

# 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

### 1. Wprowadzenie

Przedstawiane w wielu publikacjach (4, 14, 15, 19) analizy wyników badań impedancyjnych, prowadzonych w celu oceny zagrożenia korozyjnego stali w betonie, koncentrują się głównie na właściwościach elektrochemicznych stali i betonu. Dla uproszczenia beton zastępuje się czasami roztworem wypełniającym jego pory (3, 20). Pomiary impedancyjne stali osadzonej w betonie, zazwyczaj wykonywane są na prostych geometrycznie układach oraz małych próbkach, o kilku, kilkunastocentymetrowych wymiarach (4, 13). Nieliczne prace (15-17) podejmują badania impedancyjne na większych i bardziej złożonych układach, w przybliżeniu nawiązujących do skomplikowanego geometrycznie ułożenia wielu prętów, w elementach konstrukcji żelbetowej. W kilku pracach wykazano znaczny wpływ geometrii układu 'stal-beton' na przebieg widm impedancyjnych (4, 9, 15, 16), a Lemoine'a i in. (15) oraz Matsuoka i in. (16) pośrednio zbadali również wpływ betonowej otuliny. Natomiast w pracy autora (10) przedstawiono wyniki badań wpływu średnicy prętów zbrojeniowych na przebieg widm impedancyjnych stali w betonie, które stanowiły pierwszy etap weryfikacji autorskiego modelu '3D'.

W niniejszej pracy podjęto próbę analizy wpływu grubości otuliny stalowego zbrojenia na przebieg widm impedancyjnych, otrzymanych w wyniku zmiennoprądowych pomiarów polaryzacyjnych, na elementach żelbetowych. W zależności od klasy konstrukcji i klasy ekspozycji minimalna grubość otuliny, wymagana ze względu na trwałość stali zbrojeniowej w betonie, może zmieniać się w szerokim przedziale od 10 do 55 mm (porównaj PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2). Pomiary impedancyjne od niedawna wykonywane są również na dużych elementach żelbetowych ze zróżnicowanymi otulinami (7, 8, 11) i z tego względu ważna jest znajomość wpływu tego czynnika na przebieg widm. Celem pracy jest zbadanie widm impedancyjnych stali w betonie, związanych z wpływem grubości otuliny zbrojenia oraz opisanie tego wpływu za pomocą trójwymiarowego modelu.

### 1. Introduction

Presented in many papers the impedance studies, which main goal was the establishment of steel rebars corrosion behaviour in concrete, were concentrated principally on electrochemical properties of these two components of reinforced concrete (3, 9, 10, 14). As a simplification, concrete is sometimes approximated by the pore solution (2, 13). The impedance measurements on reinforcing steel in concrete are usually realised on a simple geometric system with dimension of dozen or so centimetres (3, 8). Few studies use in the experiments the impedance measurements on more complicated systems, closer to the complex distribution of numerous rebars in concrete elements (10-12). In some papers the experimental results showing the important influence of the system geometry "steel – concrete" on the shape of impedance spectra (3, 7, 10, 11) and in works of Lemoine et al. (10) as well as of Matsuoka et al. (11) indirectly also the influence of thickness of rebars cover was shown.

The main goal of this paper was the study of the effect of cover thickness of steel reinforcement on the shape of impedance spectra, obtained during the variable current polarization measurements on reinforced concrete elements. In dependence of construction and exposition classes the minimum cover thickness, required for steel in concrete resistance, can vary in wide range from 10 to 55 mm (see PN-EN 1992-1-1:2008, Euro cod 2). The impedance tests are more recently conducted also on relatively great elements of reinforced concrete with different covers thickness (7, 8, 11) and from these reasons the knowledge of this factor on impedance spectra forms is of high importance. The goal of this work is to study the influence of steel rods in concrete cover thickness on impedance spectra and modelling of this effect with three-dimensions model.

### 2. Materials and methods

The tests were conducted on 10 concrete samples of dimensions 250×100×100 mm, reinforced with one steel rod of  $\phi = 1$ mm diameter, made of steel S235JR, with cover thickness in the range:

## 2. Materiały i metody badań

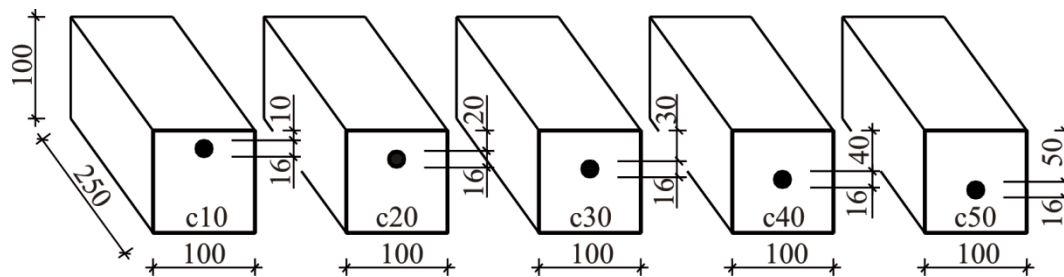
Badania przeprowadzono na 10 próbkach betonu o wymiarach 250×100×100 mm, zbrojonych jednym prętem o średnicy  $\phi = 16$  mm, ze stali S235JR, przy zmiennej grubości otuliny, w zakresie 10, 20, 30, 40 i 50 mm (rysunek 1). Próbki wykonano z jednego betonu, przy czym oznaczono go S1, w przypadku dobrych właściwości ochronnych dla stali, które dotyczyły pięciu próbek, natomiast w pozostałych pięciu próbkach, które oznaczono S2, dodano 2%  $\text{CaCl}_2$  w stosunku do masy cementu, co obniżyło właściwości ochronne zaczynu. Skład mieszanki betonowej, w przeliczeniu na 1 m<sup>3</sup> betonu, był następujący: 489 kg cementu CEM I 32,5R, 501 kg kruszywa drobnego 0/2 mm, 1168 kg kruszywa grubego frakcji 2-8 mm oraz 212 litrów wody, co dawało stosunek w/c = 0,43.

Badania impedancyjne wykonywano w układzie trójelektrodowym, pokazanym na rysunku 2. Elektrodamy badanymi 1 były stalowe pręty zbrojeniowe, elektrodę referencyjną 2 stanowiła elektroda chlorosrebrowa  $\text{Cl}^-/\text{AgCl}$ , Ag, natomiast prostokątną przeciwelektrodę 3 wykonano ze stali nierdzewnej. Przeciwelektrody o wymiarach 250×100×2 mm umieszczono na wilgotnym filcu 4, na górnej powierzchni próbek. Dobry kontakt elektryczny przeciwelektrody z betonem próbki uzyskano za pomocą próbki betonowej 5, zapewniającej obciążenie wynoszące 3 kPa.

10, 20, 30, 40 and 50 mm. The samples were produced of one concrete, which was designed S1 in the case of good steel protecting properties and embraced five samples, however, to the remaining five samples 2%  $\text{CaCl}_2$  by mass of cement was added. These samples were designated S2 and has lower steel protecting properties. The composition of concrete mixture in kg/m<sup>3</sup> was as follows: 489 kg of cement CEM I 32.5R, 501 kg of fine aggregate 0/2 mm, 1168 kg of coarse aggregate 2/8 mm and 212 liters of water, giving the w/c ratio = 0.43.

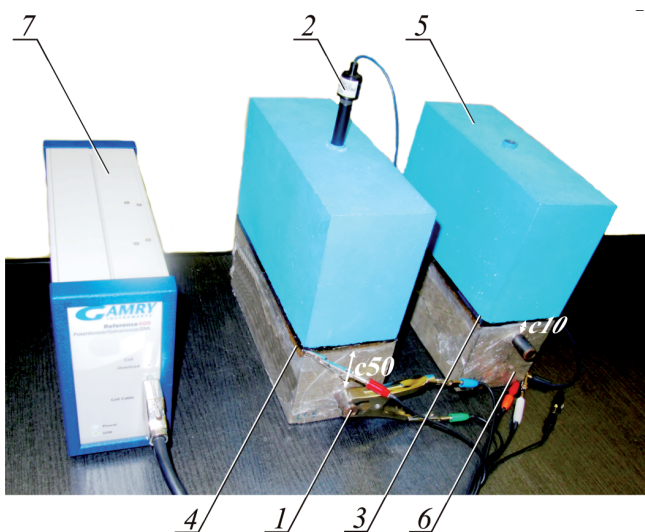
The impedance tests were conducted in the three-electrodes system, shown in Fig. 2. The working electrode 1 was the steel reinforcing rod, the reference electrode 2 was the chlorine-silver electrode  $\text{Cl}^-/\text{AgCl}$ , Ag and the counter electrode 3 was a sheet of stainless steel of 250x100x 2 mm dimensions. The counter electrode was placed on the top surface of the specimen using wet felt 3 to ensure the proper electric contact of the counter electrode and the reference electrode with concrete. The good electric contact of counter electrode with concrete through the felt was obtained using additional concrete sample 5, assuring the pressure of 3 kPa.

Directly before the impedance tests the concrete moisture was measured with dielectric hygrometer Tanel WIP-24. In order to assure of concrete constant moisture during the impedance tests the



Rys. 1. Próbkki betonowe oraz położenie pręta stalowego, zastosowane w badaniach impedancyjnych, wymiary w mm.

Fig. 1. Concrete samples and steel rebar location, used in the impedance studies, dimensions in mm.



Rys. 2. Trójelektrodowy układ pomiarowy do badań wpływu grubości otuliny zbrojenia na przebieg widm impedancyjnych (opis w tekście).

Fig. 2. Three-electrodes measurement system for studying cover thickness of reinforcing effect on the shape of impedance spectra (description in text).

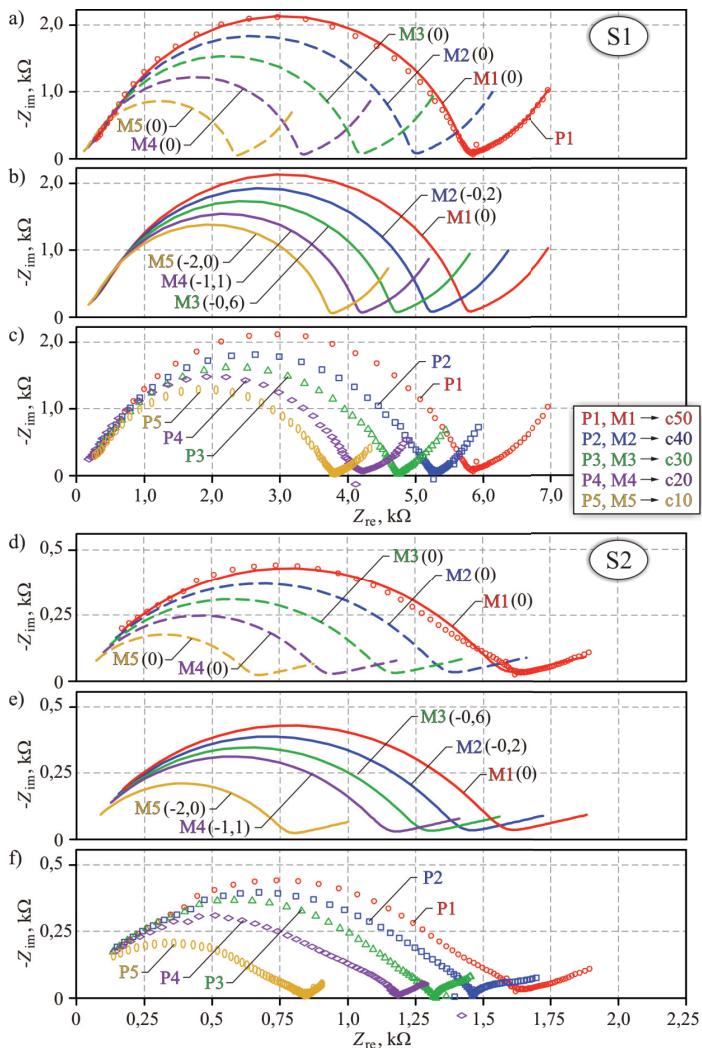
concrete samples were sealed with plastic foil 6. For impedance measurements the potentiostat 7, type Gamry Reference 600, was used. For these measurements the potentiostatic method was used with the sinusoidal disturbance signal of 10 mV amplitude, in relation to stationary potential, in the frequency range 1 MHz ÷ 10 mHz.

## 3. Discussion of obtained impedance spectra

On the diagrams of Nyquist (Figs. 3c and 3f) and Bode (Figs. 4b and 4d) the obtained impedance spectra are presented. The comparison of two spectra groups for S1 and S2 samples (Figs. 3c and 3f) shows that the impedance of the system 'steel-concrete' in the case of samples from concrete S2 is almost four times lower than for the samples S1. It is caused by the conductivity increase of concrete S2, caused by high calcium chloride addition.

It is more clearly seen on Bode diagram (Figs. 4b and 4d), on which the impedance modulus Z of steel rebar in concrete S1 samples

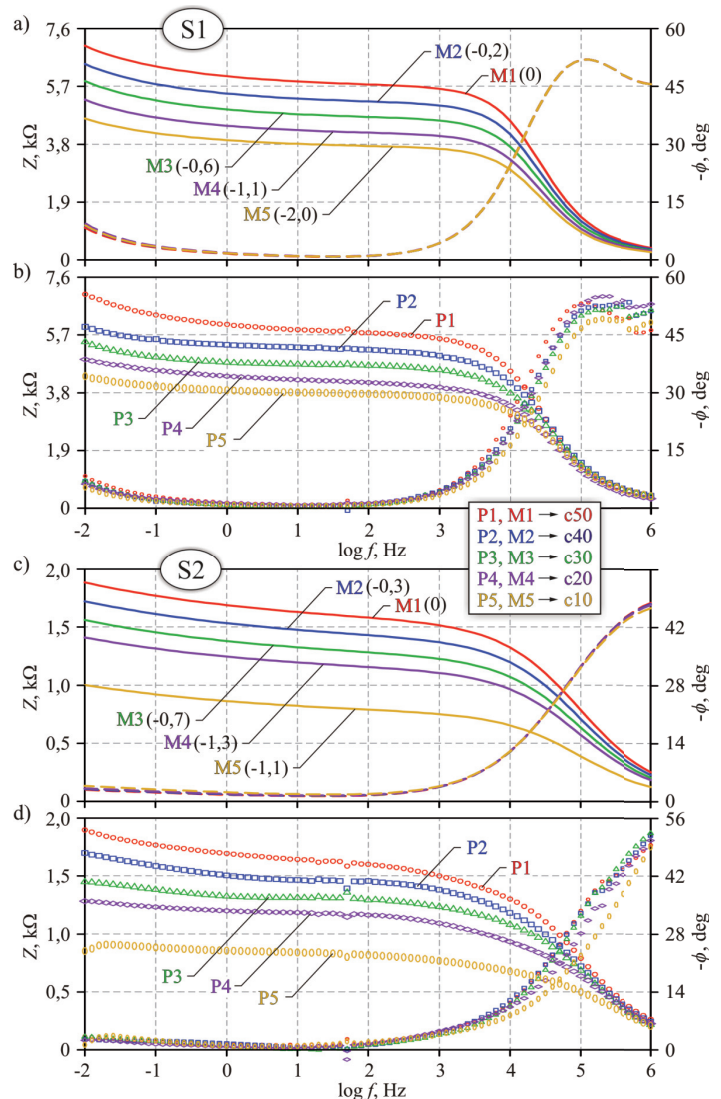
Bezpośrednio przed badaniami impedancyjnymi wykonywano pomiary wilgotności betonu za pomocą wilgotnościomierza dielektrycznego Tanel WIP-24. W celu zapewnienia stałej wilgotności betonu w trakcie badań impedancyjnych próbki betonowe zabezpieczano folią 6. Do badań impedancyjnych zastosowano potencjostat 7 typu Gamry Reference 600. Pomiary wykonywano metodą potencjostaticzną, stosując sinusoidalny sygnał zaburzający, o amplitudzie 10 mV względem potencjału stacjonarnego, w zakresie częstotliwości 1 MHz  $\pm$  10 mHz.



Rys. 3. Wykresy Nyquista widm impedancyjnych stali w próbkach betonów S1 i S2, pokazujących wpływ grubości otuliny zbrojenia i ich symulacja modelowa;  $Z_{re}$ ,  $Z_{im}$  – składowa rzeczywista i urojona impedancji; P1...P5 – wyniki badań, M1( )...M5( ) – symulacje modelowe (liczby w nawiasach oznaczają korektę wilgotności betonu w stosunku do wilgotności zmierzonej dla widma początkowego M1); c10...c50 – grubości otuliny 10...50 mm.

Fig. 3. Nyquist diagram of impedance spectra of steel in concrete S1 and S2 samples, showing cover thickness of reinforcing and their model simulation:  $Z_{re}$ ,  $Z_{im}$  - real and imaginary impedance component; P1....P5 – measurement results, M1( )....M5( ) – model simulations (numbers in parenthesis mean the concrete moisture correction in relation to the measured moisture for initial spectra M1); c10...c50 – cover thickness 10...50 mm.

in the low frequency region has the level of  $4.3 \pm 7.1$  k $\Omega$ , but in the case of concrete S2 only  $0.8 \pm 1.9$  k $\Omega$ . Also the angles of phase shift, in the range of low frequency in the concrete S2 samples, are about two times lower than in samples from concrete S1 (Figs. 4b and 4d). However, on the complex plane  $Z_{re}$ - $Z_{im}$  (Figs. 3c and 3f) for the samples of concrete S2 the impedance spectra have the flattened shape, both in high and low frequencies. In the case of



Rys. 4. Wykresy Bodego widm impedancyjnych stali w próbkach betonów S1 i S2, pokazujących wpływ grubości otuliny zbrojenia i ich symulacja modelowa;  $Z$  – moduł impedancji,  $\phi$  – kąt przesunięcia fazowego,  $f$  – częstotliwość pomiaru; P1...P5 – wyniki badań, M1( )...M5( ) – symulacje modelowe (liczby w nawiasach oznaczają korektę wilgotności betonu w stosunku do wilgotności zmierzonej dla widma początkowego M1); c10...c50 – grubości betonowej otuliny 10...50 mm.

Fig. 4. Bode diagrams of steel impedance spectra in concretes S1 and S2, showing cover thickness of reinforcing effect and their model simulation:  $Z$  impedance modulus,  $\phi$  – phase shift angle,  $f$  – frequency of measurement; P1....P5 – measurement results, M1( )....M5( ) – model simulations (numbers in parenthesis mean the concrete moisture correction in relation to the measured moisture for initial spectra M1); c10...c50 – cover thickness 10...50 mm.

### 3. Opis otrzymanych widm impedancyjnych

Na wykresach Nyquista (rysunki 3c i 3f) i Bodego (rysunki 4b i 4d) pokazano otrzymane widma impedancyjne. Porównując dwie grupy widm dla próbek S1 i S2 (rysunki 3c i 3f) można zauważyć, że impedancja układu 'stal–beton' w przypadku próbek z betonu S2 jest blisko czterokrotnie mniejsza od próbek S1. Przyczyną tego jest wzrost przewodności betonu S2 w związku z dużym dodatkiem chlorku wapnia.

Wyraźniej zaznacza się to na wykresach Bodego (rysunki 4b i 4d), na których moduł impedancji  $Z$  stali zbrojeniowej w próbkach z betonu S1 w zakresie niskiej częstotliwości osiągnął poziom  $4,3 \div 7,1 \text{ k}\Omega$ , natomiast w przypadku betonu S2 wynosi  $0,8 \div 1,9 \text{ k}\Omega$ . Również kąty przesunięcia fazowego w zakresie niskiej częstotliwości, w próbkach z betonu S2, są około dwukrotnie mniejsze niż w próbkach z betonu S1 (rysunki 4b i 4d). Natomiast na płaszczyźnie zespolonej  $Z_{re}-Z_{im}$  (rysunki 4c i 3f) w próbkach z betonu S2 krzywe impedancji mają przebieg spłaszczony i to zarówno w zakresie wysokiej jak i niskiej częstotliwości. W przypadku badań impedancyjnych stali w betonie takie widmo zazwyczaj wskazuje na rozwój procesów korozyjnych. Natomiast w przypadku próbek betonu S1 rozkłady punktów pomiarowych w zakresie wysokiej częstotliwości są w większym stopniu związane z pojemnością, a w zakresie niskiej częstotliwości punkty układają się na krzywych w kształcie łuków, co zazwyczaj wskazuje na stan pasywny stali w betonie. Ta ocena jakościowa krzywych impedancji może wstępnie potwierdzać zakładaną w badaniach depasycję stali w próbkach betonu S2, zawierającego jony chlorkowe, oraz pasywację stali w próbkach S1.

Niezależnie od opisanych charakterystyki widm, szczególnie na krzywych Nyquista (rysunki 3c i 3f) ujawnia się bardzo wyraźna tendencja do zmiany ich przebiegu, która wynika ze zróżnicowanej grubości otuliny prętów stalowych w próbkach betonu. Wraz ze spadkiem grubości otuliny zmniejsza się znacznie umowna średnica spłaszczonego półokręgu w zakresie o wysokiej częstotliwości, z równoczesnym nieznacznym skracaniem długości łuku, w zakresie o niskiej częstotliwości. Porównanie tych dwóch grup widm wykazuje największą impedancję w przypadku próbek S1, o największej grubości otuliny wynoszącej 50 mm (krzywa P1), natomiast najmniejszą impedancję ma stal w próbkach o najmniejszej grubości otuliny, równej 10 mm w próbce betonu S2 (widmo P5), co wynika z porównania krzywych na rysunkach 4b i 4d.

### 4. Założenia modelu '3D' układu 'stal–beton'

Celem opracowywanego modelu było opisanie zmian widm impedancyjnych, spowodowanych zmianami grubości otuliny stali zbrojeniowej w betonie. Natomiast założenia modelu „3D” stanowił układ do pomiaru widm impedancyjnych stali zbrojeniowej w betonie, obejmujący trzy elektrody (rysunek 5). W nawiązaniu do klasycznego układu trójelektrodowego stosowanego w elektrochemii do pomiarów polaryzacyjnych metali w elektrolitach, w modelowanym układzie ośrodkiem przewodzącym prąd w trakcie pomiaru jest

impedance tests of steel rebars in concrete those spectra show usually the development of corrosion processes. However, in the case of concrete S1 samples the distribution of measurement points in high frequency range are in higher degree linked with capacity, and in low frequency range the points are located on curves of arch shape, which usually is linked with passive state of steel in concrete. This qualitative assessment of impedance spectra, can tentatively confirm assumed in experiments steel depassivation in concrete S2 samples, containing chloride ions, and steel passivation in S1 samples.

Independently of described spectra, particularly on Nyquist diagram (Figs. 3c and 3f), the tendency to the change of their loops is evident, which is caused by the differentiated thickness of cover of steel rebars in the concrete samples. With the decrease of cover thickness the apparent diameter of flattened loop is decreasing in the range of high frequency, with the simultaneous shortened of the arc length, in the range of low frequency. The comparison of these two spectra groups is showing the highest impedance in the case of the samples S1, with the greatest thickness of cover equal 50 mm (curve P1), however, the lowest impedance has the steel in the samples with the lowest cover thickness, equal 10 mm in the sample of concrete S2 (spectrum P5, which seen of comparison of the curves on the Figs. 4b and 4d).

### 4. The assumptions of '3D' model of the 'steel – concrete system

The goal of the model elaboration was the description of the changes of impedance spectra, caused by the differentiation of cover thickness of reinforcing steel rods in concrete. The model '3D' assumptions was the system for the measurements of steel reinforcement in concrete impedance spectra, composed of three electrodes (Fig. 5). In connection to classic three electrodes system, used in electrochemistry for measurement of metals polarisation in electrolytes, in model system the medium of current conduction during the measurement is concrete in the shape of body with at least one flat surface 1. The working electrode 2 is the reinforcing rebar with the diameter  $\phi$  and length  $L$ , which the lowest distance from the flat surface of concrete, i.e. the cover thickness equals  $c$ . The metal counter electrode 3 of rectangle shape with dimensions  $L_E \times B_E$  is placed on flat surface of concrete sample, in such a manner that the margin  $L_E$  is parallel to the reinforcing rod axis. The reference electrode 4 is put against the concrete sample surface by the hole in the centre of counter electrode 3. All three electrodes are connected to the potentiostat. It is assumed that during the measurement the surface 5 of reinforcement in the shape of cylinder side surface of the height  $L_p$  and the base perimeter  $B_p$ , situated symmetrically towards the centre of counter electrode 3, is polarized.

It is assumed that the theoretical conductive pass 6 (Fig. 5b) are the elongated, curvilinear concrete elements whose top surface was on the counter electrode surface 3, and the bottom surface was on the surface of the working electrode 2. It is assumed that



współczynników geometrii pręta stalowego i belki betonowej. Lokalny współczynnik geometrii betonu  $\gamma_{i,j}^c$ , jako teoretycznego połączenia przewodzącego prąd 6, można określić na podstawie pracy (4) jako sumę ilorazów długości odcinków linii prądowej  $l_{i,j,k}$  do umownej powierzchni przepływu prądu  $S_{i,j,k}$  przez elementy bryłowe o objętości  $V_{i,j,k}$  (rysunek 5c).

$$\gamma_{i,j}^c = \frac{\rho}{\sum_{k=1}^p \frac{l_{i,j,k}}{S_{i,j,k}}}, \quad S_{i,j,k} = \varphi_{i,j,k} \frac{V_{i,j,k}}{l_{i,j,k}}, \quad i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2}, \quad j = 1, 2, \dots, \frac{m}{2} \quad [1]$$

W równaniu [1] parametr  $\Psi_{i,j,k}$  jest wilgotnością objętościową bryłowego elementu betonowego  $ijk$ , którą można obliczyć jako iloczyn wilgotności masowej  $w_{i,j,k}$  betonu w elemencie o objętości  $V_{i,j,k}$  i średniej gęstości objętościowej betonu  $\rho^c$ .

Lokalny współczynnik geometrii pręta stalowego  $\gamma_{i,j}^s$  można określić na podstawie pracy (4) jako iloczyn odwrotności elementarnej powierzchni polaryzacji pręta zbrojeniowego  $A_{i,j}^p$ , znajdującej się na końcu teoretycznego połączenia przewodzącego 6 i ilorazu długości linii prądowej  $l_{i,j}$  do średniej długości linii prądowej  $l_{mid}$ .

$$\gamma_{i,j}^s = \frac{1}{A_{i,j}^p} \cdot \frac{l_{i,j}}{l_{mid}}, \quad l_{i,j} = \sum_{k=1}^p l_{i,j,k}, \quad i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2}, \quad j = 1, 2, \dots, \frac{m}{2} \quad [2]$$

W oparciu o zależności [1] i [2] lokalnych współczynników geometrii betonu  $\gamma_{i,j}^c$  i stali  $\gamma_{i,j}^s$  określających teoretyczne połączenie przewodzące 6, można napisać wzory [3] opisujące globalne współczynniki geometrii betonu  $\gamma^c$  i stali  $\gamma^s$

$$\gamma^c = \frac{1}{\sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \sum_{j=1}^{\frac{m}{2}} \frac{4}{\gamma_{i,j}^c}}, \quad \gamma^s = \frac{1}{\sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \sum_{j=1}^{\frac{m}{2}} \frac{4}{\gamma_{i,j}^s}} \quad [3]$$

Zakłada się, że każde teoretyczne połączenie przewodzące prąd 6 opisuje impedancja  $Z_{i,j}^c$  charakteryzująca beton o współczynniku geometrii  $\gamma_{i,j}^c$ , połączona szeregowo z impedancją  $Z_{i,j}^s$  charakteryzującą stal o współczynniku geometrii  $\gamma_{i,j}^s$ . Zazwyczaj do określenia właściwości elektrochemicznych betonu i stali, w analizie widm impedancyjnych za pomocą elektrycznych schematów zastępczych, wystarcza odpowiednio dobrana kombinacja rezystorów  $R_{i,j}$  i elementów stałych, opisanych parametrami  $Y_{i,j}$  i  $\alpha_{i,j}$  (rysunek 7b). Impedancję elementu stałego określa wyrażenie:

$$Z_{i,j} = \frac{1}{Y_{i,j}(j\omega)^{\alpha_{i,j}}}, \quad [4]$$

gdzie:  $j$  jest jednostką urojoną, a  $\omega$  jest częstotliwością kątową [porównaj z pracą (5)]. W szczególnym przypadku, gdy  $\alpha_{i,j} = 1$ , parametr  $Y_{i,j}$  jest pojemnością, a element stały – kondensatorem.

Można więc ogólnie przyjąć, że impedancję zastępczą stali  $Z_{i,j}^s$  i betonu  $Z_{i,j}^c$  jako teoretycznego połączenia przewodzącego prąd 6 (rysunek 5b) opisują zależności [5] i [6].

$$Z_{i,j}^s = Z_{i,j}^s(R_{i,j}^s, Y_{i,j}^s, \alpha_{i,j}^s) \\ R_{i,j}^s = R^s \cdot \gamma_{i,j}^s, \quad Y_{i,j}^s = Y^s \cdot \frac{1}{\gamma_{i,j}^s}, \quad \alpha_{i,j}^s = \alpha^s \quad [5]$$

sation surface of steel rod  $A_{i,j}^p$ , located on the end of theoretical conductive pass 6 and the quotient of the length of current line  $l_{i,j}$  to the average length of current line  $l_{mid}$ .

$$\gamma_{i,j}^s = \frac{1}{A_{i,j}^p} \cdot \frac{l_{i,j}}{l_{mid}}, \quad l_{i,j} = \sum_{k=1}^p l_{i,j,k}, \quad i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2}, \quad j = 1, 2, \dots, \frac{m}{2} \quad [2]$$

Using the formulae [1] and [2] of the local coefficient of concrete geometry  $\gamma_{i,j}^c$  and steel  $\gamma_{i,j}^s$  defining the theoretical current conductive pass 6 we obtain the formulae [3], describing the global coefficient of concrete  $\gamma^c$  and steel  $\gamma^s$  geometry.

$$\gamma^c = \frac{1}{\sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \sum_{j=1}^{\frac{m}{2}} \frac{4}{\gamma_{i,j}^c}}, \quad \gamma^s = \frac{1}{\sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \sum_{j=1}^{\frac{m}{2}} \frac{4}{\gamma_{i,j}^s}} \quad [3]$$

It is assumed that each theoretical current conductive pass 6 is described by the impedance  $Z_{i,j}^c$ , characterising the concrete of geometry coefficient  $\gamma_{i,j}^c$ , connected in series with impedance  $Z_{i,j}^s$  characterising steel with geometry coefficient  $\gamma_{i,j}^s$ . Usually for electrochemical properties defining of steel and concrete, in the analyses of impedance spectra with the help of electrical substitute diagram the adequately chosen combination of resistors  $R_{i,j}$  and solid elements, described with the parameters  $Y_{i,j}$  and  $\alpha_{i,j}$  (Fig. 7b) is sufficient. Impedance of solid element is defined by the expression:

$$Z_{i,j} = \frac{1}{Y_{i,j}(j\omega)^{\alpha_{i,j}}}, \quad [4]$$

where:  $j$  is the imaginary unit and  $\omega$  is the angle frequency [compare with paper (5)]. In the particular case, when  $\alpha_{i,j} = 1$ , the parameter  $Y_{i,j}$  is the capacitance and solid element is the condenser.

It can be generally admitted that the substitute steel impedance  $Z_{i,j}^s$  and concrete  $Z_{i,j}^c$ , as the theoretical current conductive pass 6, (Fig. 5b) describe the relations [5] and [6].

$$Z_{i,j}^s = Z_{i,j}^s(R_{i,j}^s, Y_{i,j}^s, \alpha_{i,j}^s) \\ R_{i,j}^s = R^s \cdot \gamma_{i,j}^s, \quad Y_{i,j}^s = Y^s \cdot \frac{1}{\gamma_{i,j}^s}, \quad \alpha_{i,j}^s = \alpha^s \quad [5]$$

$$Z_{i,j}^c = Z_{i,j}^c(R_{i,j}^c, Y_{i,j}^c, \alpha_{i,j}^c) \\ R_{i,j}^c = R^c \cdot \gamma_{i,j}^c, \quad Y_{i,j}^c = Y^c \cdot \frac{1}{\gamma_{i,j}^c}, \quad \alpha_{i,j}^c = \alpha^c \quad [6]$$

In the formulae [5]  $R^s$  and  $Y^s$  are the electrochemical properties referenced to the unitary surface of reinforcing steel, however, in the formulae [6]  $R^c$  and  $Y^c$  are describing the electrochemical properties in reference to the unitary concrete volume. Parameters  $\alpha^s$  and  $\alpha^c$  are the dimensionless coefficient. It is possible to introduce, on the basis of relations [5] and [6], the notion of elementary electric substitute diagram. It is an electric diagram identical in the case of every theoretical current conductive pass, which is the adequately chosen combination of resistors  $R_{i,j}$  and solid elements, described which properties  $R_{i,j}$ ,  $Y_{i,j}$ ,  $\alpha_{i,j}$  were recalculated taking into account

$$Z_{i,j}^c = Z_{i,j}^c (R_{i,j}^c, Y_{i,j}^c, \alpha_{i,j}^c)$$

$$R_{i,j}^c = R^c \cdot \gamma_{i,j}^c, \quad Y_{i,j}^c = Y^c \cdot \frac{1}{\gamma_{i,j}^c}, \quad \alpha_{i,j}^c = \alpha^c \quad [6]$$

We wzorach [5]  $R^s$  i  $Y^s$  są właściwościami elektrochemicznymi odniesionymi do jednostkowej powierzchni stali zbrojeniowej, natomiast we wzorach [6]  $R^c$  i  $Y^c$  opisują właściwości elektrochemiczne odniesione do jednostki objętości betonu. Parametry  $\alpha^s$  i  $\alpha^c$  są bezwymiarowymi współczynnikami. Na podstawie zależności [5] i [6] można wprowadzić pojęcie elementarnego elektrycznego schematu zastępczego. Jest to schemat elektryczny jednakowy w przypadku każdego teoretycznego połączenia przewodzącego prąd, będący odpowiednio dobraną kombinacją rezystorów  $R_{i,j}$  i elementów stałych, których właściwości  $R_{i,j}$ ,  $Y_{i,j}$ ,  $\alpha_{i,j}$  przeliczono z uwzględnieniem współczynników geometrii betonu  $\gamma_{i,j}^c$  i stali  $\gamma_{i,j}^s$  (porównaj rys. 7b). Ostatecznie całkowitą zastępczą impedancję modelowanego układu 'stal-beton', ze względu na założone dwie płaszczyzny symetrii, można wyznaczyć z wzoru [7]:

$$Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \sum_{j=1}^{\frac{m}{2}} \left( \frac{4}{Z_{i,j}^c + Z_{i,j}^s} \right)} \quad [7]$$

## 5. Analiza obliczeniowa pomiarów w oparciu o model '3D'

W oparciu o podane w punkcie 4 założenia modelu '3D' na rysunku 6 przedstawiono wybrane trzy modele trójelektrodowego układu pomiarowego odwzorowujące stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 2. Głównym elementem różnicującym poszczególne modele (M1, M3 i M5) jest nie tylko różna grubość otuliny, ale również znacznie różniący się przebieg teoretycznych linii prądowych 1 pomiędzy elektrodą pomocniczą 2 i badaną 3.

Na wykresach Nyquista (rysunek 3) i Bodego (rysunek 4), obok widm uzyskanych doświadczalnie, przedstawiono wyniki symulacji modelowych wpływu grubości otuliny pręta stalowego na przebieg widm impedancyjnych stali w próbkach betonów S1 i S2. Widm doświadczalnych i modelowych nie zamieszczono na wspólnych wykresach, ponieważ każdy pomiar impedancyjny wykonywano na niezależnym elemencie próbnym. Zachowując stałą kolorystykę i symbole oznaczeń otrzymano wykresy impedancji umożliwiające ocenę zgodności dopasowania wyników doświadczalnych i widm modelowych.

Rozpoczynając analizy założono jednakowy w każdym modelu M1...M5 zasięg polaryzacji  $L_p = 246$  mm, ponieważ zgodnie z budową układów pomiarowych (rysunki 2 i 6) nie ma uzasadnienia, aby te zasięgi były zróżnicowane. W obu analizowanych układach (S1 i S2), jako widma wyjściowe do symulacji modelowych, wybrano P1 otrzymane w przypadku otuliny o największej grubości wynoszącej  $c = 50$  mm. Następnie dla obu widm, w sposób klasyczny metodą iteracyjnego dopasowania według schematu zastępczego

the geometry coefficient of concrete  $\gamma_{i,j}^c$  and steel  $\gamma_{i,j}^s$  (compare Fig. 7b). Finally the total equivalent impedance of modelled system 'steel-concrete', because of two assumed symmetry planes, can be found from the formula [7].

$$Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \sum_{j=1}^{\frac{m}{2}} \left( \frac{4}{Z_{i,j}^c + Z_{i,j}^s} \right)} \quad [7]$$

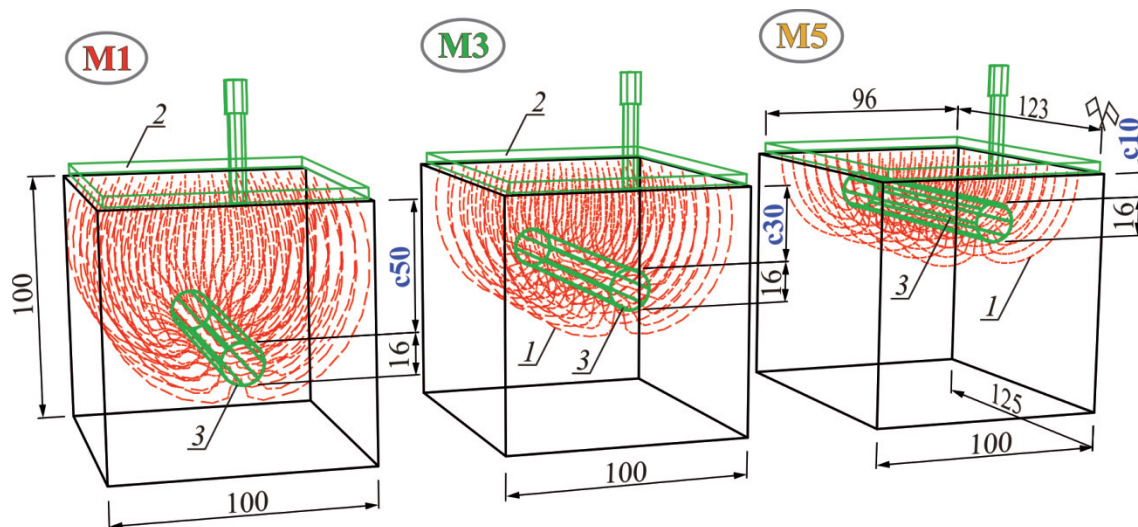
## 5. The analysis of the measurements on the basis of the '3D' model

On the basis of the '3D' model assumptions given in point 4 the chosen three models three-electrodes measuring system, mapping the measuring stand shown on Fig. 2, is presented in Fig. 6. The main element, causing that these models (M1, M3, M5) are becoming different, is not only different cover thickness, but also significantly different route of theoretical current lines 1, between auxiliary electrode 2 and working 3.

On the Nyquist (Fig. 3) and Bode (Fig. 4) diagrams, apart from the experimental spectra, the model of simulations results of the cover thickness of steel rod effect, on the shape of impedance spectra of steel in the samples of concretes S1 and S2 are presented. The experimental spectra and modelled were not plotted on the same diagrams because each impedance measurement was realised on independent concrete sample. Keeping constant the colours and symbols of designing, the impedance diagrams were obtained, permitting the compatibility of experimental and model spectra evaluation.

Beginning the analyses the same in each model M1... M5 the range of polarization  $L_p = 246$  mm was assumed, because up to the pattern of measuring system composition (Figs. 2 and 6) there is no reason for these range differentiation. In both analysed system (S1 and S2) as a initial spectra for model simulation, the P1, obtained in the case of the highest cover thickness equal 50 mm, was chosen. Then for both spectra in the classic manner, applying iterative method of matching according to the substitute scheme shown on Fig. 7a, the electrochemical properties of steel and concrete were determined, which were listed in the first column of Table 1. These values are not related to the surface or volume of the material.

The obtained electrochemical properties were recalculated to obtain the unitary parameters of the model '3D', using the relations given in Table 2 and listed in the second column of Table 1. The determined parameter  $R^1$  complies with the resistance of the pore solution in concrete, and  $R^2$ ,  $R^{2a}$  comply with the resistance of the contact double layer of solution with solids in concrete, which capacity is described by parameters  $Y^2$ ,  $\alpha^2$ ,  $Y^{2a}$ ,  $\alpha^{2a}$  of solid components. The electrochemical properties of interstitial transition zone 'steel-concrete are defined by the parameters  $Y^3$ ,  $\alpha^3$ . However, the transition double layer of the concrete pore solution with steel



Rys. 6. Modele układu trójelektrodowego do badań wpływu grubości otuliny na kształty widm impedancyjnych stali w betonie – opis w tekście.

Fig. 6. The models of three-electrodes system for measurements of cover thickness on shapes of impedance spectra of steel in concrete – description in text.

pokazanego na rysunku 7a, wyznaczono właściwości elektrochemiczne betonu i stali, które zestawiono w pierwszej kolumnie tablicy 1. Są to właściwości nie odniesione do powierzchni lub objętości materiału.

Otrzymane właściwości elektrochemiczne przeliczono na parametry jednostkowe modelu '3D', wykorzystując zależności podane w tablicy 2 i zestawione w drugiej kolumnie tablicy 1. Wyznaczony parametr  $R^1$  odpowiada rezystancji roztworu w betonie, natomiast  $R^2$ ,  $R^{2a}$  odpowiadają rezystancji kontaktowej warstwy podwójnej fazy ciekłej i stałej w betonie, której pojemność opisują parametry  $Y^2$ ,  $\alpha^2$ ,  $Y^{2a}$ ,  $\alpha^{2a}$  składników stałych. Właściwości elektrochemiczne strefy przejściowej 'stal – beton' definiują parametry  $Y^3$ ,  $\alpha^3$ . Natomiast kontaktową warstwę podwójną roztworu w porach betonu z prętem stalowym opisuje element stały o parametrach  $Y^0$ ,  $\alpha^0$  z równolegle połączonym oporem przeniesienia ładunku  $R^1$  [porównaj z pracą (19)].

Ocenę zgodności dopasowania widm modelowych do widm doświadczalnych dokonano, wzorując się na pracy (13) za pomocą współczynnika  $q$ , opisanego poniższym wzorem:

$$q = \sqrt{\frac{\chi^2}{2N - N_p}} \quad \chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{Z_{re,i}^e - Z_{e,i}^c}{\sigma_i} \right)^2 + \left( \frac{Z_{im,i}^e - Z_{m,i}^c}{\sigma_i} \right)^2 \right] \quad [8]$$

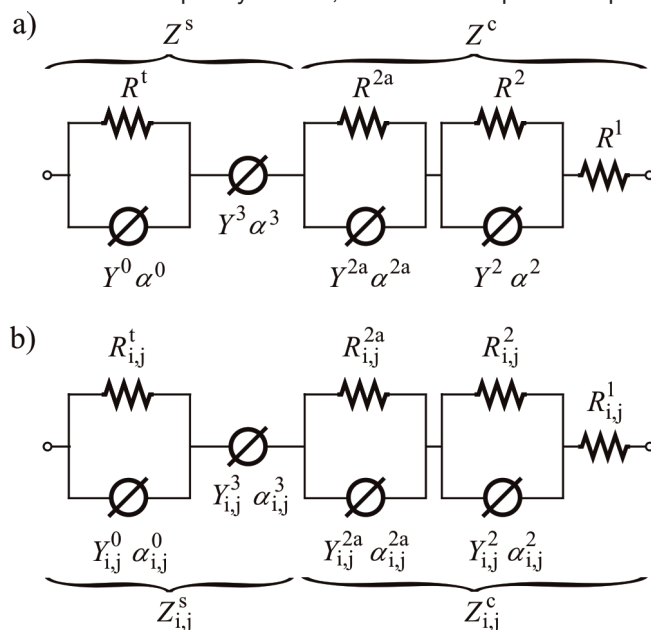
gdzie:  $N$  jest liczbą częstotliwości, dla których wyznaczano punkty widma impedancyjnego,  $N_p$  jest liczbą zmiennych w modelu, natomiast  $\chi^2$  jest funkcją celu (13). Parametry  $Z_{re,i}^e$  i  $Z_{im,i}^e$  są odpowiednio rzeczywistą i urojoną składową impedancji otrzymanej doświadczalnie, natomiast  $Z_{re,i}^c$  and  $Z_{im,i}^c$  są odpowiadającymi im składowymi impedancji, obliczonej według modelu,  $\sigma_i$  jest odchyleniem standardowym pomiaru przy  $i$ -tej częstotliwości oszacowane jako  $\sigma_i = a \cdot |Z_i^e|$ , w którym  $|Z_i^e|$  jest modulem zmierzonej impedancji przy  $i$ -tej częstotliwości, natomiast stała  $a$  jest oszacowanym błędem pomiarowym wyrażonym w procentach.

rod is described to the constant element with the parameters  $Y^0$ ,  $\alpha^0$  with parallel connected resistor of charge transport  $R^1$  [compare with the paper (19)].

The evaluation of matching of model spectra with experimental spectra was accomplish according to the paper (13), applying  $q$  coefficient, described by the formula, as follows:

$$q = \sqrt{\frac{\chi^2}{2N - N_p}} \quad \chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{Z_{re,i}^e - Z_{e,i}^c}{\sigma_i} \right)^2 + \left( \frac{Z_{im,i}^e - Z_{m,i}^c}{\sigma_i} \right)^2 \right] \quad [8]$$

where:  $N$  is the frequency number, for which the impedance spectra



Rys. 7. Przyjęty do analizy widm impedancyjnych stali zbrojeniowej w betonie: a) elektryczny schemat zastępczy, b) elementarny elektryczny schemat zastępczy.

Fig. 7. Assumed for the impedance spectra analysis of steel reinforcing in concrete: a) electrical substituting scheme, b) elemental electric substituting scheme.



Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI ELEKTROCHEMICZNE WEDŁUG MODELU '3D', PRZY ZMIENNEJ GRUBOŚCI OTULENIA I OCENA ZGODNOŚCI DOPASOWANIA Z WIDMAMI WYJŚCIOWYMI STALI W PRÓBKACH BETONU.

ELECTROCHEMICAL PROPERTIES ACCORDING TO '3D' MODEL, IN THE CASE OF DIFFERENT COVER THICKNESS AND EVALUATION OF MATCHING CONFORMITY WITH INITIAL SPECTRA OF STEEL IN CONCRETE SAMPLES.

Właściwości widm wyjściowych bez odniesienia do powierzchni lub objętości materiału Properties of initial spectra without relations to surface or volume of material			Parametry jednostkowe/Unitary parameters					
			wspólne dla 5. widm serii S1 i S2, obliczone według modelu '3D' common for 5 samples of S1 and S2, calculated using model '3D'			przeliczone wyłącznie względem powierzchni polaryzacji stali recalculated only in relation to polarised steel surface		
widmo/spectrum P1, M1 P1, M1			beton/concrete S1					
$r^1 =$	0	$\Omega$	$R^1 =$	0	$\Omega \cdot \text{cm}$	$\underline{R}^1 =$	0	$\Omega \cdot \text{cm}$
$r^2 =$	5,271	$\text{k}\Omega$	$R^2 =$	20,61	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$	$\underline{R}^2 =$	651,1	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$
$r^{2a} =$	0,419	$\text{k}\Omega$	$R^{2a} =$	1,638	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$	$\underline{R}^{2a} =$	51,73	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$
$y^2 =$	8,522	$\text{nF} \cdot \text{s}^{-1}$	$Y^2 =$	2,179	$\text{nF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}$	$\underline{Y}^2 =$	0,069	$\text{nF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}^2$
$a^2 =$	0,857		$\underline{a}^2 =$	0,857		$\underline{a}^2 =$	0,857	
$y^{2a} =$	124,7	$\text{nF} \cdot \text{s}^{-1}$	$Y^{2a} =$	31,89	$\text{nF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}$	$\underline{Y}^{2a} =$	1,009	$\text{nF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}^2$
$a^{2a} =$	0,622		$\underline{a}^{2a} =$	0,622		$\underline{a}^{2a} =$	0,622	
$y^3 =$	13880	$\text{mF} \cdot \text{s}^{-1}$	$Y^3 =$	104,7	$\text{mF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}^2$	$\underline{Y}^3 =$	112,4	$\text{mF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}^2$
$a^3 =$	0,822		$\underline{a}^3 =$	0,822		$\underline{a}^3 =$	0,822	
$y^0 =$	1388	$\text{mF} \cdot \text{s}^{-1}$	$Y^0 =$	10,47	$\text{mF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}^2$	$\underline{Y}^0 =$	11,24	$\text{mF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}^2$
$a^0 =$	0,303		$\underline{a}^0 =$	0,303		$\underline{a}^0 =$	0,303	
$r^t =$	3,220	$\text{k}\Omega$	$R^t =$	426,7	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$	$\underline{R}^t =$	397,8	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$
$a =$	1	%	$\underline{a} =$	1	%	$A^p =$	123,5	$\text{cm}^2$
$c^2 =$	137,0		$c^2 =$	137,0		$i_{kor} =$	0,13	$\text{mA} / \text{cm}^2$
$q =$	0,96		$q =$	0,96		$CR =$	0,002	$\text{mm} / \text{rok}$
widmo/spectrum P1, M1			seria/series S2					
$r^1 =$	0	$\Omega$	$R^1 =$	0	$\Omega \cdot \text{cm}$	$\underline{R}^1 =$	0	$\Omega \cdot \text{cm}$
$r^2 =$	0,796	$\text{k}\Omega$	$R^2 =$	3,689	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$	$\underline{R}^2 =$	98,32	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$
$r^{2a} =$	0,703	$\text{k}\Omega$	$R^{2a} =$	3,259	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$	$\underline{R}^{2a} =$	86,84	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$
$y^2 =$	251,2	$\text{nF} \cdot \text{s}^{-1}$	$Y^2 =$	54,19	$\text{nF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}$	$\underline{Y}^2 =$	2,034	$\text{nF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}^2$
$a^2 =$	0,655		$\underline{a}^2 =$	0,655		$\underline{a}^2 =$	0,655	
$y^{2a} =$	305,5	$\text{nF} \cdot \text{s}^{-1}$	$Y^{2a} =$	65,91	$\text{nF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}$	$\underline{Y}^{2a} =$	2,473	$\text{nF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}^2$
$a^{2a} =$	0,652		$\underline{a}^{2a} =$	0,652		$\underline{a}^{2a} =$	0,652	
$y^3 =$	5585	$\text{mF} \cdot \text{s}^{-1}$	$Y^3 =$	42,14	$\text{mF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}^2$	$\underline{Y}^3 =$	45,21	$\text{mF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}^2$
$a^3 =$	0,155		$\underline{a}^3 =$	0,155		$\underline{a}^3 =$	0,155	
$y^0 =$	11650	$\text{mF} \cdot \text{s}^{-1}$	$Y^0 =$	87,91	$\text{mF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}^2$	$\underline{Y}^0 =$	94,31	$\text{mF} \cdot \text{s}^{-1} / \text{cm}^2$
$a^0 =$	0,161		$\underline{a}^0 =$	0,161		$\underline{a}^0 =$	0,161	
$r^t =$	0,883	$\text{k}\Omega$	$R^t =$	117,0	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$	$\underline{R}^t =$	109,1	$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$
$a =$	1	%	$\underline{a} =$	1	%	$A^p =$	123,5	$\text{cm}^2$
$c^2 =$	175,0		$c^2 =$	173,6		$i_{kor} =$	0,48	$\text{mA} / \text{cm}^2$
$q =$	1,08		$q =$	1,08		$CR =$	0,006	$\text{mm} / \text{rok}$

Można zauważyć, że zgodność dopasowania modelu klasycznego w formie pojedynczego elektrycznego schematu zastępczego (rysunek 7a) i znacznie bardziej złożonego modelu '3D' (rysunek 5) jest identyczna. Współczynnik  $q$  w przypadku próbek betonu S1 wynosił 0,96, natomiast w próbkach betonu S2 – 1,08 (tablica 1). Oznacza to, że przejście z modelu klasycznego do modelu '3D' nie pogarsza jakości dopasowania widm. W trzeciej kolumnie tablicy 1 zestawiono „typowe” parametry jednostkowe, przeliczone na

points were determined,  $N_p$  is the model variables number,  $\chi^2$  is objective function (13). Parameters  $Z_{re,i}^e$  and  $Z_{im,i}^e$  are the real and imaginary experimental impedance component, and  $Z_{re,i}^c$  and  $Z_{im,i}^c$  are corresponding to them impedance components, calculated according to the model,  $\sigma_i$  is the standard deviation of the measurements, for  $i$ -letter frequency estimated as  $\sigma_i = a \cdot |Z_i^e|$ , in which  $|Z_i^e|$  is a modulus measured impedance for  $i$ -letter frequency, and constant  $a$  is a estimated measurement error, in percent.

podstawie zależności podanych w tabelicy 2, wyłącznie w stosunku do powierzchni polaryzacji stali. Na podstawie wartości oporu przeniesienia ładunku  $R_t$  (trzecia kolumna tabelicy 2) obliczono gęstość prądu korozyjnego, która w przypadku betonu S1 wyniosła  $i_{kor} = 0,13 \mu A/cm^2$ , a dla betonu S2 –  $i_{kor} = 0,48 \mu A/cm^2$ . Zgodnie z kryteriami podanymi w pracy (2), stal zbrojeniowa w betonie S1 znajdowała się w stanie mogącym wskazywać na pasywację, natomiast w betonie S2 w stanie wskazującym na korozję. Było to w pełni zgodne z założeniami doświadczalnymi.

Kontynuując analizę na podstawie wyznaczonych jednostkowych parametrów obu widm początkowych M1 (kolumna 2 w tabelicy 1) wyprowadzono, w oparciu o autorską aplikację, przewidywane rozkłady widm modelowych, opisujących coraz mniejsze grubości otuliny. Na rysunkach 3a i 3d liniami przerywanymi pokazano przebiegi modelowych widm prętów stalowych w przypadku malejących grubości otuliny od 40 mm, poprzez 30 i 20 mm, aż do 10 mm, w próbkach obu betonów S1 i S2. Wszystkie widma modelowe pokazane na rysunku 3a otrzymano przy średniej wilgotności próbek betonu  $w_{mid} = 5,3\%$ , natomiast widma przedstawione na rysunku 3d przy wilgotności  $w_{mid} = 6,4\%$ , w obu przypadkach z otuliną wynoszącą 50 mm. Obie podane wilgotności w omawianej analizie traktowane są jako wilgotności odniesienia i dlatego przy oznaczeniach widm modelowych uzyskanych przy tych wilgotnościach na rysunkach 3 i 4 podano w nawiasie liczbę zero – M1(0).

Tabela 2 / Table 2

ZALEŻNOŚCI MIĘDZY PARAMETRAMI ELEKTROCHEMICZNYMI, UWZGLĘDNIANYMI W ANALIZIE WIDM IMPEDANCYJNYCH STALI W BETONIE WEDŁUG MODELU '3D'

THE DEPENDENCES BETWEEN ELECTROCHEMICAL PARAMETERS, CONSIDERED IN THE ANALYSIS OF IMPEDANCE OF STEEL IN CONCRETE ACCORDING TO '3D' MODEL

	Parametry bez odniesienia do powierzchni lub objętości materiału Parameters of initial spectra without relations to surface or volume of material	Parametry jednostkowe/Unitary parameters	
		obliczone według modelu '3D' calculated according to '3D' model	przeliczone w stosunku do powierzchni polaryzacji stali recalculated only in relation to polarised steel surface
stal/steel	$r^t$	$R^t = \frac{r^t}{\gamma^s}$	$\underline{R}^t = R^t \gamma^s A^p = r^t A^p$
	$\Omega$	$\Omega \cdot cm^2$	$\Omega \cdot cm^2$
	$y^0$	$Y^0 = y^0 \gamma^s$	$\underline{Y}^0 = \frac{Y^0}{\gamma^s A^p} = \frac{y^0}{A^p}$
	$F \cdot s^{\alpha-1}$	$F \cdot s^{\alpha-1}/cm^2$	$F \cdot s^{\alpha-1}/cm^2$
	y <sup>3</sup> przeliczane analogicznie jak y <sup>0</sup> , natomiast $\alpha^0$ i $\alpha^3$ bez przeliczania y <sup>3</sup> recalculated analogously as y <sup>0</sup> , but $\alpha^0$ and $\alpha^3$ without recalculation		
beton/concrete	$r^2$	$R^2 = \frac{r^2}{\gamma^c}$	$\underline{R}^2 = R^2 \gamma^c A^p = r^2 A^p$
	$\Omega$	$\Omega \cdot cm$	$\Omega \cdot cm^2$
	r <sup>1</sup> przeliczane analogicznie jak r <sup>2</sup> r <sup>1</sup> recalculated analogously as r <sup>2</sup>		
	$y^2$	$Y^2 = y^2 \gamma^c$	$\underline{Y}^2 = \frac{Y^2}{\gamma^c A^p} = \frac{y^2}{A^p}$
	$F \cdot s^{\alpha-1}$	$F \cdot s^{\alpha-1}/cm$	$F \cdot s^{\alpha-1}/cm^2$
	y <sup>2a</sup> przeliczane analogicznie jak y <sup>2</sup> , natomiast $\alpha^2$ i $\alpha^{2a}$ bez przeliczania y <sup>2a</sup> recalculated analogously as y <sup>2</sup> , but $\alpha^2$ and $\alpha^{2a}$ without recalculation		

It can be notice that the accuracy of matching for classical model, in the form of single electric diagram (Fig. 7a), and much more complicated '3D' model (Fig. 5) is the same. The  $q$  coefficient in the case of concrete S1 samples was 0.96, and for concrete S2 samples – 1.08 (Table 1). It means, that the adoption from classical model to '3D' model does not worsen the matching quality of the spectra. In the third column of Table 1 the "typical" unit parameters, recalculated on the basis of the relations, given in Table 2, only in relation to the surface of steel polarisation. On the basis of the value of the charge transport resistance  $R_t$  (the third column of Table 1) the density of corrosion current was calculated, which in the case of S1 concrete sample was  $i_{cor} = 0.13 \mu A/cm^2$ , and for concrete S2 –  $i_{cor} = 0.48 \mu A/cm^2$ . According to the criterions given in the paper (2), the state of reinforcing steel in concrete S1 sample could show the passivation, however, in the sample of concrete S2 in the state indicating the corrosion. It was totally compatible with experimental assumptions.

The continuation of analysis, using the elementary parameters of both initial spectra M1 (column 2 in Table 1) and on the basis of author's application, the forecasted model spectra distribution, describing the lower and lower cover thickness, were derived. On the Figs. 3a and 3d broken lines are showing the model spectra pattern of steel rebars, in the case of decreasing cover thickness from 40 mm, through 30 and 20, till 10 mm, and for both concrete

Na rysunkach 3b i 3e linią ciągłą pokazano przebiegi widm modelowych M2, M3, M4 i M5 skorygowanych w stosunku do widm oznaczonych linią przerywaną na rysunkach 3a i 3d. Ponadto skorygowane widma modelowe przedstawiono na wykresach Bodego (rysunki 4a i 4c). Należy wyjaśnić, że linia przerywana na rysunkach 4a i 4c odnosi się również do skorygowanych widm modelowych, ale w funkcji logarytmu częstotliwości  $f$  i kąta przesunięcia fazowego  $\phi$ .

Występujące w nawiasach przy symbolach tych widm liczby, na przykład M3(-0,6), oznaczają korektę wilgotności betonu w stosunku do wilgotności odniesienia ( $w_{mid} = 5,3\%$  lub  $6,4\%$ ), przy których otrzymano widma wyjściowe M1. Na przykład, zapis M3(-0,6) oznacza, że widmo modelowe M3 wygenerowano przyjmując skorygowaną o -0,6% wilgotność odpowiadającą widmu wyjściowemu M1, czyli dla  $w = 5,3\% + (-0,6\%) = 4,7\%$ . Korekta wilgotności próbek betonu S1 mieściła się w szerokim przedziale od -0,2 do 2,0%, natomiast w przypadku próbek betonu S2 była w węższym przedziale od -0,3 do 1,3%. Wyznaczone iteracyjnie wilgotności teoretyczne (czyli skorygowane), przy których zgodność dopasowania widm jest najlepsza, w przybliżeniu odzwierciedlają średnią zmierzoną wilgotność masową próbek betonu, przeliczoną według ustalonych zależności empirycznych z pomiarów wilgotności metodą dielektryczną.

## 6. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań impedancyjnych stalowych prętów, osłoniętych otuliną o różnej grubości, pokazują wyraźną zależność od zróżnicowanej geometrii układu 'stal-beton'. Można stwierdzić, że zaproponowany model '3D' poprawnie odwzorowuje obserwowane w doświadczeniach tendencje zmian widm impedancyjnych, co uwidacznia się szczególnie przy porównaniu widm modelowych z doświadczalnymi na wykresach Nyquista (rysunek 3) i Bodego (rysunek 4). Pewne rozbieżności między widmami występują głównie na płaszczyźnie zespolonej (rysunek 3), w zakresie niskiej częstotliwości oraz w zakresie wysokiej częstotliwości na wykresach Bodego, w odniesieniu do kąta przesunięcia fazowego (rysunek 4). Stwierdzone niewielkie niezgodności wyników badań z symulacjami modelowymi wynikają głównie ze zróżnicowanej i nierównomiernej wilgotności betonu, w przypadku wszystkich porównywanych próbek.

Przedstawione doświadczenia wpływu grubości otuliny na przebieg widm impedancyjnych stali w betonie są drugą częścią wieloetapowej weryfikacji modelu '3D', opracowanego przez autora. Pierwsza pozytywnie zakończona weryfikacja modelu, przedstawiona w pracy (10), dotyczyła wpływu średnicy stalowych prętów zbrojeniowych na przebieg widm impedancyjnych.

Opracowany model '3D', po rozszerzeniu o układy wieloprętowe, może być w dalszej perspektywie narzędziem wspomagającym analizę badań impedancyjnych zbrojenia w konstrukcjach żelbetonowych. Pozwoli to, w oparciu o znajomość czynników determinujących przebieg korozji stali w betonie (12), na zastosowanie,

samples S1 and S2. All model spectra presented on Fig. 3a were obtained by average moisture of concrete samples  $w_{mid} = 5.3\%$ , however, the spectra shown on Fig. 3d at the moisture  $w_{mid} = 6.4\%$ , in both cases with cover thickness equal 50 mm. Both moisture given in the discussed analysis are regarded as reference moisture and due to this in model spectra obtained at these moistures on Figs. 3 and 4 in parenthesis zero is written – M1(0).

On the Figs. 3b and 3e with full line the distribution of model spectra M2, M3, M4 and M5, corrected in relation to the spectra shown with broken line on Figs. 3a and 3d are shown. Additionally the corrected model spectra on Bode diagrams (Figs. 4a and 4c) were shown. It should be explained that the broken line on Figs. 4a and 4c is related also to the corrected model spectra, but in function of frequency logarithm  $f$  and phase shift angle  $\phi$ .

Introduced in parenthesis in the symbols of these spectra numbers, for example M3 (-0.6), mean the concrete moisture correction in relation to the reference moisture ( $w_{mid} = 5.3$  or  $6.4$ ), at which the initial spectra M1 were obtained. For example, the notation M3 (-0.6) means that the model spectrum M3 was generated adopting the corrected by -0.6% moisture, related to initial spectrum M1, thus for  $w = 5.3\% + (-0.6) = 4.7\%$ . The moisture correction of the concrete S1 samples was in the wide range from -0.2 to 2.0%, but in the case of concrete S2 samples was in the narrower range from -0.3 to 1.3%. Determined by iteration theoretical moisture (i.e. corrected), with which the matching spectra conformity was the best, in approximation shows the medium measured mass moisture of concrete samples, recalculated according to the established empirical relations from the moisture measurements with dielectric method.

## 6. Summary

The presented impedance studies of steel rods with different thickness covers, show the distinct dependence with different geometry of the system 'steel – concrete'. It can be stated that proposed '3D' model correctly map the observed in experiments tendencies of impedance spectra change, which is evident in comparison of model with experimental spectra on the Nyquist diagrams (Fig. 3) and Bode (Fig. 4). Some discrepancies between the spectra, principally on complex plane (Fig. 3), in the low frequency range and in the high frequency range on the Bode diagrams, in relation to the phase shift (Fig. 4), are occurring. Found low incompatibility of experimental results with model simulation are caused principally from the differentiated and non-uniform concrete moisture, in all compared samples.

The presented experiments of cover thickness effect on the impedance spectra shapes of steel in concrete are the second part of proposed by the author '3D' model verification. First, favourably finished verification, embraced the influence of steel rebars length in concrete on impedance spectra (10).

The elaborated '3D' model, after widen on multi rods system, may in farther perspective be the tool assisting in the analyses of rein-

odpowiednich do zdiagnozowanego stanu konstrukcji, metod naprawczych.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego POIG.01.01.02-10-106/09-03 „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”.

## Literatura / References

1. A. Ali, A. Zybura, Application of termomechanics equations in describing chloride ex-traction from concrete, *Transport in Porous Media*, **72**, 139-156, 2008.
2. C. Andrade, M. C. Alonso, A. Gonzalez, An Initial Effort to Use the Corrosion Rate Measurements for Estimating Rebar Durability, in: N. S. Berke, et al (eds.): *Corrosion Rates of Steel in Concrete*, ASTM STP 1065, ASTM, 29-37, 1990.
3. W. Chen, R. G. Du, C. Q. Ye, Y. F. Zhu, C. J. Lin, Study on the corrosion behaviour of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions using in situ Raman spectroscopy assisted by electrochemical techniques, *Electrochimica Acta*, **55**, 5677-5682 (2010).
4. S. J. Ford, J. D. Shane, T. O. Manson, Assignment of features in Impedance Spectra of the Cement-Paste/Steel System, *Cem. Concr. Res.*, **28**, 1737-1751 (1998).
5. C. H. Hsu, F. Mansfeld, Concerning the Conversion of the Constant Phase Element Parameter  $Y_0$  into a Capacitance, *Corrosion*, **57**, 747-748 (2001).
6. M. Jaśniok, A. Zybura, Modelling the Carbonated Concrete Realkalisation, *J. Civil Eng. Manag.*, **15**, 2, 159-168 (2009).
7. M. Jaśniok, T. Jaśniok, A. Zybura, Badania korozyjnego zagrożenia zbrojenia kielichowej konstrukcji budynku dworca kolejowego w Katowicach, *Inżynieria i Budownictwo*, **5-6**, 249-253 (2010) (in Polish).
8. M. Jaśniok, A. Śliwka, A. Zybura, Zastosowanie pomiarów polaryzacyjnych do oceny stanu zbrojenia żelbetowej podpory wiaduktu, *Ochrona przed Korozją*, **53**, 220-224 (2010) (in Polish).
9. M. Jaśniok, Examining and Modelling the Influence of Lengths of Rebars in Concrete to Shapes of Impedance Spectra, *Cement Wapno Beton – Special Issue*, **79**, 30-34 (2012).
10. M. Jaśniok, Investigation and Modelling of the Impact of Reinforcement Diameter in Concrete on Shapes of Impedance Spectra, *Procedia Engineering*, **57**, 456-465 (2013).
11. T. Jaśniok, M. Jaśniok, A. Zybura, Badania szybkości korozji zbrojenia żelbetowych zbiorników na wodę (Studies on corrosion rate of reinforcement in reinforced concrete water tanks), *Ochrona przed Korozją*, **56**, 227-234 (2013).
12. T. Jaśniok, M. Jaśniok, Zmienność szybkości korozji zbrojenia w betonie przy stałych warunkach termiczno-wilgotnościowych, *Ochrona przed Korozją*, **55**, 282-285 (2012) (in Polish).
13. M. Keddani, H. Takenouti, X. R. Novoa, C. Andrade, C. Alonso, Impedance Measurements on Cement Paste, *Cem. Concr. Res.*, **27**, 1191-1201 (1997).
14. S. C. Kranc, A. A. Sagues, Calculation of Extended Counter Electrode Polarization Effects on the Electrochemical Impedance Response of Steel in Concrete, in: J. R. Scully et al (eds.): *Electrochemical Impedance: Analysis and Interpretation*, ASTM STP 1188, Philadelphia ASTM, 365-383, 1993.
15. L. Lemoine, F. Wenger, J. Galland, Study of the Corrosion of Concrete Reinforcement by Electrochemical Impedance Measurement, in: N. S. Berke et al (eds.): *Corrosion Rates of Steel in Concrete*, ASTM STP 1065, ASTM, 118-133, 1990.
16. K. Matsuoka, H. Kihira, S. Ito, T. Murata, Corrosion Monitoring for Re-

forcement impedance studies in reinforced concrete construction. It will give the possibility, on the basis of the factors governing the steel corrosion in concrete (12), for applying the suitable damage repair method.

The studies were realised in the frame of the Project POIG.01.01.02-10-106/09-03 “Innovative measures and effective methods of security improvement and durability of building constructions as well as transport infrastructure in the strategy of sustainable development”.

- inforcing Bars in Concrete, in: Berke N.S. et al (eds.): Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065, ASTM, Philadelphia, 103-117, 1990.
17. M. F. Montemor, A. M. Simoes, M. G. S. Ferreira, Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques, *Cem. Concr. Comp.* **25**, 491-502 (2003).
18. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków, (in Polish).
19. C. A. Scuderi, T. O. Mason, H. M. Jennings, Impedance Spectra of Hydrating Cement Pastes, *J. Mat. Science* **26**, 349-353 (1991).
20. J. K. Singh, D. D. N. Singh, The nature of rusts and corrosion characteristics of low alloy and plain carbon steels in three kinds of concrete pore solution with salinity and different pH, *Corrosion Science*, **56**, 129-142 (2012).