

## ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ КІЛЬКОСТІ ВИМІРІВ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕНОГО ВІБРОАКУСТИЧНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОПОР КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ

Досліджено необхідна кількість нанесення ударів по опорі вдосконалим віброакустичним методом для прийняття рішення «справна» або «несправна» опора контактної мережі.

Исследовано необходимое количество нанесения ударов по опоре усовершенствованным виброакустическим методом для принятия решения «исправна» или «неисправна» опора контактной сети

The necessary quantity of making shocks on a support by the improved vibroacoustic method of detecting defective supports of the contact electric mains has been investigated.

Залізобетонні опори контактної мережі є відповідальними і дорогими елементами пристроїв електропостачання залізниць. В процесі експлуатації їх довговічність і надійність є важливими умовами безперебійної і ефективної експлуатації залізничного транспорту. Вихід з ладу тільки однієї опори може привести до порушення руху потягів або до аварії. Тому актуальність проблеми підвищення надійності роботи опор контактної мережі електрифікованих залізниць не викликає сумніву.

Для забезпечення довговічності та надійності опори в процесі експлуатації та визначення несучої здатності провадять випробування неруйнівними технічними методами діагностування. Існує багато різних методів, які з певною надійністю можуть визначити технічний стан залізобетонної опори контактної мережі [1, 2, 3, 4, 5]. Щоб отримати достовірні дані під час діагностування, необхідно зробити не одне, а декілька вимірів відповідними приладами, наприклад, приладом АДО-2М потрібно зробити не менш трьох вимірів перехідного потенціалу при позитивній і негативній поляризації з тим самим струмом. Прибором ДИАКОР також потрібно зробити не менш трьох вимірів [2, 3, 4]. Для отримання достовірного результату при діагностуванні прибором УК1401 та електрохімічним методом необхідні багаторазові виміри [2, 3, 4]. Співробітниками кафедри «Електропостачання залізниць» ДІТу розроблено вдосконалений віброакустичний метод діагностики залізобетонних опор контактної мережі. Цей метод дозволяє значно скоротити витрати на діагностування шляхом відбору «потенційно небезпечних опор». Далі ці «небезпечні» опори

підлягають перевірці більш досконаліми (та одночасно більш витратними) методами.

Модернізований віброакустичний метод полягає в наступному. По надземній частині опори на зручній висоті від півтора до двох метрів наносяться удари спеціальним тарованим молотком. Затухаючі коливання, що виникли внаслідок цього збурювання, записують у пам'ять звукозаписуючого пристрою. На даному етапі розробляється варіант комплексного пристрою, що включає в себе і ударний і звукозаписуючий блоки.

Діагностика стану залізобетонної опори контактної мережі проводиться за цим методом по розкиду частот з максимальною амплітудою. Позначимо цей діагностичний параметр за  $x$ . Будемо також позначати:  $D_1$  - справний стан опори,  $D_2$  - несправний стан опори (наявність корозії, відшарування бетону, низька якість бетону, поздовжні та поперечні тріщини тощо).

Щоб дати обґрунтовану відповідь про технічний стан опори для вдосконаленого віброакустичного методу, необхідно науково обґрунтувати необхідну кількість вимірів. Скористуємося для цього теоремою Байєса [6, 7, 8].

В нашому випадку стан опори характеризується однією ознакою –  $x$ . На кожному кроці процедури діагностування будемо перевіряти умову про можливість постановки діагнозу. Якщо інформації досить, то будемо ставити діагноз і припиняти діагностування.

При використанні теореми Байєса [6, 7, 8] для розпізнавання станів  $D_i$  і  $D_j$  будемо складати співвідношення (1) та (2) наступного вигляду:

$$P\left(\frac{D_i}{K^*}\right) = \frac{P(D_i) \cdot P\left(\frac{K^*}{D_i}\right)}{\sum_{S=1}^n P(D_S) \cdot P\left(\frac{K^*}{D_S}\right)}, \quad (1)$$

де  $K^*$  – вектор діагностичних параметрів залізобетонної опори,

$D_i$  і  $D_j$  – відповідно  $i$ -тий та  $j$ -тий технічні стани

$$\frac{P\left(\frac{D_j}{K^*}\right)}{P\left(\frac{D_i}{K^*}\right)} = \frac{P(D_j)}{P(D_i)} \cdot \frac{P\left(\frac{K_1^*}{D_j}\right) \dots P\left(\frac{K_m^*}{D_j}\right)}{P\left(\frac{K_1^*}{D_i}\right) \dots P\left(\frac{K_m^*}{D_i}\right)}, \quad (2)$$

де  $K_1^*$  – вектор діагностичних ознак залізобетонної опори при першому вимірі,

$K_m^*$  – вектор діагностичних ознак залізобетонної опори при  $m$ -му вимірі.

Якщо

$$\frac{P\left(\frac{D_j}{K^*}\right)}{P\left(\frac{D_i}{K^*}\right)} > 1, \text{ при } j = 1, 2, \dots; i \neq j, \quad (3)$$

то  $K^* \in D_j$ .

Отже, при  $K^* \in D_j$ ,

$$\frac{P\left(\frac{K_1^*}{D_j}\right) \dots P\left(\frac{K_m^*}{D_j}\right)}{P\left(\frac{K_1^*}{D_i}\right) \dots P\left(\frac{K_m^*}{D_i}\right)} > \frac{P(D_i)}{P(D_j)}. \quad (4)$$

Відношення ймовірності складаються послідовно.

Допустимо, що у об'єкта  $K^*$  є ознака  $K_1$ , причому ознака  $K_1$  при діагнозі  $D_2$  зустрічається частіше, ніж при діагнозі  $D_1$ . При цьому, якщо

$$\frac{P\left(\frac{K_1}{D_2}\right)}{P\left(\frac{K_1}{D_1}\right)} > A, \text{ то } K^* \in D_2, \quad (5)$$

де  $A$  – верхня межа прийняття рішення.

Інакше, коли ознака  $K_1$  значно частіше зустрічається при діагнозі  $D_1$  приймається рішення при

$$\frac{P\left(\frac{K_1}{D_2}\right)}{P\left(\frac{K_1}{D_1}\right)} < B, K^* \in D_1, \quad (6)$$

де  $B$  – нижня межа прийняття рішення.

Відношення ймовірності (7) використаємо для визначення необхідної кількості вимірів.

$$B < \frac{P\left(\frac{K_1}{D_2}\right)}{P\left(\frac{K_1}{D_1}\right)} < A. \quad (7)$$

Якщо в результаті першої перевірки умова (7) виконується, то необхідна наступна перевірка, тоді відношення ймовірності набуває вигляду (8)

$$B < \frac{P\left(\frac{K_1}{D_2}\right)}{P\left(\frac{K_1}{D_1}\right)} \cdot \frac{P\left(\frac{K_2}{D_2}\right)}{P\left(\frac{K_2}{D_1}\right)} < A. \quad (8)$$

Розрахунки будемо повторювати до тих пір, поки значення відношення (8) не вийде за одну з вказаних меж ( $A$  або  $B$ ).

Межі  $A$  і  $B$  можна розрахувати, виходячи з ймовірності помилок першого  $\alpha$  (прийняте рішення «опора несправна», а насправді – «опора справна») і другого  $\beta$  (прийняте рішення «опора справна», насправді – «опора несправна») роду, які можна задати:

$$\frac{1-\beta}{\alpha} \geq A, \quad (9)$$

$$B \geq \frac{\beta}{1-\alpha}. \quad (10)$$

У практичних розрахунках можна приймати  $\alpha = \beta = 0.05 \dots 0.10$ . Значення  $\alpha$  і  $\beta$  можна вибрати з економічних міркувань.

В даній роботі приводяться результати експериментального визначення технічного стану залізобетонних опор СКЦ модернізованим віброакустичним методом. Було випробувано 240 опор. Для прикладу надаються дані тільки по десятиох справних і несправних опорах (табл. 1 і 2).

В табл. 1 та 2 в рядках міститься інформація по десятиох вимірах кожної опори. В якості еталонного використано ультразвуковий метод.

## Результати вимірювань справних опор

№ опори	Частота гармоніки з максимальною амплітудою, Гц										$\Delta x$ , Гц
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
223	875.6	875.9	876	874.7	930	896.9	896.2	900	926.5	896	55.3
225	1215	1217	1218	1216	1216	1215	1216	1217	1221	1220	6
245	1012	1099	1002	1002	1092	1096	1097	1090	1089	1009	97
247	937.9	943.9	939.6	932.3	9317	930.6	932.6	938.9	935.9	933.9	13.3
249	1067	1067	1063	1067	1070	1066	1003	1006	1074	1072	71
251	872.9	867.5	863.7	862.6	861.3	860.2	856.8	861.4	876.9	873.2	20.1
253	968	970.5	947.1	951.7	947.3	941.1	823.2	949	950.8	947.7	147.3
255	944.2	943.4	946.4	943.9	877.5	944.4	943.3	945.8	943.2	948.6	71.1
262	908.2	910.1	905.6	839.1	947.6	908.6	902.2	901.9	905.6	904.7	108.5
260	891.3	893.9	889.4	887.8	890.3	892	896.1	893.1	890.5	1041	153.2

Таблиця 2

## Результати вимірювань несправних опор

№ опори	Частота гармоніки з максимальною амплітудою, Гц										$\Delta x$ , Гц
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
324	1286	1413	1416	1439	1116	17.33	979	1276	37.71	27.95	1421.67
221	1310	561	4.51	12.67	1309	1283	1264	1360	1190	1319	1355.49
258	1318	487.1	1390	287.2	1376	1188	1318	1185	62.98	1187	1327.02
227	1252	1252	1251	1250	1250	1250	467	1251	1250	1627	1160
231	1182	531.7	1187	1207	1212	1178	1207	1202	523	1204	689
243	1363	1325	1295	1251	1259	1327	1299	470	522.7	353	1010
259	1064	1063	32.83	107	1059	1062	1199	1067	1067	1066	1166.17
258	1318	487.1	1390	287.2	1376	1188	1318	1185	62.98	1187	1327.02
32	1091	389.1	530.2	1037	1038	1084	1090	35.64	1038	1037	1055.36
1(2)	995.2	547.6	524.1	922.3	996.9	544.5	1350	380.8	374.6	1244	975.4

Для справних опор математичне очікування діагностичного параметру  $x$  склало  $\mu_1 = 65.97$  Гц; для несправних –  $\mu_2 = 707,27$  Гц. Середні квадратичні відхилення діагностичного параметру  $x$  відповідно склали –  $\sigma_1 = 44.37$  Гц і  $\sigma_2 = 285.5$  Гц. На основі експериментальних даних визначено, що параметр  $x$  розподілений для справних опор за нормальним законом, а для несправних опор – за логнормальним законом [9]. Функції розподілів діагностичного параметру  $x$  справних і несправних опор наведені на рис. 1. Необхідно визначити стан опори по послідовних вимірах (кількості нанесення ударів по опорі). Приймаємо  $\alpha = \beta = 0.05$ . Вся інформація міститься в табл. 3 та 4, де в рядках таблиць наведені дані по  $i$ -тих вимірюваннях.

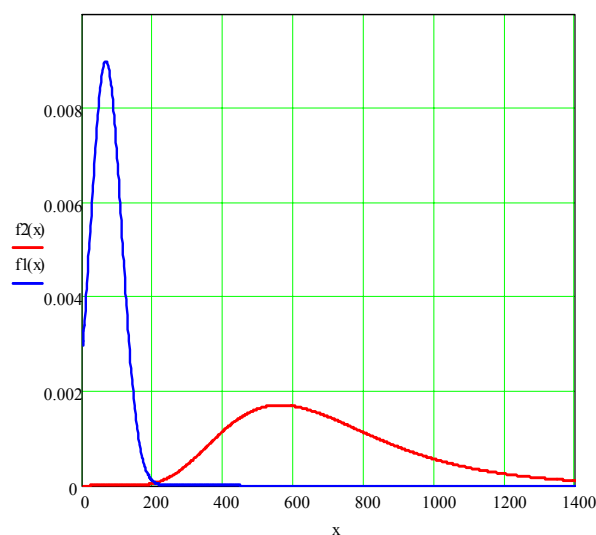


Рис. 1. Функції розподілу параметру  $x$ :  
 $f_1$  – функція розподілу для справних опор,  
 $f_2$  – функція розподілу для несправних опор

Експериментальні дані для справної опори № 260

№ п/п	Частота гармоніки з максимальною амплітудою $f_i$ , Гц										x, Гц
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	891.3	893.9									2.6
2	891.3	893.9	889.4								4.5
3	891.3	893.9	889.4	887.8							6.1
4	891.3	893.9	889.4	887.8	890.3						6.1
5	891.3	893.9	889.4	887.8	890.3	892					6.1
6	891.3	893.9	889.4	887.8	890.3	892	896.1				8.3
7	891.3	893.9	889.4	887.8	890.3	892	896.1	893.1			8.3
8	891.3	893.9	889.4	887.8	890.3	892	896.1	893.1	890.5		8.3
9	891.3	893.9	889.4	887.8	890.3	892	896.1	893.1	890.5	1041	153.2

Таблиця 4

Експериментальні дані для несправної опори № 231

№ п/п	Частота гармоніки з максимальною амплітудою $f_i$ , Гц										x, Гц
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1182	531.7									650.3
2	1182	531.7	1187								655.3
3	1182	531.7	1187	1207							675.3
4	1182	531.7	1187	1207	1212						680.3
5	1182	531.7	1187	1207	1212	1178					680.3
6	1182	531.7	1187	1207	1212	1178	1207				680.3
7	1182	531.7	1187	1207	1212	1178	1207	1202			680.3
8	1182	531.7	1187	1207	1212	1178	1207	1202	523		689
9	1182	531.7	1187	1207	1212	1178	1207	1202	523	1204	689

За результатами проведення двох перших вимірювань (перший рядок в табл. 3 та 4) можна обчислити

$$\frac{f\left(\frac{x_1}{D_2}\right)}{f\left(\frac{x_1}{D_1}\right)} = \frac{\sigma_1 \cdot \exp\left[-\frac{(\ln(x_1) - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right]}{x_1 \cdot \sigma_2 \exp\left[-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right]} = \frac{\sigma_1}{x_1 \cdot \sigma_2} \exp\left\{\frac{1}{2}\left[\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{(\ln(x_1) - \mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right]\right\}. \quad (11)$$

Відношення (11) після проведення  $n$ -го вимірювання (останній рядок в табл. 3 та 4) переписується у вигляді

$$\frac{f\left(\frac{x_1}{D_2}\right) \dots f\left(\frac{x_n}{D_2}\right)}{f\left(\frac{x_1}{D_1}\right) \dots f\left(\frac{x_n}{D_1}\right)} =$$

$$= \prod_{i=1}^n \frac{\sigma_1}{x_i \cdot \sigma_2} \exp\left\{\frac{1}{2}\left[\frac{(x_i - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{(\ln(x_i) - \mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right]\right\}. \quad (12)$$

Якщо значення відношення (12) буде розміщене у межах

$$B < \frac{f\left(\frac{x_1}{D_2}\right) \dots f\left(\frac{x_n}{D_2}\right)}{f\left(\frac{x_1}{D_1}\right) \dots f\left(\frac{x_n}{D_1}\right)} < A, \quad (13)$$

то для встановлення діагнозу інформації не вистачає.

В результаті проведення експериментів [10] отримано наступні значення діагностичного параметру розкиду спектру частот з максимальною амплітудою (Гц) (табл. 3):  $x_1 = 2.6$ ;  $x_2 = 4.5$ ;  $x_3 = 6.1$ ;  $x_4 = 6.1$ ;  $x_5 = 6.1$ ;  $x_6 = 8.3$ ;  $x_7 = 8.3$ ;  $x_8 = 8.3$ ;  $x_9 = 153.2$ . Позначимо (12) як  $D_n$  ( $n$  – кількість вимірювань)

$$D_n = \prod_{i=1}^n \frac{\sigma_1}{x_i \cdot \sigma_2} \exp \left\{ \frac{1}{2} \left[ \frac{(x_i - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{(\ln(x_i) - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right] \right\}$$

Для справних опор (табл. 3)  $D_n$  приймає наступні значення:

$$D_1 = \infty, D_2 = \infty, D_3 = \infty, D_4 = \infty, D_5 = \infty, \\ D_6 = \infty, D_7 = \infty, D_8 = \infty, D_9 = \infty.$$

Для несправних опор (табл. 4) значення  $D_n$  виявились наступними:

$$D_1 = 0, D_2 = 0, D_3 = 0, D_4 = 0, D_5 = 0, D_6 = 0, \\ D_7 = 0, D_8 = 0, D_9 = 0.$$

Межі ухвалення рішень:

$$A \leq \frac{1-\beta}{\alpha} = \frac{1-0.05}{0.05} = 19, \quad B \geq \frac{\beta}{1-0.05} = 0.0526.$$

Результати розрахунку за формулою (13) за приведеними даними свідчать про те, що для постановки діагнозу «опора несправна» або «опора справна» достатньо одної пари вимірів (для опор типу СКЦ).

#### Висновки:

Для оцінки необхідної кількості вимірів при діагностуванні залізобетонних опор контактної мережі вдосконалим віброакустичним методом запропоновано використовувати теорему Байеса.

При ймовірностях похибок першого та другого роду  $\alpha = \beta = 0.05$  встановлено, що для дослідних опор СКЦ в умовах Придніпровської залізниці достатньо наносити два удари по опорі.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ефимов А. В. Надежность и диагностирование систем электроснабжения железных дорог / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. – М.: УМК МПС, 2000. – С. 408-414.
2. Технологічні карти на роботи по утриманню та ремонту пристроїв контактної мережі електрифікованих залізниць, книга II. – Біла Церква: ВАТ «Білоцерківська книжкова фабрика», 2001. – С. 122-165.
3. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети. – М.: Трансиздат, 2003. – С. 53-75.
4. Вказівки з технічного обслуговування та ремонту опорних конструкцій контактної мережі. –К.: ТОВ «Швидкий рух», 2007. – С. 81-116.
5. Каталог приборов для неразрушающего контроля и технической диагностики. – Донецк: ООО «ИНТРОН – СЭТ Лтд», 2006. – С. 95. (www.intron-set.com.ua).
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – С. 56-58.
7. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 1999. – С. 52-55.
8. Гурский Е. И. Теория вероятностей с элементами математической статистики. – М.: Высш. шк., 1971. – С. 35-38.
9. Жлуктенко В. І. Теорія ймовірностей і математична статистика. Ч. 1. Теорія ймовірностей / В. І. Жлуктенко, С. І. Наконечний. – К.: МВС України, 2000. – С. 232-235, 238-239.
10. Кузнецов В. Г. Визначення науково обґрунтованого значення діагностичного параметру при віброакустичному методі діагностики залізобетонних опор / В. Г. Кузнецов, О. М. Полях // Залізничний транспорт України, 2008, № 2. – С. 31-33.

Надійшла до редколегії 19.02.2008.