



---

**WPLYW CZĘSTOŚCI ODCZYTU MIERZONYCH SYGNAŁÓW  
NA UZYSKANĄ CHARAKTERYSTYKĘ PRĄDÓW BŁĄDZĄCYCH**  
**THE EFFECT OF THE FREQUENCY OF RECORDING MEASURED SIGNALS  
ON THE OBTAINED CHARACTERISTICS OF STRAY CURRENTS**

Wojciech Sokółski, Krzysztof Żakowski

Politechnika Gdańska  
Katedra Technologii Zabezpieczeń Przeciwkorozyjnych

Słowa kluczowe: prądy błędzące, korozja elektrolityczna, pomiary korozyjne  
Keywords: stray current, stray current corrosion, corrosion measurements

**Streszczenie**

W pracy omówiono metodykę analizy danych pomiarowych uzyskanych przy różnej częstotliwości odczytu sygnałów. Przedstawiono uzyskane w ten sposób wyniki obliczeń podstawowych wielkości charakteryzujących prądy błędzące: wartość średnia potencjału konstrukcji i napięcia między nią a szynami trakcji elektrycznej, składowa zmienna potencjału i napięcia, potencjał stacjonarny, współczynnik asymetrii zmian potencjału, stosunek składowych stałej i zmiennej potencjału, współczynnik korelacji, nachylenie widma korelacyjnego. Wskazano najkorzystniejszą częstotliwość odczytu sygnałów pomiarowych.

**Summary**

In this work the methodology of analysis of measurement data has been described, obtained at different recording frequencies. The calculations of basic quantities characterising stray currents have been presented, i.e., the mean value of the potential of the structure and the voltage between the structure and the rails of the electric traction, the variable component of potential and voltage, the stationary potential, the correlation coefficient, the slope of the correlation spectrum. The most advantageous frequency of signal measurements has been indicated.

## 1. Wprowadzenie

Zmiany wielkości fizykochemicznych w polu oddziaływania prądów błędzących są bardzo dynamiczne, sygnały zawierają wiele składowych. W praktyce pomiary korozyjne i ich analiza odbywają się prawie wyłącznie automatycznie, z zastosowaniem elektronicznej techniki obliczeniowej [1-2]. Celem pomiarów jest zazwyczaj określenie zagrożenia badanej konstrukcji korozją elektrolityczną. Powszechnie stosuje się opracowaną w Politechnice Gdańskiej metodę korelacyjną, która polega na rejestracji dwóch wielkości charakteryzujących prądy błędzące, a następnie na analizie widma ich wzajemnej korelacji [3-4]. Mierzone sygnały próbkowane są zazwyczaj z częstością kilku odczytów na sekundę w czasie 20 - 30 minut. Wartości te określono na podstawie ogólnych zasad analizy sygnałów losowych.

Zalecenia dotyczące pomiarów korozyjnych w polu oddziaływania prądów błędzących zawiera norma PN-90/E-05030/01: „Ochrona przed korozją. Elektrochemiczna ochrona katodowa. Metalowe konstrukcje podziemne. Wymagania i badania.” [5]:

*„3.3.1. Pomiar potencjału konstrukcji [...]*

*W przypadku oddziaływania prądów błędzących [...] . Pomiary należy wykonywać w czasie przewidywanego największego nasilenia oddziaływania prądów błędzących, w ciągu co najmniej 20 minut. W przypadku braku odpowiedniego rejestratora wskazania woltomierza należy odczytywać co 10 sek. w ciągu co najmniej 20 minut.”*

Wymagania te sformułowano, gdy jeszcze powszechnie nie stosowano w pomiarach rejestratorów cyfrowych.

Prognozowanie zagrożenia korozyjnego jest tym łatwiejsze, im pełniejsza charakterystyka oddziaływania prądów błędzących uzyskana z danych pomiarowych. W cytowanym wyżej fragmencie normy brak sugestii, z jaką częstością najkorzystniej odczytywać sygnały mierzone przy pomocy rejestratorów, by taką charakterystykę otrzymać. Na ten temat brak również doniesień literaturowych. W niniejszej pracy przedstawiono niektóre wyniki badań, prowadzonych nad omawianym zagadnieniem w Politechnice Gdańskiej.

## 2. Metodyka analizy danych pomiarowych

Od kilku lat w Katedrze Zabezpieczeń Przeciwkorozyjnych Politechniki Gdańskiej gromadzone są w zewnętrznej pamięci komputerowej wyniki pomiarów terenowych, które przeprowadzono w rejonach oddziaływania prądów błędzących. Zbiory te umożliwiły przeprowadzenie szerokiej analizy wpływu częstości próbkowania mierzonych sygnałów na uzyskaną charakterystykę prądów błędzących w rejonach o różnej wielkości zagrożenia korozją elektrolityczną, na różnych konstrukcjach podziemnych.

Pomiary, które stanowiły bazę do omówionych w tej pracy badań, wykonywane były w terenie z częstością próbkowania mierzonych sygnałów 4 razy na sekundę (co 0,25 sek.). Zapisywano je przy pomocy rejestratora, niektóre: komputera przenośnego [6-7]. Długość każdego pomiaru wynosiła 20-30 minut [5]. Uzyskane dane pomiarowe przenoszone były w laboratorium na dysk twardy komputera.

## 2.1. Baza danych pomiarów terenowych

Do analizy wpływu częstości próbkowania sygnałów na uzyskaną charakterystykę prądów błędnych wytypowano z komputerowej bazy 145 zbiorów z danymi pomiarowymi. W terenie mierzone były (zgodnie z techniką korelacyjną) jednocześnie dwie spośród następujących wielkości [4]:

- potencjał konstrukcji względem elektrody odniesienia,
- napięcie między konstrukcją a szynami trakcji elektrycznej,
- różnica potencjałów między dwoma punktami na powierzchni ziemi (w tym także rozkład pola elektrycznego w kierunkach prostopadłych do siebie),
- potencjał szyn trakcji elektrycznej względem tzw. ziemi oddalonej.

Zdecydowaną większość stanowiły najbardziej typowe dla techniki korelacyjnej dane pomiarowe, tzn. zawierające przebieg zmian potencjału konstrukcji oraz napięcia względem szyn trakcji elektrycznej. Analizowane wyniki pomiarów reprezentowały szeroką gamę rejonów o różnym stopniu zagrożenia wywołwanego przez prądy błędące, o różnej korelacji zmian mierzonych sygnałów. Obliczone wartości współczynników asymetrii zmian potencjału konstrukcji względem jej potencjału stacjonarnego (główna miara zagrożenia korozją elektrolityczną [3,8]) zawierały się w całym przedziale możliwych wartości, to znaczy 0 - 100 %.

## 2.2. Wielkości fizykochemiczne obliczane z danych pomiarowych

Przy różnej częstości próbkowania sygnałów, badano prawidłowość odwzorowania następujących wielkości charakteryzujących rozptyw prądów błędnych w terenie [9-10]:

- średnia wartość napięcia między konstrukcją a szynami trakcji elektrycznej  $U_{sr}$ ,
- składowa zmienna napięcia (odchylenie standardowe)  $s(U)$ ,
- średnia wartość potencjału konstrukcji  $E_{sr}$ ,
- składowa zmienna potencjału konstrukcji  $s(E)$ ,
- najbardziej prawdopodobna wartość potencjału stacjonarnego konstrukcji  $E_s$ ,
- wartość współczynnika asymetrii zmian potencjału  $\gamma$ ,
- stosunek składowych stałej i zmiennej potencjału  $(E_{sr} - E_s) / s(E)$ ,
- współczynnik korelacji zmian mierzonych sygnałów  $r$ ,
- nachylenie widma korelacyjnego potencjał-napięcie  $b$ .

## 2.3. Przyjęta metodyka analiz

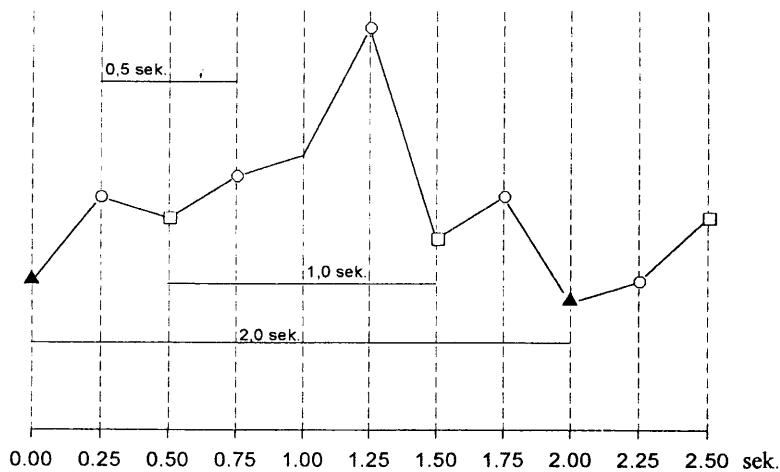
Badanie wpływu częstości próbkowania mierzonych sygnałów w polu oddziaływania prądów błędnych na uzyskiwaną charakterystykę ich rozptywu w rejonie miejsca pomiaru przeprowadzono następująco:

- za punkty odniesienia przyjęto przebiegi mierzonych sygnałów uzyskiwane w terenie przy okresie próbkowania 0,25 sek.,
- dokonano komputerowej analizy tych przebiegów,
- uzyskane wyniki obliczeń przyjęto za podstawę do późniejszego określenia błędów, z jakimi obliczane były poszczególne wielkości przy innych częstościach próbkowania sygnałów,

- przeprowadzono próbkowanie zapisów terenowych z następującymi częstotliwościami: co 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 10 i 20 sekund,

*Próbkowania dokonano w ten sposób, że z pliku danych pomiarowych pobierano wartości uzyskiwane w założonym odstępie czasu rzeczywistego (np. co 2 sekundy). Ilustruje to rysunek 1. Dla każdego okresu próbkowania wykonano kilka prób, z różnym punktem startowym pierwszego odczytu. Celem tej procedury było uzyskanie różnych zbiorów danych pomiarowych, otrzymanych po próbkowaniu danych wyjściowych z tą samą częstotliwością.*

- dokonano komputerowej analizy uzyskanych danych pomiarowych,
- uśredniono wyniki obliczeń wszystkich przebiegów uzyskanych po próbkowaniu tego samego zapisu wyjściowego z tą samą częstotliwością, lecz różnym punktem startowym,
- wyniki obliczeń wytypowanych wielkości, otrzymane przy różnej częstotliwości próbkowania zapisu wyjściowego, porównano z wartościami przyjętymi za punkt odniesienia.



Rys. 1. Odczyt zapisu terenowego z różnymi okresami próbkowania.

Dokładność odwzorowania wielkości charakteryzujących rozplyw prądów błędzących w terenie określano na podstawie wyznaczenia błędu względnego  $\delta$ :

$$\delta = \left| \frac{X - X_i}{X} \right| \cdot 100 \%$$

gdzie:  $X$  - wartość rzeczywista (obliczona dla okresu próbkowania co 0,25 sekundy),  
 $X_i$  - wartość obliczona przy założonym okresie próbkowania.

### 3. Uzyskane wyniki

Wyniki przeprowadzonych analiz przedstawiono poniżej w formie tabel. Dla każdej częstotliwości próbkowania przebiegów wyjściowych pokazano ilość uzyskanych zbiorów danych pomiarowych, z których po analizie matematycznej otrzymano wyniki obarczone błędem

względny przekraczającym założoną dopuszczalną jego wartość. Przyjęto następujące progi tego błędu: 5 %, 10 %, 15 %, 20 %. Przykładowo: przy założonym progu 10 % wynik obliczeń uważany był za prawidłowy, jeśli obarczony był błędem  $\delta < 10\%$ . Klasyfikację prowadzono oddzielnie dla każdej wymienionej w tabelach wielkości fizykochemicznej. Może się zatem zdarzyć, że konkretny zbiór uzyskanych po próbkowaniu danych pomiarowych został dla jednej wielkości zaliczony do dających prawidłowe wyniki obliczeń, zaś dla innej: wyniki nieprawidłowe (przekraczające dopuszczalny błąd).

Tabela 1 przedstawia ilość zbiorów danych pomiarowych (uzyskanych przy różnych częstościach próbkowania sygnałów rzeczywistych), które po obliczeniach dawały poszczególne wyniki obarczone błędem większym od 20 %. W tym przypadku zbiory kwalifikowane były do dających prawidłowe wyniki obliczeń z bardzo dużą tolerancją.

*Tabela 1. Procent pomiarów wykonanych z podanymi okresami próbkowania, dających wyniki obliczeń wymienionych wielkości z błędem względnym  $\delta > 20\%$ .*

okres próbkowania [sek]	$U_{sr}$	$s(U)$	$E_{sr}$	$s(E)$	$E_s$	$\gamma$	$\frac{(E_{sr}-E_s)}{s(E)}$	r	b
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	3,4	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	4,1	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	4,8	0,0	0,0
3	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	8,3	1,4	1,4
4	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	9,7	2,1	2,1
5	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	11,7	4,8	4,8
10	9,7	0,7	0,0	0,0	0,0	4,8	20,7	11,0	11,0
20	22,1	3,4	0,0	4,1	0,0	12,4	35,9	13,8	19,3

Dane z tabeli 1 wskazują na to, że mimo bardzo dużego dopuszczalnego błędu obliczeń (20 %), przy małych częstościach próbkowania sygnałów rzeczywistych wiele uzyskanych danych pomiarowych źle oddaje charakterystykę prądów błądzących. Przy odczycie co 10 sekund, odsetek nieprawidłowych wyników przekracza 10 % dla następujących wielkości:

- wartość średnia napięcia,
- stosunek składowych stałej i zmiennej,
- współczynnik korelacji,
- nachylenie widma korelacyjnego.

W przypadku obliczeń wartości współczynnika asymetrii potencjału, podobny odsetek błędnych wyników występuje przy częstości odczytu co 20 sekund.

Najgorzej odwzorowywana jest wartość stosunku składowych stałej i zmiennej potencjału (ze stosunkiem tym powiązany jest funkcyjnie współczynnik asymetrii).

Po zaostrożeniu kryterium dyskwalifikującego, tzn. przyjęciu dopuszczalnej wartości względnego błędu obliczeń 15 %, uzyskano wyniki zebrane w tabeli 2.

Tabela 2. Procent pomiarów wykonanych z podanymi okresami próbkowania, dających wyniki obliczeń wymienionych wielkości z błędem względnym  $\delta > 15\%$ .

okres próbkowania [sek]	$U_{sr}$	$s(U)$	$E_{sr}$	$s(E)$	$E_s$	$\gamma$	$\frac{(E_{sr}-E_s)}{s(E)}$	r	b
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	4,1	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	4,1	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	8,3	0,0	0,0
3	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	9,7	2,1	2,1
4	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	11,7	3,4	4,1
5	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	15,2	5,5	5,5
10	15,9	0,7	0,0	0,7	0,0	8,3	25,5	12,4	11,7
20	31,0	9,0	0,0	11,7	0,0	19,3	43,4	17,2	21,4

Udział pomiarów dających błędne wyniki obliczeń jest przy powyższym założeniu o kilka procent większy, niż w tabeli 1. Widoczne jest, że przy próbkowaniu co 10 sekund podstawowe wielkości charakteryzujące rozptył prądów błądzących odtwarzane są ze zbyt dużym błędem. Dane z tabeli 2 wskazują, że przy dopuszczalnym błędzie obliczeń 15%, minimalny okres próbkowania sygnałów w terenie powinien wynosić 5 sekund. Należy przy tym zaznaczyć, że kryterium dyskwalifikujące zbiory danych pomiarowych na tym poziomie błędu obliczeń jest w dalszym ciągu dość łagodne.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki analiz, wykonanych przy założeniu dopuszczalnego błędu obliczeń wytypowanych wielkości na poziomie 10%, zaś w tabeli 4 na poziomie 5%.

Tabela 3. Procent pomiarów wykonanych z podanymi okresami próbkowania, dających wyniki obliczeń wymienionych wielkości z błędem względnym  $\delta > 10\%$ .

okres próbkowania [sek]	$U_{sr}$	$s(U)$	$E_{sr}$	$s(E)$	$E_s$	$\gamma$	$\frac{(E_{sr}-E_s)}{s(E)}$	r	b
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	4,1	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	6,2	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	12,4	0,0	0,0
3	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	13,8	2,8	2,8
4	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	15,9	4,1	5,5
5	6,9	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	20,7	6,2	6,9
10	22,1	2,1	0,0	4,1	0,0	12,4	32,4	13,8	16,6
20	40,0	17,2	0,0	20,0	0,0	31,0	52,4	22,1	27,6

Tabela 4. Procent pomiarów wykonanych z podanymi okresami próbkowania, dających wyniki obliczeń wymienionych wielkości z błędem względnym  $\delta > 5\%$ .

okres próbkowania [sek]	$U_{sr}$	$s(U)$	$E_{sr}$	$s(E)$	$E_s$	$\gamma$	$\frac{(E_{sr}-E_s)}{s(E)}$	$r$	$b$
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	4,8	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	10,3	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	16,6	0,7	0,7
3	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	21,4	4,1	4,8
4	7,6	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	29,0	6,9	6,9
5	12,4	0,7	0,0	0,7	0,0	7,6	33,1	9,7	11,7
10	35,2	15,9	0,0	22,1	0,0	33,8	50,3	19,3	24,1
20	55,9	41,4	1,4	42,8	0,7	57,9	70,3	28,3	37,9

Na uwagę zasługuje fakt bardzo dobrego odtwarzania wartości średniej potencjału oraz obliczonej najbardziej prawdopodobnej wartości potencjału stacjonarnego, nawet przy bardzo rzadkim odczycie mierzonych sygnałów rzeczywistych. Błąd obliczenia pozostałych wielkości przy małych częstościach próbkowania jest znaczny. Przykładowo, przy dopuszczalnym błędzie 5%, przy okresie próbkowania 10 sekund aż co trzeci pomiar terenowy dawałby nieprawidłowy wynik obliczenia wartości współczynnika asymetrii zmian potencjału.

#### Podsumowanie i wnioski

Z wyników zebranych w tabelach widoczne są następujące zależności:

1. Odsetek pomiarów terenowych dających nieprawidłowe wyniki obliczeń wyraźnie wzrasta przy okresie próbkowania mierzonych sygnałów powyżej 2 sekund. Dotyczy to odwzorowania zwłaszcza następujących wielkości:
  - średnia wartość napięcia  $U_{sr}$ ,
  - wartość współczynnika asymetrii zmian potencjału  $\gamma$ ,
  - współczynnik korelacji  $r$ ,
  - nachylenie widma korelacyjnego  $b$ .
2. Składowe zmienne napięcia  $s(U)$  i potencjału  $s(E)$  są dobrze odtwarzane przy próbkowaniu sygnałów rzeczywistych najrzadziej co 5 sekund.
3. Niezależnie od okresu próbkowania sygnałów, praktycznie bezbłędnie obliczana jest wartość średnia potencjału konstrukcji  $E_{sr}$  oraz najbardziej prawdopodobna wartość jej potencjału stacjonarnego  $E_s$ . Oczywiście wymagana jest przy tym odpowiednio duża ilość odczytów (pomiar powinien trwać 20 - 30 minut).
4. Najgorzej odtwarzany jest stosunek składowych stałej i zmiennej potencjału  $(E_{sr}-E_s) / s(E)$ . Jego wartość jest prawidłowa, jeśli okres próbkowania mierzonych sygnałów wynosi maksimum 1 sekundę.

Powyższe zależności wskazują na to, że celem uzyskania całościowej, w miarę dokładnej charakterystyki oddziaływania prądów błądzących, najkorzystniej jest wykonywać pomiary terenowe z odczytem wartości co 1 sekundę lub częściej. Jeśli sygnały próbkowane są rzadziej, niż co 2 sekundy - prawidłowo oszacować można jedynie wartość średnią potencjału konstrukcji oraz najbardziej prawdopodobną wartość jej potencjału stacjonarnego. Utrudnione jest jednak wówczas (jeśli zachodzi taka potrzeba) wytypowanie najkorzystniejszej formy ochrony elektrochemicznej: błędnie oszacowana wartość średnia napięcia nie pozwala prawidłowo prognozować skuteczności np. elektrycznego drenazu polaryzowanego.

## Literatura

1. Juchniewicz R., Sokólski W.: Computers in stray current corrosion control, Paper No.38, NACE Corrosion'86 (1986).
2. Sokólski W.: Computer aided analysis of stray current corrosion activity, 9th European Corrosion Congress, Utrecht (1989).
3. Juchniewicz R., Sokólski W.: Pomiar współczynnika asymetrii zmian potencjału konstrukcji w polu oddziaływania prądów błądzących, Ochrona przed Korozją, **30**, 132-134 (1987).
4. Sokólski W., Żakowski K.: Ocena zagrożenia korozyjnego i metody zabezpieczenia przed prądami błądzącymi metalowych konstrukcji podziemnych, Materiały Konferencyjne nt. Zabezpieczenia przeciwkorozyjne w przemyśle, Grudziądz, 23 maja 1989 r. Grudziądz: NOT, Komit. Miej. w Grudziądz, (1989), s. 51-71.
5. PN-90/E-05030/01: Ochrona przed korozją. Elektrochemiczna ochrona katodowa. Metalowe konstrukcje podziemne. Wymagania i badania.
6. Sokólski W., Żakowski K.: Nowa technika pomiarowa prądów błądzących. Stanowisko laboratoryjne do modelowania korozji elektrolitycznej, Materiały Sesji Naukowej „Zastosowanie ochrony elektrochemicznej w przemyśle”, Kołobrzeg 1988, Gdańsk: Politechnika Gdańska (1988), s. 22-28.
7. Sokólski W., Żakowski K.: Zdalne monitorowanie prądów błądzących, Materiały IV Krajowej Konferencji Korozyjnej KOROZJA 93. Warszawa, 1-4 czerwca 1993. Warszawa: Inst. Chem. Fiz. PAN, (1993), s. 361-364.
8. Sokólski W.: Prądy błądzące - nowe spojrzenie na kryteria ochrony przeciwkorozyjnej, Materiały XXI Krajowej Konferencji Naukowo - Technicznej "Nauka i praktyka w walce z korozją", Kule k. Wąsosza, 26-28 maja 1994. Częstochowa: Częst. Zakł. Chem. Og., SITPChem., Zesp. ds. Ochr. przed Koroz., (1994), s. 101-110.
9. Sokólski W., Żakowski K.: Dobowa charakterystyka oddziaływania prądów błądzących na konstrukcje metalowe, Materiały XXI Konwersatorium Korozji Morskiej, Jurata, 20-22 września 1995, Gdańsk: Instytut Morski (1995), s. 245-251.
10. Sokólski W., Żakowski K.: Potencjał stacjonarny konstrukcji w strefach oddziaływania prądów błądzących, Mat. Ogólnopolskiego Sympozjum Naukowo - Technicznego „Nowe osiągnięcia w badaniach i inżynierii korozyjnej”, Poraj, (1995), s. 212-217.