

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**NUMERYCZNA ANALIZA ROZKŁADU NAPIĘCIA ORAZ GĘSTOŚCI  
PRĄDU W ZAGADNIENIACH ZWIĄZANYCH Z OCHRONĄ KATODOWĄ  
PODZIEMNYCH OBIEKTÓW METALOWYCH**

**mgr inż. Agnieszka Wantuch**

**Promotor:** prof. dr hab. inż. Eugeniusz Kurgan (AGH)

**dyscyplina:** elektrotechnika

Kraków 2011

## **1. Wprowadzenie**

Stal jest jednym z najczęściej wykorzystywanych materiałów w technice dzięki stosunkowo niskiej cenie oraz swoim właściwościom, takim jak: twardość, sprężystość, plastyczność, wytrzymałość na rozciąganie, ciągliwość, spawalność itp., które utrzymywane są w szerokim zakresie temperatur. Jednak poza wieloma zaletami, posiada także dwie zasadnicze wady – brak odporności na korozję oraz utrata większości swoich cech mechanicznych w wyższych temperaturach.

Pomimo tego, że procesy korozyjne niszczą materiały takie jak metal, beton, drewno, to jednak powszechnie kojarzą się ze stalą. Termin korozja jest używany do opisu reakcji metalu z otoczeniem, która powoduje mierzalne zmiany i może prowadzić do jego uszkodzenia. Reakcje materiałów metalowych i roztworów wodnych są zwykle natury elektrochemicznej. Ochrona przed korozją ma na celu uniknięcie jej szkodliwego działania i ma przede wszystkim zapewnić bezpieczne warunki eksploatacji i niezawodności struktur metalowych. Zapobiega uszkodzeniom, które mogą zagrażać ludziom i środowisku.

## **2. Cel i zakres pracy**

Rozprawa dotyczy istotnego problemu jakim jest ochrona przed korozją obiektów metalowych. Podjęty temat jest o istotnym znaczeniu teoretycznym i praktycznym, zawierający trudne matematycznie i eksperymentalnie zadanie badawcze.

Istnieje wiele podziemnych obiektów metalowych, jak np. zbiorniki, rurociągi, kable energetyczne, narażonych na działanie czynników korozyjnych. W środowisku atmosferycznym dominuje korozja ogólna, która przebiega stosunkowo wolno i równomiernie w cienkiej warstwie wilgoci znajdującej się na powierzchni metalu. Natomiast zarówno pod ziemią jak i w wodzie znaczną rolę odgrywa korozja lokalna, która powoduje większość uszkodzeń. Zagrożenie korozją elektrochemiczną podziemnych konstrukcji metalowych wynikać może, między innymi, z oddziaływania prądów błądzących pochodzących od trakcji elektrycznej prądu stałego.

Problem ochrony przed korozją, poruszany w niniejszej rozprawie, jest nadal aktualny i bardzo istotny. Omówiono tu metodę katodowej ochrony infrastruktury podziemnej. W obliczeniach uwzględniono reakcje elektrochemiczne na granicy faz anoda-elektrolit oraz elektrolit-katoda, które zostały opisane za pomocą równania Butlera-Volmera. W obrębie elektrolitu rozwiązywano równanie Laplace'a, a równanie Butlera-Volmera wykorzystywano do wyprowadzenia warunków brzegowych. Ponieważ w obrębie chronionych obiektów mogą znajdować się również inne przedmioty metalowe, dlatego zbadano także ich wpływ na jakość ochrony katodowej.

W związku z powyższym autorka sformułowała tezy:

- Numeryczne obliczenia rozkładu potencjału i pola gęstości prądu w elektrolicie i na powierzchni elektrod oraz nadpotencjału na granicy faz można wykorzystać do modelowania efektywnych systemów ochrony katodowej.
- Istnieje skuteczna numeryczna metoda obliczania rozkładu potencjału, nadpotencjału i pola gęstości prądu, oraz rozptyłu produktów i reagentów reakcji elektrochemicznych zachodzących na granicy faz oraz w elektrolicie w symulacji korozji wżerowej.

Budowa modelu wymagała następujących uproszczeń:

- powierzchnia gruntu jest płaszczyzną,
- przewodność gruntu jest wielkością stałą,
- modele są izotermiczne i w warunkach stałego ciśnienia,
- do opisu kinetyki procesu elektrodowego wykorzystano równanie Butlera-Volmera.

Niniejsza rozprawa wnosi, wg autorki, następujące elementy nowości w rozpatrywanym zagadnieniu:

- modelowanie oraz analizę numeryczną rozkładu gęstości prądu i napięcia wokół podziemnych obiektów metalowych przy zastosowaniu katodowej ochrony przed korozją,
- uwzględnienie w obliczeniach reakcji elektrochemicznych zachodzących na elektrodach, które w ogniwie korozyjnym stanowią: podziemna konstrukcja metalowa i anody ochronne,
- przedstawienie wpływu wybranych parametrów elektrycznych na skuteczność ochrony katodowej,
- uwzględnienie parametrów elektrycznych elektrod przy analizie ochrony struktur podziemnych.

W dysertacji do obliczeń zastosowano Metodę Elementów Skończonych.

### 3. Ochrona przed korozją

Podczas gdy modelowanie numeryczne systemów ochrony przed korozją jest stosunkowo nowym działaniem, wykorzystanie samych systemów ochrony rurociągów zakopanych w ziemi jest dobrze znane. Ochrona elektrochemiczna jest jedną z najbardziej skutecznych metod ochrony przeciwkorozyjnej stali w środowiskach naturalnych. Wykorzystuje do tego celu sposoby galwaniczne i elektrolityczne.

Ochrona katodowa jest jedną z najszerzej stosowanych metod przeciwdziałaniu korozji. Zasadniczo może być stosowana do ochrony przed korozją wszelkich metali lub stopów będących w wodnym elektrolicie. Korozja może być zredukowana niemal do zera, a prawidłowo zaprojektowane systemy mogą zapewnić bezawaryjną pracę na wiele lat.

#### Ochrona katodowa

Tendencja metalu do uwalniania elektronów i przenikania jonów do elektrolitu powodując korozję, jest związana z potencjałem metalu mierzonym w odniesieniu do innego elementu konstrukcji. Potencjał równowagowy materiałów tworzących elektrody można odnaleźć w odpowiednich tabelach. Różnica potencjału elektrochemicznego pomiędzy anodą i katodą powoduje powstanie sterowanego źródła napięcia wymuszającego reakcję chemiczną i jest także podstawą dla ochrony katodowej.

Zjawisko przeniesienia ładunku na granicy metal dielektryk opisane jest za pomocą równania Butlera-Volmera:

$$j(\eta) = j_a + j_k = j_0 \left[ \exp\left(\frac{\eta}{\beta_a}\right) - \exp\left(\frac{-\eta}{\beta_k}\right) \right] \quad (3.1)$$

gdzie

$$\beta_a = \frac{RT}{\alpha nF} \quad \beta_k = \frac{RT}{(1-\alpha)nF} \quad (3.2)$$

Tu  $j_0$  oznacza gęstość prądu wymiany w  $A/m^2$ ,  $j$  gęstość prądu na powierzchni metal-elektrolit, a  $\eta$  nadpotencjał na danej elektrodzie w V. Nadpotencjał  $\eta$  jest definiowany równaniem:

$$\eta = \varphi - E_0 \quad (3.3)$$

gdzie  $\varphi$  jest rozkładem potencjału na korodującej elektrodzie,  $E_0$  jest potencjałem elektrody w stanie równowagi oraz

$$E_0 = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_R}{a_O} \quad (3.4)$$

gdzie  $E^\circ$  jest standardową siłą elektromotoryczną ogniwa,  $a_R$  katodowa aktywność substratów,  $a_O$  anodowa aktywność produktów.

W elektrolicie gęstość prądu pozostaje w relacji z natężeniem pola elektrycznego wg wzoru:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.5)$$

gdzie  $\sigma$  jest przewodnością elektrolitu. Wektor natężenia pola związany jest z potencjałem  $\varphi$  w elektrolicie zależnością:

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi \quad (3.6)$$

Gęstość prądu jest dywergencją wektora swobodnego:

$$\text{div } \mathbf{J} = 0 \quad (3.7)$$

Z powyższych relacji otrzymujemy dobrze znane równanie różniczkowe cząstkowe dla potencjału w elektrolicie:

$$\text{div}(-\sigma \text{grad } \varphi) = 0 \quad (3.8)$$

Równanie powyższe musi być spełnione razem z warunkami brzegowymi Neumanna i Dirichleta.

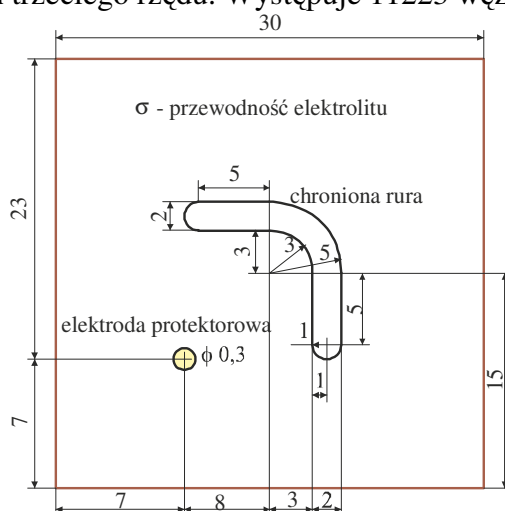
$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = -\frac{1}{\sigma} i_n \quad (3.9)$$

$$\varphi|_{r \in \Gamma} = \varphi_{\text{dane}} \quad (3.10)$$

Wyniki numeryczne porównano z obliczeniami analitycznymi. Aproxymowany błąd dla warunków brzegowych (dla żelaza) jest mniejszy niż 0,015%, zatem można wnioskować, że proponowana metoda rozwiązania jest odpowiednia.

#### 4. Wybrane przykłady obliczeniowe

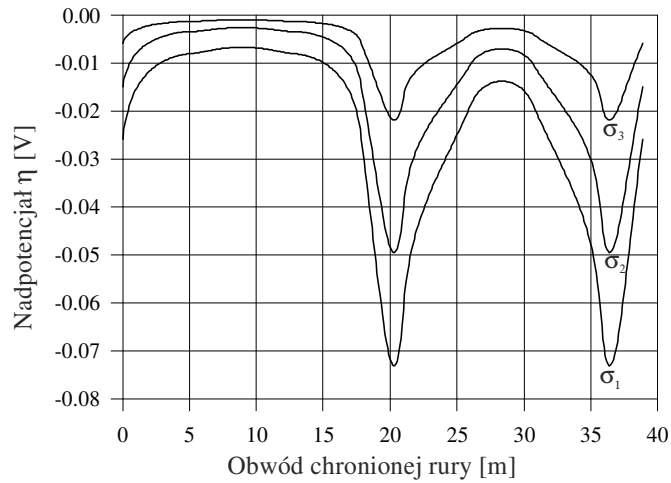
Jako pierwszy przykład obliczeniowy rozważono rurę zakopaną w ziemi, która jest chroniona przeciw korozji magnezową elektrodą protektorową. Geometryczne wymiary razem z ich wzajemną orientacją pokazano na rysunku 3.1. Stałe fizyczne są takie same jak w przykładzie w sekcji II i zostaną tu powtórzone. Obszar obliczeniowy został podzielony na 3077 elementów trójkątnych trzeciego rzędu. Występuje 11223 węzłów (stopni swobody).



Rys. 3.1. Geometryczne wymiary przykładowego problemu.

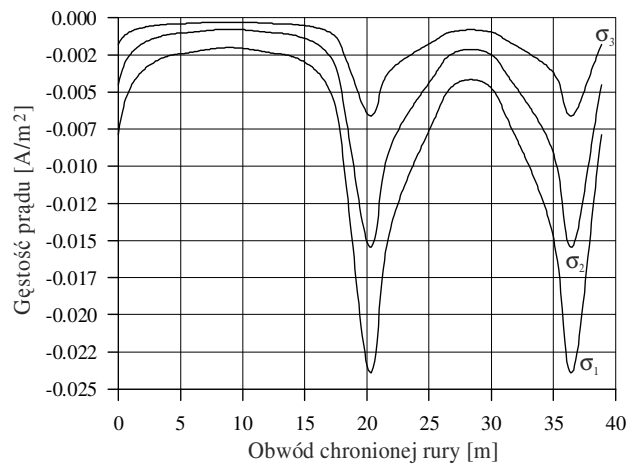
Wszystkie numeryczne symulacje przeprowadzono dla trzech różnych przewodności gleby:  $\sigma_1 = 0,09$  S/m,  $\sigma_2 = 0,05$  S/m i  $\sigma_3 = 0,02$  S/m. Rezultat obliczeń pokazano na

kolejnych rysunkach 3.2 – 3.4 Możemy na nich zaobserwować, że przewodność elektrolitu ma duży wpływ na rozkład nadpotencjału. Rysunek 3.2 przedstawia wykres nadpotencjału na chronionej rurze.

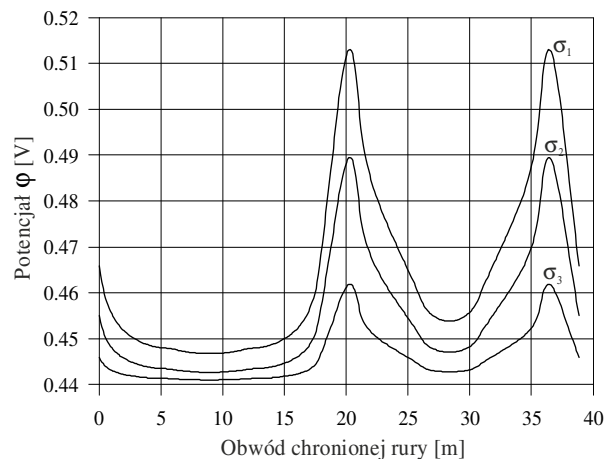


Rys. 3.2. Wykres nadpotencjału  $\eta$  wzdłuż chronionej rury.

W każdym punkcie wartość nadpotencjału jest ujemna, co oznacza, że prąd ochrony wpływa do chronionej konstrukcji. Gwarantuje to, iż korozja na chronionej konstrukcji nie będzie występowała, co potwierdza rozkład gęstości prądu na rysunku 3.3. Na rysunku 3.4 przedstawiono rozkład potencjału wokół obwodu chronionej rury.

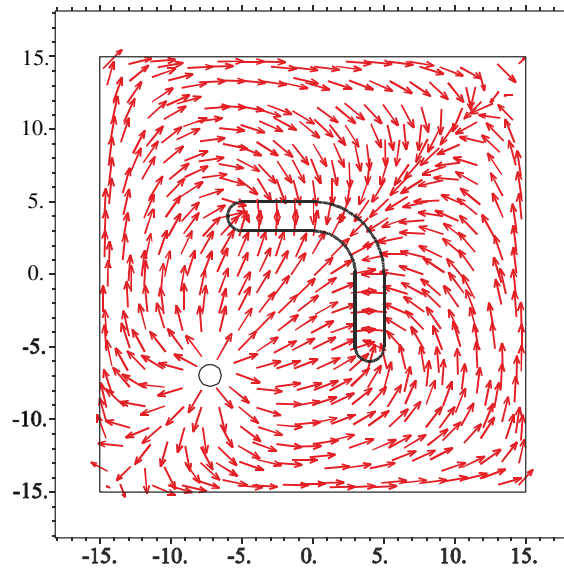


Rys. 3.3. Rozkład gęstości prądu na chronionej rurze.



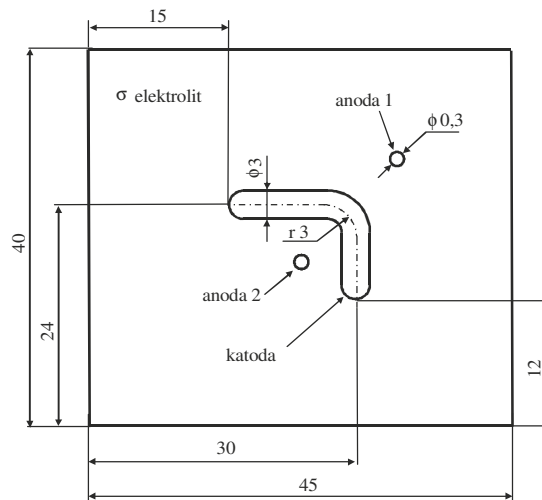
Rys. 3.4. Rozkład potencjału wzdłuż chronionej rury.

Rysunek 3.5 przedstawia rozkład gęstości prądu.



Rys. 3.5. Znormalizowany rozkład wartości gęstości prądu w elektrolicie.

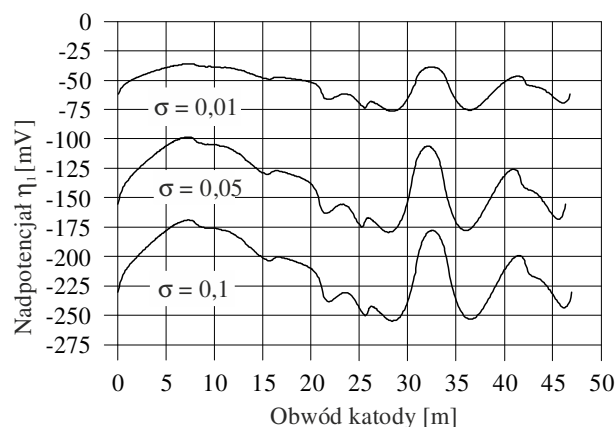
W kolejnym przykładzie wykorzystano ochronę z wykorzystaniem zewnętrznego źródła prądu. Pomiedzy anody i katodę włączone jest źródło napięcia jak na rysunku 3.6. Wymiary anod w przykładzie są celowo powiększone, aby były widoczne na rysunku. Symulacje przeprowadzono dla trzech przewodności elektrolitu: 0,01 S/m, 0,5 S/m oraz 0,1 S/m.



Rys. 3.6. Wymiary geometryczne rozważanego układu. Wszystkie wymiary podano w [m].

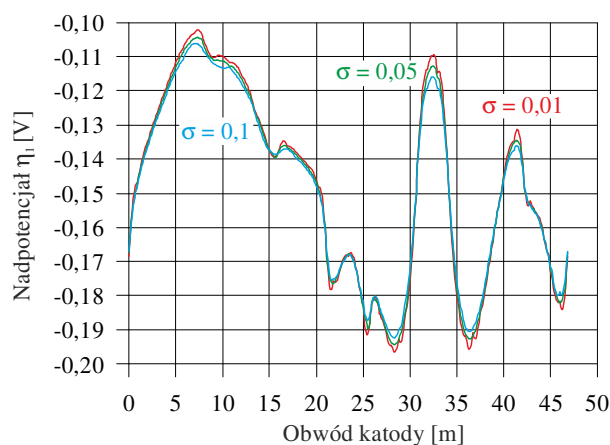
Głównym celem tych obliczeń jest zbadanie jak potencjały elektrod i gęstość prądu zależy od przewodności elektrolitu, który jest wybranym parametrem.

Na rysunku 3.7 pokazano zależność nadpotencjału na katodzie dla źródła napięcia o wartości  $E = 5 \text{ V}$ . Można zaobserwować duże zmiany parametrów elektrycznych w zależności od przewodności elektrolitu.



Rys. 3.7. Zależność nadpotencjału na chronionym obiekcie dla źródła napięcia  $E = 5 \text{ V}$  w funkcji obwodu katody dla trzech przewodności elektrolitu  $\sigma \text{ [S/m]}$ .

Następnie w miejsce źródła napięcia podłączono źródło prądowe. Obliczono te same parametry elektryczne jak w poprzednim przypadku. Jak można zaobserwować zmiana przewodności  $\sigma$  ma niewielki wpływ na rozkład potencjału.



Rys. 5.8. Zależność nadpotencjału na chronionym obiekcie dla źródła prądu stałego  $J = 2 \text{ A}$  w funkcji obwodu katody dla trzech przewodności elektrolitu  $\sigma \text{ [S/m]}$ .

Pokazano tu, że użycie źródła prądowego zamiast źródła napięcia czyni ochronę odporną na wpływ środowiska.

#### 4. Podsumowanie

W niniejszej pracy:

- określono, opisano i porównano kilka stosowanych w praktyce systemów ochrony przed korozją,
- stworzono modele numeryczne pozwalające określić parametry ograniczające skutki korozji. Zaprezentowane w dysertacji modele umożliwiły symulację szeregu zjawisk decydujących o intensywności korozji,
- wykazano praktyczną przydatność zaprezentowanych modeli poprzez przeprowadzenie numerycznych symulacji wybranych zagadnień związanych z ochroną antykorozyjną,

### **Ważniejsze publikacje doktoranta:**

Kurgan E., **Wantuch A.**: Impressed cathodic protection of underground structures, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87, NR 5/2011, s. 96-99

Kurgan E., **Wantuch A.**, Mitkowski St.: Sacrificial Cathodic Protection of Underground Objects with Finite Conductivity of Corroding Materials, XV Conference ZKwE, Poznań, 2010

Kurgan E., **Wantuch A.**: Wpływ obiektów metalowych na efektywność ochrony katodowej zbiorników podziemnych przed korozją, Elektromagnetyzm w środowisku. Szanse czy zagrożenia?, PTZE, INB ZTUREK, Warszawa, 2010

**Wantuch A.**: *Cathodic Protection of Underground Objects*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 86, NR 12/2010, s. 167-169

**Wantuch A.**: *Katodowa ochrona przed korozją podziemnych zbiorników*, Zastosowania elektromagnetyzmu w Nowoczesnych technikach i informatyce, XXI Sympozjum PTZE, Lubliniec, 2011, s. 244-246

**Wantuch A.**: *Porównanie obliczeń trój- i dwuwymiarowych w analizie ochrony katodowej*, IV Sympozjum PPEEm, Wisła 2011

**Wantuch A.**: *Sacrificial Cathodic Protection of Underground Objects*, XX Sympozjum PTZE Zastosowania elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i informatyce, Warszawa, 2010