



**OMOWY SPADEK NAPIĘCIA IR W POMIARACH POTENCJAŁU KONSTRUKCJI
PODZIEMNYCH W STREFACH ODDZIAŁYWANIA PRĄDÓW BŁĄDZĄCYCH**

**THE IR OHMIC VOLTAGE DROP IN POTENTIAL MEASUREMENTS
OF UNDERGROUND STRUCTURES IN STRAY CURRENT INTERACTION ZONES**

Wojciech Sokółski, Krzysztof Żakowski

Katedra Technologii Zabezpieczeń Przeciwkorozyjnych
Politechnika Gdańska

słowa kluczowe: pomiar potencjału, prądy błędzące, omowy spadek napięcia IR, metoda korelacyjna

keywords: potential measurements, stray currents, IR ohmic voltage drop, correlation method

Streszczenie

Omówiono rolę i potrzebę eliminowania omowego spadku napięcia IR w pomiarach potencjałów konstrukcji w strefach oddziaływania prądów błędzących. Przedstawiono jeden z możliwych sposobów numerycznej eliminacji IR z wyników pomiarów potencjału konstrukcji, uzyskiwanych w rejonach trakcji elektrycznych zasilanych prądem stałym. Metoda dostosowana jest do danych pomiarowych otrzymywanych przy pomocy techniki korelacyjnej. Przedstawione przykłady praktycznego zastosowania metody wskazują na możliwość ujawnienia dzięki niej efektów zazwyczaj maskowanych w wynikach pomiarów przez składową IR.

Summary

The role and the need have been described for eliminating the IR ohmic voltage drop in measurements of potentials of structures in stray current interaction zones. One possible numeric method has been presented of IR elimination from the results of potential measurements of structures, obtained in regions of electric tractions with a DC source. The method is adjusted to measurement data obtained through the correlation technique. The presented examples of practical application of the method point to possibility of disclosure of effects usually masked in measurement results by the IR component.

Wprowadzenie

Zagrożenie korozyjne metalowej konstrukcji podziemnej określa się najczęściej na podstawie jej potencjału mierzonego względem elektrody odniesienia. Zazwyczaj w warunkach terenowych pomiar ten odbywa się w obecności pola elektrycznego, związanego z przepływem przez ziemię prądu elektrycznego. Wartość potencjału zawiera wówczas składową IR, będącą głównie spadkiem napięcia na rezystancji pomiędzy elektrodą a badaną konstrukcją. Obecność tej składowej często uniemożliwia prawidłową interpretację zjawisk zachodzących na granicy faz metal - środowisko. Stosowane są więc różne metody, których celem jest wyeliminowanie składowej IR [1,2,3].

W systemach ochrony katodowej powszechnie stosuje się metodę wyłączeniową [4,5]. Jej zasada polega na przerywaniu na krótko prądu ochrony i pomiarze w tym czasie tzw. off-potencjału. Konieczne jest przy tym zsynchronizowanie przerywania pracy wszystkich stacji ochrony katodowej z pomiarem potencjału, co może stanowić trudność techniczną. Odmianą tej metody jest pomiar potencjału w stacji ochrony katodowej kontrolowanej mikroprocesorem podczas przerw wyzwalań tyrystora [6].

Techniki pomiarowe przydatne w systemach ochrony katodowej, gdy pole elektryczne w ziemi ma charakter statyczny, są zawodne w strefach oddziaływania dynamicznych prądów błędzących. Przyczyną są bardzo szybkie zmiany potencjału wywołane polaryzacją konstrukcji [7,8]. W takich sytuacjach metodą ominięcia problemu IR może być pomiar potencjału elektrody symulującej [9]. Jest ona zwierana z konstrukcją i zazwyczaj stanowi część specjalnie konstruowanej sondy umieszczanej w ziemi [10]. Potencjał konstrukcji wolny od składowej omowej można także wyznaczyć wykorzystując metodę ekstrapolacji [11]. Wymaga ona stosowania rejestratora mikroprocesorowego, mierzącego spadki napięcia w ziemi oraz potencjał wyłączeniowy konstrukcji. Potencjał polaryzacji bez składowej IR obliczany jest z odpowiedniego wzoru [9].

Określenie charakteru oddziaływania prądów błędzących wymaga poznania zjawisk zachodzących na granicy faz metal - środowisko, wywołanych w skutek polaryzacji spowodowanej przepływem tych prądów. Krzywa polaryzacji, opisująca procesy elektrochemiczne przebiegające na powierzchni konstrukcji metalowej, jest liniowa tylko w pobliżu potencjału korozyjnego. Przy większej polaryzacji ma kształt zbliżony do funkcji eksponentialnej. Jej przebieg w kierunku anodowym i katodowym różni się. Ocena procesów na granicy faz możliwa byłaby wówczas, gdyby mierzone wartości potencjału konstrukcji pozbawione były omowego spadku napięcia IR. W wielu przypadkach jest ona znacznie większa od wartości polaryzacji. W rezultacie uzyskiwane zależności zdominowane są przez znaczny udział składowej IR, zaś zasadnicza z punktu widzenia zagrożenia korozyjnego wielkość polaryzacji jest niedostrzegalna.

Całkowite pozbycie się w prosty sposób składowej IR w warunkach polowych podczas pomiarów w rejonach oddziaływania prądów błędzących jest praktycznie niemożliwe. Dlatego potrzebne jest poszukiwanie specjalnych metod pozwalających wyeliminować tę składową z danych pomiarowych.

W niniejszej pracy przedstawiono jeden ze sposobów numerycznej kompensacji składowej IR z wyników pomiarów sygnałów, które mierzone są w rejonach oddziaływania prądów błędzących wpływających z traktacji elektrycznych. Technika ta nie jest jeszcze w wystarczający sposób przetestowana na odpowiednio dużych populacjach wyników pomiarowych i dlatego nie stanowi jeszcze standardowej procedury w programach obróbki danych w technice korelacyjnej. Uzyskane rezultaty wskazują jednak, że przyjęto właściwe założenia i można przewidzieć dalszy rozwój tej koncepcji.

Numeryczna eliminacja składowej omowej

Prezentowana metoda dostosowana jest do danych pomiarowych uzyskanych przy pomocy techniki korelacyjnej badania prądów błądzących [12,13,14,15]. Stosowana jest przede wszystkim w rejonach występowania dynamicznych, bipolarnych prądów błądzących o dowolnym stosunku okresów polaryzacji anodowej i katodowej. Głównymi ich źródłami są trakcje elektryczne prądu stałego. Prądy błądzące z nich upływające charakteryzują się tym, że losowo zmieniają natężenie i kierunek przepływu przez granicę faz metal - środowisko elektrolityczne. Losowe są wówczas także długości okresów chwilowej polaryzacji anodowej i katodowej metalowej konstrukcji podziemnej, przez którą przepływają te prądy.

Technika korelacyjna polega na badaniu zależności zmian dwóch wielkości związanych z przepływem prądów błądzących w terenie: najczęściej potencjału konstrukcji metalowej względem elektrody odniesienia oraz napięcia względem źródła prądów (szyn trakcji elektrycznej) [16]. Charakter oddziaływania prądów błądzących określany jest na podstawie obliczonych parametrów oraz kształtu widma korelacyjnego mierzonych sygnałów [17]. Miara zagrożenia korozją elektrolityczną jest współczynnik asymetrii zmian potencjału konstrukcji względem potencjału stacjonarnego, co przyjęto na podstawie rozważań teoretycznych oraz badań laboratoryjnych i terenowych [18]. Współczynnik ten jest równy prawdopodobieństwu wystąpienia polaryzacji anodowej konstrukcji. Określa on udział czasu polaryzacji anodowej, czyli czasu w którym potencjał jest bardziej dodatni od potencjału stacjonarnego. Określenie wielkości zagrożenia korozją elektrolityczną przy pomocy metody korelacyjnej jest możliwe nawet pomimo obecności omowego spadku napięcia w wynikach pomiarów potencjału, gdyż współczynnik asymetrii nie jest czuły na wielkość IR. Możliwe jest dzięki temu uproszczenie techniki pomiarowej, co ma duże znaczenie w terenie.

Przeprowadzona symulacja komputerowa wykazała, że po odpowiedniej obróbce danych pomiarowych możliwe jest częściowe wyeliminowanie składowej IR i pełniejsze ujawnienie efektów związanych ze zjawiskami elektrochemicznymi zachodzącymi na zewnętrznej powierzchni konstrukcji podziemnej [19]. Symulację prowadzono w ten sposób, że każdą chwilową wartość potencjału konstrukcji korygowano o pewną wielkość związaną funkcynie z chwilową wartością napięcia względem szyn trakcji. Dobierając wagę odejmowanej wielkości uzyskiwano kolejne przybliżenia chwilowych wartości potencjału bez udziału składowej omowej. W konsekwencji symulowano przebieg rzeczywistych zmian potencjału rurociągu bez omowego spadku napięcia IR.

Stosowanie prezentowanej metody eliminacji omowego spadku napięcia wymaga zachowania danych pomiarowych na nośnikach pamięci, by mogły być poddane obróbce matematycznej po zakończeniu pomiaru. Powinien on więc być wykonany automatycznie, z wykorzystaniem specjalnych rejestratorów lub mikrokomputerów [20,21]. Długość pomiaru i częstość próbkowania mierzonych sygnałów może być właściwie dowolna, jeśli chodzi o możliwość zastosowania metody. Przeprowadzone badania wykazały jednak, że celem uzyskania dokładnej charakterystyki parametrów prądów błądzących należy mierzyć sygnały z częstością nie mniejszą, niż 2 Hz przez okres około 20-30 minut [22]. Poza tym im więcej danych pomiarowych - tym mniejszy błąd metody, która opiera się na zasadach analizy sygnałów losowych (jakimi są prądy błądzące), wymagających dużej liczby danych.

Historycznie rzecz ujmując podstawy metody korelacyjnej przyjęte były przy upraszczającym założeniu, że zależność między mierzoną wartością potencjału konstrukcji $E(t)$ a napięciem względem źródła prądów błądzących $U(t)$ jest w zasadzie liniowa. Oczywiście rzeczywista współzależność tych zmiennych jest dalece bardziej złożona, co wynika przede wszystkim z nieliniowej natury elektrochemicznej zjawisk zachodzących na granicy faz metal-

-elektrolit. Zatem w znacznym przybliżeniu i przy zachowaniu szeregu ograniczeń można tę zależność uprościć do poniższej postaci, w szczególności w przypadku występowania dużego omowego spadku napięcia IR:

$$E(t) = f(U(t)) \cong E_s + b \cdot U(t) \quad (1)$$

gdzie: E_s - wartość potencjału stacjonarnego konstrukcji,
 b - nachylenie widma korelacyjnego potencjał-napięcie (współczynnik kierunkowy prostej regresji; powinien być zawsze mniejszy od 1).

Wartość potencjału konstrukcji, mierzona w polu oddziaływania prądów błędzących, składa się z następujących składników:

$$E = E_s + \Delta E + I \cdot R \quad (2)$$

gdzie: E - chwilowa wartość potencjału konstrukcji,
 E_s - potencjał stacjonarny konstrukcji (w warunkach bez polaryzacji),
 ΔE - chwilowa wartość polaryzacji, wywołanej przepływem prądu przez granicę faz metal - elektrolit,
 $I \cdot R$ - chwilowa wartość spadku napięcia na rezystancji pomiędzy konstrukcją a elektrodą odniesienia, zależna między innymi od lokalizacji elektrody pomiarowej; w skrajnym przypadku wartość IR może być zbliżona do napięcia konstrukcji względem źródła prądów U .

Suma dwóch pierwszych składników we wzorze (2) jest potencjałem konstrukcji po jej polaryzacji prądem zewnętrznym. To właśnie ta wielkość jest interesująca z korozyjnego punktu widzenia. Polaryzacja (zmiana potencjału w funkcji prądu) zależy od szeregu czynników fizyko-chemicznych opisujących zjawiska na granicy faz. Zależy także od rodzaju konstrukcji metalowej, rezystywności środowiska, jakości izolacji, położenia względem źródła. Zatem rzeczywiste nachylenie krzywej regresji (współczynnik kierunkowy b po wyeliminowaniu składowej IR) może wnieść wiele informacji o charakterze i mechanizmie procesów korozji elektrolitycznej na powierzchni badanej konstrukcji.

Zgodnie z przeprowadzoną symulacją komputerową, zadowalające efekty eliminacji składowej IR uzyskuje się po skorygowaniu każdej zmierzonej chwilowej wartości potencjału konstrukcji E_i o pewną część odpowiadającą mu chwilowej wartości napięcia U_i względem obwodów powrotnych traktacji elektrycznej:

$$E_{(i)} = E_i - k \cdot U_i \quad (3)$$

gdzie: $E_{(i)}$ - wartość potencjału po eliminacji składowej IR,
 k - mnożnik zawierający się w zakresie $0 < k < \Delta$, gdzie

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(E_i - E_s)}{U_i} \quad \text{dla } U_i \neq 0; \quad N - \text{liczba danych pomiarowych.}$$

Wartość potencjału E_s obliczana jest w sposób typowy jako wyraz wolny prostej regresji $E = E_s + b \cdot U$:

$$E_s = \frac{\sum U_i^2 \cdot \sum E_i - \sum U_i \cdot \sum (U_i \cdot E_i)}{N \cdot \sum U_i^2 - (\sum U_i)^2} \quad (4)$$

gdzie: U_i - chwilowa wartość napięcia rurociągu względem szyn trakcji elektrycznej,
 E_i - chwilowa wartość potencjału rurociągu,
 N - ilość próbek mierzonych sygnałów.

Zgodnie z przedstawionymi wyżej zależnościami, omawiana procedura eliminacji składowej IR składa się z następujących etapów:

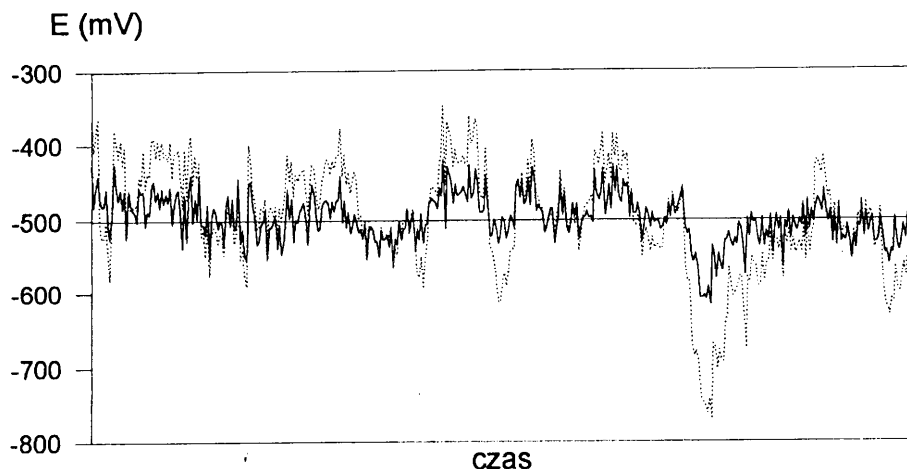
- analiza odchyleń mierzonych chwilowych wartości potencjału konstrukcji od obliczonej wartości potencjału stacjonarnego,
- badanie stosunku tych odchyleń i chwilowych wartości napięcia,
- wyznaczenie zależności opisującej w przybliżeniu składową IR.

Dobierając odpowiednio wagę współczynnika k z zależności (3) uzyskać można kolejne przybliżenia chwilowych wartości potencjału bez udziału składowej IR. W konsekwencji możliwe jest przybliżenie rzeczywistych zmian potencjału bez omowego spadku napięcia IR.

Przykłady zastosowania metody

Cytowane niżej przykłady pokazują ciekawe rezultaty, które uzyskano po zastosowaniu prezentowanej numerycznej metody kompensacji składowej omowej. Pomiary wykonano metodą korelacyjną na dwóch rurociągach sąsiadujących z trakcją tramwajową. W obu przypadkach celem pomiarów było sprawdzenie skuteczności i zasięgu działania instalacji ochronnych przed korozją elektrolityczną (elektryczne drenaże polaryzowane). Pomiary wykonano przy użyciu dwukanałowego rejestratora cyfrowego. Mierzono jednocześnie potencjał konstrukcji i napięcie względem szyn tramwajowych. Wykorzystano atestowaną przenośną elektrodę siarczano-miedziową, którą umieszczano w ziemi nad rurociągiem. Podłączenie rejestratora do rurociągu i szyny realizowane było w zaciskach istniejących punktów kontrolno-pomiarowych. Sygnały próbkowano z częstotliwością 2 Hz przez okres 30 minut. Analizy danych pomiarowych dokonano przy pomocy własnego programu komputerowego.

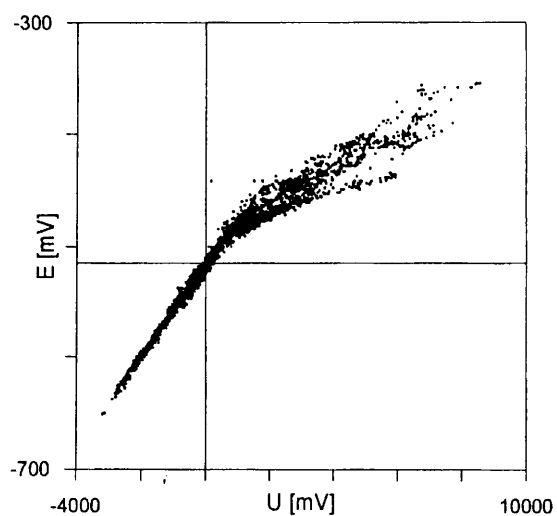
Przykładowy 2-minutowy fragment zmian potencjału rurociągu ilustruje rys. 1. Linia ciągłą zaznaczono wartości potencjału po częściowej eliminacji składowej IR, zaś linią kropkowaną wyjściowe dane pomiarowe. Na rysunku wykreślono linię $E = -501$ mV odpowiadającą potencjałowi stacjonarnemu obliczonemu wg zależności (4). Widać, że im większe odchylenie mierzonej w terenie chwilowej wartości potencjału od wartości potencjału stacjonarnego, tym większa wartość bezwzględna odejmowanej składowej omowej. Wynika to z faktu liniowej zależności składowej IR od chwilowej wartości natężenia zewnętrznego prądu polaryzującego.



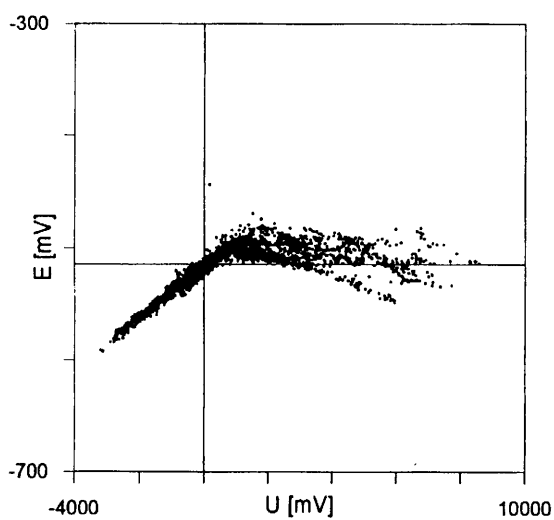
Rys. 1. Fragment przebiegu potencjału gazociągu.
Linia kropkowana - wartości zmierzone.
Linia ciągła - wartości po częściowej kompensacji składowej IR.

Rys. 2 przedstawia rezultaty analizy wyników pomiarów uzyskanych na gazociągu średniego ciśnienia. Widmo korelacyjne potencjał-napięcie $E=f(U)$ z wyjściowych danych pomiarowych ilustruje rys.2a, zaś po numerycznej eliminacji składowej omowej rys.2b. Oba widma wykreślono w tej samej dziedzinie układu współrzędnych o środku w punkcie $(0, E_s)$ z zaznaczonymi osiami na poziomie $E=E_s$ oraz $U=0$, co umożliwia łatwe ich porównanie. Kształt widma korelacyjnego z danych wyjściowych sugeruje, że w miejscu pomiaru gazociąg nie jest objęty zasięgiem skutecznego działania ochronnego pobliskiego elektrycznego drenazu polaryzowanego. Wskazuje na to zbyt małe zagłębienie widma do dziedziny ujemnych wartości potencjału gazociągu dla dodatnich wartości napięcia względem szyn tramwajowych (rys. 2a). Po wyeliminowaniu z danych pomiarowych składowej IR wyraźnie widać, że efekt ochronny został jednak osiągnięty. Świadczy o tym występujące teraz ujemne nachylenie części widma korelacyjnego dla napięć powyżej +1 V, przy których dioda w instalacji ochronnej przewodzi prądy błądzące odprowadzane przewodem elektrycznym z gazociągu do szyn tramwajowych (rys. 2b). Uzyskany kształt widma jest typowy dla prawidłowo działającej instalacji ochronnej w formie elektrycznego drenazu polaryzowanego. W prezentowanym przykładzie wykorzystanie metody numerycznej kompensacji składowej omowej pozwoliło uzyskać pełniejsze informacje o procesach zachodzących na zewnętrznej powierzchni gazociągu. Efekty te były maskowane w wyjściowych danych pomiarowych przez znaczny udział składowej IR. Zaprezentowane wyniki analiz potwierdziły się w czasie eksploatacji rurociągu: od chwili uruchomienia instalacji ochronnej nie wystąpiła awaria korozyjna.

Kolejny przykład ilustruje rys. 3. Dane pomiarowe uzyskano na izolowanym tradycyjnie ciepłociągu magistralnym w sąsiedztwie drenazu polaryzowanego. Na rys. 3a widmo korelacyjne z danych pomiarowych potencjału rurociągu i jego napięcia względem szyn tramwajowych ma kształt zbliżony do linii prostej.



a)

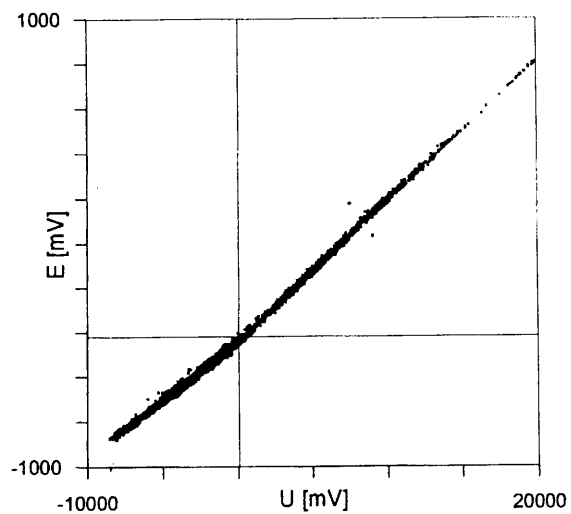


b)

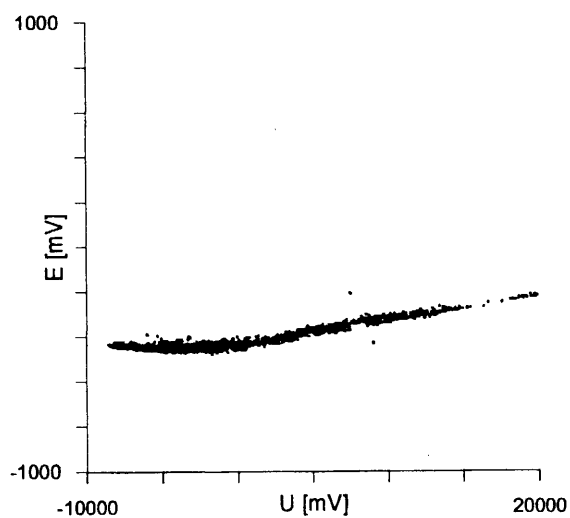
Rys. 2. Przykład widma korelacyjnego uzyskanego dla gazociągu.

a) - wartości zmierzone.

b) - wartości po kompensacji składowej IR.



a)



b)

Rys. 3. Widma korelacyjne uzyskane dla ciepłociągu:
a) - przed eliminacją, b) - po eliminacji składowej IR.

Wskazuje to pośrednio na bardzo duży udział składowej IR, co potwierdzają także wartości mierzonego potencjału. Po wyeliminowaniu omowego spadku napięcia przy pomocy prezentowanej metody uzyskano widmo korelacyjne przedstawione na rys. 3b. Ujawniło się wyraźne zagięcie widma w pobliżu początku układu współrzędnych. Ponadto w dziedzinie ujemnych napięć potencjał ciepłociągu miał prawie stałą wartość. Efekty te były niewidoczne wówczas, gdy składowa IR stanowiła główny składnik mierzonego potencjału.

Omówienie wyników i wnioski

Dokładność prezentowanej metody zależy między innymi od prawidłowego wyznaczenia wartości E_S . Wykorzystywana do tego metoda regresji liniowej jest często stosowana do analizy danych pomiarowych w polu oddziaływania prądów błądzących [23,24]. Zależność (4) powinna być jednak stosowana tylko dla przypadków wzajemnej korelacji badanych sygnałów zbliżonej do liniowej. W przeciwnym przypadku wyniki uzyskane po kompensacji IR są błędne, nie nadające się do dalszej analizy. Konieczne jest wówczas stosowanie innych algorytmów określania wartości E_S . Dzieje się tak przede wszystkim w sytuacjach, gdzie pomiary wykonywane są w rejonie zastosowanych do ochrony przed korozją drenaży elektrycznych lub automatycznych stacji ochrony katodowej.

Przedstawiona metoda, będąca jednym z możliwych sposobów rozwiązania problemu eliminowania omowego spadku napięcia IR, powinna być stosowana umiejętnie. Realizacja eliminacji składowej IR zakłada dobór odpowiedniej wagi współczynnika k z zależności (3) tak, by uzyskać odpowiednie przybliżenie chwilowych wartości potencjału bez składowej IR. Zgodnie z uwarunkowaniami wskazanymi wyżej, nie dla wszystkich wyjściowych danych pomiarowych możliwe jest zautomatyzowanie tej procedury. Optymalny zakres numerycznej kompensacji tej składowej powinien być ustalany poprzez takie kryterium, które związane jest z charakterem procesów zachodzących na powierzchni metalu przy przepływie zewnętrznego prądu polaryzującego.

Przeprowadzone analizy [25] wykazały, że przy doborze stopnia kompensacji składowej IR pomocne może być śledzenie zmian współczynnika korelacji r badanych sygnałów losowych. Współczynnik korelacji może przyjmować wartości w przedziale $<-1; 1>$. Jeśli jest równy ± 1 , to zależność między zmiennymi jest liniowa. Jeśli $r=0$, to wówczas brak jest zależności pomiędzy zmiennymi losowymi. Może on więc być wykorzystany jako kryterium ujawnienia efektów nieliniowych, a więc także jako kryterium skompensowania IR. Powyższe założenie sprawdzono badając zgromadzoną bazę ponad 200 zbiorów danych pomiarowych wykonanych techniką korelacyjną w rejonach oddziaływania prądów błądzących. Otrzymane rezultaty wskazują na to, że współczynnik korelacji służyć może jako kryterium kompensowania omowego spadku napięcia IR.

Zaletą prezentowanej metody jest prostota procedur obliczeniowych. Należy jednak zaznaczyć, że wynika to między innymi z założonego uproszczenia opisu zjawisk towarzyszących oddziaływaniu prądów błądzących na konstrukcje podziemne. Automatyzacja procedury kompensacji składowej omowej przy podanych założeniach nie jest możliwa dla wszystkich danych pomiarowych uzyskiwanych w warunkach rzeczywistych. W szczególności dotyczy to w niektórych przypadkach procedury wyznaczania wartości potencjału E_S przy pomocy regresji liniowej. Jako kryterium kompensacji składowej IR służyć może wartość współczynnika korelacji zmian badanego potencjału i napięcia.

Praca wykonana została w ramach grantu KBN nr 8 T10C 013 14.

Literatura

- [1] B.A.Martin: Potential measurement on buried pipelines, „Cathodic Protection Theory and Practice - The Present Status” Coventry 1982.
- [2] NACE publication 10A190: Measurement techniques related to criteria for cathodic protection of underground or submerged steel piping systems, NACE, (1991), Houston.
- [3] R.D.Webster: Compensating for the IR drop component in pipe-to-soil potential measurements, *Materials Performance*, Vol.26, No. 10, (1987), pp. 38-41.
- [4] W.v.Baeckmann, W.Prinz: New developments in measuring the effectiveness of cathodic protection, *Corr. Australasia*, Vol. 8, No. 1, (1983), 4-9.
- [5] E.Escalante: Elimination of IR error in measurements of corrosion in concrete, *Proceedings „Measurement and correction of electrolyte resistance in electrochemical tests”* (ASTM), Baltimore 1988, pp.180-190.
- [6] W.Bogotko, D.Jonaszek: Microprocessor controlled cathodic station maintaining protection with elimination IR drop, *Proceedings „Korozja '93”*, June 1-4, (1993), Warsaw, Poland, Inst. of Physical Chemistry of the Polish Academy of Sciences, pp. 353-356.
- [7] J.Dabkowski: Technique development for polarized pipe-to-soil potential measurements: final report, 1989. Available from American Gas Association, 1515 Wilson Boulevard, Arlington. Book
- [8] W.Fleig: Experiences with intensive measuring of coating defects on cathodic protected pipes, 18th World Gas Conference, Berlin, July 8-11, 1991.
- [9] W.v.Baeckmann: Messtechnik beim kathodischen Korrosionsschutz. Expert Verlag. Ehningen bei Boblingen. 1989.
- [10] H.Tang, G.Song, C.Cao, H.Lin: Study on soil-corrosion by the back-inserted reference electrode method, *Corrosion Science and Protection Technique*, Vol. 6, No. 4, (1994), pp. 352-357.
- [11] W.v.Baeckmann: New methods for measuring potential without internal resistance (IR) in the cathodic protection of underground pipelines, *Werkstoffe und Korrosion*, Vol. 34, No. 5, (1983), 230-235.
- [12] R.Juchniewicz, W.Sokółski: *Proc.9th International Congress on Metallic Corrosion*, Toronto, 1985, p.92.
- [13] R.Juchniewicz, W.Sokółski: *NACE, Corrosion'86* (1986), Paper No.38.
- [14] W.Sokółski: *Bull. Electrochem.*, 3, 531 (1987).
- [15] W. Sokółski: 9th European Congress on Corrosion, Utrecht, 1989.
- [16] R.Juchniewicz, W.Sokółski: Field evaluation of a new method to determine stray current corrosion activity, *Mater. Performance*, Vol. 24, No. 7 (1985), pp. 26-28.
- [17] K.Żakowski, W.Sokółski: Determination of corrosion hazard caused by stray currents, *The European Corrosion Congress EUROCORR '97*, Trondheim, Norway, 22-25 September 1997.
- [18] W.Sokółski: Evaluation of corrosion hazards for underground structures caused by stray currents, *Ochrona przed Korozją* (Polish), No. 7 (1992), pp. 153-157.
- [19] K.Żakowski, W.Sokółski: The correlation method of stray current investigations. Evaluation of non-linear effects, *Ochrona przed Korozją* (Polish), No. 9 (1997), pp. 262-264.
- [20] I.Salomon, J.Morris: Modern data logging systems for the monitoring of stray currents and cathodic protection systems, *Conference UK Corrosion and Eurocorr 94*, Vol. 4, pp. 197-209.
- [21] W.Sokółski, K.Żakowski: Remote monitoring of stray currents, *Conference „Korozja '93”* Warsaw, Poland, pp. 361-364, avail.: Inst. of Physical Chemistry of the Polish Academy of Sciences.
- [22] K.Żakowski, W.Sokółski: The correlation method of stray current investigations. Signification of the probe frequency, *Ochrona przed Korozją* (Polish), No. 6 (1997), pp. 174-177.
- [23] B.Bazzoni, L.Lazzari: The Lateral Gradient Technique for Potential Measurements in Presence of Stray Current, Paper No. 202. Presented at *CORROSION/96*, 24-29 March 1996, Denver, Colorado, (NACE International).
- [24] B.A.Martin, H.J.Brinsmead: A Method for Determining Pipeline Polarized Potentials in Stray Current Areas Using Linear Regression Analysis, *Ind. Corr.*, Vol. 3, No. 3 (1985), pp. 10-13.
- [25] W.Sokółski, K.Żakowski: The correlation method of stray current investigations. The role of the correlation coefficient in evaluation of IR compensation, *Ochrona przed Korozją* (Polish), No. 11 (1997), pp. 317-318.