

## SONDOWANIA POTENCJALNE

**P**OCZĄWSZY OD LISTOPADA 1953 r. prowadzone były na terenie Zakładu Geofizyki Instytutu Geologicznego prace teoretyczne i doświadczalne nad nową metodą pomiarów geoelektrycznych o nazwie sondowania potencjalne.\*

Myślą przewodnią w opracowaniu metody było skonstruowanie takiego układu pomiarowego, który pozwalałby na bezpośrednie określenie z pomiaru głębokości zalegania horyzontów oporowych.

Zadanie takie wydawało się najistotniejsze z punktu widzenia potrzeb geologii. Dlatego też uwagę skoncentrowano na metodzie sondowań powierzchni ekwipotencjalnymi, które wiążą pomiar bezpośrednio z interesującą głębokością.

Stosowana obecnie metoda elektrooporowa sonduje liniami prądowymi i w przeciwieństwie do sondowań potencjalnych nie określa bezpośrednio z pomiaru głębokości horyzontów oporowych.

Za podstawę rozważań przyjęto pole elektrostatyczne wywołane potencjałem przyłożonym do powierzchni jednorodnego, izotropowego ośrodka przewodzącego, wypełniającego półprzestrzeń ograniczoną poziomą płaszczyzną.

Kształt linii prądowych (wektora natężenia pola), na których bazuje metoda sondowań elektrooporowych, daje się określać teoretycznie. Nie jest jednak możliwe praktyczne powiązanie punktów powierzchni ośrodka z odpowiednimi liniami prądowymi, a więc i z odpowiednimi głębokościami, ponieważ na powierzchni ośrodka istnieją tylko wspólne wychodnie dla nieskończonej ilości linii prądowych, w punktach przyłożenia potencjału.

Kształt powierzchni ekwipotencjalnych, na których bazuje metoda sondowań potencjalnych jest również określony teoretycznie, lecz każdemu punktowi linii ekwipotencjalnej na powierzchni ośrodka przyporządkowane są jednoznacznie punkty odpowiedniej powierzchni ekwipotencjalnej rozciągającej się we wnętrzu ośrodka.

Własność tak określona stała się podstawą opracowania odpowiedniej konfiguracji elektrod pomiarowych w metodzie sondowań potencjalnych, która pozwala wiązać punkty powierzchni ośrodka z odpowiednimi głębokościami sondowania.

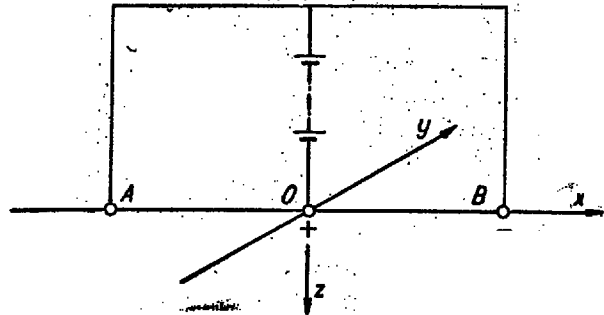
W celu stworzenia warunków pomiaru przy możliwie małych rozstawach elektrod przyjęto układ, którego charakterystycznym elementem jest centralna elektroda prądowa podłączona do jednego z biegunów źródła prądu stałego. Drugi biegun źródła, w najogólniejszym przypadku łączony jest z dowolną ilością elektrod prądowych, rozmieszczonych w jednakowej odległości i symetrycznie względem elektrody centralnej.

### UKŁAD TRÓJELEKTRODOWY

Na płaskiej, poziomej powierzchni jednorodnego, izotropowego ośrodka o oporze właściwym  $\rho$  rozmieszczone są wzdłuż linii prostej, w jednakowej odległości  $L$ , trzy elektrody prądowe AOB.

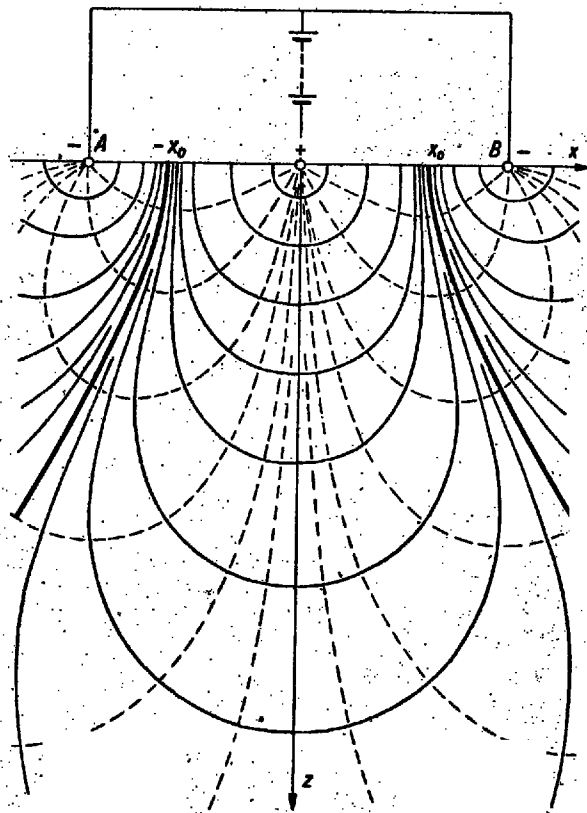
Układowi elektrod przyporządkowany jest lewoskrętny układ współrzędnych prostokątnych o osiach  $x, y, z$  ze środkiem w punkcie  $O$ . Punkty  $AB$  leżą na osi  $x$  (ryc. 1).

\* Projekt metody sondowań potencjalnych złożono w archiwum IG z datą 10.III.1954 r.



Ryc. 1

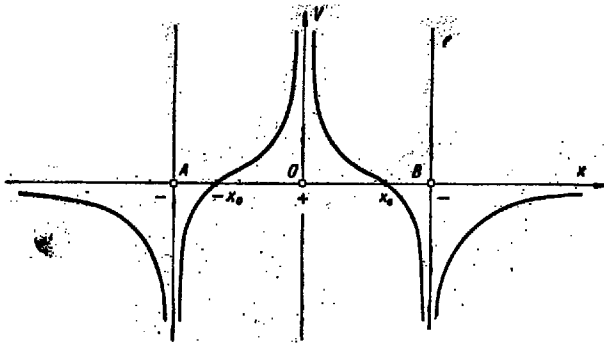
Różnica potencjałów przyłożona między elektrodą centralną  $O$  a dwiema skrajnymi  $AB$  wywołuje w ośrodku przepływ prądu. Potencjał pola elektrostatycznego związanego jest w każdym punkcie ośrodka z odpowiednią powierzchnią ekwipotencjalną (ryc. 2).



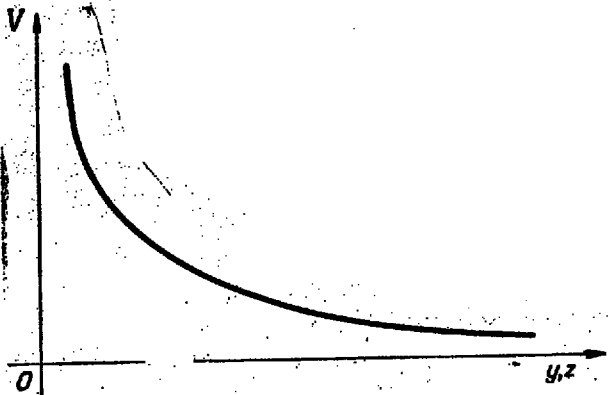
Ryc. 2

Spadek potencjału wzdłuż osi  $x, y, z$  obrazują ryciny 3 i 4.

Spośród powierzchni ekwipotencjalnych rozważamy jedynie zbiór powierzchni przecinających jednocześnie wszystkie osie układu współrzędnych



Ryc. 3



Ryc. 4

Zbiór ten ograniczony jest powierzchnią ekwipotencjalną o równaniu  $V_0 = 0$ , przecinającą oś  $x$  w punktach  $\pm x_0$  ( $x_0 \approx 0,618 L$ ), a osie  $y$  i  $z$  w nieskończoności.

Powierzchnie zbioru przecinają powierzchnię ośrodka wzdłuż zamkniętych linii ekwipotencjalnych, z których dwie wykreślono na ryc. 5.

Linie te przecinają oś  $x$  w punktach  $\pm x_1, \pm x_2$  zawartych w przedziale  $0 < x_1 < x_2 \leq x_0$  oraz oś  $y$  w punktach  $\pm y_1, \pm y_2$ , gdzie  $0 < y_1 < y_2$ .

Pomiar różnicy potencjałów  $\Delta V$  między punktami  $x_1, x_2$  lub  $y_1, y_2$  odniesiony jest do płata powierzchniowego zawartego między powierzchniami ekwipotencjalnymi przechodzącymi przez punkty  $x_1, x_2, y_1, y_2$  oraz na osi  $z$  przez punkty  $z_1, z_2$ .

Przez otrzymany płat powierzchniowy przepływa w każdej chwili całkowita wartość  $I$  natężenia prądu płynącego od elektrody centralnej  $O$ .

Zgodnie z prawem Ohma zachodzi następujący związek

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}, \quad (1)$$

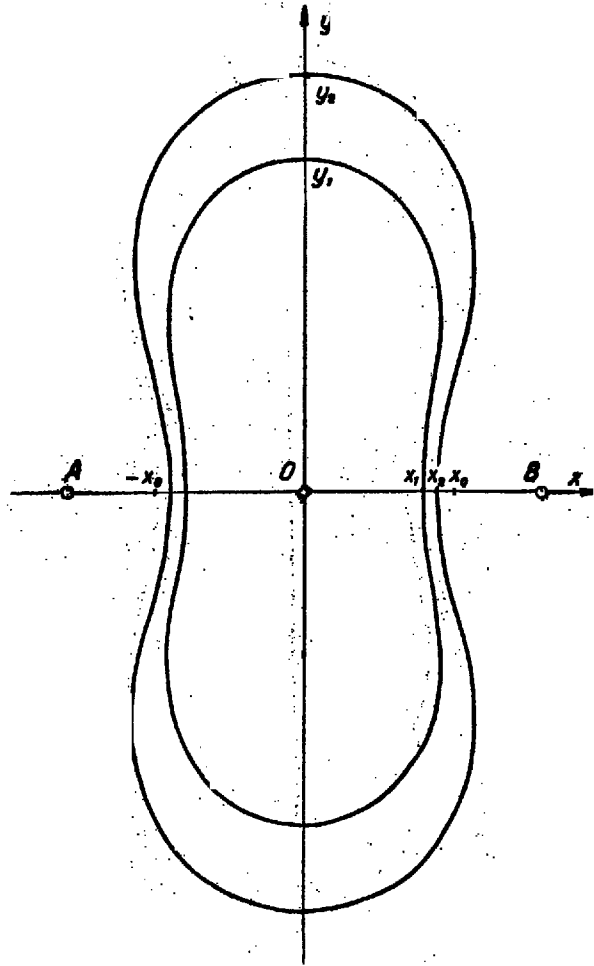
gdzie  $K$  jest współczynnikiem zależnym od konfiguracji elektrod.

W układzie trójelektrodowym rozróżniamy dwie zasadnicze konfiguracje elektrod. W pierwszej pomiar różnicy potencjałów wykonuje się wzdłuż osi  $x$ . Układ taki oznaczono symbolem 3X. W drugiej pomiar wykonuje się wzdłuż osi  $y$ . Analogicznie układ oznaczono symbolem 3Y.

#### UKŁAD 3X

W układzie 3X elektrody potencjalne MN rozmieszczone są wzdłuż osi  $x$  (Ryc. 6 i 7).

Różnica potencjałów  $\Delta V$  między punktami  $x_1, x_2$  oraz natężenie  $I$  prądu płynącego przez elektrodę



Ryc. 5

o są elementami wchodzącymi w skład równania (1). Współczynnik  $K$  określony jest dla układu 3X następującym równaniem:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{x_2 - x_1}{x_1 x_2} + \frac{(x_2^2 - x_1^2) L}{(L^2 - x_1^2)(L^2 - x_2^2)} \right] \quad (2)$$

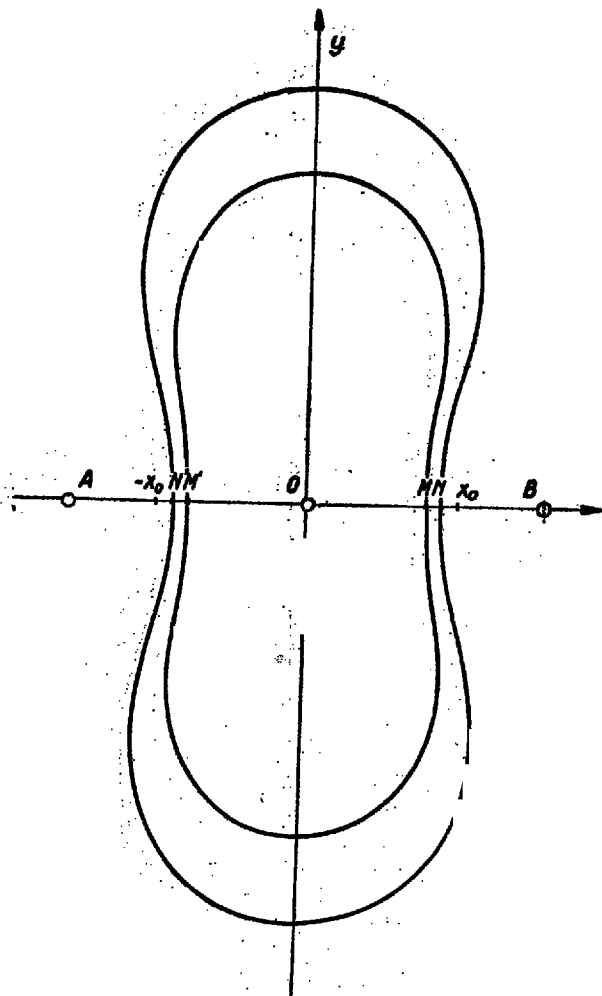
W ośrodku niejednorodnym, rozgraniczonym na przykład poziomymi horyzontami oporowymi (ryc. 6) wartość  $\rho$  w równaniu (1) określa opór pozorny części ośrodka przypadającej na płat powierzchniowy wyznaczony punktami  $x_1, x_2$ . Opór pozorny płyta wynika z nałożenia się oporów właściwych wszystkich warstw ośrodka aż do głębokości  $z_2$ . A zatem współrzędna  $z_2$  wyznacza głębokość pomiaru  $h$ .

Dla ośrodka jednorodnego, izotropowego istnieje następujący związek między współrzędną  $z_2 = h$  oraz współrzędną  $x_2 = x$ .

$$\begin{aligned} & \left[ \sqrt{L^2 + h^2} - h \right] x^3 - \left[ h \sqrt{L^2 + h^2} \right] x^2 + \\ & + \left[ L^2 h - (Lh + L^2) \sqrt{L^2 + h^2} \right] x + \left[ L^2 h \sqrt{L^2 + h^2} \right] = 0 \quad (3) \end{aligned}$$

Równanie (3) wiąże jednoznacznie rozstaw elektrody potencjalnej umieszczonej w punkcie  $x$  na powierzchni ośrodka z głębokością  $h$  liczoną wzdłuż osi  $z$ .

\* Dla uproszczenia pominięto załamania linii ekwipotencjalnych na granicy stref oporowych.



Ryc. 6

Z pomiaru natężenia prądu płynącego przez elektrodę O przy stałym rozstawie L, oraz z pomiaru różnicy potencjałów między punktami  $\pm x_n, \pm x_{n+1}$ , gdzie  $n=1, 2, 3, \dots$  określona zostaje na podstawie równań (1), (2), (3) krzywa pomiarowa sondowania potencjalnego o równaniu:

$$\rho = f(h) \quad (4)$$

W zastosowaniu do geologii krzywa pomiarowa (4) jest obrazem zmian wartości  $\rho$  oporu pozornego na znanej głębokości h badanej struktury geologicznej.

UKŁAD 3Y

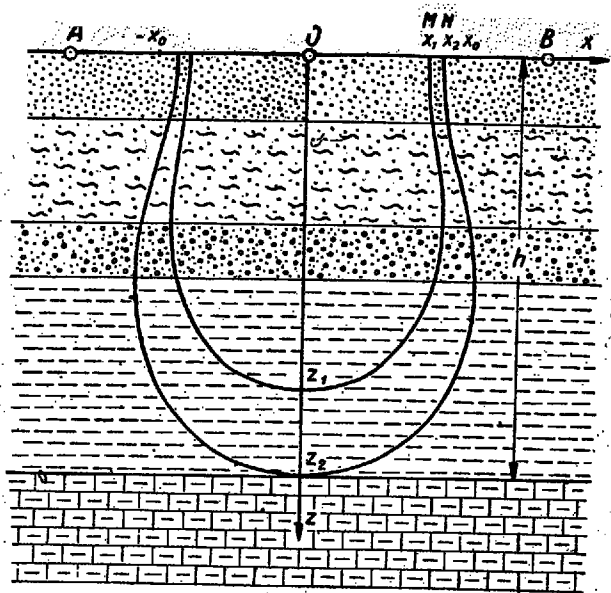
W układzie 3Y elektrody potencjalne MN rozmieszczone są wzdłuż osi y (ryc. 8 i 9).

Różnica potencjałów  $\Delta V$  między punktami  $y_1, y_2$  oraz natężenie I prądu płynącego przez elektrodę O są elementami równania (1).

Współczynnik K określony jest dla układu 3Y następującym równaniem:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{y_2 - y_1}{y_1 y_2} \frac{\sqrt{L^2 + y_2^2} - \sqrt{L^2 + y_1^2}}{\sqrt{L^2 + y_1^2} \sqrt{L^2 + y_2^2}} \right] \quad (5)$$

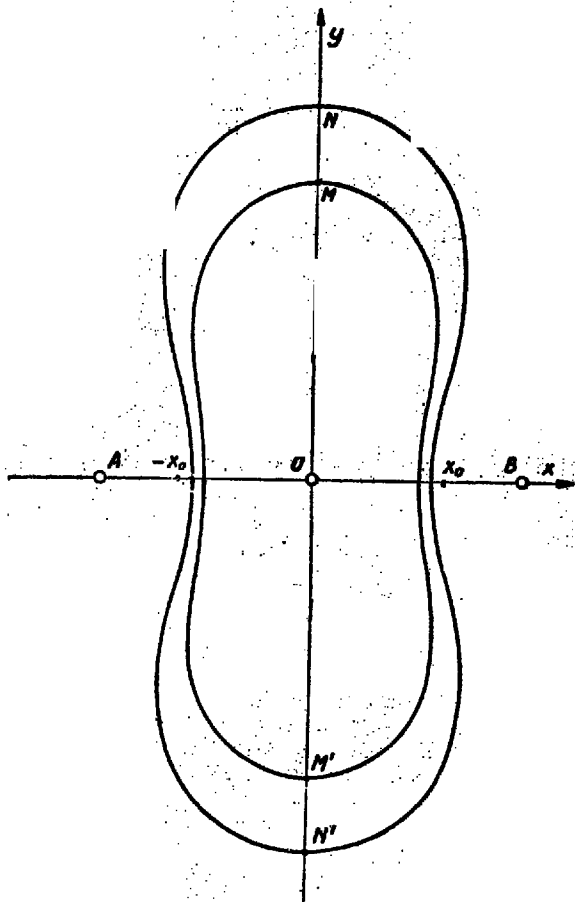
Podobnie jak w układzie 3X dla ośrodka niejednorodnego (ryc. 9), wartość  $\rho$  w równaniu (1)



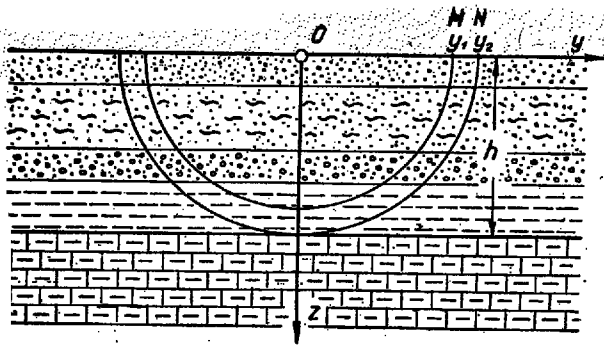
Ryc. 7

określa opór pozorny części ośrodka przypadające na płat powierzchniowy wyznaczony punktami  $y_1, y_2$ .

Opór pozorny płyta wynika z nałożenia się oporów właściwych wszystkich warstw ośrodka aż do głębokości  $z_2$ . Współrzędna  $z_2$  wyznacza zatem głębokość pomiaru h.



Ryc. 8



Ryc. 9

Dla ośrodka jednorodnego izotropowego istnieje prosty związek między współrzędną  $z_2 = h$  oraz współrzędną  $y_2 = y$ .

$$h = y \quad (6)$$

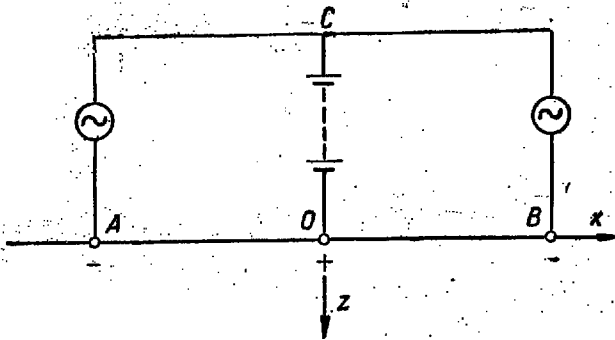
Równanie (6) wiąże jednoznacznie rozstaw elektrody potencjalnej, umieszczonej w punkcie  $y$  na powierzchni ośrodka z głębokością  $h$  liczoną wzdłuż osi  $z$ .

Z pomiaru natężenia prądu płynącego przez elektrodę  $O$ , przy stałym rozstawie  $L$ , oraz z pomiaru różnicy potencjałów między punktami  $y_n, y_{n+1}$ , gdzie  $n = 1, 2, 3, \dots$ , określona zostaje na podstawie równań (1), (5), (6) krzywa pomiarowa sondowania potencjalnego o równaniu (4).

W zastosowaniu do geologii krzywa pomiarowa (4) w układzie 3Y, podobnie jak krzywa w układzie 3X, jest obrazem zmian wartości  $\rho$  oporu pozornego na znanej głębokości  $h$  badanej struktury geologicznej.

#### UKŁAD 3Y NA PRĄD ZMIENNY

W obwodzie układu trójelektrodowego poza źródłem prądu stałego o natężeniu  $I$  pracuje źródło dwufazowego prądu sinusoidalnie zmiennego (ryc. 10).



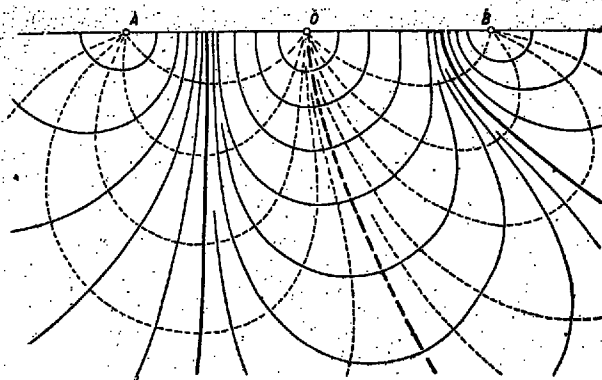
Ryc. 10

Zródło wytwarza prąd o jednakowej fazie i jednakowej amplitudzie natężenia  $i_m$  ( $i_m < I$ ) przy małej częstotliwości zmian.

Przepływ prądu zmiennego w obwodzie ACB powoduje asymetrię w rozkładzie wypadkowego natężenia prądu płynącego w gałęziach A i B.

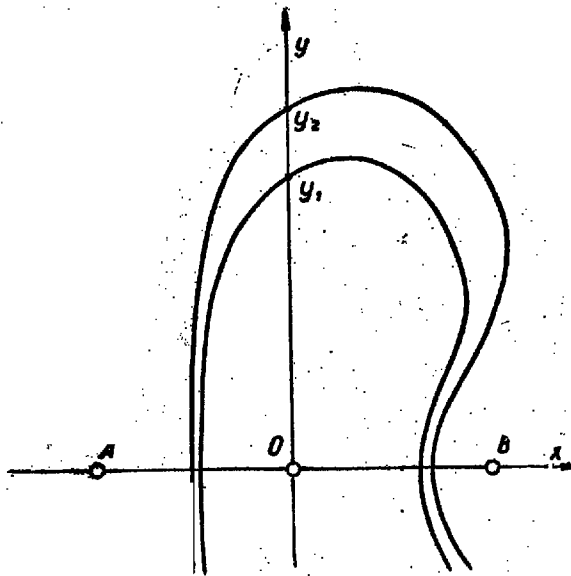
Linie prądowe i powierzchnie ekwipotencjalne w ośrodku ulegają odkształceniom proporcjonalnym do stosunku  $k = i/I$ , gdzie  $i$  jest chwilową wartością natężenia prądu zmiennego (ryc. 11).

Punkty przecięcia powierzchni ekwipotencjalnych z osiami  $y$  i  $z$  są niezależne od prądu zmiennego.

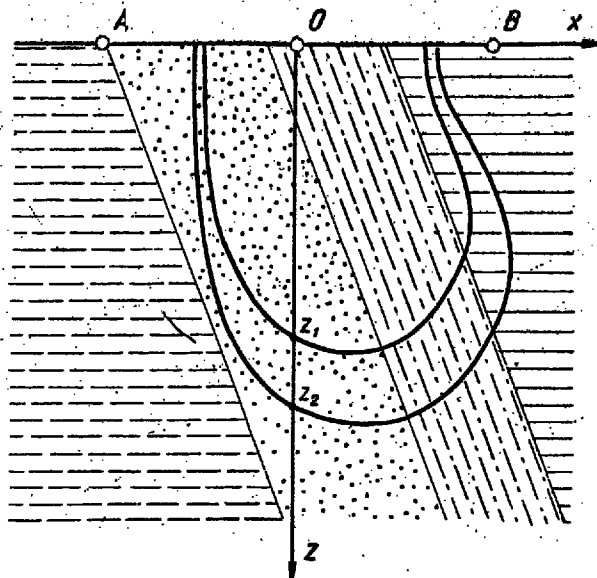


Ryc. 11

Pomiar różnicy potencjałów  $\Delta V$  między punktami  $y_1, y_2$  na osi  $y$  dotyczy zawsze jednego i tego samego płata powierzchniowego, mimo że kształt jego ulega periodycznym zmianom w takt zmian funkcji sinusoidalnej  $k$  (ryc. 12).



Ryc. 12



Ryc. 13

W ośrodku jednorodnym, izotropowym wartość  $\Delta V$  jest stała. W ośrodku niejednorodnym, np. o nachylonych horyzontach oporowych, różnica potencjałów ulega periodycznym zmianom. Zmienność tę obserwować można na oscylografie katodowym podłączając różnicę potencjałów  $\Delta V$  z punktów  $y_1$   $y_2$  na płytce Y, a na płytce X potencjał sinusoidalnie zmienny ze źródła prądu zmiennego.

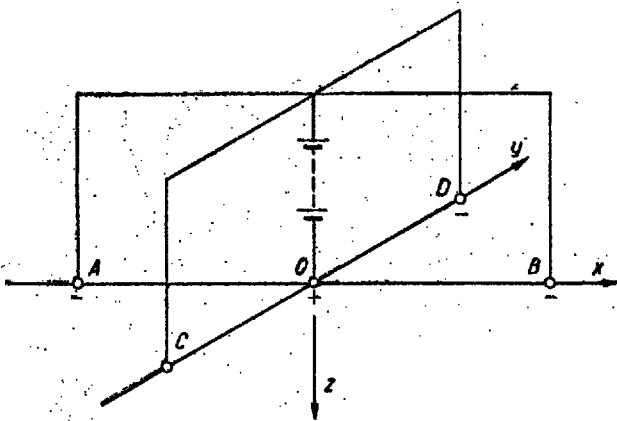
Dla ośrodka jednorodnego obraz na ekranie oscylografu jest linią prostą. Odkształcenia obserwowane w ośrodku niejednorodnym są podstawą interpretacji poziomej niejednorodności ośrodka (ryc. 13), na głębokości określonej równaniem (6).

W zastosowaniu do geologii krzywa pomiarowa stwarza warunki interpretacji poziomych nieciągłości strukturalnych typu uskoków, dyslokacji, nasunięć, kontaktów strukturalnych, krasu itp.

#### UKŁAD PIĘCIOELEKTRODOWY

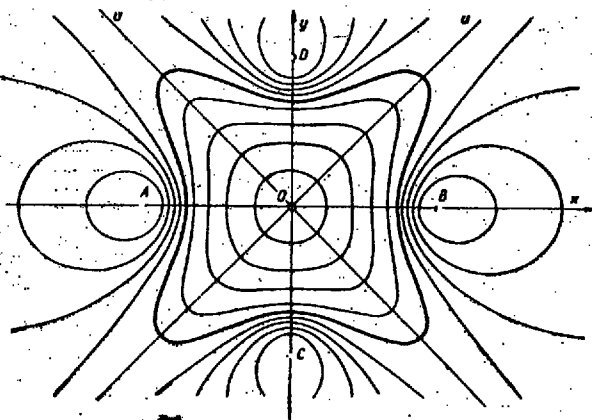
Na powierzchni ośrodka fizycznego zdefiniowanego w rozdziale poprzednim rozplanowany jest układ 5 elektrod prądowych OABCD. Układowi elektrod przyporządkowany jest lewoskrętny układ współrzędnych prostokątnych o osiach  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ze środkiem w punkcie O.

Elektrody AB i CD leżą odpowiednio na osiach  $x$  i  $y$  w jednakowej odległości  $L$  od elektrody centralnej O (ryc. 14).

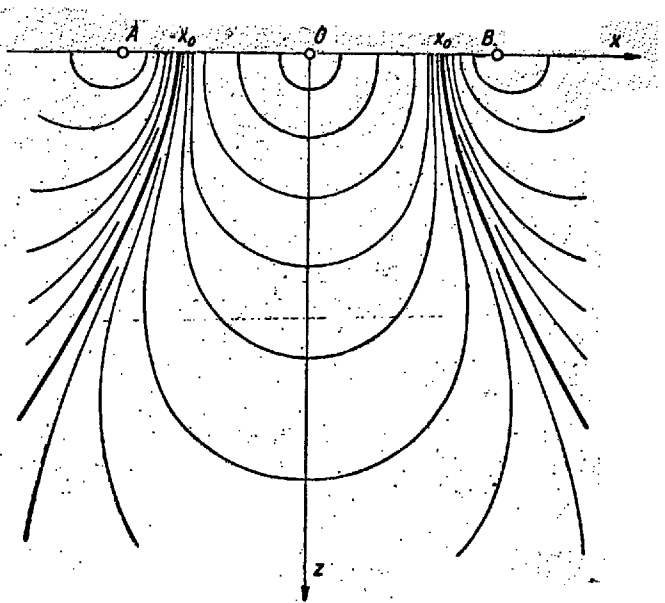


Ryc. 14

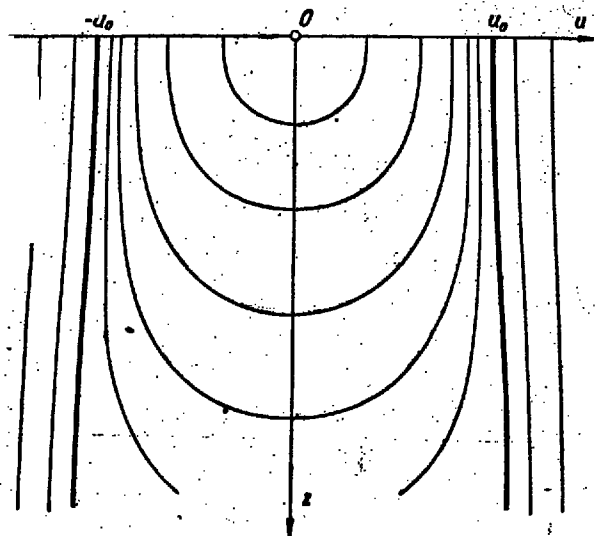
Różnica potencjałów przyłożona między elektrodą centralną O a czterema skrajnymi ABCD wytwarza w ośrodku pole elektrostatyczne, którego potencjał w każdym punkcie ośrodka związany jest z odpowiednią powierzchnią ekwipotencjalną (ryc. 15, 16 i 17).



Ryc. 15

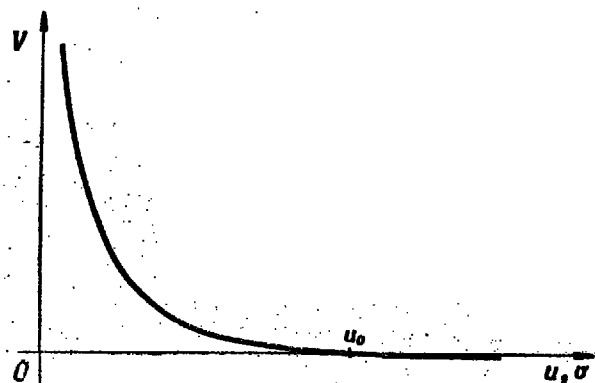


Ryc. 16



Ryc. 17

Spadek potencjału wzdłuż osi  $x$  lub  $y$  przebiega analogicznie jak w układzie 3X (ryc. 3). Spadek potencjału wzdłuż przekątnej  $u$  lub  $v$  obrazuje ryc. 18.



Ryc. 18

Podobnie jak w układzie trój elektrodowym róż-  
ważmy jedynie zbiór powierzchni ekwipotencjalnych  
przecinających jednocześnie wszystkie osie układu  
współrzędnych. Zbiór ten ograniczony jest powier-  
zchnią ekwipotencjalną o równaniu  $x_0 = 0$  przeci-  
nającą osie  $x, y$  w punktach  $\pm x_0, \pm y_0$  ( $x_0, y_0 \approx$   
 $\approx 0,709 L$ ), a os  $z$  w nieskończoności.

Powierzchnie zbioru przecinają powierzchnię  
ośrodka wzdłuż zamkniętych linii ekwipotencjal-  
nych. Na ryc. 19 wykreślono dwie linie przecinające  
os  $x$  w punktach  $\pm x_1, \pm x_2$  oraz os  $y$  w punktach  
 $\pm y_1, \pm y_2$ .

Współrzędne przecięć z osiami zawarte są w przed-  
ziałach  $0 < |x_1| < |x_2| \leq |x_0|$  oraz

$$0 < |y_1| < |y_2| \leq |y_0|.$$

Linie ekwipotencjalne przecinają ponadto dwu-  
sieczne  $u, v$  w punktach  $\pm u_1, \pm u_2$  i w punktach  
 $\pm v_1, \pm v_2$ .

Współrzędne przecięć z dwusiecznymi zawarte są  
w przedziałach  $0 < |u_1| < |u_2| \leq |u_0|, 0 < |v_1| < |v_2| \leq |v_0|$   
( $u_0, v_0 \approx 1,24 L$ ).

Pomiar różnicy potencjałów między liniami ekwi-  
potencjalnymi na osiach  $x, y$  lub na dwusiecznych  
 $u, v$  odnosi się do płata powierzchniowego zawar-  
tego między dwiema powierzchniami ekwipoten-  
cjalnymi przechodzącymi przez wymienione pun-  
kty.

Powierzchnie ekwipotencjalne ograniczające płat  
przecinają os  $z$  w punktach  $z_1, z_2$ .

Ogólne równanie (1), stosowane w układzie trój-  
elektrodowym, spełnia warunki układu pięcioele-  
ktrodowego.

Współczynnik  $K$  określony jest w tym równaniu  
w zależności od konfiguracji elektrod.

W układzie pięcioelektrodowym zasadniczo roz-  
różniamy dwie konfiguracje elektrod. W pierwszej  
pomiar różnicy potencjałów wykonuje się na osi  
 $x$  lub  $y$ . Układ taki oznaczono symbolem 5XY. W  
drugiej pomiar wykonuje się wzdłuż dwusiecznej  $u$   
lub  $v$ . Analogicznie układ oznaczono symbolem  
5UV.

#### UKŁAD 5XY

W układzie 5XY elektrody potencjalne MN roz-  
mieszczone są wzdłuż osi  $x$  lub  $y$  (ryc. 20).

Różnica potencjałów  $\Delta V$  między punktami  $x_1,$   
 $x_2$  lub  $y_1, y_2$  oraz natężenie prądu płynącego przez  
elektrodę  $O$  są elementami równania (1).

Współczynnik  $K$  określony jest dla układu 5XY  
następującym równaniem:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{4\pi} \left[ 2 \frac{(x_2 - x_1)}{x_1 x_2} + \frac{L(x_2^2 - x_1^2)}{(L^2 - x_1^2)(L^2 - x_2^2)} - \frac{\sqrt{L^2 + x_2^2} - \sqrt{L^2 + x_1^2}}{\sqrt{L^2 + x_1^2} \sqrt{L^2 + x_2^2}} \right] \quad (7)$$

W ośrodku niejednorodnym wartość  $\rho$  w równa-  
niu (1) określa opór pozorny części ośrodka przy-  
padającej na płat powierzchniowy wyznaczony  
punktami  $x_1, x_2$  lub  $y_1, y_2$  (por. ryc. 7).

Opór pozorny płata wynika z nałożenia się opo-  
rów właściwych wszystkich warstw ośrodka aż do  
głębokości  $z_2$ , a zatem podobnie jak w układzie  
trój elektrodowym współrzędna  $z_2$  wyznacza głębo-  
kość pomiaru  $h$ .

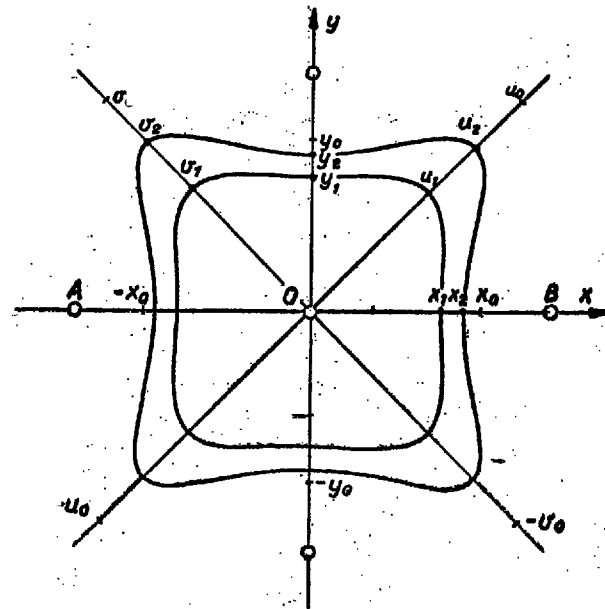
Dla ośrodka jednorodnego izotropowego istnieje  
następujący związek między współrzędną  $z_2 = h$  a  
współrzędną  $x_2 = x$  lub  $y_2 = y$ .

$$\frac{2}{h} = \frac{2}{\sqrt{L^2 + h^2}} = \frac{2}{x} = \frac{L}{L^2 - x^2} = \frac{1}{\sqrt{L^2 + x^2}} \quad (8)$$

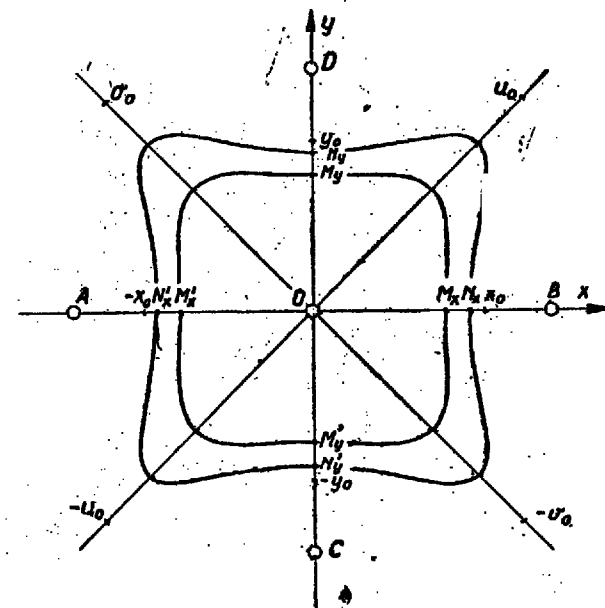
Równanie (8) wiąże jednoznacznie rozstaw elek-  
trody potencjalnej, umieszczonej w punkcie  $x$  lub  
 $y$  z głębokością  $h$  liczoną wzdłuż osi  $z$ .

Z pomiaru natężenia prądu, płynącego przez elek-  
trodę  $O$ , przy stałym rozstawie  $L$  oraz z pomiaru róż-  
nicy potencjałów między punktami  $\pm x_n, \pm x_{n+1}$ , gdzie  
 $n = 1, 2, 3, \dots$  określona zostaje na podstawie równań  
(1), (7), (8) krzywa pomiarowa sondowania poten-  
cjalnego o równaniu (4).

W zastosowaniu do geologii krzywa pomiarowa  
(4) w układzie 5XY jest obrazem zmian wartości  $\rho$   
oporu pozornego na znanej głębokości  $h$  badanej  
struktury geologicznej.



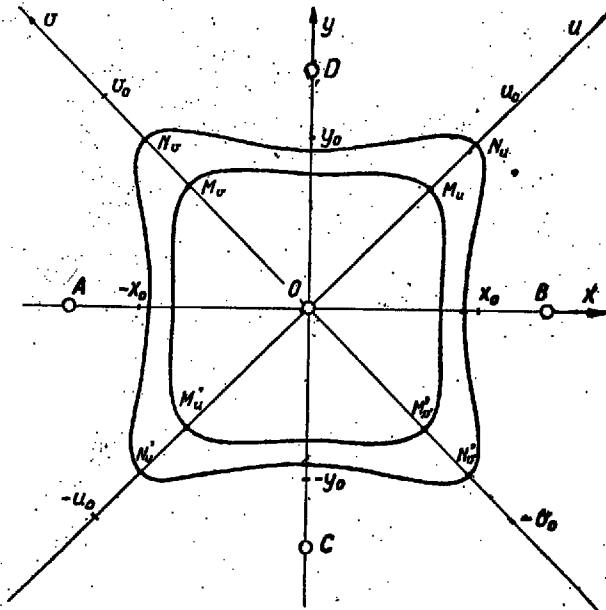
Ryc. 19



Ryc. 20

UKŁAD 5 UV

w układzie 5 UV elektrody potencjalne MN rozmieszczone są wzdłuż dwusiecznych u lub v (ryc. 21 i 22).



Ryc. 21

roznica potencjałów  $\Delta V$  między punktami  $u_1, u_2$  lub  $v_1, v_2$  oraz natężenie prądu płynącego przez elektrodę O wchodzi w skład równania (1).

Współczynnik K określony jest dla układu 5 UV następująco:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{2(u_2 - u_1)}{u_1 u_2} \right]$$

$$\frac{\sqrt{L^2 + \sqrt{2}Lu_2 + u_2^2} - \sqrt{L^2 + \sqrt{2}Lu_1 + u_1^2}}{\sqrt{L^2 + \sqrt{2}Lu_1 + u_1^2} \sqrt{L^2 + \sqrt{2}Lu_2 + u_2^2}} \left[ \frac{\sqrt{L^2 - \sqrt{2}Lu_2 + u_2^2} - \sqrt{L^2 - \sqrt{2}Lu_1 + u_1^2}}{\sqrt{L^2 - \sqrt{2}Lu_1 + u_1^2} \sqrt{L^2 - \sqrt{2}Lu_2 + u_2^2}} \right] \quad (9)$$

W ośrodku niejednorodnym, np. rozwarstwowionym poziomo, wartość  $\rho$  w równaniu (1) określa opór pozorny badanego płata powierzchniowego (ryc. 22).

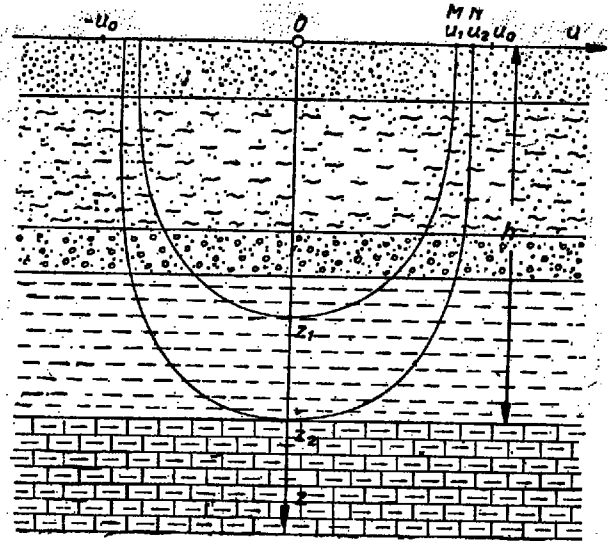
Opór ten, jak określono poprzednio, wynika z nałożenia się oporów właściwych wszystkich warstw ośrodka aż do głębokości  $z_2$ .

Współrzędna  $z_2$  wyznacza głębokość pomiaru h.

Dla ośrodka jednorodnego, izotropowego istnieje następujący związek między współrzędną  $z_2 = h$  oraz współrzędną  $u_2 = u$  lub  $v_2 = v$

$$\frac{2}{h} \frac{2}{\sqrt{L^2 + h^2}} = \frac{2}{u} \frac{1}{\sqrt{L^2 + \sqrt{2}Lu + u^2}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 - \sqrt{2}Lu + u^2}} \quad (10)$$

Równanie (10) wiąże jednoznacznie rozstaw elektrody potencjalnej umieszczonej w punkcie u lub v z głębokością h liczoną wzdłuż osi z.



Ryc. 22

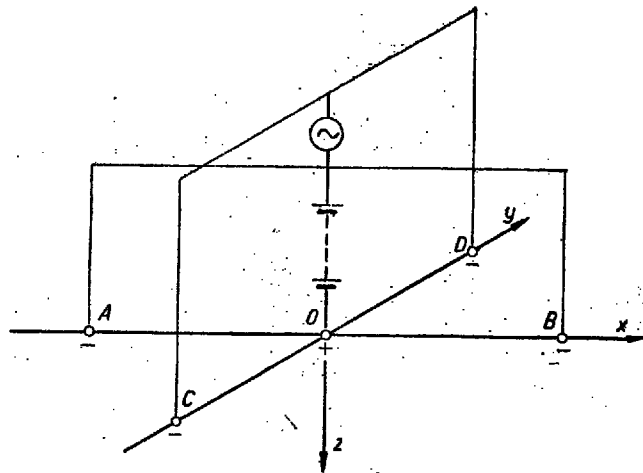
Z pomiaru natężenia prądu w gałęzi O, przy stałym rozstawie L, oraz z pomiaru różnicy potencjałów między punktami  $u_n, u_{n+1}$ , gdzie  $n=1, 2, 3, \dots$  określona zostaje na podstawie równań (1), (9), (10) krzywa pomiarowa sondowania potencjalnego o równaniu (4).

W zastosowaniu do geologii krzywa pomiarowa (4) w układzie 5 UV, podobnie jak krzywe w układach zdefiniowanych poprzednio, jest obrazem zmian wartości  $\rho$  oporu pozornego na znanej głębokości h badanej struktury geologicznej.

UKŁAD 5 XY NA PRĄD ZMIENNY

W obwodzie prądowym układu 5 XY, poza źródłem prądu stałego o natężeniu I, pracuje źródło prądu sinusoidalnie zmiennego o natężeniu maksymalnym  $i_m$  ( $i_m < I$ ) przy małej częstotliwości zmian (ryc. 23).

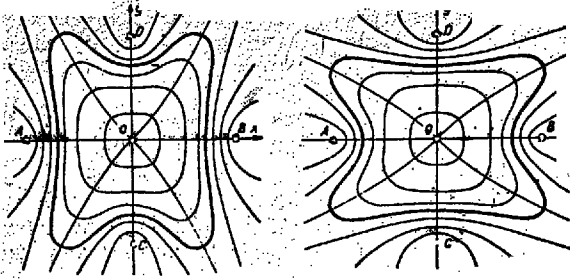
Przepływ prądu zmiennego wywołuje w ośrodku symetryczne odkształcenia powierzchni ekwipotencjalnych (ryc. 24 i 25).



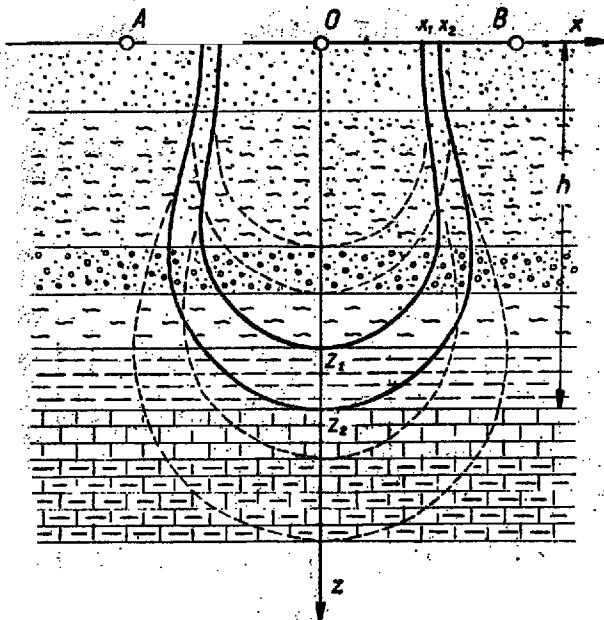
Ryc. 23

Pod wpływem zmian wypadkowego natężenia prądu wartość potencjału w dowolnym punkcie ośrodka lub na jego powierzchni ulega periodycznym wahaniom.

Każdemu stałemu punktowi ośrodka przyporządkowana jest, w dowolnej chwili t ( $0 \leq t < T$ ).



Ryc. 24



Ryc. 25

T — okres zmienności prądu), umia powierzchnia ekwipotencjalna.

Dla stałego punktu  $x$  umieszczonego na powierzchni ośrodka istnieje następująca zależność między prądem  $i$ , a zmiennym punktem  $h$  na osi  $z$ , związanym z punktem  $x$  tą samą powierzchnią ekwipotencjalną.

$$[2 - k(1 - p)] \left[ \frac{1}{h} \frac{1}{\sqrt{L^2 + h^2}} \right] = \frac{2 - k(1 - p)}{x} - \frac{L(1 + pk)}{L^2 - x^2} - \frac{1 - k}{\sqrt{L^2 + x^2}} \quad (11)$$

gdzie  $k = i/I$ ,  $p = \frac{2}{2 + \sqrt{2}}$

Równanie (11) określa funkcję  $h = f(k)$  i wiąże jednoznacznie, w każdej chwili  $t$ , za pośrednictwem zmiennej  $k$  rozstaw elektrody potencjalnej umieszczonej w stałym punkcie  $x$  na powierzchni ośrodka ze zmienną głębokością pomiaru  $h$  liczoną wzdłuż osi  $z$ .

Zmienna różnica potencjałów  $\Delta V$  między dwoma stałymi punktami  $x_1, x_2$  odnosi się do płata powierzchniowego ograniczonego zmiennymi powierzchniami ekwipotencjalnymi. Powierzchnie ograniczające płat przecinają oś  $z$ , w zależności od zmian  $k$ , w różnych punktach  $z_n, z_{n+1}$  ( $n = 1, 2, \dots$ ). Współrzędna  $z_{n+1}$  wyznacza głębokość pomiaru  $h$ .

Położenie punktu  $h$  wynika z równania (11) i określa przedział pionowej oscylacji płata powierzchniowego, wywołanej zmiennością prądu o granicznych wartościach  $\pm i_m$  (ryc. 25).

Obserwowany płat zmienia okresowo swój kształt, kurcząc się i wydłużając w kierunku pionowym. Pulsacja taka zachodzi w takt zmian natężenia i prądu sinusoidalnego.

Przyrost różnicy potencjałów dla ośrodka jednorodnego izotropowego, między stałymi punktami  $x_1, x_2$  jest liniową funkcją natężenia i prądu zmiennego. A zatem w ośrodku niejednorodnym różnica potencjałów jest proporcjonalna do zmiennej wartości oporu pozornego pulsującego płata powierzchniowego.

Opór pozorny płata określony jest równaniem (1). Współczynnik  $k$  występujący w tym równaniu zależy od konfiguracji elektrod jak również od wartości i natężenia prądu zmiennego.

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{(x_2 - x_1)[2 - k(1 - p)]}{x_1 x_2} + \frac{L(x_2^2 - x_1^2)(1 + pk)}{(L^2 - x_1^2)(L^2 - x_2^2)} - \frac{(1 - k)(\sqrt{L^2 + x_2^2} - \sqrt{L^2 + x_1^2})}{\sqrt{L^2 + x_1^2} \sqrt{L^2 + x_2^2}} \right] \quad (12)$$

W równaniu (12) poza zmienną  $k$  wszystkie parametry są stałe.

W ośrodku jednorodnym, izotropowym zmienna funkcja  $K$  dla stałych punktów  $x_1, x_2$  jest odwzorowaniem odwrotności zmian różnicy potencjałów  $\Delta V$ .

Pomiar różnicy potencjałów  $\Delta V$  odniesiony do natężenia i prądu zmiennego, wykonany na oscylografie katodowym ( $\Delta V$  — na płytkach Y,  $i$  — na płytkach X), daje w efekcie krzywą pomiarową sondowania potencjalnego o bezpośrednim równaniu  $\Delta V = f(i)$ , które po przeskalowaniu przyjmuje postać  $g = f(h)$ .

W odniesieniu do geologii, krzywa pomiarowa sondowania potencjalnego na prąd zmienny jest ciągłym obrazem zmienności oporu pozornego badanej struktury geologicznej na przestrzeni oscylacji płata powierzchniowego.

Każde przejęcie krzywej pomiarowej związane jest z odpowiednią wartością i natężenia prądu zmiennego, a więc i z wartością  $k$  wchodzącą w skład równania (11), skąd każdy punkt krzywej pomiarowej związany jest z odpowiednią głębokością pomiaru  $h$ .

Ponieważ w układzie 5 XY na prąd zmienny wszystkie parametry geofizyczne są stałe, a zmianom podlega jedna jedyna wartość — natężenie prądu zmiennego  $i$ , przy czym zmienność ta powoduje pulsację płata powierzchniowego przez badane warstwy struktury geologicznej — krzywa pomiarowa sondowania potencjalnego jest wiernym obrazem występujących w strukturze stref oporowych.

Zgodność obrazu pomiarowego z rzeczywistymi warunkami geofizycznymi możliwa jest w układzie 5 XY na prąd zmienny, przede wszystkim dzięki zupełnemu wyeliminowaniu wpływu zmienności poziomej warstw przypowierzchniowych.

#### UWAGI

1. Metoda sondowań potencjalnych przystosowana jest w zasadzie do badania niezaburzonej struktury geologicznej. Zasięg głębokościowy metody obejmuje szeroki zakres badań, począwszy od obiektów płytkich do bardzo głębokich (do kilku tysięcy metrów). Wybór układu sondowań potencjalnych zależy od zadań geofizycznych oraz od lokalnych warunków pomiaru.



2. Najistotniejszą cechą wszystkich odmian metody sondowań potencjalnych jest możliwość określenia głębokości poszczególnych horyzontów oporowych bezpośrednio z krzywych pomiarowych.

Krzywe sondowań potencjalnych w odróżnieniu od krzywych sondowań elektrooporowych są czytelne bezpośrednio, bez stosowania jakiegokolwiek interpretacji teoretycznej. Dzięki tej własności metody istnieją warunki interpretacji pewniejszej, łatwiejszej i bardziej wszechstronnej. Możliwe staje się interpretowanie układów wielowarstwowych.

Jak wiadomo, metoda elektrooporowa wyróżnia drogą żmudnej i często bardzo problematycznej interpretacji teoretycznej — dwie, trzy, a w szczególnych przypadkach cztery strefy oporowe. Pozostałe oscylacje krzywych pomiarowych zostają zgeneralizowane i w zasadzie wyłączone z interpretacji.

Na krzywych sondowań potencjalnych każde sprawdzone odchylenie jest interesujące w sensie geofizycznym i możliwe do zinterpretowania geologicznego.

Czytelność krzywych sondowań potencjalnych wynika z formy równania  $\rho = f(h)$ , które określa opór pozorny  $\rho$  badanej struktury geologicznej na bezpośrednio określonej głębokości  $h$  (ryc. 26).

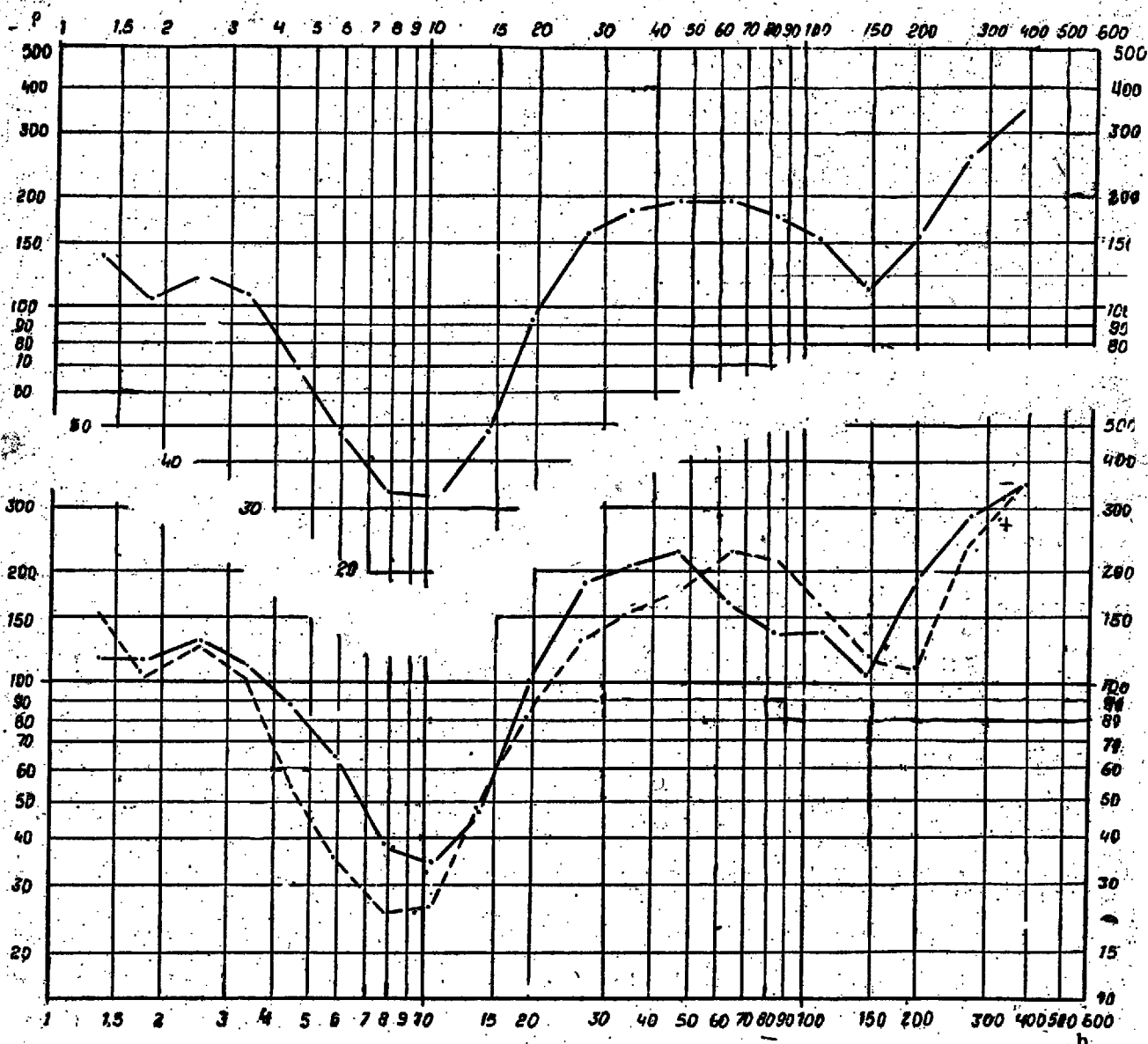
3. Kompletnie, pojedyncze sondowanie potencjalne, składa się z dwóch krzywych, uzyskanych z pomiarów po obu stronach centralnej elektrody prądowej, oraz z krzywej wartości średnich krzywych stron (ryc. 26).

Komplet trzech krzywych pojedynczego sondowania potencjalnego pozwala uzyskać następujące dane:

- Określić głębokość zalegania poszczególnych, wyróżniających się horyzontów oporowych, a tym samym rozgraniczyć poszczególne strefy oporowe, związane w zasadzie z warstwami geologicznymi.
  - Określić opory właściwe wyróżnionych stref oporowych, ewentualnie określić rząd ich wielkości.
  - Określić kierunek upadów warstw geologicznych.
4. Pojedynczy ciąg sondowań potencjalnych stwarza warunki interpretacji pionowego przekroju geologicznego.

W wyniku interpretacji ciągu otrzymać można:

- Rozgraniczenie kontrastujących oporowo warstw geologicznych i określenie głębokości zalegania ich stropów i spągów.



Ryc. 26

b) Rozwiązanie ogólnej tektoniki w strefie wykonanego przekroju — określenie upadów warstw geologicznych, lokalizacja antyklin, synklin i wysadów, lokalizacja uskoków, dyslokacji, nasunięć, określanie zrzutów; stwierdzanie krasu itp.

5. System równoległych ciągów sondowań potencjalnych stwarza warunki przestrzennej interpretacji geologicznej.

W wyniku tej interpretacji otrzymać można:

- a) Geologiczne przekroje pionowe w różnych kierunkach (por. 4).
- b) Mapy geologiczne na wybranych głębokościach pomiaru (określanie biegunów warstw geologicznych na wybranych poziomach).

Należy zwrócić uwagę, że interpretacja geologiczna wyników sondowań potencjalnych możliwa jest tylko wykonania jedynie na podstawie interpretacji geofizycznej materiałów pomiarowych i materiałów geologicznych obszaru badań.

6. Drugą ważną cechą metody sondowań potencjalnych jest duży zasięg głębokościowy metody przy stosunkowo niewielkich rozstawach elektrod pomiarowych. Zasięg ten uwarunkowany jest czułością aparatury pomiarowej (galwanometru) i opornością pierwszej, przypowierzchniowej warstwy geologicznej. Dobra czułość galwanometru (rzędu  $10^{-6}$ ) oraz niskie opory pierwszej warstwy (rzędu kilkudziesięciu  $\Omega m$ ) pozwala osiągnąć głębokość  $h \geq 5 L$ . W przeciętnych warunkach pomiaru uzyskuje się łatwo głębokość  $h = 4 L$ . W szczególnie złych warunkach geofizycznych i technicznych (opór pierwszej warstwy ponad 20 000  $\Omega m$ ; czułość galwanometru  $10^{-7}$ ) zasięg sondowania może spaść do wartości  $h = 0,3 L$ .

W metodzie sondowań potencjalnych pomiar wykonuje się przy nieruchomych elektrodach prądowych jedynie za pośrednictwem elektrod potencjalnych. W układzie 3X elektrody potencjalne nie wykraczają poza odległość  $0,6 L$ , a więc efektywny pomiar dla obu stron zawiera się w przedziale  $2 \cdot 0,6 L$ . W porównaniu z metodą sondowań elektrooporowych, których zasięg ocenia się w granicach  $0,1 AB - 0,33 AB$  (AB — rozstaw pomiarowy) głębokość pomiaru np. w układzie 3X może osiągnąć 40-krotny zasięg sondowania elektrooporowego.

Tak więc dla uzyskania tej samej głębokości pomiaru rozstaw pomiarowy w metodzie sondowań potencjalnych może być w pewnych warunkach nawet 40 razy mniejszy od analogicznego rozstawu w metodzie sondowań elektrooporowych.

Własność ta ma znaczenie geofizyczne i duże znaczenie ekonomiczne.

Wydatne zredukowanie wielkości rozstawów pomiarowych stwarza dobre warunki dokładnego śledzenia zmian oporowych badanej struktury geologicznej. Linie wektora natężenia prądu koncentrują się bowiem w najbliższym otoczeniu punktu pomiarowego.

Znaczenie ekonomiczne małych rozstawów metody sondowań potencjalnych wyraża się w poważnym zmniejszeniu obsady pracowników obsługujących linie pomiarowe. Przy sondowaniach elektrooporowych o zasięgu ok. 500 m linie pomiarowe obsługuje 6—8 pracowników. W metodzie sondowań potencjalnych analogiczną pracę wykonuje 2 pracowników przy obsłudze układu 3X, 5XY lub 5UV oraz 4 przy obsłudze układu 3Y.

Poważne zmniejszenie rozstawów pomiarowych powiększa znaczenie wydajności pracy polowej metodą sondowań potencjalnych. W porównaniu z metodą

elektrooporową wydajność sondowań potencjalnych jest 4 — 6 razy większa.

7. Trzecią ważną cechą metody sondowań potencjalnych jest jej wysoka czułość pomiarowa. Znajduje ona wyraz w ostrych kontrastach krzywych pomiarowych.

Zmiany oporów badanej struktury geologicznej rysują się na krzywych sondowań potencjalnych znacznie wyraźniej niż na krzywych sondowań elektrooporowych. (Krzywe pomiarowe w układach 3Y oraz 3UV są bardziej kontrastowe w końcowej swej części w stosunku do końców krzywych w układach 3X lub 5XY).

8. Pomiaru na prąd zmienny w układach 3Y lub 5XY wyróżniają się jednorodnością warunków fizycznych. Najistotniejszą cechą metody jest stałe położenie wszystkich elektrod pomiarowych.

Sondowanie w układzie 5XY na prąd zmienny odbywa się wyłącznie za pośrednictwem zmian natężenia prądu zmiennego. Wyeliminowane są dzięki temu wszystkie przypadkowe błędy pochodzące od wpływu niejednorodności przypowierzchniowych, wpływu oporów kontaktowych, polaryzacji elektrod itp.

Obraz oscylograficzny krzywej sondowania potencjalnego na prąd zmienny jest wiernym odbiciem badanej struktury geologicznej.

Należy podkreślić wysoką ekonomikę sondowań na prąd zmienny. Pomiar odbywa się drogą zdjęcia fotograficznego ekranu oscylografu. Rzeczywisty czas pracy poświęcony jest rozmieszczeniu elektrod i podłączeniu linii pomiarowych na stosunkowo niewielkie rozstawy.

9. Określone wyżej własności metody sondowań potencjalnych, a więc przede wszystkim możliwość bezpośredniego określania głębokości zalegania horyzontów oporowych, następnie wysoka czułość na zmiany oporowe kontrastujących stref oporowych, wreszcie możliwość interpretowania struktur wielowarstwowych oraz duży zasięg głębokościowy pozwolą metodzie sondowań potencjalnych na uzupełnienie badań sejsmicznych na wielu obiektach geologicznych.

Spodziewać się należy, że w pewnych określonych układach geologicznych metoda sondowań potencjalnych zdoła całkowicie zastąpić nieporównanie kosztowniejsze badania sejsmiczne.

## SUMMARY

Potential sounding is a method of geoelectrical survey, DC or AC current. A method of deep electrical prospecting is presented where one of the pole of current source is connected with the middle electrode "O" while the second pole is connected with outside electrodes placed symmetrically equidistant to "O". The sounding is effected by means of equipotential surfaces allowing the direct evaluation of the depth.

The advantages are:

- 1 — Sounding curve is shown by equation  $\rho = f(h)$  where  $\rho$  is the apparent resistivity and  $h$  the depth.
- 2 — Considerable reach in depth by a rather small electrode spacing.
- 3 — High sensibility of the method on the resistivity contrasts.
- 4 — Possibility of interpretation of many layers.
- 5 — High economy.