

TRASOWANIE ŚCIEŻEK PRĄDOWYCH W BETONIE MIĘDZY PRZECIWELEKTRODĄ I ELEKTRODĄ BADANĄ W POMIARACH IMPEDANCYJNYCH ZBROJENIA

Mariusz JAŚNIOK

Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice, Polska

Słowa kluczowe: beton, stal zbrojeniowa, polaryzacja, elektroda badana, przeciwelektroda, spektroskopia impedancyjna, EIS, modelowanie.

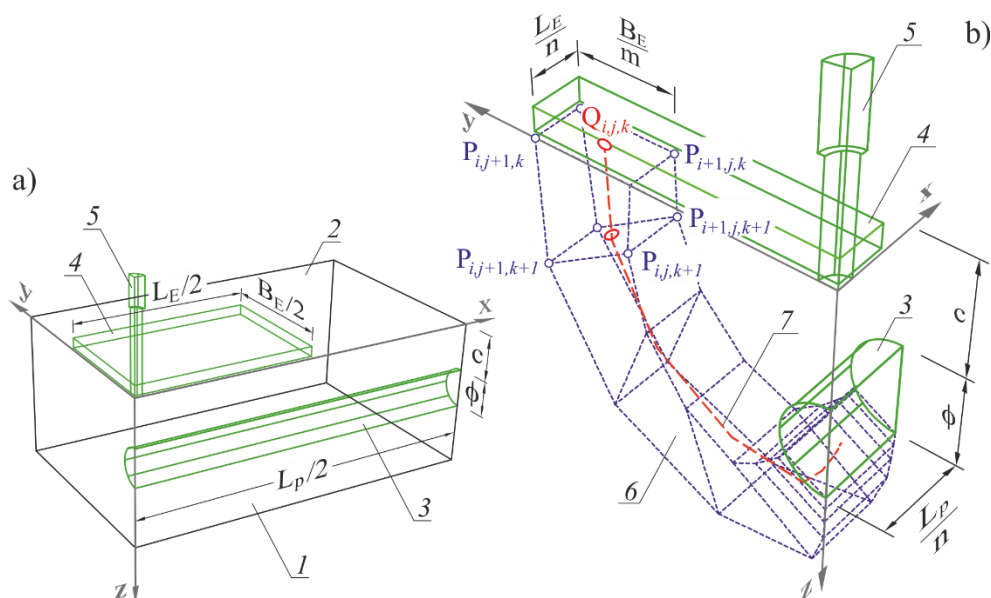
1. Zarys problemu

Praca dotyczy szeroko rozumianej zaawansowanej diagnostyki korozyjnej konstrukcji żelbetonowych [1,2]. Jedną z metod stosowanych w tego typu pomiarach diagnostycznych jest elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna (EIS) [3]. Jest to narzędzie pomiarowe o ogromnych możliwościach, jednak interpretacja wyników badań impedancyjnych uzyskiwanych na stali w betonie jest skomplikowana [4]. Szczególnie ciekawym problemem z punktu widzenia budownictwa jest wpływ geometrii badanych elementów żelbetonowych (cech geometrycznych), na parametry elektrochemiczne uzyskiwane metodą EIS. Czytelne zależności między geometrią układu pomiarowego a widmami impedancyjnymi otrzymanymi w pomiarach EIS przedstawiono i wyjaśniono w pracach [5-8]. Podstawą interpretacji uzyskiwanych widm był autorski model '3D' układu 'przeciwelektroda–beton–pręt zbrojeniowy', który umożliwia analizę liczbową elektrochemicznych parametrów intensywności procesów korozyjnych na zbrojeniu w betonie, a także przewidywanie tendencji do zmian kształtów widm impedancyjnych w funkcji geometrii układu pomiarowego. Jednym z elementów modelu '3D' jest przestrzenna siatka węzłów układu pomiarowego wyznaczająca obszar betonu aktywnego w przewodzeniu prądu zmiennego w trakcie pomiaru EIS. W cytowanych wyżej pracach sposób tworzenia wspomnianej siatki węzłów nie został opisany, dlatego też w niniejszym artykule zdecydowano się szczegółowo omówić autorską metodykę trasowania ścieżek prądowych w betonie pod kątem możliwości symulacji i analizy pomiarów impedancyjnych modelem '3D'.

2. Modelowany układ pomiarowy

Rozważa się bryłę betonu 1 o co najmniej jednej płaskiej powierzchni 2 zbrojoną pojedynczym stalowym prętem 3. W celu realizacji pomiarów impedancyjnych na płaskiej powierzchni betonu umieszcza się sondę pomiarową złożoną z prostokątnej przeciwelektrody 4 o wymiarach $L_E \times B_E$ i elektrody referencyjnej 5 usytuowanej w geometrycznym środku przeciwelektrody (rys. 1). Wprowadza się prostokątny układ

współrzędnych, którego oś x jest równoległa do osi pręta zbrojeniowego średnicy ϕ , który w omawianym układzie pomiarowym pełni rolę elektrody badanej. Zakłada się, że zasięg polaryzacji zbrojenia wynosi L_p . Oś z układu współrzędnych wskazuje kierunek odmierzenia grubości otuliny betonowej c .



Rys. 1. Modelowany układ pomiarowy: a) główne elementy układu, b) fragment układu z wyznaczonymi teoretycznymi ścieżkami prądowymi.

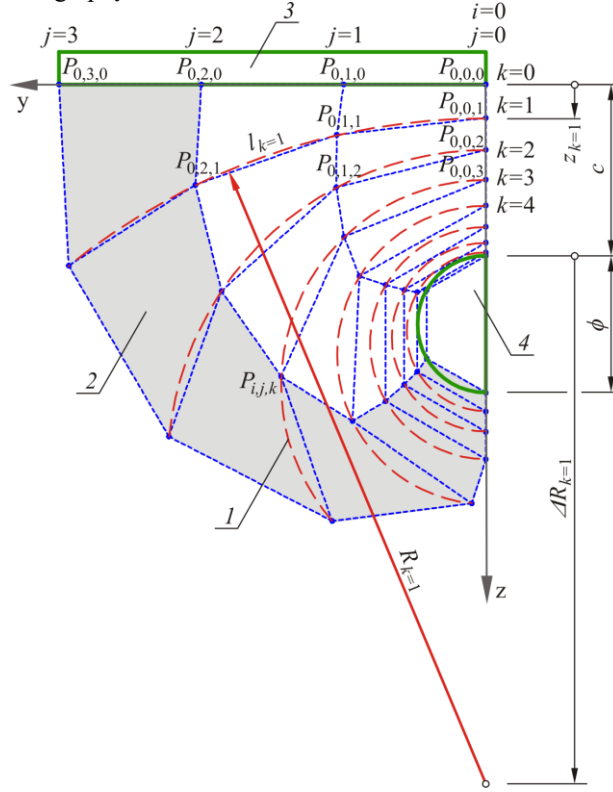
Fig. 1. Modelled measurement system: a) the main elements of the system, b) a fragment of the system with the designated theoretical electrical conductivity paths.

3. Metodyka trasowania ścieżek przewodzenia prądu w betonie

W celu wyznaczenia siatki węzłów modelu układu ‘przeciwelektroda–beton–pręt’ przeprowadza się trasowanie ścieżek przewodzenia prądu zmiennego w betonie. Zakłada się, że teoretyczne ścieżki przewodzenia δ (rys. 1b) są wydłużonymi bryłami betonu o krzywoliniowym przebiegu i górnej podstawie znajdującej się na powierzchni przeciwelektrody 4, a dolnej podstawie na powierzchni elektrody badanej 3. Ustala się podział modelu układu w kierunku osi x , y i z na odpowiednio n , m i p elementów. W konsekwencji, zarówno przeciwelektroda, jak i elektroda badana składają się z jednakowej liczby $n \times m$ elementów powierzchniowych. Natomiast beton pomiędzy tymi elektrodami, jako ośrodek przewodzący prąd, został podzielony na nieregularne, osmiokątne elementy bryłowe w liczbie $n \times m \times p$. Przy opisanych założeniach liczba teoretycznych ścieżek przewodzenia prądu w betonie wynosi $n \times m$, a każda ścieżka składa się z jednakowej liczby p połączonych segmentów z elementów bryłowych (por. rys. 1b).

Na podstawie przyjętego podziału na elementy powierzchniowe i bryłowe definiuje się geometryczne zależności, umożliwiające określenie współrzędnych wyznaczających przestrzenną siatkę węzłów modelu. W tym celu wprowadza się elementy pomocnicze w postaci przewodnic ścieżek prądowych – rys. 2. Każda przewodnica l jest łukiem

o promieniu R_k i długości l_k oraz środka znajdującym się w odległości ΔR_k (odmierzanej w kierunku dodatnim osi z) od najbliższego przeciwelektrode punktu na obwodzie przekroju poprzecznego pręta.



Rys. 2. Zasady wyznaczania parametrów przewodnic l teoretycznych ścieżek prądowych 2 , przebiegających między przeciwelektrodą 3 a prętem zbrojeniowym 4 .
 Fig. 2. Principles of determining guide parameters l for theoretical electrical conductivity paths 2 running between a counter electrode 3 and a rebar 4 .

Wymienione trzy podstawowe parametry przewodnic (R_k , l_k , ΔR_k) oraz parametr pomocniczy z_k , będący najmniejszą odległością łuku przewodniczy od płaszczyzny x - y , można po prostych przekształceniach wyznaczyć z zależności (1)-(4):

$$\left(1 - \frac{\phi/2}{R_k}\right)^2 = 1 - \sin\left(\frac{k}{p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \rightarrow R_k, \quad k = 0, 1, \dots, p \quad (1)$$

$$\Delta R_k = R_k - c \left(1 - \frac{\phi/2}{R_k}\right)^2, \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

$$l_k = B_E + \left[(B_p - B_E) \frac{k}{p} \right] + \left(\frac{c}{\phi} \frac{|B_p - B_E|}{2} \right) \cdot \sin\left(\frac{k}{p} \pi\right) \leq 2\pi R_k, \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

$$z_k = c \cdot \sin\left(\frac{k}{p} \cdot \frac{\pi}{2}\right), \quad k = 0, 1, \dots, p \quad (4)$$

Można zauważyć, że dla $k = 0$ według (1) $R_k \rightarrow \infty$, a według (4) $z_k = 0$, czyli prowadnica pokrywa się z powierzchnią przeciwelektrody na zewnętrznej powierzchni betonu. Natomiast dla $k = p$ według (1) $R_k = \phi/2$, czyli promień łuku prowadnicy odpowiada promieniowi przekroju poprzecznego pręta, a według (2) $\Delta R_k = \phi/2$, czyli środek łuku prowadnicy znajduje się w środku przekroju pręta. Z kolei według (3) $l_k = B_p = \pi \phi$, czyli łuk prowadnicy przechodzi w okrąg o promieniu przekroju poprzecznego pręta, natomiast według (4) $z_k = c$, czyli prowadnica jest maksymalnie, tj. na grubość otulenia, oddalona od zewnętrznej powierzchni betonu.

Wykorzystując zależności (1)-(4), sformułowano wzory umożliwiające wyznaczenie współrzędnych przestrzennej siatki węzłów $P_{i,j,k}$ modelu (por. rys. 1b):

$$P_{i,j,k}(x_{i,j,k}^P, y_{i,j,k}^P, z_{i,j,k}^P), \quad i = 0, 1, \dots, \frac{n}{2}, \quad j = 0, 1, \dots, \frac{m}{2}, \quad k = 0, 1, \dots, p, \quad (5)$$

$$x_{i,j,k}^P = \begin{cases} \frac{i}{n} \left(L_E + z_k \frac{L_p - L_E}{c} \right), & k > 0, \\ \frac{i}{n} L_E, & k = 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$y_{i,j,k}^P = \begin{cases} R_k \sin\left(\frac{l_k}{R_k} \frac{2j}{m}\right), & k > 0, \\ \frac{j}{m} B_E, & k = 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$z_{i,j,k}^P = \begin{cases} z_k + R_k \left[1 - \cos\left(\frac{l_k}{R_k} \frac{2j}{m}\right) \right], & k > 0, \\ 0, & k = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Indeks i we wzorach wskazuje numer punktu w kierunku osi x , indeks j – w kierunku osi y , natomiast indeks k – w kierunku osi z . Przyjęte oznaczenia i numeracja węzłów są jednakowe w każdej ćwiartce modelu (rys. 1a) wydzielonej przez dwie przecinające się płaszczyzny symetrii: x - z i y - z .

W ostatnim kroku na bazie współrzędnych (6)-(8) z zależności (9)-(12) ustala się współrzędne punktów $Q_{i,j,k}$ będących końcami odcinków tzw. teoretycznych linii prądowych (7 na rys. 1b) w poszczególnych elementach bryłowych modelu:

$$Q_{i,j,k}(x_{i,j,k}^Q, y_{i,j,k}^Q, z_{i,j,k}^Q), \quad i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2}, \quad j = 1, 2, \dots, \frac{m}{2}, \quad k = 0, 1, \dots, p, \quad (9)$$

$$x_{i-1,j-1,k}^Q = x_{i-1,j-1,k}^P + \frac{x_{i,j,k}^P - x_{i-1,j-1,k}^P}{2}, \quad (10)$$

$$y_{i-1,j-1,k}^Q = y_{i-1,j-1,k}^P + \frac{y_{i,j,k}^P - y_{i-1,j-1,k}^P}{2}, \quad (11)$$

$$z_{i-1,j-1,k}^Q = z_{i-1,j-1,k}^P + \frac{z_{i,j,k}^P - z_{i-1,j-1,k}^P}{2}. \quad (12)$$

4. Podsumowanie

Opisany w niniejszym artykule sposób trasowania ścieżek prądowych w betonie jest jedynie elementem składowym modelu '3D' układu pomiarowego 'przeciwelektroda–beton–pręt zbrojeniowy', którego zasadniczą część obszernie omówiono w publikacji [6]. Przedstawiona metodyka ma zastosowanie jedynie do układów symetrycznych o ograniczeniach podanych w założeniach. Poprawność przyjętych założeń została pozytywnie zweryfikowana doświadczalnie w pracach [6-8], w których dokonano również oceny statystycznej zgodności wyników pomiarów doświadczalnych z wynikami symulacji przebiegu widm według modelu '3D'. Należy zaznaczyć, że w literaturze alternatywne propozycje modelowania opisanego zagadnienia sprowadzają się do znacznie prostszych i nie ujmujących pełnej geometrii żelbetu modeli dwuwymiarowych [9-11].

Oznaczenia symboli

- c – grubość otulenia betonowego, concrete cover thickness, [m],
- l_k – długość łuku przewodnicy; arc length of the guide, [m],
- n, m, p – liczba elementów modelu układu w kierunku osi x, y, z ; the number of elements of the model towards axes x, y and z direction,
- z_k – najmniejsza odległość łuku przewodnicy od powierzchni przeciwelektrody, the smallest distance of the guide arc from the surface of the counter electrode, [m],
- B_E – szerokość prostokątnej przeciwelektrody; width of a rectangular counter electrode, [m],
- L_E – długość prostokątnej przeciwelektrody, length of a rectangular counter electrode, [m],
- L_p – długość zasięgu polaryzacji zbrojenia, length of a limited range of reinforcement polarization, [m],
- $P_{i,j,k}$ – punkty siatki węzłów modelu, mesh points of model nodes,
- $Q_{i,j,k}$ – końce odcinków teoretycznych linii prądowych, ends of segments of theoretical current lines,
- R_k – promień łuku przewodnicy ścieżki prądowej, radius the guide arc of the current path, [m],
- ΔR_k – odległość środka promienia łuku przewodnicy do najdalszego punktu na powierzchni elektrody badanej, distance of a centre of the guide arc radius to the furthest point on the surface of the working electrode, [m],
- ϕ – średnica elektrody badanej, diameter of the working electrode, [m].

Literatura

- [1] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T.: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu, t. 2, PWN, Warszawa 2011.

- [2] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T.: O trwałości, diagnostyce i obserwacji konstrukcji żelbetowych, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 10, 2010, s. 519-525.
- [3] Jaśniok M.: Modelowanie układu stal–beton w pomiarach szybkości korozji zbrojenia metodą spektroskopii impedancyjnej, *Monografia*, nr 470, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013, s. 230.
- [4] Jaśniok M.: Cechy widm impedancyjnych stali w zaczynie cementowym, zaprawie i betonie, *Ochrona przed Korozją*, nr 1, 2011, s. 2-7.
- [5] Jaśniok M.: Examining and Modelling the Influence of Lengths of Rebars in Concrete to Shapes of Impedance Spectra, *Cement Wapno Beton - Special Issue*, 2012, s. 30-34.
- [6] Jaśniok M.: Investigation and Modelling of the Impact of Reinforcement Diameter in Concrete on Shapes of Impedance Spectra, *Procedia Engineering*, Vol. 57, 2013, Elsevier, pp. 456-465.
- [7] Jaśniok M.: Analiza wpływu grubości betonowej otuliny zbrojenia na kształty widm impedancyjnych stali zbrojeniowej w elementach żelbetowych (Analysis of the thickness of steel rebars cover in concrete effect on the impedance spectra in the reinforced concrete), *Cement Wapno Beton* nr 1, 2014, s. 46-58.
- [8] Jaśniok M.: Studies on the Effect of a Limited Polarization Range of Reinforcement on Impedance Spectra Shapes of Steel in Concrete, *Procedia Engineering*, vol. 108, 2015, Elsevier, pp. 332-339.
- [9] Lemoine L., Wenger F., Galland J.: Study of the Corrosion of Concrete Reinforcement by Electrochemical Impedance Measurement, [in:] Berke N.S. et al. (eds.): *Corrosion Rates of Steel in Concrete*, ASTM STP 1065, ASTM, 1990, pp. 118-133.
- [10] Matsuoka K., Kihira H., Ito S., Murata T.: Corrosion Monitoring for Reinforcing Bars in Concrete, [in:] Berke N.S. et al. (eds.): *Corrosion Rates of Steel in Concrete*, ASTM STP 1065, ASTM, Philadelphia 1990, pp. 103-117.
- [11] Macdonald D.D., Mckubre M.C.H., Urquidi-Macdonald M.: Theoretical Assessment of AC Impedance Spectroscopy for Detecting Corrosion of Rebar in Reinforced Concrete, *Corrosion*, Vol. 44, No. 1, 1988, pp. 2-7.

ROUTING OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY PATHS IN CONCRETE BETWEEN A COUNTER ELECTRODE AND A WORKING ELECTRODE IN IMPEDANCE MEASUREMENTS OF THE REINFORCEMENT

Summary

The paper concerns the widely understood advanced diagnosis of corrosion of reinforced concrete structures. The subject of analysis was the method of electrochemical impedance spectroscopy (EIS). At the outset the general assumptions of the original '3D' model was described for analysis and simulation of impedance spectra obtained for reinforcing steel in concrete. Then, the way of routing of electrical conductivity paths in concrete between the counter electrode and the working electrode (rebar) was described in details. Mathematical expressions were given to allow determination of a spatial grid of nodes in concrete, which are also the nodes of the conductivity paths. The described conductivity of electrical paths are the elongated curvilinear concrete solids and demarcate the active zone of concrete in conduction of alternating current during impedance measurements of steel in concrete.