

## KWADRATOWE SONDOWANIE ELEKTROOPOROWE

UKD 550.837.31(kwadratowe).01.056(438)

Pod pojęciem kwadratowego sondowania elektrooporowego (w skrócie — KSE) rozumiane jest sondowanie o konfiguracji układu dipolowego, przy czym elektrody tego układu zawsze tworzą kwadrat. Pomiary wykonuje się tu w 3 możliwych kombinacjach układu: 2 — dipolowych wzajemnie prostopadłych ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) i 1 — odpowiadającej krzyżowemu ustawieniu dipoli ( $\gamma$ ). W odróżnieniu od klasycznych sondowań liniowych, takich jak np. układy Schlumbergera czy Wennera, KSE charakteryzuje się tym, że mierzone właściwe oporności pozorne są w zasadzie niezależne od kierunku badania.

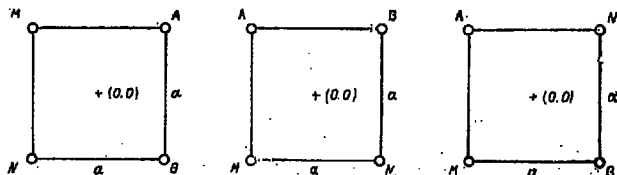
Autorzy pragną przedstawić KSE na podstawie własnych badań, od strony metodycznej, jak i przydatności do badań geoelektrycznych. Pierwsze sondowania tego typu wykonano w Polsce przez Dział Geofizyki Stosowanej przy Przedsiębiorstwie Geologicznym w Kielcach. Pomiary polowe (napięcia, natężenia) poddano skomplikowanej obróbce matematycznej na elektronicznej maszynie cyfrowej „Odra 1304” w języku Algol-ICL. W wyniku tych obliczeń oprócz końcowych pozornych oporności właściwych otrzymano również pośrednie dane cząstkowe, które pozwoliły na głębszą analizę powyższych sondowań.

Na wstępie przedstawiono podstawy teoretyczne KSE (wg G. M. Habberjama i G. E. Watkinsa; 2), a następnie przedyskutowano praktyczną stronę sondowania. Na podkreślenie zasługuje fakt, że podstawy teoretyczne tej nowej metody są z kolei związane z teorią tzw. 3 potencjałów, opracowaną w latach pięćdziesiątych przez E. W. Carpentera i G. M. Habberjama (1).

### OPIS METODY

Nad danym punktem w terenie wykonuje się pomiary (napięcia, natężenia) wg 3 konfiguracji  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  układu kwadratowego (ryc. 1). Krok pomiarowy jest równy  $a\sqrt{2}$ .

konfiguracja  $\alpha$  konfiguracja  $\beta$  konfiguracja  $\gamma$



Ryc. 1. Konfiguracje kwadratowego sondowania elektrooporowego.

Fig. 1. The square configurations of electrodes.

Z każdej konfiguracji otrzymuje się opory  $R_\alpha$ ,  $R_\beta$ ,  $R_\gamma$ .

$$R_\alpha(k) = \frac{V_\alpha(k)}{I_\alpha(k)}, \quad R_\beta(k) = \frac{V_\beta(k)}{I_\beta(k)}, \quad R_\gamma(k) = \frac{V_\gamma(k)}{I_\gamma(k)} \quad [1]$$

przy czym  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$ ,  $V_\gamma$  — napięcie prądu:  $I_\alpha$ ,  $I_\beta$ ,  $I_\gamma$  — natężenie prądu.

Opory te powinny spełniać zależność

$$R_\alpha = R_\beta + R_\gamma \quad [2]$$

W przypadku ośrodka izotropowego  $R_\gamma = 0$ . Niedokładności pomiarowe, jak i zakłócenia typu naturalnego powodują, że w takich przypadkach bardzo często  $R_\alpha \neq R_\beta$ . Według autorów najbardziej reprezentatywny wydaje się opór średni  $R$ .

$$R = \frac{R_\alpha + R_\beta}{2} \quad [3]$$

Mnożąc średni opór przez współczynnik geometryczny  $K$  uzyskuje się wartość średniej pozornej oporności właściwej.

$$\rho = \frac{\pi \cdot a}{2 - \sqrt{2}} (R_\alpha + R_\beta) \quad [4]$$

Mimo uśredniania, wartości  $\rho$  są obarczone błędami. W celu poprawienia tych wartości wprowadza się rysunek wyrównawczy. Pierwsze wyrównanie polega na badaniu warunku (nierówność [8] dla drugich pochodnych względnego rozkładu potencjału  $\phi(k)$ ). Rozkład ten można obliczyć korzystając z zasady

$$\frac{R_\alpha(k) + R_\beta(k)}{2} = 2[\phi(k) - \phi(k+1)] = R(k) \quad [5]$$

skąd

$$\phi(k+1) = \phi(k) - \frac{R(k)}{2} \quad [6]$$

Jeżeli na  $\phi(1)$  przyjmie się wartość np. 1000 i sukcesywnie odejmować się będzie kolejne wartości  $R(k)/2$ , to otrzyma się szukany względny rozkład potencjałów. Drugie pochodne oblicza się wg wzoru

$$S_k = \frac{R(k)}{\frac{k-1}{2}} \quad [7]$$

Drugie pochodne powinny spełniać nierówności

$$S_1 > S_2 > S_3 \dots > S_{k-1} > S_k \quad [8]$$

W przypadku niespełnienia nierówności w jakimkolwiek miejscu wprowadza się poprawkę.

$$S_k = S_{k+1} = \frac{R(k) + R(k+1)}{2 \cdot \frac{k-1}{2} (1 + \sqrt{2})} \quad [9]$$

Z poprawionych wartości drugich pochodnych ponownie oblicza się różnice potencjałów, a następnie rozkład potencjału, który poddaje się drugiemu etapowi wyrównawczemu. Rozkład potencjału wyrównuje się metodą trójpunktową.

$$\phi_w(k) = 0.207 \phi(k-1) + 0.5 \phi(k) + 0.293 \phi(k+1) \quad [10]$$

Z poprawionych wartości względnego rozkładu potencjału oblicza się poprawione wartości oporności.

$$\rho_p(k) = \frac{4 \pi \cdot a}{2 - \sqrt{2}} [\phi(k) - \phi(k+1)] \quad [11]$$

Korzystając z zależności między układami można wartości oporności przedstawić w układzie Wennera lub Schlumbergera.

1.414a			
A	M	N	B układ kwadratowy
1.610a			
0.805a			
A	M	N	B układ Wennera
1.207a			
A	M	N	B układ Schlumbergera

Ekwiwalentne rozstawy  $\frac{AB_w(k)}{2}$  układu Wennera oraz  $\frac{AB_s(k)}{2}$  układu Schlumbergera oblicza się wg wzorów:

$$\frac{AB_w(k)}{2} = 0.805 \cdot a(k) \quad [12]$$

$$\frac{AB_s(k)}{2} = 1.207 \cdot a(k) \quad [13]$$

Opory  $R_\alpha$ ,  $R_\beta$ ,  $R_\gamma$  stosuje się jeszcze do obliczenia współczynnika niejednorodności  $\sigma$ .

$$\sigma = \left[ \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{k=K} \left( \frac{2R_\gamma(k)}{R_\alpha(k) + R_\beta(k)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad [14]$$

W wyniku przeprowadzenia tych wszystkich obliczeń matematycznych otrzymuje się krzywą oporności pozornej, którą poddaje się interpretacji za pomocą albumów krzywych teoretycznych dla układu Wennera lub Schlumbergera. Wartość współczynnika niejednorodności stanowi natomiast informację jakościową o niejednorodności utworów geologicznych.

#### PROPONOWANA OBRÓBKA MATERIAŁÓW POMIAROWYCH

Na podstawie wymienionych przesłanek teoretycznych G. M. Habberjama i G. E. Watkina wykonano w rejonie Okuniewa ponad 30 KSE. Następnie opracowano program na EMC w języku Algol-ICL i przeliczono wszystkie wykonane sondowania. Główną konstrukcją programu na EMC były algorytmy podane przez autorów metody. Kolejnymi czynnościami procedury są:

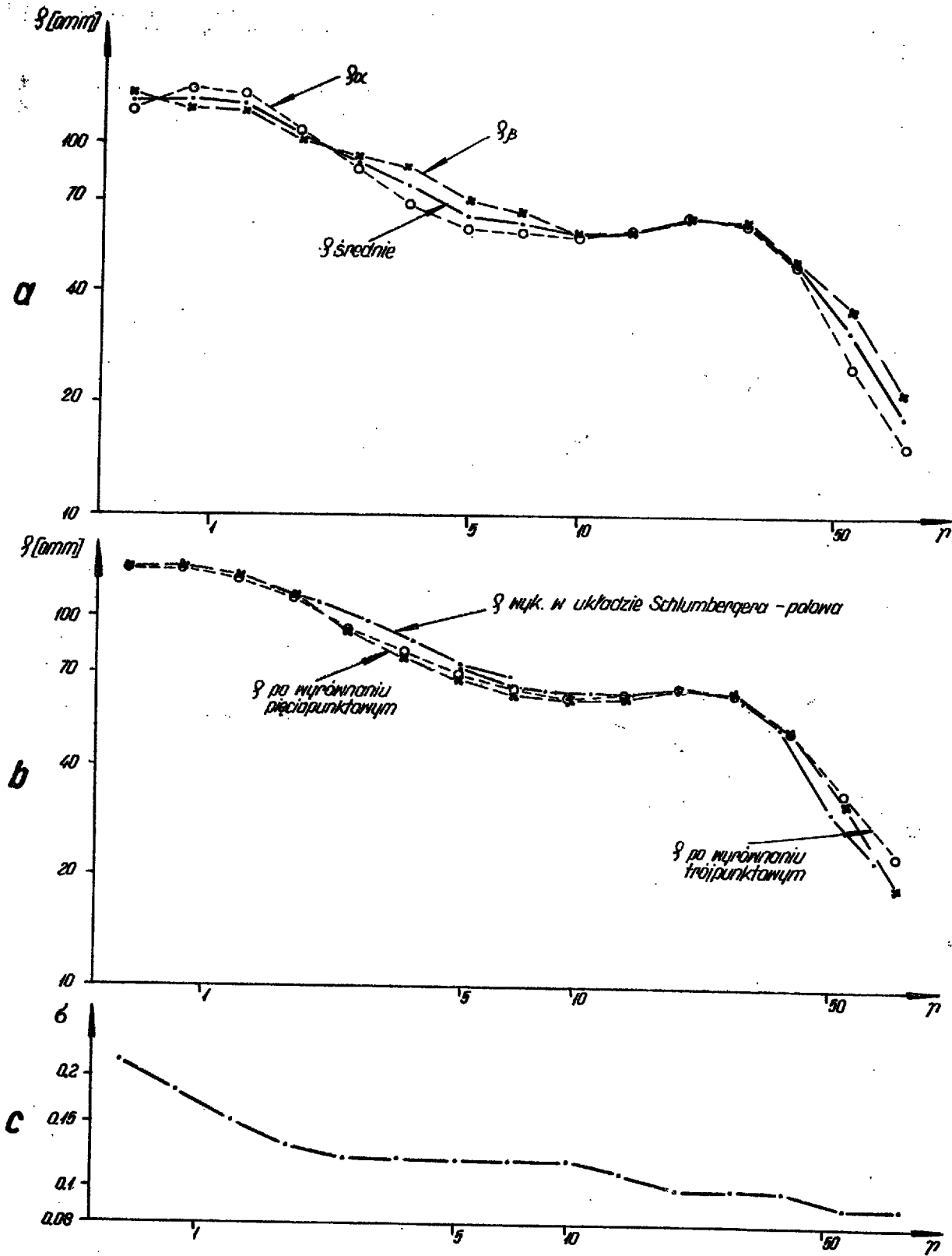
- 1) obliczanie krzywych oporności właściwych
- 2) uśrednianie ww. krzywych,
- 3) obliczanie względnego rozkładu potencjałów,
- 4) obliczanie drugich pochodnych względnego rozkładu potencjałów,
- 5) sprawdzanie warunku dla drugich pochodnych i ewentualne wprowadzanie poprawek,
- 6) wyrównywanie trójpunktowe względnego rozkładu potencjałów,
- 7) obliczanie końcowej krzywej pozornej oporności właściwej,
- 8) obliczanie wartości współczynnika niejednorodności,
- 9) ekwiwalentne rozstawy dla układu Wennera i Schlumbergera. Dodatkowo do programu wprowadzono:
- 10) wyrównywanie pięciopunktowe względnego rozkładu potencjałów niezależnie od wyrównywania trójpunktowego,
- 11) obliczanie współczynnika niejednorodności dla każdego rozstawu  $a$ .

W wyniku tych obliczeń na EMC uzyskano tabulogramy wynikowe, które przedstawiają wszystkie obliczenia główne oraz pomocnicze (opory  $R_\alpha$ ,  $R_\beta$ ,  $R_\gamma$ , drugie pochodne i in.). Przedstawiona poniżej analiza metodyczna KSE opiera się wyłącznie na badaniach własnych. Proponowane zmiany i uzupełnienia w procedurze obliczeń, które wg autorów pozwolą na ulepszenie metody KSE nie zostały jeszcze oprogramowane.

#### ANALIZA OBLICZEŃ POMOCNICZYCH KSE

Kwadratowe sondowanie elektrooporowe, ze względu na skomplikowaną obróbkę matematyczną, powinno być przetwarzane na maszynie cyfrowej. Wydaje się więc słuszne prześledzenie KSE pod względem jego oprogramowania na EMC. Przebieg obliczeń podany przez autorów metody nie zawsze jest słuszny i dla celów oprogramowania efektywny.

Zasadniczym zadaniem uśredniania krzywych  $\rho_\alpha$  i  $\rho_\gamma$  jest zmniejszenie wpływu niejednorodności ośrodka oraz rozrzucenie małych błędów przypadko-



Ryc. 2 i 3. Przykłady wykresów sondowań kwadratowych wykonanych w rejonie Okuniewa w latach 1973—74. Ryc. 2. Sondowanie kwadratowe GSEK wykonane w miejscu o małym poziomie średnich wartości współczynnika niejednorodności  $\rho$  z głębokością.

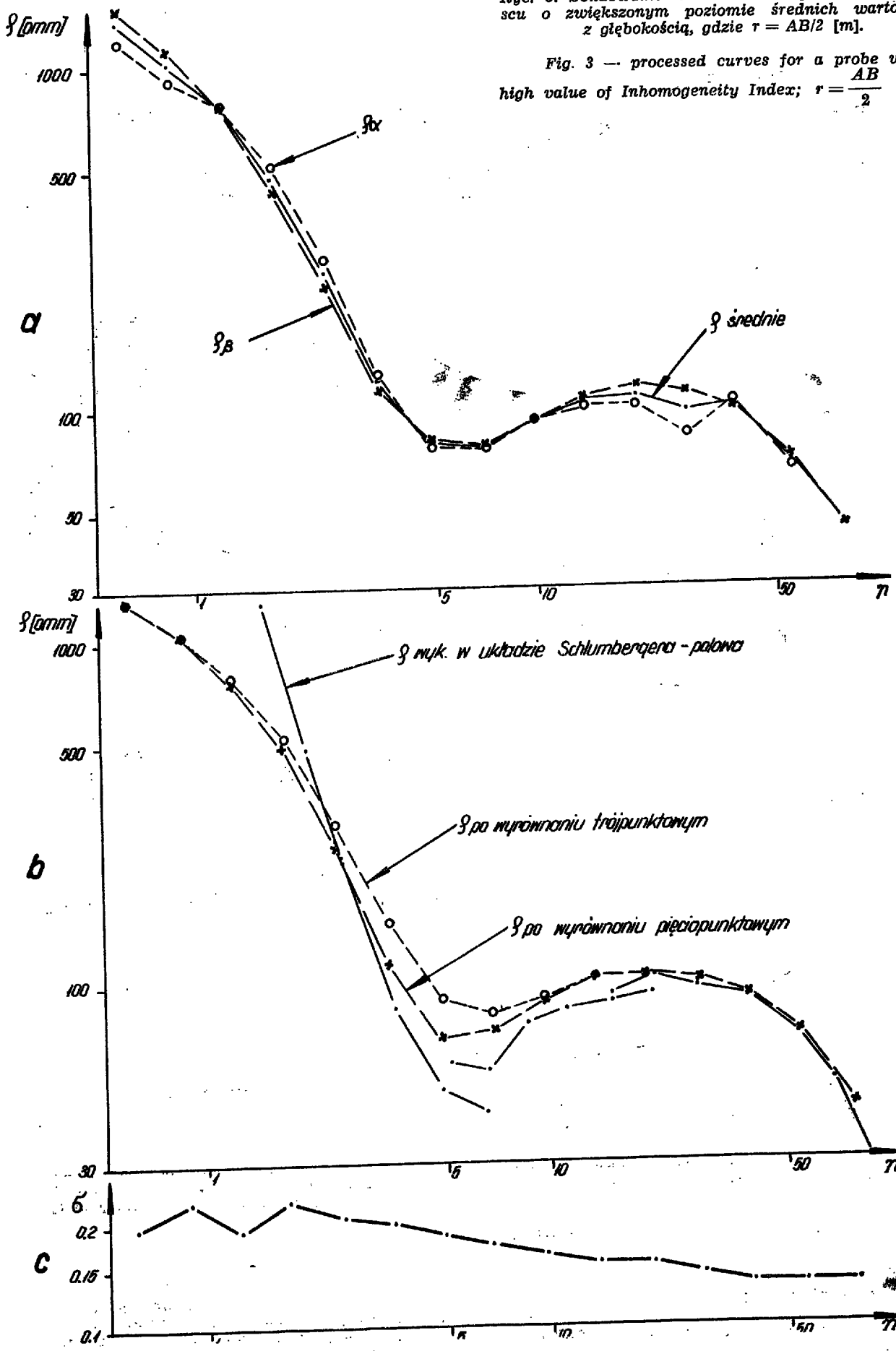
Fig. 2—3. Practical examples of the square soundings carried out near Okuniew. Fig. 2 — processed curves for a probe with a low value of Inhomogeneity Index.

wych na sąsiednie punkty. Przy pomiarach połowych wykonywanych poprawnie procedura uśredniania jest w pełni uzasadniona i daje oczekiwany efekt. W przypadku jednak choćby jednego większego błędu pomiarowego uśrednianie zmniejszy wprawdzie jego

wpływ, ale i tak krzywa wynikowa będzie obciążona fałszywą informacją. Dalsze wyrównywanie wygładzi krzywą oporności, ale błąd ten będzie na niej tkwić w postaci rozrzuconej i utajonej. Wydaje się więc słuszne przeprowadzenie wstępnej eliminacji

Ryc. 3. Sondowanie kwadratowe wykonane w miejscu o zwiększonym poziomie średnich wartości  $\rho$  z głębokością, gdzie  $r = AB/2$  [m].

Fig. 3 — processed curves for a probe with a high value of Inhomogeneity Index;  $r = \frac{AB}{2}$  [m].



dużych błędów pomiarowych już na krzywych połowych  $q_\alpha$  i  $q_\gamma$ . Powinna ona być tak zaprogramowana, aby likwidowanie błędów odbywało się w sposób automatyczny po wprowadzeniu pomiarów połowych do EMC. Zmiana ta poprawi w procedurze obliczeń przede wszystkim jakość krzywej wynikowej (oporności) i usprawni działanie całego systemu obliczeniowego.

Opracowanie algorytmu na EMC dla automatycznego oczyszczania krzywej z błędów jest trudne i obecnie jeszcze nie w pełni ukończony. Stosowanie natomiast wyrównywania trójpunktowego czy pięciopunktowego nie może być brane pod uwagę ze względu na rozrzucanie błędów na sąsiednie punkty. Autorzy proponują następujące rozwiązanie tego problemu. Krzywą połową ( $q_\alpha$ ,  $q_\gamma$ ) należy aproksymować wielomianem  $k$ -stopnia, w którym wartość  $k$  zależy od typu krzywej.

$$q_T(n) = a_0 x^k + a_1 x^{k-1} + a_2 x^{k-2} + \dots + a_{k-1} x + a_k \quad [15]$$

gdzie:

$q_T(n)$  — wartość funkcji aproksymowanej dla danego rozstawu. Współczynniki  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_k$  oblicza się za pomocą metody najmniejszych kwadratów C. F. Gaussa. Następnie oblicza się kolejne różnice wg wzoru

$$\Delta q(n) = [q_T(n) - q_P(n)] \quad [16]$$

gdzie:

$q_T(n)$  — wartość funkcji aproksymowanej dla danego rozstawu,

$q_P(n)$  — wartość oporności na krzywej połowej dla danego rozstawu,

$n$  — numer kolejnego rozstawu.

W pamięci maszyny przechowywane są wszystkie różnice dla danej krzywej. Układ logiczny EMC wybiera te punkty, dla których wartość  $\Delta q(n)$  jest największa. Istnieje największe prawdopodobieństwo, że właśnie te punkty są obciążone błędem. Maszyna sama automatycznie odrzuca błędy wprowadzając wartości interpolowane względnie ekstrapolowane. Inną odmianą tej procedury może być kontrola z zewnątrz wielkości odchyłki. Tam, gdzie zadana wartość zostaje przekroczone EMC wprowadza poprawki. Eliminowanie błędów już na krzywych połowych wydaje się najwłaściwsze. Główną zaletą tej procedury jest nienaruszanie punktów, które nie są obciążane błędem.

Po wstępnej eliminacji błędów pomiarowych stosowanie propagowanej przez G. M. Hæbberjama i G. E. Watkina metody wyrównywania względnego rozkładu potencjałów przez sprawdzenie warunku dla drugich pochodnych, t.j.  $S_1 > S_2 > \dots > S_{k-1} > S_k$  nie jest już konieczne. Ze względu na odmienną w sposobie eliminowania błędów należy to zagadnienie omówić szerzej.

Eliminowanie błędów na krzywej przez sprawdzanie warunku dla drugich pochodnych jest oparte na zależnościach fizycznych, w odróżnieniu od wyrównywania trójpunktowego czy pięciopunktowego, które jest czysto matematyczną spekulacją. Wydawać się może, że podwyższa metoda jest najbardziej słuszną; wykonana przez nas analiza wykazała, że jest ona za mało czuła. Niespełnianie warunku dla drugich pochodnych zachodzi dopiero w przypadku bardzo dużych błędów.

Przedstawiony sposób usuwania błędów w przypadku niespełnienia warunku dla drugich pochodnych (patrz wzór [9]) jest zatem dużym nieporozumieniem. Jak wynika z przedstawionego wzoru [9] błąd rozrzucany jest na sąsiednie punkty. Dalsze wyrównywanie wygładza krzywą, ale błąd pozostaje na krzywej, tylko rozciągnięty na dalsze punkty. Z takiego rozumowania wynika, że eliminowanie błędów za pomocą omawianej metody jest metodycznie słuszne, jeżeli wprowadzi się następujące zmiany w tej procedurze: poprawi czułość metody i zastąpi usrednianie drugich pochodnych eliminowaniem błędów tam, gdzie on faktycznie występuje.

Wartość współczynnika niejednorodności obrazuje badany ośrodek jakościowo. Informacja ta ma duże znaczenie przy identyfikacji ośrodka geologicznego oraz przy interpretacji KSE. Opracowany na EMC program oblicza omawiany współczynnik dla każdego kolejnego rozstawu układu pomiarowego. Dzięki tym obliczeniom istnieje możliwość wykreślenia rozkładu niejednorodności w zależności od głębokości śledzenia. Poszczególne punkty krzywej niejednorodności, tj. współczynnika  $q$  oblicza się wg wzoru [14]. Sumując powyższą analizę proponuje się następującą kolejność obliczeń pomocniczych:

- obliczanie krzywych połowych  $q_\alpha$  i  $q_\gamma$ ,
- przeprowadzanie wstępnej eliminacji błędów z krzywych połowych,
- usrednianie poprawionych krzywych połowych,
- wyrównywanie trójpunktowe krzywej średniej (można pominać),
- obliczanie rozkładu współczynnika niejednorodności na podstawie poprawionych krzywych połowych.

Na ryc. 2 i 3 przedstawiono 2 przykłady sondowań kwadratowych KSE. Wybrano je z większego zestawu sondowań wykonanych w rejonie Okuniewa w ramach prac doświadczalnych. Odzwierciedlają one odmiennie cechy fizyczne ośrodków dla jednego i drugiego sondowania. Dla każdego z sondowań wykreślono krzywe połowe  $q_\alpha$  i  $q_\gamma$  na tle krzywej średniej (zestaw a) oraz krzywe kwadratowe wynikowe na tle konwencjonalnego sondowania GSE (zestaw b). Poniżej przedstawiono wykres rozkładu współczynnika niejednorodności (diagram c).

Na ryc. 2 należy zwrócić uwagę, że krzywa  $q_\alpha$  posiada bardzo płynny przebieg, natomiast na krzywej  $q_\beta$  widać wyraźnie błąd pomiarowy. Wskutek usrednienia błąd ten zmniejszył się, jednak w dalszym ciągu zaburza prawdziwy obraz geoelektryczny. Z krzywej średniej obliczono względny rozkład potencjałów i poddano go niezależnie wyrównaniu trójpunktowemu i pięciopunktowemu. W wyniku tych procedur uzyskano dwie krzywe oporności różniące się wyraźnie. Przy porównywaniu uzyskanych krzywych z przebiegiem krzywej GSE może się wydawać, że wyrównanie pięciopunktowe bardziej zbliża krzywą sondowania kwadratowego KSE do rzeczywistości. Rozumowanie to jest tylko pozornie słuszne.

W przypadku krzywych  $H$  o dużym gradientzie jednej gałęzi, wyrównanie pięciopunktowe zmniejszała punkty w minimum, przesuwając niektóre w dół. Zwiększony gradient krzywej po wyrównaniu pięciopunktowym tego sondowania należy uznać za przypadkowy i niczym nieuzasadniony.

Na rys. 3, ze względu na małą kontrastowość oraz dość dużą jednorodność ośrodka geologicznego w warstwach przypowierzchniowych zarówno krzywe połowe, jak i uzyskane drogą obliczeń prawie pokrywają się z krzywą otrzymaną w układzie Schlumbergera. Obrazem zmian niejednorodności wraz z głębokością jest krzywa  $q$ . Występujące na krzywej plateau należy wiązać ze zwiększoną niejednorodnością ośrodka na tej głębokości. Informację tę dodatkowo potwierdza rozbieżność się krzywych połowych  $q_\alpha$  i  $q_\gamma$  w punktach 5—9.

#### WNIOSKI

Z porównania materiału pomiarowego uzyskanego zarówno z sondowania klasycznego w układzie Schlumbergera GSE, jak i sondowania kwadratowego KSE wynikają wnioski odnośnie do przydatności omawianej metody dla perspektywy geofizycznej.

Wady metody KSE:

- 1) mniejsza kontrastowość w stosunku do sondowań klasycznych GSE;
- 2) minimum ulga przesunięciu w prawo względem minimum sondowania GSE;
- 3) rozbieżność w punktach początkowych względem sondowania klasycznego; co jest spowodowane głównie dipolowo-wennerowskim charakterem układu;
- 4) skomplikowana obróbka matematyczna, co w praktyce wymaga zastosowania EMC.

Zalety metody KSE:

- 1) sondowanie jest w zasadzie niezależne od trendu geologicznego;
- 2) mniejsza wrażliwość na niejednorodności przypowierzchniowe;
- 3) równoczesne otrzymywanie informacji o stopniu anizotropii ośrodka;
- 4) wykorzystanie EMC umożliwia dodatkowo dokonanie analizy w ramach poszczególnych etapów (procedur).

#### UWAGI OGÓLNE

Na zakończenie autorzy chcieliby zaznaczyć, że przedstawiona publikacja nie zamyka zagadnienia sondowań kwadratowych. Uważa się ją raczej za przyczynek do problemu. Wspomiane prace doświadczalne wykonano w warunkach przekroju czwartorzędowego, a więc szczególnie trudnego dla badań elektrooporowych. Dlatego też wskazane byłoby sprawdzenie tej metody w warunkach prostszego przekroju geologicznego, lecz o różnym stopniu skomplikowania dyslokacjami itp., przy czym obszar powinien być bardzo dobrze rozpoznany. Sprawą otwartą pozostaje również zagadnienie adaptacji pro-

#### SUMMARY

The paper presents the method of resistivity measurements involving the use of four electrodes set in a square array, and its theoretical background. The methodology of data preparation and processing and the applicability of this method for routine prospecting are briefly discussed.

filowania układem kwadratowym dla celów prospekcyjnych. Stosowanie ekwiwalentnych rozstawów układu Schlumbergera lub Wennera dla KSE nie zawsze jest słuszne. Do rozwiązania pozostaje więc zagadnienie transformacji krzywych sondowania kwadratowego KSE na krzywe w układzie Wennera lub Schlumbergera i odwrotnie. Można by też opracować specjalne nomogramy interpretacyjne dla sondowań kwadratowych lub znaleźć inne rozwiązanie problemu interpretacji.

#### LITERATURA

1. Carpenter E. W., Habberjam G. M. — A tri-potential method of resistivity prospecting, *Geophysies*, vol. XXI, no. 2, 1956.
2. Habberjam G. M. — The use of square configuration in resistivity prospecting, *Geoph. Prosp.*, vol. XV, no. 3, 1967.
3. Kalitiuk R., Porębski P., Tracz A. — Dokumentacja geoelektrycznych prac doświadczalnych zastosowanych do rozpoznania litologicznego osadów czwartorzędowych w rejonie Okuniewa. *Arch. IG*, 1974.

#### РЕЗЮМЕ

В статье описан новый метод квадратных электродондирований (КЭ). Кривые зондирований составляются по замерам с расположением электродов в трех конфигурациях в вершинах квадрата. Изложены теоретические основы метода, методика подготовки данных, производство расчетов с применением математической техники, анализируются эффективность и пути применения метода. В качестве основы выводов приняты данные проведенных измерений.