_j^2 = n \cdot \sum_{j=1}^k \frac{(P_j^* - P_j)^2}{P_j}. \quad (10)$$

Результати розрахунків представлені в табл. 6, 7.

Таблиця 6

Значення X_j^2 для інтервалів розбиття

Інтервал	Для верхніх товщин стінок				
	P_j^*	P_j	$P_j^* - P_j$	$(P_j^* - P_j)^2$	X_j^2
1	0,093	0,119	-0,026	0,001	0,006
2	0,453	0,093	0,359	0,129	1,378
3	0,156	0,189	-0,033	0,001	0,006
4	0,093	0,367	-0,274	0,075	0,204
5	0,062	0,135	-0,073	0,005	0,039
6	0,140	0,065	0,075	0,075	0,088
$X_{\text{розр}}^2 = \sum_{j=1}^k X_j^2$					1,721
$X_{\text{крит}}^2$					6,25

Таблиця 7

Значення X_j^2 для інтервалів розбиття

Інтервал	Для нижніх товщин стінок				
	P_j^*	P_j	$P_j^* - P_j$	$(P_j^* - P_j)^2$	X_j^2
1	0,062	0,062	0	0	0
2	0,218	0,087	0,131	0,017	0,196
3	0,234	0,144	0,09	0,008	0,056
4	0,343	0,287	0,056	0,003	0,011
5	0,140	0,373	-0,233	0,054	0,145
$X_{\text{розр}}^2 = \sum_{j=1}^k X_j^2$					0,408
$X_{\text{крит}}^2$					4,61

За кількістю ступенів свободи знаходимо критичне значення $X_{\text{крит}}^2$ [7]:

$$X_{\text{крит}}^2 = 6,25$$

Оскільки $X_{\text{розр}}^2 < X_{\text{крит}}^2$, то можна зробити висновок, що статистична інформація не заперечує гіпотезі про прийнятий закон розподілення.

Розрахунок довірчих границь для параметрів нормального розподілення

Для визначення допустимого інтервалу необхідно задатися допустимою вірогідністю β , яку в технічних розрахунках приймають із ряду 0,8; 0,9; 0,95.

Число ступенів свободи визначається за

формулою (7)

$$v = n - 1, \quad (11)$$

де n – об'єм вибірки.

Допустимий інтервал для математичного очікування товщини стінок опори визначається за формулою (7):

$$m_a^* - t_\beta \cdot \frac{\sigma_a^*}{\sqrt{n}} < m_a < m_a^* + t_\beta \cdot \frac{\sigma_a^*}{\sqrt{n}}. \quad (12)$$

Приймаємо $\beta = 0,9$. Число ступенів свободи $v = 64 - 1 = 63$.

Знаючи допустиму вірогідність та число ступенів свободи можна знайти значення кванти розподілення Стьюдента: $t_\beta = 1,645$.

Допустимі границі для середньоквадратичного відхилення дорівнюють:

$$\sigma_a^* \cdot \sqrt{\frac{(n-1)}{X_{\alpha/2}^2}} < \sigma_a < \sigma_a^* \cdot \sqrt{\frac{(n-1)}{X_{1-\alpha/2}^2}}. \quad (13)$$

де $X_{\alpha/2}^2, X_{1-\alpha/2}^2$ – критерії відповідності Пі-

рсона для імовірностей $P = \frac{\alpha}{2}$ та $P = 1 - \frac{\alpha}{2}$ по

числу ступенів свободи v . Тут

$$\alpha = 1 - \beta = 1 - 0,9 = 0,1. \text{ Тоді}$$

$$P = \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ та } P = 1 - \frac{0,1}{2} = 0,95.$$

Значення критерію відповідності Пірсона знаходиться за формулою [7]:

$$X_p^2 = \frac{1}{2} \cdot (\sqrt{2 \cdot v - 1} + u_p)^2, \quad (14)$$

де u_p – значення аргументу. Для імовірнос-

ті $P = \frac{\alpha}{2}$ та $P = 1 - \frac{\alpha}{2}$ визначаються відповід-

ні їм значення функції інтегралу Лапласа а потім знаходяться відповідні значення аргументу.

Тоді $u_p = u_{\alpha/2} = 1,645$ та

$u_p = u_{1-\alpha/2} = -1,645$. Визначимо значення

критеріїв Пірсона:

$$X_{\alpha/2}^2 = \frac{1}{2} \cdot (\sqrt{2 \cdot 63 - 1} + 1,645)^2 = 82,245,$$

$$X_{1-\alpha/2}^2 = \frac{1}{2} \cdot (\sqrt{2 \cdot 63 - 1} - 1,645)^2 = 45,461.$$

Остаточні результати будуть наступними:

$$51,299 < m_a < 52,967,$$

$$3,549 < \sigma_a < 4,773.$$

Аналогічні розрахунки проведені також для аналізу нижніх товщин стінок опори, результати розрахунків наведені в табл. 8.

Таблиця 8

Результати розрахунків для верхніх та нижніх товщин стінок залізобетонних опор

Товщини стінок	Верхні	Нижні	
m_a	52,13	56,61	
D_a^*	16,44	13,77	
σ_a^*	4,055	3,711	
K_b	0,078	0,066	
$\delta, \%$	0,953	1,092	
Довірчі границі, мм	Математичне очікування	$51,3 < m_a < 52,9$	$3,55 < \sigma_T < 4,77$
	Середньоквадратичного відхилення	$55,8 < m_a < 57,3$	$3,25 < \sigma_T < 4,37$

Висновки:

1. Проаналізовано фактори, що впливають на довговічність залізобетонних опор контактної мережі.

2. Розраховано числові та функціональні характеристики товщини стінок опор для партії опор.

3. Встановлено довірчі інтервали для математичного очікування та для середньоквадратичного відхилення товщини стінок опор. $51,29 < m_a < 52,96$ мм $3,55 < \sigma_a < 4,77$ мм при $\beta = 0,9$.

4. Визначено, що товщина стінок опор розподілена за нормальним законом.

5. На експлуатацію надійшло 20 % опор, що не відповідають ДСТУ по товщині стінок опор.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Нормы проектирования конструкций контактной сети ВСН 141-84. Минтрансстрой. Москва 1985.
2. СНиП 2.03.01-84.
3. ДСТУ Б В.2.6-21-200 Опори залізобетонні для опор контактної мережі залізниць. Технічні умови. – К., 2000. – 25 с. (ГОСТ 19330 - 99).
4. Подольський В. И. Эволюция опорного хозяйства контактной сети электрифицированных железных дорог. Сборник докладов научно-практической конференции «Электрификация – основа технического перевооружения железнодорожного транспорта. Электрификация-75». – М.: Интекст, 2004. – С. 100-104.
5. Сиченко В. Г. Технічні характеристики опор для опор контактної мережі: аналіз та вимоги / В. Г. Сиченко, В. А. Савченко, Д. Ю. Колесник // Сб. докладов науч.-практ. конфер.
6. Технічна вказівка від 25.12.2001 р. № ЦЕТ-1-01 «Про застосування опор контактної мережі із змішаним армуванням» // Зб. техн. вказівок та техн. інформації по господарству електрифікації та електропостачання. - К., Укрзалізниця.- 2003. - С. 30-31.
7. Вентцель Е. С. Теория вероятностей - М.: Наука, 1964 - 576 с.
8. Аналіз роботи електрифікації та електропостачання в 2005 році. – К., 2006.
9. Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць № ЦШЕОТ-0005. - К. 1998 р.
10. Вказівки Главку № ЦЕТ-6-03 від 22. 12. 02.
11. Кудрявцев А. А. Проблемы долговечности опорных конструкций контактной сети. Электрификация и развитие железнодорожного транспорта России. Традиции, современность, перспективы: Тезисы докладов на международном симпозиуме «Elirans-2001», СПб, 23-26 окт., - СПб: ПГУПС. 2001. С. 90-91. Рус. RU.

Надійшла до редакції 15.07.2007.