



**POMIARY POLA ELEKTRYCZNEGO W OCENIE
ZAGROŻENIA KOROZYJNEGO JEDNOSTEK PŁYWAJĄCYCH**
**MEASUREMENTS OF SHIP ELECTRICAL FIELD USED
IN EVALUATION CORROSION HAZARDS**

Krzysztof Dymarkowski
Ośrodek Badawczo Rozwojowy
Centrum Techniki Morskiej
81-109 Gdynia ul. Dickmana 62

Słowa kluczowe: pole elektryczne, zagrożenie korozyjne, pomiar
Keywords: electrical field, corrosion hazard, measurement

Streszczenie

Przedstawiono problemy wyznaczania pola elektrycznego metalowych konstrukcji występującego na tle zmienności pola elektrycznego środowiska. Opisano właściwości fizykochemiczne środowiska. Pokazano źródła i rodzaje zakłóceń pola elektrycznego. Zaprezentowano podstawowe właściwości pola elektrycznego. Opisano związek pomiędzy prądem korozyjnym a rozkładem pola elektrycznego. Zaprezentowano dynamiczne metody pomiarów pola elektrycznego okrętów. Zwrócono uwagę na sposoby ograniczania zakłóceń w układach pomiarowych.

Summary

The measuring method of characteristic parameters of the ship's electrical field allowing to determine them, with satisfactory accuracy, for the purpose of disturbance comparable with the measured signal is specified. Physical features of environment has been described. The source and type of disturbance have been shown. The basic features of electrical field has been presented. The connection between corrosion current and distribution schedule of electric field has been described. Dynamic methods of measurements of the ship's electrical field are presented. Attention has been paid to noise suppression procedures in measuring systems.

1 Wstęp

Ocena zagrożenia korozyjnego metalowych konstrukcji jakimi są jednostki pływające, w środowisku elektrolitycznym możliwa jest na podstawie metod bezpośrednich (pomiar potencjału elektrochemicznego) i pośrednich (pomiar wielkości opisujących pole elektryczne) - rys. 1.

W tym celu wykorzystuje się szereg bezpośrednich metod pomiarów potencjału elektrochemicznego uwzględniających występowanie zakłóceń (np. prądów błądzących). Należy do nich metoda mostkowa, przełączeniowa czy metoda elektrody symulującej.

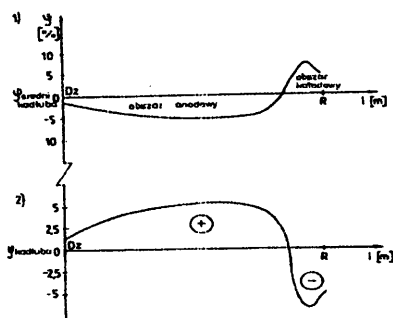
Praktyczne zastosowanie znajduje również wiele metod pozwalających na eliminowanie zakłócenia definiowanego w elektrochemii jako tzw. składowa IR.

Znana jest również metoda oparta na jednoczesnym pomiarze potencjału elektrochemicznego w dostępnych punktach metalowej konstrukcji i potencjału pola lub jego gradientu. Pomiar potencjału konstrukcji na całej długości wyznaczany jest na drodze analitycznej. Metoda stosowana jest szczególnie do badań konstrukcji trudnodostępnych np. do określania potencjału elektrochemicznego rurociągów ułożonych na dnie morskim.

W metodzie pośredniej wyznacza się potencjał pola jako różnicę potencjałów pola elektrycznego względem wartości potencjału pola w nieskończoności.

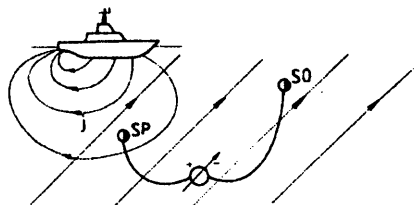
W praktyce pomiar potencjału przepływowego pola prądu elektrycznego polega na porównaniu potencjału czujnika umieszczonego w obszarze występowania pola elektrycznego okrętu z potencjałem czujnika umieszczonego poza tym obszarem (Rys.2).

Pole to w warunkach morskich występuje, podobnie jak potencjał elektrochemiczny kadłuba jednostki pływającej, na tle zakłóceń. Oprócz technik wyznaczania parametrów pola niezbędne są zatem rozwiązania zmierzające do ograniczenia wpływu zakłóceń na mierzone parametry pola jednostki pływającej.



Rys.1. Wzdłużne rozkłady potencjału elektrycznego jednostki pływającej:

- 1 - potencjał elektrochemiczny kadłuba jednostki pływającej,
- 2 - potencjał przepływowego pola prądu elektrycznego jednostki pływającej



Rys.2. Układ podstawowy do pomiarów potencjału przepływowego pola prądu elektrycznego jednostek pływających

2 Przepływowe pole prądu elektrycznego wytwarzane przez jednostkę pływającą

Przepływowe pole prądu elektrycznego jako jedno z pól fizycznych wytwarzanych przez jednostki pływające opisują ogólnie znane z elektrotechniki równania Maxwella:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0},$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0,$$

gdzie:

- \mathbf{E} - natężenie pola elektrycznego,
- ρ - gęstość ładunku,
- ϵ_0 - przenikalność elektryczna.

Przy wykorzystaniu liniowości równań wyrażenie na potencjał przepływowego pola elektrycznego w punkcie (n), gdy znana jest gęstość prądu \mathbf{j} , przyjmuje postać:

$$\varphi(n) = \frac{1}{4\pi\gamma} \int \frac{j(m) dS_m}{r_{nm}}.$$

gdzie:

- $j(m)$ - gęstość prądu wypływającego prostopadle do powierzchni S w punkcie (x, y, z) ,
- dS_m - element powierzchni (m),
- r_{nm} - odległość między punktami (n) i (m).

Wyznaczenie potencjału sprowadza się zatem do obliczenia całki powierzchniowej z gęstości prądu $j(x,y,z)$ przy ustalonej odległości r_{nm} , a potencjał jest funkcją trzech zmiennych:

$$\varphi = f(I, \gamma, r).$$

Rozpatrując pole wytwarzane przez jednostkę pływającą można zatem założyć, że rozkład przepływowego pola elektrycznego okrętu zależy od wartości natężenia prądu elektrycznego (I) płynącego przez elektrolit o konduktywności (γ). Jest on uzależniony również od geometrii układu źródeł i punktu obserwacji (r).

3 Właściwości pola geoelektrycznego w środowisku wody morskiej

W pomiarach pola elektrycznego jednostek pływających zakłada się, że elektrolit jakim jest woda morska stanowi środowisko jednorodne i liniowe. Oznacza to, że konduktywność γ dla rozpatrywanego obszaru nie zależy od współrzędnych punktu. Znaczący to również, że wektor gęstości prądu liniowo zależy od natężenia pola. Ponieważ elektrolit jest środowiskiem dyspersyjnym, to jego konduktywność zależy od częstotliwości. Woda morska przy przepływie prądu stałego lub przy przepływie prądu o częstotliwości sieciowej ($f = 50$ Hz) zachowuje się tak, jak przewodnik. Przy częstotliwościach radiowych rzędu MHz należy ją traktować jako dielektryk.

Na podstawie obserwacji zakłóceń występujących jako wahania pola elektrycznego stwierdza się, że reprezentujący je sygnał zmienności jest zmienną losową ciągłą.

Właściwości procesu stochastycznego zmiennej losowej mogą być opisane nie tylko przy pomocy gęstości prawdopodobieństwa, ale również przy pomocy parametrów liczbowych, jakimi są wartość średniokwadratowa czy funkcja korelacji lub funkcja widmowej gęstości mocy.

W praktyce mamy najczęściej do czynienia z przypadkiem, kiedy wartość średnia w czasie funkcji zbioru zmienności jest stałą i równa się zero. Podobnie jak wartość średnia, wariancja stacjonarnego procesu stochastycznego jest stała.

Przy założeniu, iż wartość średnia sygnału jest różna od zera gęstość prawdopodobieństwa określana jest wzorem Gaussa:

$$p(z) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(z - \bar{z})^2}{2\sigma_z^2} \right]$$

gdzie:

σ_z - wartość odchyłki standardowej zmienności pola,

z - wartość chwilowa zmienności pola,

\bar{z} - wartość średnia zmienności pola.

Problem wyznaczania pola okrętu na tle zmienności pola geoelektrycznego można sprowadzić do zagadnienia znalezienia prawdopodobieństwa wykonania pomiaru, podczas którego poziom sygnału zmienności nie przekroczy określonej granicy. Prawdopodobieństwo można wyznaczyć z zależności:

$$P(a < z < b) = F(b) - F(a)$$

jako różnicę dystrybuant w punktach granicznych przedziału.

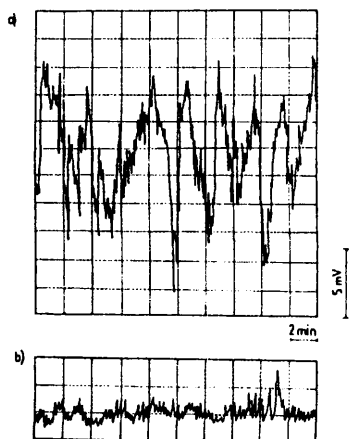
4 Metody ograniczania zakłóceń w układach do pomiarów przepływowego pola elektrycznego jednostek pływających

Występujące w warunkach naturalnych zakłócenia to przede wszystkim wahania pola mające swe źródło w naturze zjawiska pola tellurycznego. Zakłócenia pola jednostek pływających są również wynikiem istnienia prądów błądzących. W technice pomiarowej skuteczne odseparowanie sygnału mierzonego pola jednostek pływających od sygnału zmienności pola geoelektrycznego jest trudne. Istnieją jednak metody pomiarowe umożliwiające pomiar pól jednostek pływających na tle zmienności przepływowego pola prądu elektrycznego.

4.1 Bierne ograniczanie zakłóceń pola elektrycznego

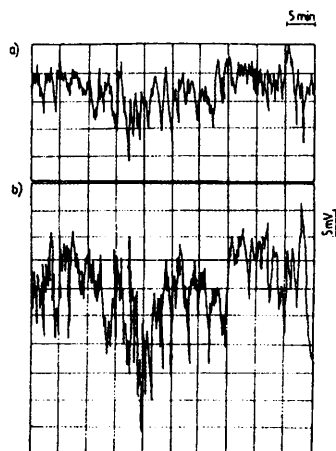
Metody bierne bazują na właściwościach pola geoelektrycznego przejawiających się różną intensywnością występowania zakłóceń, zależną od pory dnia, pory roku oraz od rejonów badań. Jako przykład na rys.3. przedstawiono zmienności pola geoelektrycznego występujące w strefie brzegowej Zatoki Gdańskiej w różnych porach doby.

Rysunek 4 przedstawia wahania pola zmierzone w strefie brzegowej na dwóch prostopadłych kierunkach geograficznych E-W i N-S.



Rys.3. Oscylogram zmienności pola elektrycznego występujących w strefie brzegowej Zatoki Gdańskiej:

- a) zmienności pola zarejestrowane w porze "dziennej",
- b) zmienności pola zarejestrowane w porze "nocnej"



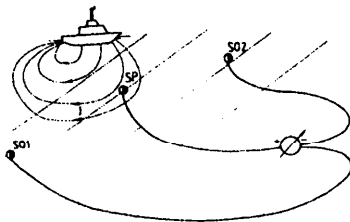
Rys.4. Oscylogram zmienności pola elektrycznego występujących na dwóch kierunkach geograficznych strefy brzegowej Zatoki Gdańskiej:

- a) kierunek E-W,
- b) kierunek N-S

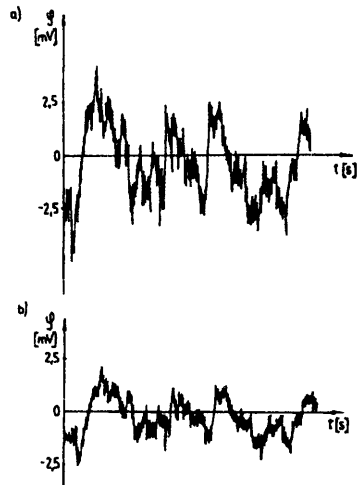
Fakt, że pole zakłóceń posiada wyróżnione kierunki charakteryzujące się odmiennym poziomem zmienności, znalazł zastosowanie w wielu rozwiązaniach układów pomiarowych. Przykładem może być między innymi układ pomiarowy przedstawiony na rys.5. Układ składa się z trzech czujników. Dwa z nich, pełniące rolę czujników odniesienia, umieszcza się w obszarach leżących po przeciwnych stronach płaszczyzny przechodzącej przez punkt usytuowania czujnika pomiarowego SP. Odległości między czujnikami SP-SO1 oraz SP-SO2 dobiera się tak, aby sygnał zmienności pola był jak najmniejszy. Na rys.6. przedstawiono oscylogramy zmienności występujących przy pomiarach potencjału pola elektrycznego jednostek pływających mierzonych w układzie podstawowym (Rys.2) oraz w układzie z kompensacją zakłóceń pola (Rys.5).

4.2 Czynne ograniczanie zakłóceń pola elektrycznego

Trudności z dopasowaniem odległości pomiędzy czujnikami odniesienia a czujnikiem pomiarowym, zmieniające się w czasie położenie uprzywilejowanych kierunków zmienności pola oraz wymagana wielkość obszaru zajmowanego przez układ pomiarowy (Rys.5), spowodowały powstanie układu aktywnie dopasowującego mierzone sygnały do zmieniających się warunków zewnętrznych. Przestrzenną konfigurację układu pokazano na rys.7. Układ pomiarowy zbudowano z dwóch czujników odniesienia oraz z czujnika pomiarowego. Jeden z czujników odniesienia połączono z masą układu pomiarowego, drugi zaś z wejściem wzmacniacza



Rys.5. Układ do pomiarów potencjału pola elektrycznego z kompensacją zmienności pola bez przetwarzania sygnału zmienności



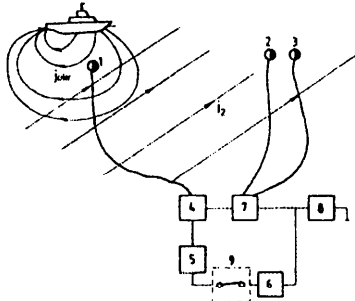
Rys.6. Oscylogram zmienności pola elektrycznego występujących w układach do pomiaru potencjału pola elektrycznego jednostki pływającej:

- a) układ podstawowy,
- b) układ z kompensacją zakłóceń pola bez przetwarzania sygnału zmienności

połączonego z jednym z wejść sumatora. Do drugiego wejścia sumatora podłączono czujnik pomiarowy. Wyjście sumatora połączone z przyrządem pomiarowym oraz poprzez układ sprzężenia zwrotnego ze wzmacniaczem pomiarowym. Przetworzony we wzmacniaczu sygnał dopasowywany jest w sumatorze do sygnału mierzonego czujnikiem pomiarowym względem czujnika podawanego na masę układu tak, aby na wyjściu układu osiągnąć wartość minimalną. Do wysterowania wzmacniacza wykorzystywano sygnał wyjściowy podawany pętlą sprzężenia zwrotnego. W chwili wykonywania pomiaru pola okrętu pętlę sprzężenia zwrotnego przerywa się a wzmocnienie wzmacniacza podtrzymuje się ze źródła napięcia zewnętrznego. Oscylogramy zmienności pola elektrycznego w układzie podstawowym oraz w układzie z kompensacją zmienności pola metodą przetwarzania sygnału pokazano na rys.8.

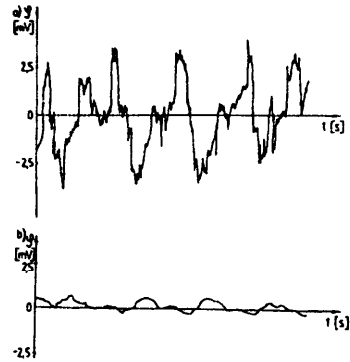
Zwiększenie dokładności pomiarów pola elektrycznego pozwoliło między innymi na monitorowanie poprawności działania okrętowych systemów ochrony katodowej, w tym na ocenę pracy zwieraczy wałów (Rys.9).

W tabelicy 1 przedstawiono porównanie skuteczności ograniczania zmienności pola w omówionych układach. Wyniki badań z przetwarzaniem zmienności pola odniesiono do zakłóceń mierzonych w układzie podstawowym. Jako parametr do porównań przyjęto odchyłkę standardową σ .

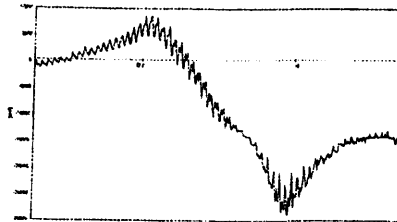


Rys.7. Układ do pomiarów potencjału pola elektrycznego z aktywną kompensacją zmienności pola:

- 1 - czujnik pomiarowy będący w strefie oddziaływania pola jednostki pływającej,
- 2,3 - czujniki odniesienia umieszczone poza strefą oddziaływania jednostki pływającej,
- 4 - wzmacniacz pomiarowy,
- 5 - źródło napięcia,
- 6 - blok sprzężenia zwrotnego,
- 7 - sumator,
- 8 - przyrząd pomiarowy,
- 9 - zwieracz



Rys.8. Oscylogram zmienności pola występujących w układach do pomiaru potencjału pola elektrycznego jednostki pływającej:
a) układ podstawowy,
b) układ z kompensacją zakłóceń pola z przetwarzaniem sygnału zmienności pola



Rys.9. Wzdłużny rozkład potencjału pola elektrycznego jednostki pływającej z wadliwie pracującym zwieraczem wałów

Tablica 1. Porównanie zmienności przepływowego pola elektrycznego występujących w układach pomiarowych

Rodzaj układu	Poziom zakłóceń [%]
Układ podstawowy wg rys. 2	100
Układ z kompensacją zakłóceń pola bez przetwarzania sygnału zmienności pola wg rys. 5	50
Układ z kompensacją zakłóceń pola z przetwarzaniem zmienności pola wg rys. 7	5

5 Podsumowanie

Ograniczenie wpływu zmienności zakłócającego pola elektrycznego na pole jednostki pływającej możliwe jest poprzez:

- prowadzenie pomiarów w wybranych porach doby np. w porze „nocnej” (Rys.3) i różnych kierunkach geograficznych np. na kierunku E-W (Rys.4),
- wykorzystywanie układów przetwarzających sygnał zmienności pola elektrycznego.

Zwiększenie dokładności pomiarów pola elektrycznego pozwala na:

- określanie obszarów anodowych i katodowych, ich ilości oraz miejsc występowania;
- ocenę poprawności działania okrętowych systemów ochrony katodowej np. uszkodzenia zwieraczy wałów (Rys.9).

Literatura

1. Baeckmann W.v., Schwenk W.: Katodowa ochrona metali. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1976.
2. Dymarkowski K., Cichocki R.: Ocena możliwości pomiarów obiektów generujących prąd elektryczny w strefie oddziaływania wariacji przepływowego pola prądu elektrycznego. Zeszyty Naukowe WSMW nr 4/87/85, str. 5-16.
3. Dymarkowski K., Tomaszek A., Zając R.: Sposób pomiaru pola elektrycznego obiektu pływającego, zwłaszcza w środowisku elektrolitycznym Patent 287 431.
4. Dymarkowski K.: Układy do minimalizacji zakłóceń przy pomiarach przepływowego pola prądu elektrycznego. Zeszyty Naukowe WSMW Nr 3/78 1983.
5. Dymarkowski K., Zając R., Tomaszek A.: Sposób i układ do pomiaru potencjału konstrukcji metalowych w środowisku elektrolitycznym Patent 283 853.
6. Pomiarzy korozyjne w ochronie elektrochemicznej. Konferencja Naukowo - Techniczna, Słupsk 1980.
7. Zając R., Dymarkowski K.: Sposób i układ do pomiaru pola przepływowego z ograniczeniem sygnałów pasożytniczych zwłaszcza w środowisku elektrolitycznym. Patent 146906.
8. Zając R., Dymarkowski K.: Sposób i układ do pomiaru potencjału przepływowego pola prądu elektrycznego, zwłaszcza w środowisku elektrolitycznym przy obecności sygnałów pasożytniczych przy pomiarach wielkości fizycznych wykonywanych metodami elektrycznymi. Patent 131541.