

Félvezető hőmérsékletszelvényező fúróllyukműszerek méretezése

EGERER FRIGYES

A dolgozat a mélyfúrású geofizika félvezető lineáris ellenállás-hőmérséklet-karakterisztikájú lyukműszerei méretezési elméletét, és mérési eredményekre támaszkodó konkrét példáját ismerteti.

В работе излагается теория определения размеров полупроводниковых скважинных приборов промышленной геофизики, имеющих линейную характеристику сопротивления-температуры. Приводятся конкретные примеры, в основе которых лежат результаты измерений.

Es wird die Theorie der Bemessung der Karottage-Instrumente mit Halbleitern entwickelt, wenn diese Instrumente eine lineare Widerstand-Temperaturcharakteristik aufweisen. Auf Messresultate gestützt werden einige konkrete Beispiele behandelt.

Bevezetés

A mélyfúrások hőmérséklet-szelvényezésénél már korábban is alkalmaztak termisztoros szondákat, mégis ezek a lyukműszerek $0,01\text{ C}^\circ$ mérési pontosságuk ellenére sem terjedtek el széles körben. Ennek az egyes műszerek konstrukciós hibáin kívül alapvetően két oka volt. Először, a termisztorok felső méréshatára $80 - 100\text{ C}^\circ$ körül mozgott, másodszer a hőmérséklet függvényében exponenciális és nem lineáris jelet adtak [1].

Az első probléma, a félvezetők gyártástechnológiai kérdése, ma már megoldottnak tekinthető.

A második probléma a mérőrendszer áramkörébe épített hőmérsékletfüggő linearizáló egységgel — a megkívánt pontosság követelményeit figyelembe véve — szintén megoldható, és biztosítható a lineáris ellenállás-hőmérséklet-karakterisztika.

Elméleti alapok

Fúróllyukak hőmérsékletszelvényezésénél akkor járunk el helyesen, ha az érzékelőelemeket is tartalmazó mérőhidat teljes egészében lyukműszerben helyezzük el. Ez esetben a hőmérséklet okozta kábelellenállás-változások a mérő-, illetve tápegység ellenállásához adódnak; mivel az utóbbiak nagy ellenállásúak, hozzájuk képest a kábelellenállás-változás a mérési hiba mellett elhanyagolható. A lineáris ellenállás-hőmérséklet-karakterisztika biztosításának az a módja, amely a mérőhídon belüli linearizálás [7, 8], nem elégti ki sem a mélyfúrású geofizika pontosságának ($0,01\text{ C}^\circ$), sem mérési tartományának igényeit.

Tételezzük fel, hogy linearizáló elem nélkül a regisztráló galvanométeren jelentkező feszültséget a híd összes elektromos adatait tartalmazó

$$U_i = U_i[R_{ki}R_{nt}(T); R_i; R_b I] \quad (1)$$

függvény írja le. A kifejezésekben R_{ki} a híd hőmérsékletfüggetlen ellenállásai ($k=1, 2, 3$); R_{nt} a hőérzékelők (termisztorok) ellenállása ($n=1; 2$); R_i az indikátor-galvanométer belső ellenállása; R_b a tápegység belső ellenállása, T a hőmérséklet, I pedig a tápkörben folyó áram. Legyen U_i bármilyen függvénykapcsolatban a változókkal, azt a függvényt keressük, amely leírja az R_i -vel

(mérőköri linearizálás) vagy R_b -vel (tápköri linearizálás) sorbakötendő ellenállás hőmérsékletváltozását (ϱ_i, ϱ_b), — úgy, hogy a mért U_i a mérés hőmérsékletén egy általunk megszabott feltételt elégítsen ki. A linearizáló elemek mindkét esetben a lyukműszerben vannak gyakorlatilag a mindenkor mért hőmérsékletén. Mérőköri linearizálás esetén:

$$U_{ii} = U_{ii}[R_k; R_{nl}(T); (R_i + \varrho_i); R_b; I]. \quad (2)$$

Tápköri linearizálásnál:

$$U_{ib} = U_{ib}[R_k; R_{nl}(T); (R_b + \varrho_b); I]. \quad (3)$$

Keressük az előző függvényekből ϱ_b -t és ϱ_i -t.

A hőmérséklet abszolút értékének mérése esetén U_{ii} vagy U_{ib} lineáris kapcsolatban van T -vel, ha

$$\frac{\partial U_{ii}}{\partial T} = k_i, \quad (4)$$

illetve

$$\frac{\partial U_{ib}}{\partial T} = k_b, \quad (5)$$

ahol k_i és k_b állandók, melyek a megkívánt mérési intervallum és mérési pontosság alapján egy kijelölt T_0 pontnál, — ahol $\varrho_i = \varrho_{i0}$ és $\varrho_b = \varrho_{b0}$, — a (2) vagy (3) függvényből kaphatók.

Legyen az egyszerűség kedvéért a (4) és (5) kifejezés esetén ugyanaz a pontosság kívánalom, így

$$k_i = k_b = k \quad (6)$$

(4)-ből

$$k = \left(\frac{\partial U_{ii}}{\partial T} \right)_{T_0} \quad (7)$$

Integrálva pl. a (4) kifejezésből

$$U_{ii} = \left(\frac{\partial U_{ii}}{\partial T} \right)_{T_0} \cdot T + C. \quad (8)$$

Az integrálban szereplő C állandó a $T = T_0$; $\varrho_i = \varrho_{i0}$ feltételből számítható tehát

$$C = U_{iiT_0} \cdot T_0.$$

A (8) összefüggés végső alakja

$$U_{ii} = \left(\frac{\partial U_{ii}}{\partial T} \right)_{T_0} \cdot (T - T_0) + U_{iiT_0}. \quad (9)$$

Hasonlóan (5) alapján

$$U_{ib} = \left(\frac{\partial U_{ib}}{\partial T} \right)_{T_0} \cdot (T - T_0) + U_{ibT_0} \quad (10)$$

Elvileg kívánatos volna a $\varrho_0 = 0$ feltétel, azonban nincs olyan hőmérséklet-érzékelő (pl. termisztor), amelyre ez valós T_0 értékeknél teljesülne, ezért gyakorlatban a következő eljárás követendő. A $\varrho_0 = 0$ feltételre számítjuk ϱ -t, majd az ehhez legjobban illeszkedő ellenállás-hőmérséklet-karakterisztikájú és a kereskedelmi forgalomban kapható hőérzékelőből kialakított egység T_0 helyen mutatott ellenállását választjuk ϱ_0 -nak és megismételjük a fenti számítási eljárást. Egy-két közelítéssel az iterációs eljárás kielégítő eredményt ad.

Az előbbi gondolatsort gradiens- vagy anomália-szonda esetére alkalmazva, ha T a két érzékelő közepes hőmérséklete, a következőt kapjuk (a két érzékelő hőmérséklete a τ változó bevezetésével $T - \tau$, ill. $T + \tau$):

$$\frac{\partial U_{ii}}{\partial T} = 0 \quad (11) \quad \text{és} \quad \frac{\partial U_{ib}}{\partial T} = 0, \quad (12)$$

illetve:

$$U_{ii} = U_{iio} \quad (13) \quad \text{és} \quad U_{ib} = U_{ibo} \quad (14)$$

ahol $U_{iio} = U_{iiT=T_0}$, és hasonlóan $U_{ibo} = U_{ibT=T_0}$, tetszőleges τ -nál. A (13) és (14) egyenletekből pedig már kiszámítható ϱ_i és ϱ_b . A mérőműszerek gyakorlati kivitelénél nagyfokú áram- vagy feszültségstabilizálást kell biztosítani.

Mivel a mélyfűrészi geofizikai gyakorlatban a tápegységek belső ellenállása nagy, viszonylag könnyen biztosítható $1 - 2\%$ -os áramstabilitás. Ezért két példánkat most áramstabilitás esetére mutatjuk be.

A linearizáló egység számítása gradiens szondánál

Az 1. ábrán egy egyszerű termogradiens szonda kapcsolási rajzát mutatjuk be. Legyen egyelőre $\varrho' + R_i = R'_i$ -val. A felírt Kirchoff-törvények a következők:

$$\begin{aligned} 1. \quad & I - I_1 - I_2 = 0 \\ 2. \quad & I_1 - I_i - I_3 = 0 \\ 3. \quad & I_3 - I_4 - I = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{I.} \quad & -U + I_2 R_2 + R I_4 = 0 \\ \text{II.} \quad & -(R'_i + \varrho_v) I_i + R I_3 - R I_4 = 0 \\ \text{III.} \quad & R_1 I_1 + (R'_i + \varrho_v) I_i - R_2 I_2 = 0, \end{aligned}$$

ahol R_1 és R_2 a termisztorok, R a hőmérsékletfüggetlen ellenállások, R_i az indikátorellenállás, I a főágban folyó áram, U a tápfeszültség, I_1 ; I_2 ; I_3 ; I_4 az egyes ágakban folyó, I_i az indikátor áram, $\varrho_i = \varrho + \varrho_v$, pedig a hőmérséklet-linearizáló egység ellenállása a későbbiek miatt célszerűen bontott alakban. A Kirchoff-egyenletek megoldásaként

$$I_i = \frac{R(R_1 - R_2)}{(R_1 + R_2)(2R + R'_i + \varrho_v) + 2R(R_i + \varrho_v)} I \quad (15)$$

adódik, melyből az indikátorfeszültség

$$U_{ii} = \frac{R R_i (R_1 - R_2)}{(R_1 + R_2)(2R + R'_i + \varrho_v) + 2R(R'_i + \varrho_v)} I.$$

Legyen $\frac{U_{ii}}{I} = \Phi$, akkor (4) feltétel

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T} = C \quad (16)$$

alakot ölt.

A linearizáló egység nagymértékben egyszerűsödik, ha az eddig ϱ_v -vel jeölt ismeretlen ellenállás helyére a

$$\varrho_v = \frac{2R(R_1 + R_2)}{2R + R_1 + R_2} \quad (17)$$

ún. „*vakhidat*” kötjük. Ugyanis viszonylag nem túl nagyszámú (néhány tíz) termisztor ellenállás-hőmérséklet-karakterisztikájának gondos laboratóriumi beméréséből már a gyakorlati igényeket kielégítően választható négy olyan termisztor, amelyek karakterisztikája gyakorlatilag azonos, illetve hőmérsékletfüggetlen ellenállásokból álló kis javító ellenállásokkal azzá tehető. Így $R_1 + R_2 = 2R_i$ jelöléssel a Φ függvény a (17) összefüggés felhasználásával

$$\Phi = \frac{R_2 - R_1}{2R_i(4R + R'_i)}, \quad (18)$$

ahol

$R_1 = A_1 e^{\frac{B_1}{T-\tau}}$ és $R_2 = A_2 e^{\frac{B_2}{T+\tau}}$, A_1 és A_2 a termisztorok $T = \infty$ hőmérséklethez tartozó ellenállása, B_1 és B_2 pedig az energiaállandó. Az elmondottak szerint $A_1 \approx A_2$ és $B_1 \approx B_2$, valamint tekintve, hogy $\tau \ll T$ (τ néhány C°) felhasználva a $\frac{1}{T} \cdot \frac{1}{1 \pm \frac{\tau}{T}} \approx \frac{1}{T} \left(1 \pm \frac{\tau}{T} \right)$ relációt, a (18) összefüggés tovább így

alakul

$$\Phi = \frac{\text{sh} \frac{B\tau}{T^2}}{4R + R'_i}. \quad (19)$$

Mivel kis értékekre $\text{sh} \frac{B\tau}{T^2} \sim \frac{B\tau}{T^2}$,

$$\Phi = \frac{B\tau}{T^2(2R + R_1 + \varrho')}. \quad (20)$$

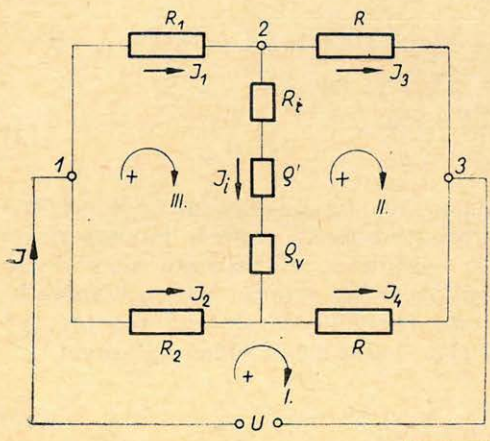
Az előzőkben ismertetett (13) összefüggés alapján

$$\frac{B\tau}{T^2(4R + R_1 + \varrho')} = \frac{B\tau}{T_0^2(4R + R_i + \varrho'_0)},$$

illetve

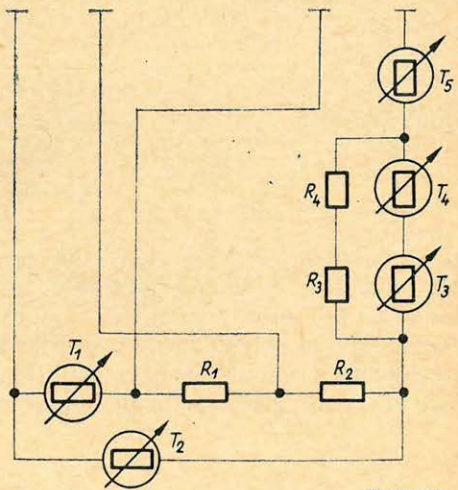
$$\varrho'_0 = \left(\frac{T_0^2}{T^2} - 1 \right) (4R + R_i) + \frac{T_0^2}{T^2} \varrho'_0. \quad (21)$$

Bizonyítható ezzel az is, hogy a függvény τ -ra nézve lineárisává válik, ugyanis



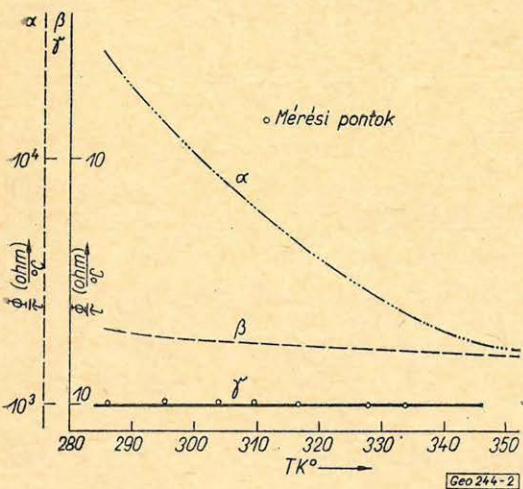
Geo 244-1

1. ábra Φ uz. 1. Fig. 1.



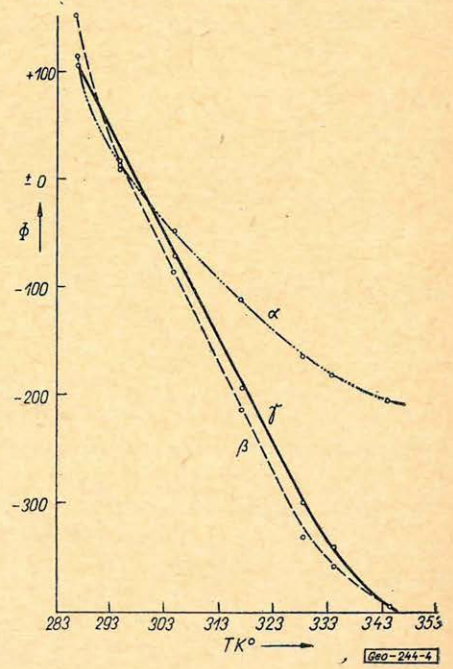
Geo 244-3

2. ábra Φ uz. 2. Fig. 2.



Geo 244-2

3. ábra Φ uz. 3. Fig. 3.



Geo-244-4

4. ábra Φ uz. 4. Fig. 4.

(21) kifejezést (20)-ba behelyettesítve

$$\Phi = \frac{B\tau}{T_0^2(4R + T_0^2R_i + \varrho'_0)}. \quad (22)$$

Ebből következően pedig U_{ii} is lineáris függvénye a τ -nak. Az a feltétel pedig, hogy a linearizáló egység (ϱ') a közepes mérési hőmérsékleten dolgozzon, a ϱ' két részre bontásával technikailag könnyen megvalósítható.

Az U_{ii} függvénybe R_1 és R_2 értékét helyettesítve, figyelembe véve, hogy gyakorlatilag

$$\frac{C\tau}{T^2} \sim 0, \text{ ezért ch } \frac{B\tau}{T^2} \sim 1, \text{ sh } \frac{B\tau}{T^2} \sim \frac{B\tau}{T^2},$$

$\varrho_0 = 0$ esetén a következő alakot kapjuk:

$$U_{ii} = \frac{RR_i \frac{B\tau}{T^2} I}{A(2R + R_i) + RR_i e^{-\frac{B}{T}}}. \quad (23)$$

A $\Phi(T)/\tau$ kifejezést ábrázoltuk 2. ábrán egy mért karakterisztikájú termisztorpárra, $T_0 = 333 \text{ K}^\circ$, $B = 3960 \text{ K}^\circ$; $A = 0,00185\Omega$ az $R_i = 6 \text{ k}\Omega$ és $R = 1 \text{ k}\Omega$ esetén (α görbe). Ugyancsak a 2. ábrán az előbbieket szerint ismertetett „vakhid” bekapcsolásával mutatjuk a Φ/τ függvényt (β görbe). Majd $2TT1,5$ és $2TT0,6$ típusú Tungstram termisztorokból kialakított linearizáló tag bekapcsolásával a γ görbéhez jutunk. A linearizáló tag ellenállása 20 C° -on $2,3 \text{ k}\Omega$. A kapcsolás elvi sémája tehát a 3. ábra szerint alakul.

Nem kétséges, hogy a linearizálás művelete rontja a termisztoros szonda érzékenységet, de még így is lényegesen nagyobb a műszer ellenállásváltozása, mint a huzallellenállásból készült műszereké. Jól látható ez, ha a termoszonák érzékenységének jellemzésére általánosan használt műszerállandó „ $c \text{ C}^\circ/\Omega$ ” alapján végzünk összehasonlítást. A műszerállandó értelmezése ($c \text{ C}^\circ/\Omega$) az irodalomban megtalálható [1; 2].

A műszer-indikátor feszültségével, tápáramával és a hőmérsékletkülönbséggel a következő összefüggés áll fenn:

$$\Delta U_{ii} = \frac{\Delta\tau}{c} I.$$

A műszer annál jobb, minél kisebb a c . Ez általában 2–3 körüli érték a huzallellenállásból készült műszereknél, pl. a szovjet *ETSZ* típusnál 2. A c értéke a 2. ábra γ görbéjéből leolvastva $0,1 \text{ C}^\circ/\Omega$, ami hússzor kedvezőbb érték, mint az említett típusé. Figyelembe véve, hogy B és R növelésével termisztoros berendezésnél a c $0,02 \text{ C}^\circ/\Omega$ értékig eltolható, a félvezetős linearizált szondák százszor érzékenyebbek lehetnek a példaként hozott és igen érzékeny szondának ismert típusnál.

Megjegyzendő, hogy a híd jósága a termisztorpár gondos kiválasztásán is múlik, ezért azt rendkívül körültekintően kell végrehajtani. Az irodalom e tárgyban is bőséges pl. [3, 4, 5].

A linearizáló egység számítása abszolút szondánál

Ez esetben $R_2 = R$ és $R_1 = R_T$, tehát az indikátor-feszültségfüggvény a következő alakot ölti

$$U_{ii} = \frac{(R_T - R)RR_i}{(R_T + R)(2R + R_i' + \varrho') + 2R(R_i'' + \varrho_v')}; \quad (24)$$

a vakhíd ellenállása

$$\varrho_v' = \frac{2R(R_T + R)}{R_T + 2R} \quad (25)$$

és

$$R_i'' = R_i + \varrho''.$$

Így

$$\Phi = \frac{U_{ii}}{I} = \frac{R_T - R}{(R_T + R)(4R + R_i'')} \quad (26)$$

A (8) összefüggés, valamint $T = T_0$ -nál az $R_{T_0} = R$; $(U_{ii})_{T_0} = 0$ és a $\varrho'' = \varrho_0'' = 0$ feltételek alapján

$$\frac{(R_T - R)R_i R}{(R_T + R)(4R + R_i + \varrho'')} = k'(T - T_0), \quad (27)$$

ahonnan, abszolút szondára linearizáló tagra a

$$\varrho'' = \frac{(R_T - R)RR_i}{k'(T - T_0)(R_T + R)} - (4R + R_i) \quad (28)$$

függvényt kapjuk.

$T_0 = 297,3 \text{ K}^\circ$ -ot választva (7) alapján meghatározva a k' értékét $10,1 \text{ } \Omega/\text{C}^\circ$, $R = 10^3 \text{ } \Omega$ és $R_i = 6 \cdot 10^3 \text{ } \Omega$ értékre egy mért ellenállás-hőmérséklet-karakterisztikájú $2TT1,5$ típusú termisztort tartalmazó hídra a 4. ábrán mutatjuk be a (26) összefüggését (α görbe); a vakhíddal javított függvényt (27) alapján (β görbe) és a linearizáló taggal javítottat (γ görbe).

Jól látható, hogy a lineáris karakterisztika biztosított, az érzékenység közel $100 \text{ } \Omega/\text{C}^\circ$, ami nagyságrenddel meghaladja a huzalellenállások értékeit.

Következtetések

Az elmondottakból, a számításokból és a bemutatott mérési eredményekből kitűnik, hogy a mélyfúrású geofizikai célokra készíthető olyan termogradiens szonda, melynek érzékenysége $10 - 15 \text{ } \Omega/\text{C}^\circ$, és $100 - 150 \text{ } \Omega/\text{C}^\circ$ érzékenységu abszolút szonda, melyeknek ellenállás-hőmérséklet-karakterisztikája gyakorlati szempontból lineáris. Ez pedig annyit jelent, hogy a különböző típusú termométerek eddigiekben is ismert felhasználási körének [1; 6] további bővítése válik lehetségessé.

IRODALOM

- [1] A. Z. Позин: Дифференциальная термометрия газовых и нефтяных скважин. Издательство „Недра” Москва 1964.
- [2] С. Г. Комаров: Техника промышленной геофизики. Гостоптехиздат, Москва 1967.
- [3] E. Aslan: Thermistor Bead matching for temperature Compensated RF power thermistor mounts. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 16. 3. 1967. sept. pp. 192 - 196.
- [4] И. Ф. Волошин: Электрические цепи постоянно тока с термисторами. Издательство АН БССР. Минск 1962.
- [5] А. Г. Шашков: Терморезисторы и их применение. „Энергия” Москва 1967.
- [6] K. S. Kunz, M. P. Tixier: Temperature surveys in gas producing wells. J. of Petroleum Technology. Vol. 204. 1955. pp. 111 - 119.
- [7] Richards, J. S. C.: Sensitive thermistor thermometer, Electronic Engineering 1967. Vol. 39. pp. 674 - 676.