

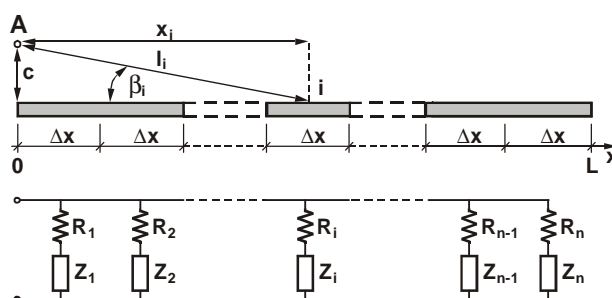
## MODEL UKŁADU STAL-BETON DO POMIARU KOROZJI ZBROJENIA METODĄ SPEKTROSKOPII IMPEDNACYJNEJ

Mariusz JAŚNIOK  
Politechnika Śląska, Gliwice

### 1. Zarys problemu

Od wielu lat podejmowane są mało skuteczne próby opracowania efektywnej metodyki analizy wyników pomiarów impedancyjnych (EIS) wykonywanych na elementach żelbetowych. Podstawowy problem dotyczy trudności z prawidłową identyfikacją tzw. powierzchni polaryzacji, określającej badany obszar stali zbrojeniowej. Znajomość powierzchni polaryzacji zbrojenia umożliwia wyznaczenie oporu przeniesienia ładunku, który jest odwrotnie proporcjonalny do szybkości korozji. W żelbecie pomiary wykonuje się w układzie trójelektrodowym, w którym elektrodą badaną jest zbrojenie, natomiast elektroda pomocnicza wraz z elektrodą odniesienia umieszczane są w głowicy pomiarowej na powierzchni betonu – por. [1]. W trakcie pomiaru, zbrojenie jest polaryzowane prądem zmiennym.

Na początku lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku po raz pierwszy podjęto próbę zastosowania spektroskopii impedancyjnej do korozyjnego monitoringu zbrojenia betonowych próbek zanurzonych w wodzie morskiej – por. [2]. Autorzy do analizy uzyskanych widm impedancyjnych zaproponowali elektryczny schemat zastępczy złożony z dwóch szeregowo połączonych układów  $R-C$ , przy czym jeden rozbudowany o impedancję *Warburga*. W publikacji Lemoine i in. [3] zaproponowano nieco inne podejście do modelowania odpowiedzi na zmiennoprądową polaryzację długiej wkładki zbrojeniowej w betonie.



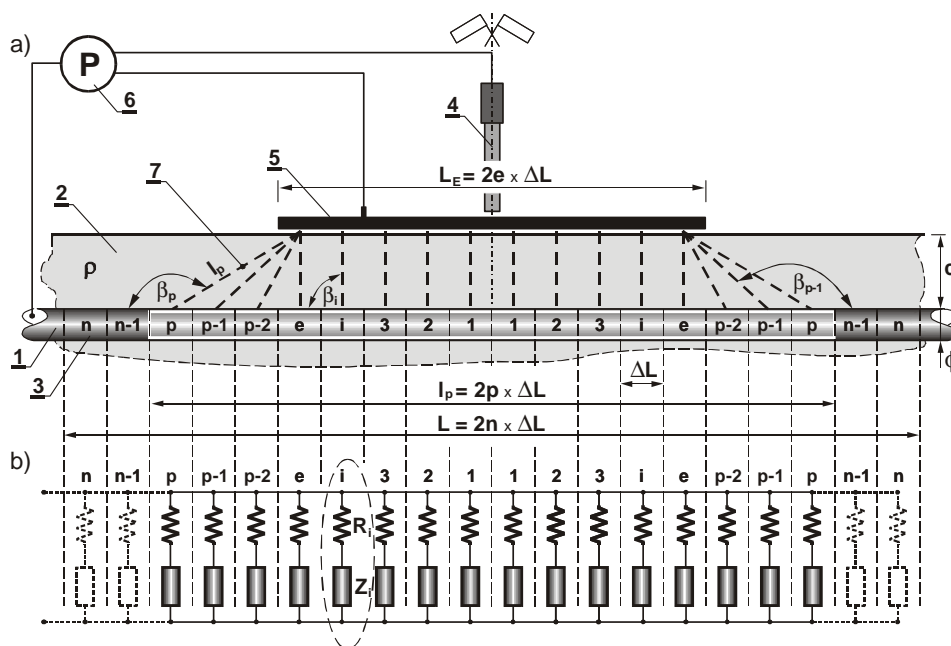
Rys. 1. Założenia modelu akademickiego Lemoine i in. [3]  
Fig. 1. Principles of the academic model by Lemoine et. al. [3]

Autorzy przez analogię do modelu *linii transmisji* równolegle połączyli kilka obwodów *Randlesa*, z których każdy przypisany został do wydzielonego myślowo odcinka  $\Delta x$  długiej wkładki zbrojeniowej z otuliną – rys. 1. Założono, że elektroda odniesienia wraz z przeciwelektrodą są geometrycznie skoncentrowane w punkcie „A”. Ponadto przyjęto, że możliwa jest polaryzacja wyłącznie całej długości badanej wkładki zbrojeniowej. Powyższe założenia tzw. *modelu akademickiego* Lemoine i in. [3] stały się podstawą prezentowanego w niniejszej pracy modelu układu *długa wkładka zbrojeniowa – beton*, oznaczanego dalej skrótem  $\rightarrow$  DWZ-B.

## 2. Układ pomiarowy według założeń modelu DWZ-B

Opierając się na głównych założeniach *modelu akademickiego* [3] zaproponowano jego rozbudowę, wprowadzając gruntowne modyfikacje i usuwając ograniczenia pomiarowe, w celu dostosowania do koncepcji metody *zmiennej powierzchni przeciwelektrody* [4]. Model DWZ-B – schematycznie przedstawiony na rys. 2 – dotyczy długiej wkładki zbrojeniowej 1 osadzonej w betonie 2 o rezystywności  $\rho$  [ $\Omega\text{cm}$ ] – por. [3]. Stalowa wkładka zbrojeniowa jest elektrodą badaną, natomiast ciecz porowa betonu jest elektrolitem [3].

Wkładkę zbrojeniową o długości  $L$  myślowo dzieli się na dowolną liczbę  $2n$  krótkich odcinków 3 o jednakowej długości  $\Delta L$ , rozmieszczonych symetrycznie względem osi elektrody odniesienia 4 i przeciwelektrody 5, stąd  $L = 2n \times \Delta L$  – por. rys. 2.



Rys. 2. Model DWZ-B układu stal-beton do elektrycznej symulacji dowolnego zasięgu polaryzacji zmiennoprądowej na długich wkładkach zbrojeniowych w betonie  
 Fig. 2. DWZ-B model of steel-concrete system for electrical simulation of any alternating current polarization range on the long reinforcing rods embedded in concrete

Każde pionowe pasmo wydzielające fragment wkładki zbrojeniowej wraz z betonem o szerokości  $\Delta L$  charakteryzuje impedancja  $Z_i$  układu metal-elektrolit połączona szeregowo z rezystancją  $R_i$  otuliny [3]. Impedancja  $Z_i$  jest definiowana w sposób „klasyczny”, w ramach doboru odpowiedniego elektrycznego schematu zastępczego, modelującego procesy elektrochemiczne przebiegające na styku stal zbrojeniowa – ciecz porowa betonu – por. [5]. Odcinek  $\Delta L$  wydzielający powierzchnię  $\Delta S$  poboczniczy stalowej wkładki o średnicy  $\phi$  jest odseparowany od sondy pomiarowej przez otulinę o grubości  $c$  [3].

W sondzie pomiarowej, umieszczonej na powierzchni betonu, znajduje się elektroda odniesienia 4 i przeciw elektroda 5, które wraz z elektrodą badaną 1 podłączone są do potencjostatu 6, tworząc tzw. układ trójelektrodowy – por. [3].

Linie prądowe 7 przebiegające w betonie między przeciw elektrodą i polaryzowanymi powierzchniami  $\Delta S = \pi\phi \times \Delta L$  elektrody badanej są odcinkami prostymi o długości  $l_i$  i nachyleniu  $\beta_i$  mierzonym względem osi zbrojenia – por. [3].

Elektryczna rezystancja  $R_i$  otuliny betonowej określona jest zależnością [3]

$$R_i = \rho \frac{l_i}{\Delta S}, \text{ w której } l_i = \frac{c + \phi/2}{\sin \beta_i}. \quad (1)$$

### 3. Elektroda badana i przeciw elektroda o zmiennej powierzchni

Długość  $L$  elektrody badanej jest wstępnie założonym odcinkiem analizowanej wkładki zbrojeniowej, który nie może być mniejszy od poszukiwanego zasięgu polaryzacji  $l_p$ . Na podstawie badań laboratoryjnych można przyjąć  $L \approx (2\div 3) \times L_E$ , gdzie  $L_E$  jest długością przeciw elektrody.

Zalecana długość elementarnego odcinka  $\Delta L = 0,5\div 1$  mm, co uzasadnione jest długością zasięgu polaryzacji  $l_p$  szacowaną maksymalnie z dokładnością do 1 mm.

Przeciw elektroda może mieć dowolną długość i w przeciwieństwie do propozycji [3] na rys. 1, nie jest skoncentrowana w jednym punkcie „A”. Przyjęte założenie umożliwia elektryczną symulację zachowania się układu stal-beton w nawiązaniu do metody *zmiennej powierzchni przeciw elektrody*.

Długość  $L_E$  przeciw elektrody jest wielokrotnością odcinka  $\Delta L$ , tj.  $L_E = 2e \times \Delta L$  i nie może przekroczyć całkowitej długości  $L$  elektrody badanej ( $L_E \leq L$ ).

### 4. Zasięg polaryzacji na zbrojeniu

Polaryzacja może obejmować dowolnej długości fragment wkładki zbrojeniowej usytuowany symetrycznie względem środka przeciw elektrody. Zakłada się, że zawsze równocześnie polaryzowane są dwa odcinki  $\Delta L$  o tym samym numerze. W pierwszej kolejności są to odcinki nr 1 usytuowane centrycznie pod przeciw elektrodą, następnie odcinki nr 2, itd. Długość  $l_p$  zasięgu polaryzacji jest wielokrotnością odcinka  $\Delta L$ , czyli  $l_p = 2p \times \Delta L$ .

Zakłada się, że linie prądowe znajdujące się bezpośrednio pod geometrycznym wymiarem przeciw elektrody przebiegają prostopadle do osi wkładki zbrojeniowej ( $\beta_i = 90^\circ$ ), natomiast poza jej gabarytem nachylone są pod kątem rozwartym ( $\beta_i > 90^\circ$ ), którego wielkość rośnie wraz ze wzrostem odległości od krawędzi obrysu tej elektrody.

Praktyczną realizację ograniczenia zasięgu polaryzacji do długości  $l_p$  wykonano poprzez wyłączenie z obwodu elektrycznego wszystkich układów elektrycznych  $R_i-Z_i$ , dla których

zachodzi warunek  $i > p$ . Przy tym założeniu całkowitą elektrochemiczną impedancję  $Z$  układu stal-beton można wyliczyć z zależności

$$\frac{1}{Z} = \sum_{i=1}^p \left( \frac{1}{R_i + Z_i} \right). \quad (2)$$

## 5. Podsumowanie

Przedstawiony model *DWZ-B* układu stal-beton umożliwia elektryczną symulację dowolnego zasięgu polaryzacji zmiennoprądowej na długich wkładkach zbrojeniowych w betonie za pomocą przeciwelektrody o zmiennej powierzchni. Sformułowane założenia modelu minimalizują dotychczasowe problemy interpretacyjne, ponieważ za pomocą pomiarów EIS dwiema przeciwelektrodami o różnych powierzchniach, można uzyskać jednostkowe charakterystyki korozyjne zbrojenia służące miarodajnej ocenie stanu żelbetu.

## Literatura

- [1] Jaśniok M., Jaśniok T.: Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Zaawansowane badania elektrochemiczne (cz. IV). Przegląd Budowlany, nr 7-8, 2007, s. 36-43.
- [2] Montemor M.F., Simoes A.M., Ferreira M.G.S.: Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques, *Cement & Concrete Composites*, 25, pp.491-502, 2003.
- [3] Lemoine L., Wenger F., Galland J.: Study of the Corrosion of Concrete Reinforcement by Electrochemical Impedance Measurement, *Corrosion Rates of Steel in Concrete*, ASTM STP 1065, pp. 118-133.
- [4] Jaśniok T., Zybura A: Polaryzacyjne pomiary korozji zbrojenia z uwzględnieniem przeciwelektrody o zmiennej powierzchni, *MATBUD'2003*, Kraków, 25-27 czerwca 2003, s. 219-230.
- [5] Feliu V., Gonzalez J. A., Andrade C., Feliu S.: Equivalent circuit for modeling the steel-concrete interface. I. Experimental evidence and theoretical prediction, *Corrosion Science*, Vol. 40, No.6, 1998, pp. 975-993.

## MODEL OF STEEL-CONCRETE SYSTEM IN CORROSION MEASUREMENTS OF THE REINFORCEMENT BY IMPEDANCE SPECTROSCOPY METHOD

### Summary

The model of the steel-concrete system for electrical simulation of any alternating current range by EIS method on the long reinforcing rods embedded in concrete, using the varying area counter electrode, was presented. The model consists of the elementary equivalent electrical circuits in parallel while the concrete cover resistance is a function of distribution of the electric field lines between the counter electrode and the working electrode. On the basis of the model principles the new conception of corrosion velocity assessment of the reinforcement in concrete can be formulated.