

УДК 624.21

РАДІОЛОКАЦІЙНИЙ МЕТОД МОНІТОРИНГУ КОРОЗІЙНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

В. В. БЕРЕКА, В. В. РУДЕНКО, О. В. ЗАЄЦЬ, О. М. ПАСТУШЕНКО

Науково-дослідний інститут Міністерства оборони України, Київ

Розроблено теоретичні засади і виведено рівняння радіолокаційного методу дистанційного моніторингу корозійного стану залізобетонних конструкцій, в основі якого – електрохімічна модель кородованої поверхні металу арматури залізобетону. Запропоновано спосіб такого моніторингу та синтезовано структуру нелінійного радіолокатора для його реалізації. Зокрема, визначено його оптимальні робочі частоти для вікон прозорості атмосфери та розміри корозійних елементів. Оцінено загасання сигналу нелінійного радіолокатора під час проходження крізь бетон з урахуванням його електропровідності та діелектричної проникності.

Ключові слова: залізобетонна конструкція, електрохімічна корозія арматури, локальний корозійний елемент, рівняння радіолокаційного моніторингу корозійного стану металу, метод дистанційного моніторингу.

The theoretical principles of the radar method as well as the equation for remote monitoring of the corrosion state of reinforced concrete structures are developed. This equation is based on an electrochemical model of the corroded metal surface of reinforced concrete reinforcement. The method of such monitoring is proposed and the structure of nonlinear radar for its implementation is synthesized, in particular the optimal operating frequencies of the nonlinear radar for atmospheric transparency windows and the sizes of corrosive elements have been determined. The attenuation of the signal of a nonlinear radar when passing through concrete is estimated, taking into account its electric conductivity and dielectric permeability.

Keywords: reinforced concrete structure, electrochemical corrosion of reinforcement, local corrosion element, an equation for radar monitoring of the corrosion state of metal, method for remote monitoring.

Вступ. У залізобетоні з часом під дією атмосферної вологи, кислих газів та солей починає розвиватися корозія арматури, через що послаблюється його міцність та цілісність [1–3]. Щорічні економічні втрати внаслідок електрохімічної корозії металу оцінюють в 3,5% від світового ВВП [3]. Тому моніторинг корозійного стану сталевих арматур залізобетонних конструкцій залишається актуальним [1–5].

Його традиційно оцінюють так [6–11]: оглядають конструкції, щоб виявити зовнішні ознаки – бурі плями або смуги на бетоні, тріщини вздовж арматури, відшарування захисного шару бетону з оголенням арматури, а також контролюють його цілісність.

Ці методи придатні, як правило, на стадіях, коли вже проявились зовнішні ознаки корозії і для відновлення залізобетонних конструкцій потрібні значні трудовитрати. Тому тут ефективніші методи, які дають змогу оцінити стан арматури на початкових стадіях корозії, а отже, знизити трудовитрати під час технічного обслуговування [9]. Одним з них є метод потенціалів півелемента, який полягає у вимірюванні електричного потенціалу між металом арматури і стандартним електродом порівняння. Суттєвим його недоліком є необхідність під'єднання одного з полюсів приладу, який реалізує метод, до арматурного каркаса залізобетонної конструкції, що призводить до її часткового руйнування.

Контактна особа: О. М. ПАСТУШЕНКО, e-mail: pastushenko_an@i.ua

Дещо інший метод [10], заснований на залежності електричного опору бетону від його водонасичення. Зниження електричного опору вказує на підвищення ймовірності корозії арматури. Але ці методи не дають змоги виконати неруйнівний та дистанційний моніторинг корозійного стану її металу.

Мета дослідження – розробити для цього новий неруйнівний радіолокаційний спосіб.

Опрацювання теоретичних засад методу моніторингу корозійного стану залізобетонних конструкцій. Електрохімічна корозія металу арматури розвивається в результаті нейтралізації захисного шару бетону та зниження рН до $\leq 9,5$. Під час корозії на поверхні через електрохімічну гетерогенність металу викликають локальні корозійні елементи розміром 6...7 mm (рис. 1a), що мають структуру метал–окис–метал (рис. 1b) [12–14].

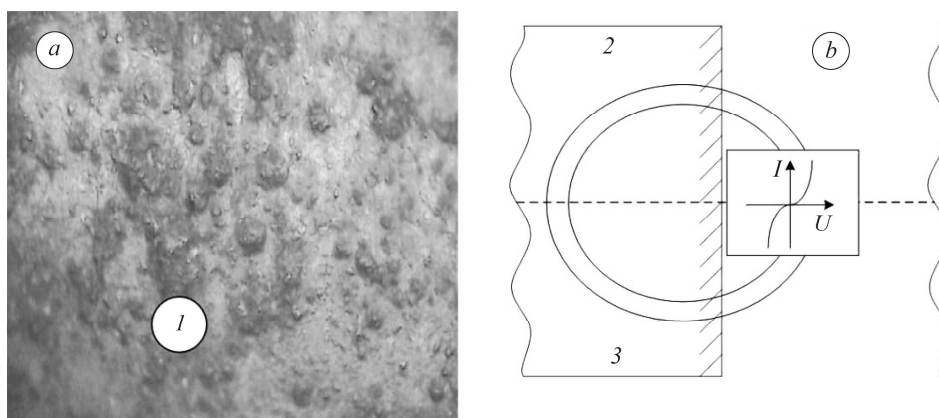


Рис. 1. Диференціація поверхні металу на локальні корозійні елементи (a) та їх радіолокаційна модель (b): 1 – локальний елемент; 2, 3 – його анодна та катодна ділянки.

Fig. 1. Metal surface differentiation into local corrosion elements (a) and their radar model (b): 1 – local element; 2, 3 – its anode and cathode sections.

Кородована поверхня металу арматури як радіолокаційний об'єкт – це множина короткозамкнених через метал локальних корозійних елементів (рис. 1b), розміщених у довільному порядку. Локальний корозійний елемент – це магнетний випромінювач з нелінійною вольтамперною характеристикою [4]:

$$i = i_0 \left(\exp\left(\frac{\alpha z F}{RT} u\right) - \exp\left(-\frac{\beta z F}{RT} u\right) \right),$$

де i_0 – густина струму; z – кількість електронів, задіяних в електрохімічній корозії; R – універсальна газова стала, $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \times \text{K})$; T – температура, К; F – стала Фарадея, $F = 9,648 \cdot 10^4 \text{ C/mol}$; α, β – коефіцієнти перенесення заряду.

Для дистанційного моніторингу скоротимо простір ознак корозійного стану металу арматури, апроксимуючи i у деякій робочій точці (U_0, I_0) рядом Тейлора n -го ступеня:

$$\begin{aligned} i(u) &= i(U_0) + \frac{i'(U_0)}{1!} (u - U_0) + \frac{i''(U_0)}{2!} (u - U_0)^2 + \dots + \frac{i^{(n)}(U_0)}{n!} (u - U_0)^n = \\ &= a_0 + a_1 (u - U_0) + a_2 (u - U_0)^2 + \dots + a_n (u - U_0)^n, \end{aligned}$$

де $a_n = \frac{i^{(n)}(U_0)}{n!}$ визначають у точці $u = U_0$.

Обмежимося випадком, коли ступінь ряду Тейлора не вище третього та $U_0 = 0$. Тоді ансамблі локальних корозійних елементів металу арматури описуватимуть

квадратичні та кубічні члени $i(u) = a_2 u^2 + a_3 u^3$, а ділянки без корозії – лінійний член $i(u) = a_1 u$ ряду, що може слугувати ознакою для розпізнавання металу з корозією.

Під час опромінювання радіолокатором металу залізобетонної конструкції напругою $u_1(t) = U_m \sin \omega_1 t$ струм, що протікає через перехід метал–окис–метал корозійного елемента

$$i(t) = a_0 + a_1 U_m \sin \omega_1 t + a_2 U_m^2 \sin^2 \omega_1 t + a_3 U_m^3 \sin^3 \omega_1 t.$$

Беручи до уваги, що

$$\sin^2 \omega_1 t = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega_1 t, \quad \sin^3 \omega_1 t = \frac{3}{4} \sin \omega_1 t - \frac{1}{4} \sin 3\omega_1 t,$$

отримаємо:

$$i(t) = \left(a_0 + \frac{a_2 U_m^2}{2} \right) + \left(a_1 U_m + \frac{3}{4} a_3 U_m^3 \right) \sin \omega_1 t - \frac{1}{2} a_2 U_m^2 \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{4} a_3 U_m^3 \sin 3\omega_1 t. \quad (1)$$

Отже, струм $i(t)$ містить першу, другу та третю гармоніки.

За відсутності корозії металу існуватиме тільки перша гармоніка. Під час корозії у перевипроміненому сигналі з'являться друга, третя та вищі, значення яких слугуватимуть мірою корозійного стану металу арматури.

Ступінь корозії металу залізобетонної конструкції оцінюватимемо за відношенням суми потужності другої P_2 та третьої P_3 гармонік відносно першої P_1 :

$$N = 10 \lg \frac{P_1}{P_2 + P_3}. \quad (2)$$

Отже, залежно від ступеня корозії потужність перевипроміненого сигналу від металу залізобетонної конструкції перерозподілятиметься між першою, другою та третьою гармоніками. Це дає можливість позбутися впливу зміни дальності між радіолокатором та металом конструкції. Ураховуючи це, виведемо рівняння радіолокаційного моніторингу корозійного стану металу арматури.

Якщо розміри поверхні металу арматури перевищують довжину хвилі опромінення нелінійного радіолокатора, то згідно з принципом Гюйгенса–Кірхгофа кожний локальний корозійний елемент розглядають як незалежне джерело перевипроміненого сигналу з випадковими фазою, амплітудою та поляризацією. Хаотичний розподіл корозійних елементів обумовлює випадковий розподіл фаз перевипромінених електромагнетних хвиль поверхнею металу. Поле вторинного випромінювання поверхні металу арматури є суперпозиція елементарних полів корозійних елементів з урахуванням фаз та амплітуд. Припустимо, що метал арматури знаходиться на відстані r від передавача нелінійного радіолокатора (рис. 2).

За ізотропної антени передавача випромінювана потужність рівномірно розподіляється всією поверхнею сфери $S = 4\pi r^2$. Густина потоку потужності на металі арматури

$$P = P_t G_t / (4\pi r^2),$$

де P_t – потужність передавача на вході антени; G_t – коефіцієнт підсилення його антени. Локальний корозійний елемент металу арматури є умовною (еквівалентною) приймальною антеною з ефективною площею A_{ω_1} , потужність на виході якої описує вираз

$$P_A = P A_{\omega_1} = \frac{P_t G_t A_{\omega_1}}{4\pi r^2},$$

де A_{ω_1} – ефективна площа антени локального корозійного елемента.

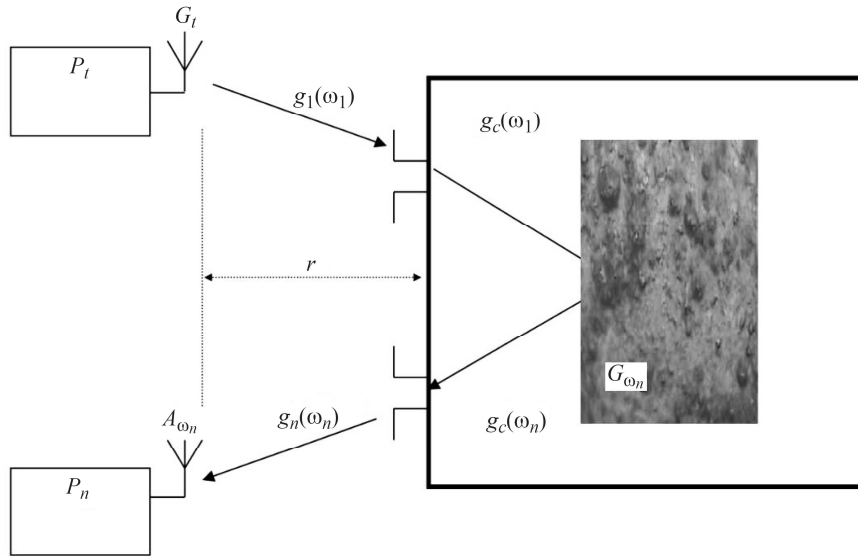


Рис. 2. Модель радіолокаційного моніторингу залізобетону.

Fig. 2. Model of radar monitoring of reinforced concrete.

Згідно з виразом (1), за нелінійного переходу метал–окис–метал корозійного елемента зондувальний сигнал $u(t) = U_m \sin \omega t$ перетворюється в n -ту гармоніку. Потужність на вході умовної передавальної антени локального корозійного елемента з урахуванням коефіцієнта перетворення зондувального сигналу в n -ту гармоніку $\xi_n[P_t, K_1(\omega_1), K_n(\omega_n)]$

$$P_{t_1} = \frac{P_t G_t A_{\omega_1}}{4\pi r^2} \xi_n[P_t, K_1(\omega_1), K_n(\omega_n)] g_1(\omega_1) g_c(\omega_1),$$

де $K_1(\omega_1), K_n(\omega_n)$ – коефіцієнти передачі потужності сигналу корозійним елементом на частотах ω_1 та ω_n , $g_1(\omega_1), g_c(\omega_1)$ – коефіцієнти передачі потужності зондувального сигналу вільним простором та бетоном на частоті ω_1 .

Враховуючи коефіцієнт підсилення G_{ω_n} умовної (еквівалентної) передавальної антени корозійного елемента, рівняння радіолокаційного моніторингу запишемо так:

$$P_{t_2} = \frac{P_t G_t A_{\omega_1} G_{\omega_n}}{4\pi r^2} \xi_n[P_t, K_1(\omega_1), K_n(\omega_n)] g_1(\omega_1) g_c(\omega_1).$$

Потужність n -ої гармоніки на вході приймача радіолокатора

$$P_n = \frac{P_t G_t A_{\omega_1} G_{\omega_n} A_{\omega_n}}{4\pi r^2} \xi_n[P_t, K_1(\omega_1), K_n(\omega_n)] g_1(\omega_1) g_c(\omega_1) g_c(\omega_n) g_n(\omega_n),$$

де A_{ω_n} – ефективна площа приймальної антени радіолокатора; $g_n(\omega_n), g_c(\omega_n)$ – коефіцієнти передачі сигналу n -ої гармоніки вільним простором та бетоном.

В цьому випадку, коли відсутня корозія металу арматури, існуватиме тільки перша гармоніка $i(t) = (a_1 U_m + \frac{3}{4} a_3 U_m^3) \sin \omega_1 t$ з потужністю P_1 . Під час корозії в перевипроміненому сигналі з'являться друга $\frac{1}{2} a_2 U_m^2 \cos 2\omega_1 t$ та третя $\frac{1}{4} a_3 U_m^3 \sin 3\omega_1 t$ з потужностями P_2 та P_3 . Отже, ступінь корозії металу залізобетонної конструкції можна оцінити за співвідношенням потужностей цих гармо-

нік, використовуючи вираз (2).

Нелінійний радіолокатор, який реалізує запропонований метод, складається з передавача 1; трьох приймачів 2–4, налаштованих на частоти ω_1 , $2\omega_1$, $3\omega_1$ та пристрою обчислення ступеня корозії 5 (рис. 3).

Враховуючи особливості поширення радіохвиль міліметрового діапазону, важливо вибрати його робочу частоту відповідно до вікон прозорості атмосфери, параметрів корозійних елементів як елементарних випромінювачів та загасання радіохвиль у бетоні.

Беручи до уваги розмір корозійних елементів, які знаходяться в межах 6...7 mm, частоту передавача доцільно вибрати в діапазоні 30...51 GGz зі середньою довжиною хвилі 8,6 mm (див. таблицю).

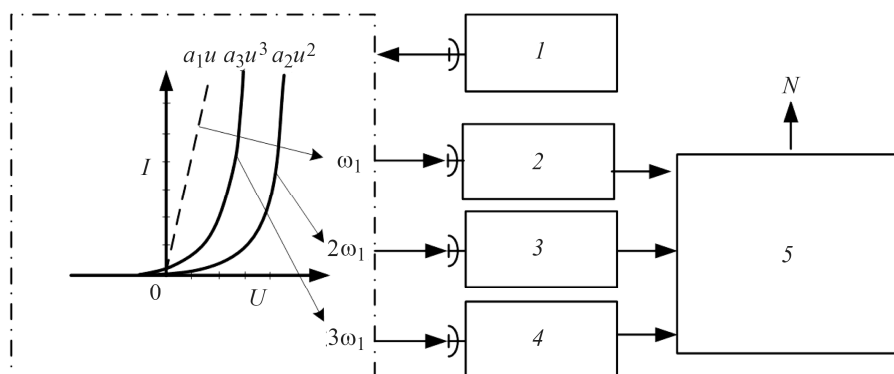


Рис. 3. Схема нелінійного радіолокатора.

Fig. 3. A scheme of a nonlinear radar.

Межі піддіапазонів вікон прозорості атмосфери, їх середні частоти та загасання радіохвиль в атмосфері та бетоні

Діапазон, GGz	Середня довжина хвилі піддіапазону, mm	Загасання хвиль в атмосфері, dB/m	Загасання хвиль в бетоні, dB/cm
30...51	8,6	$0,15 \cdot 10^{-3}$	1,58...2,42
66...105	3,2	$0,4 \cdot 10^{-3}$	2,97...4,33

Тоді друга $\frac{1}{2} a_2 U_m^2 \cos 2\omega_1 t$ та третя $\frac{1}{4} a_3 U_m^3 \sin 3\omega_1 t$ гармоніки потрапляють у діапазон 66...105 GGz зі середньою довжиною хвилі 3,2 mm вікна прозорості атмосфери.

Оцінимо загасання сигналу радіолокатора під час проходження крізь бетон за відомою методикою [15]. Коефіцієнт загасання радіохвиль у бетоні обчислимо за емпіричною формулою

$$A_c = 1636 \frac{\sigma_c}{\epsilon_r'}$$

де σ_c , ϵ_r' – електрична провідність та відносна діелектрична проникність бетону.

Електричну провідність бетону [15]

$$\sigma_c = 0,0326 \cdot f$$

де f – частота зондувального сигналу радіолокатора, GGz.

Враховавши, що відносна діелектрична проникність бетону $\epsilon_r' = 5,31$, коефіцієнт загасання радіохвиль у бетоні визначимо так [15]:

$$A_c = 10,044 \cdot f^{0,8095}, \text{ dB/m.}$$

Отже, загасання сигналу нелінійного радіолокатора у бетоні для діапазонів вікон прозорості (див. таблицю) становить 1,58...4,33 dB/m.

ВИСНОВКИ

Через нелінійність вольтамперних характеристик виникають гармоніки в сигналі радіолокатора від осередків корозії під час опромінення їх гармонічним сигналом. Співвідношення амплітуд гармонік може слугувати оцінкою ступеня корозії металу за радіолокаційного моніторингу корозійного стану металу арматури. Враховуючи розміри корозійних елементів, які становлять 6...7 mm, частоту передавача доцільно обирати в діапазоні 30...51 GGz. Тоді друга та третя гармоніки, що характеризують корозію, потрапляють в діапазон 66...105 GGz зі середньою довжиною хвилі 3,2 mm вікна прозорості атмосфери. Загасання сигналу нелінійного радіолокатора в бетоні для діапазонів вікон прозорості знаходиться в межах 1,58...4,33 dB/cm.

1. Більченко А. В., Кіслов О. Г., Синьковська О. В. Проблема довговічності залізобетонних конструкцій // Наук. вісник будівництва. – 2018. – **92**, № 2. – С. 162–165.
2. Довговічність залізобетонних конструкцій є основою життєвого циклу мостових споруд / А. В. Більченко, О. Г. Кіслов, О. В. Синьковська, А. В. Ігнатенко // Наук. вісник будівництва. – 2018. – **94**, № 4. – С. 140–144.
3. Електрохімічний захист підземного трубопроводу в зоні впливу ліній електропередач / Р. Джала, Б. Вербенець, О. Винник, Ю. Гужов, Р. Савула, М. Мельник // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спецвип. № 8: Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. – 2010. – **2**. – С. 498–503.
4. Дамаскин Б. Б., Петрий О. А., Цирлина Г. А. Электрохимия. – М.: Химия, 2006. – 672 с.
5. Sola E., Ožbolt J., and Balabanić G. Modelling corrosion of steel reinforcement in concrete: Natural vs. Accelerated Corrosion // Conference Paper: 9th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. – 2016. – P. 1–12.
6. Пузанов А. В., Улыбин А. В. Методы обследования коррозионного состояния арматуры железобетонных конструкций // Magazine of Civil Eng. – 2011. – № 7. – С. 18–24.
7. Бліхарський Я. З., Копійка Н. С. Дослідження методик моніторингу і моделювання корозійних процесів в залізобетонних елементах // Вісник Одеськ. держ. академії будівництва та архітектури. – 2019. – Вип. № 77. – С. 29–37.
8. Диагностика активной коррозии арматуры в железобетонных конструкциях мостовых сооружений / И. К. Матвеев, В. К. Матвеев, К. М. Шевчук, Р. М. Дрыгин // Мир дорог. – 2010. – № 49. – С. 54–58.
9. ASTM C876 Standards Test Method for Half-cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete. <https://kupdf.net/download/astm-c876-15-corrosion-potentials-of-uncoated-reinforcing-steel-in-concrete>.
10. Gowers K. R. and Millard S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique // ACI Mater. J. – 1999. – September–October. – P. 536–541.
11. New methods for the corrosion monitoring of underground pipelines according to the measurements of currents and potentials / R. M. Dzhalal, B. Ya. Verbenets, M. I. Melnyk, A. B. Mytsyk, R. S. Savula, and O. M. Semenyuk // Materials Science. – 2016. – **52**, № 5. – P. 732–741. DOI: 10.1007/s11003-017-0016-8
12. Stepova O., Parashchiienko I., and Lartseva I. Calculation of steel pipeline corrosion depth at the galvanic corrosive element operation // Int. J. of Eng. & Techn. – 2018. – **7**, № 3.2. – P. 431–435.
13. Ouzaa K. and Oucif C. Numerical model for prediction of corrosion of steel reinforcements in reinforced concrete structures // Underground Space. – 2019. – **4**, № 1. – P. 72–77.
14. Ožbolt J., Balabanić G., and Oršanić F. Modelling corrosion of steel reinforcement in concrete // IOP Conf. Series: Mat. Sci. and Eng. – 2019. – **615**.
15. Рекомендация Международного союза электросвязи ИТУ Р.2040. Влияние строительных материалов и структур на распространение радиоволн на частотах выше приблизительно 100 МГц // Распространение радиоволн. Сер. Р. – 2013. – № 9 – 54 с.

Одержано 27.04.2021