

ZAGADNIENIE DOBORU CZĘSTOTLIWOŚCI POLA ELEKTRYCZNEGO W DIELEKTRYCZNYM POMIARZE WILGOTNOŚCI GLEB ZASOLONYCH

M.A. Malicki, W. Skierucha

Instytut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

e-mail: mmal@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie. W cyfrowych systemach akwizycji danych czytelne są wyłącznie sygnały elektryczne. Dlatego stosowane czujniki muszą przetwarzać mierzoną wielkość na proporcjonalny sygnał elektryczny. Kluczem do rozwiązania problemu elektrycznego pomiaru danej wielkości w sposób selektywny jest znalezienie takiej elektrycznej właściwości medium warunkującego tę wielkość, która jest dla niego unikatowa. W odniesieniu do problemu elektrycznego pomiaru wilgotności gleby medium warunkującym wilgotność jest woda a jej unikatową właściwością jest polarna struktura molekuł (molekuła wody posiada trwały moment dipolowy równy 1.87 D). Polarność molekuł wody powoduje, że dielektryczna przenikalność wody dominuje przenikalność stałej fazy gleby (względna przenikalność dielektryczna wody w polu o częstotliwości poniżej 10 GHz i w temperaturze 18°C, wynosi 81, podczas gdy względna przenikalność dielektryczna fazy stałej wynosi w tych warunkach 4÷5). Ponieważ dielektryczna przenikalność gleby jest warunkowana jej wilgotnością, elektryczny monitoring wilgotności gleby realizuje się w oparciu o pomiar jej przenikalności dielektrycznej.

Zarówno składniki stałej fazy gleby jak i woda, są praktycznie izolatorami (nie przewodzą znaczącego prądu elektrycznego). Obecność jonów w „wodzie glebowej” czyni z niej elektrolit przewodzący prąd elektryczny. Dlatego gleba w polu elektrycznym wykazuje dwoistą naturę, dielektryka (izolatora) oraz przewodnika. Zatem dielektryczna przenikalność gleby jest wielkością zespoloną, której składowa rzeczywista jest warunkowana wilgotnością zaś urojona zasoleniem. Zasolenie znacząco utrudnia dielektryczny pomiar wilgotności gleby powodując potrzebę częstej, specyficznej dla każdej gleby, kalibracji pomiaru *in situ*.

W pracy przedstawiono dyskusję warunków, w których dielektryczny pomiar wilgotności gleby byłby wolny od wpływu elektrycznej konduktywności obecnego w niej elektrolitu. Znalezione częstotliwość pola elektrycznego jakim należy pobudzać glebę przy jej określonym zasoleniu, by interpretacja dielektrycznego pomiaru wilgotności tej gleby była wolna od wpływu zasolenia.

Słowa kluczowe: metoda dielektryczna, stała dielektryczna, wilgotność.

WPROWADZENIE

Koncentracja wody w glebie, (wilgotność gleby) oraz temperatura gleby są wielkościami silnie zmieniającymi się w czasie i w przestrzeni, podczas gdy koncentracja stałej fazy (gęstość gleby) jak również gęstość jej składników (gęstość cząsteczkowa) są wielkościami praktycznie stabilnymi.

Zmiany elektrycznej pojemności kondensatora z glebą w roli dielektryka przypisuje się zmianom wilgotności gleby, ponieważ przenikalność dielektryczna wody (względna wartość równa 81 w 18°C) dominuje przenikalność dielektryczną fazy stałej gleby (względna wartość ok. 4÷5) oraz powietrza (względna wartość równa 1). Uwzględniając powyższe przyjęto realizować elektryczny pomiar wilgotności gleby w oparciu o skorelowaną z nią przenikalność dielektryczną [2, 4, 5, 6]. Takie rozwiązanie problemu nie jest jednak doskonałe. Obecność jonów w „wodzie glebowej” czyni z niej przewodzący prąd elektryczny elektrolit. Dlatego gleba w polu elektrycznym wykazuje dwoistą naturę. Posiada ona jednocześnie właściwości izolatora charakteryzowanego przenikalnością dielektryczną wody, składników stałej fazy gleby oraz powietrza, jak również przewodnika, charakteryzowanego konduktywnością elektryczną elektrolitu (założono, że konduktywność stałej fazy gleby oraz powietrza jest pomijalna). Zatem dielektryczna przenikalność gleby jest wielkością zespoloną, której składowa rzeczywista jest warunkowana wilgotnością zaś urojona zasoleniem.

Przedstawiona dyskusja dotyczy warunków, w których dielektryczny pomiar wilgotności gleby byłby wolny od wpływu elektrycznej konduktywności obecnego w niej elektrolitu. Celem rozważań jest określenie częstotliwości pola elektrycznego jakim należy pobudzać glebę, by interpretacja jej reakcji na to pobudzenie odnosiła się wyłącznie do zawartej w glebie wody oraz fazy stałej.

DYSPERSJA DIELEKTRYCZNEJ PRZENIKALNOŚCI ELEKTROLITU

Przenikalność dielektryczna, ϵ , elektrolitu jest wielkością zespoloną, której wartość zależy od częstotliwości pola elektrycznego, f . Składowa rzeczywista, $\text{Re}(\epsilon)$ oraz urojona, $\text{Im}(\epsilon)$ względnej przenikalności dielektrycznej elektrolitu wynoszą [1, 3]:

$$\text{Re}(\epsilon) = \epsilon' \quad (1)$$

$$\text{Im}(\varepsilon) = \varepsilon'' + \frac{\sigma_e}{\omega\varepsilon_0} \quad (2)$$

gdzie: ε' – składowa rzeczywista względnej zespolonej przenikalności dielektrycznej wody, ε'' – składowa urojona względnej zespolonej przenikalności dielektrycznej wody, σ_e – elektryczna konduktywność elektrolitu (S m^{-1}), ω – pulsacja pola równa $2\pi f$ (s^{-1}), ε_0 – dielektryczna przenikalność próżni (F m^{-1}).

Składową rzeczywistą oraz urojoną względnej zespolonej przenikalności dielektrycznej wody określają formuły Cole-Cole [1, 3]:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \left[1 + (\omega\tau)^{1-h} \sin \frac{h\pi}{2} \right]}{1 + (\omega\tau)^{2(1-h)} + 2(\omega\tau)^{1-h} \sin \frac{h\pi}{2}} \quad (3)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \left[(\omega\tau)^{1-h} \cos \frac{h\pi}{2} \right]}{1 + (\omega\tau)^{2(1-h)} + 2(\omega\tau)^{1-h} \sin \frac{h\pi}{2}} \quad (4)$$

gdzie: ε_∞ – względna przenikalność dielektryczna wody gdy $\omega > \tau^{-1}$, ε_s – względna przenikalność dielektryczna wody gdy $\omega = 0$, τ – czas relaksacji polaryzacji orientacyjnej wody, (s) , h – parametr wyrażający interakcję dipoli wody: $0 < h < 1$.

Podstawiając (4) do (2) otrzymujemy $\text{Im}(\varepsilon)$ elektrolitu:

$$\text{Im}(\varepsilon) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \left[(\omega\tau)^{1-h} \cos \frac{h\pi}{2} \right]}{1 + (\omega\tau)^{2(1-h)} + 2(\omega\tau)^{1-h} \sin \frac{h\pi}{2}} + \frac{\sigma_e}{\omega\varepsilon_0} \quad (5)$$

Wartość bezwzględna (moduł) zespolonej przenikalności dielektrycznej elektrolitu, k , wynosi:

$$k = |\varepsilon| = \sqrt{[\text{Re}(\varepsilon)]^2 + [\text{Im}(\varepsilon)]^2} \quad (6)$$

Rozwiązanie (3) i (5) dla różnej ω pozwala znaleźć częstotliwościową dyspersję ε' oraz k , tzn. zależność ich wartości od częstotliwości pola elektrycznego [7].

Rysunek 1 przedstawia częstotliwościową dyspersję modułu, k , zespolonej przenikalności dielektrycznej elektrolitu oraz dyspersję jej składowej rzeczywistej, ε' , dla elektrolitu o różnej konduktywności, σ_e .

W obliczeniach przyjęto:

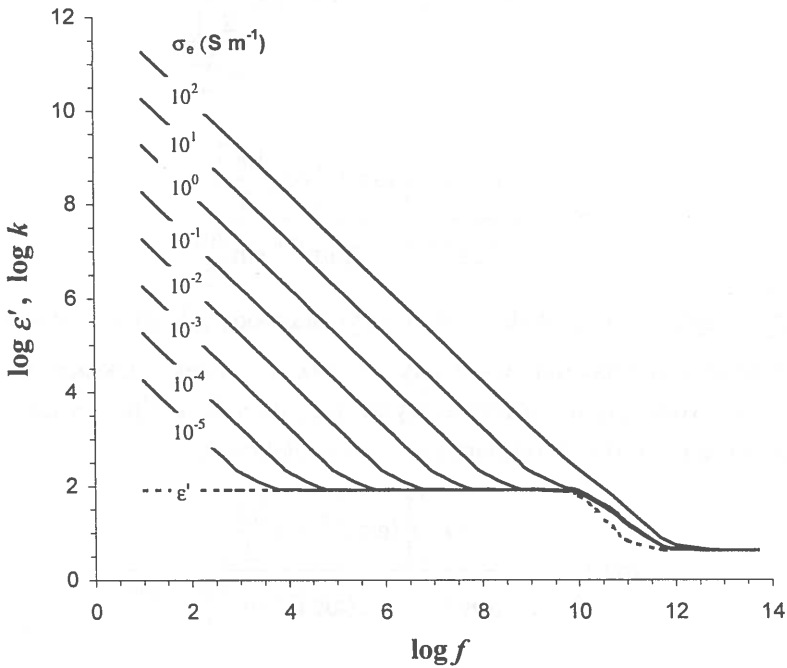
$$\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1},$$

$$\varepsilon_s = 81,$$

$$\varepsilon_\infty = 4,23 [3],$$

$$h = 0,013 [3]$$

$$\tau = 9,3 \times 10^{-12} \text{ s [3]}.$$



Rys. 1. Częstotliwościowa dyspersja składowej rzeczywistej, ε' , oraz modułu, k , zespolonej przenikalności dielektrycznej elektrolitu dla jego różnych konduktywności, σ_e .

Fig. 1. Frequency dispersion of the real part, ε' , and modulus, k , of the complex dielectric constant of the electrolyte for different conductivities.

Widać, że w określonym paśmie częstotliwości oraz w określonym zakresie konduktywności $k = \varepsilon'$. Znaczy to, że składowa urojona dielektrycznej przenikalności elektrolitu, $\text{Im}(\varepsilon'')$, jest wtedy pomijalna, zaś elektrolit zachowuje się jak dielektryk (izolator). Prawa granica tego pasma jest warunkowana stratami dielektrycznymi (relaksacyjnymi) wody i wynosi ok. 10^{10} Hz, zaś lewa zależy od elektrycznej konduktywności elektrolitu, σ_e . Zatem, stosując dostatecznie wysoką częstotliwość pola elektrycznego, f_{\min} , zasilającego czujnik, można dielektryczny pomiar wilgotności gleby uwolnić od wpływu jej konduktywności elektrycznej, jeśli elektryczna konduktywność obecnego w glebie elektrolitu nie przekracza 10 S m^{-1} . Częstotliwość tę znajdujemy korelując wartości częstotliwości w punkcie przebiegu krzywych z odpowiadającymi im wartościami σ_e :

$$\lg f_{\min} = 8.5 + \lg \sigma_e \quad (7)$$

Biorąc pod uwagę, że elektryczna konduktywność gleby w warunkach nasycenia elektrolitem jest około $5 \div 15$ razy mniejsza od konduktywności samego elektrolitu [8], f_{\min} wyznaczona dla elektrolitu odnosi się również do gleby.

WNIOSKI

1. Im mniejsza jest elektryczna konduktywność obecnego w glebie elektrolitu tym niższa jest częstotliwość graniczna pola elektrycznego, od której począwszy elektrolit zachowuje się jak czysta woda (dielektryk, izolator), umożliwiając tym samym dielektryczny pomiar wilgotności gleby, wolny od wpływu jej konduktywności elektrycznej.
2. Im mniejsza jest elektryczna konduktywność gleby tym niższa jest częstotliwość graniczna pola elektrycznego, od której począwszy gleba zachowuje się jak dielektryk (izolator), umożliwiając tym samym dielektryczny pomiar jej wilgotności, wolny od wpływu elektrycznej konduktywności gleby.
3. Jeśli elektryczna konduktywność obecnego w glebie elektrolitu nie przekracza 1 S m^{-1} to przy odpowiednio wysokiej, ale nie wyższej niż 10^{10} Hz, częstotliwości pola elektrycznego działającego na obecny w glebie elektrolit prąd przesunięcia (polaryzacji dielektrycznej) jest zdominowany przyczynkiem orientacyjnej polaryzacji wody.

PIŚMIENNICTWO

1. **Chelkowski A.:** Fizyka dielektryków. PIW, Warszawa, 1972.
2. **Gardner C.M.K., Bell J.P., Cooper J.D., Dean T.J., Hodnett M.G.:** Soil water content. In: Soil Analysis: Physical Methods, eds: C.E. Mullins & K.A. Smith, Marcel Dekker, New York, pp. 1-73, 1991.
3. **Hasted J.B.:** Aqueous dielectrics. Chapman and Hall, London, 1973.
4. **Malicki M.A.:** A capacity meter for the investigation of soil moisture dynamics. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 220, 201-214, 1983.
5. **Malicki M.A., Skierucha W.M.:** A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse. Irrigation Science, 10, 153-163, 1989.
6. **Malicki M.A.:** A reflectometric (TDR) meter of moisture content in soils and other capillary-porous materials. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 388, 107-114, 1990 a.
7. **Malicki M.A.:** Metodyczne zagadnienia monitoringu statusu wody w wybranych materiałach biologicznych (in Polish). Acta Agrophysica, 19, Lublin 1999.
8. **Malicki M. A., Walczak R. T.:** Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. European J. Soil Sci., 505-514, September, 1999.

CHOICE OF FREQUENCY OF ELECTRIC FIELD IN DIELECTRIC METHODS FOR THE DETERMINATION OF WATER CONTENT IN SALTY SOILS

M.A. Malicki, W. Skierucha

Institute of Agrophysics PAS, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27, Poland

Summary. Digital data acquisition systems read only electric signals. Therefore the applied sensors must convert the measured value to the corresponding electrical signal. The key to the solution of the selective electric measurement of a certain quantity is to find an unique electrical property of a medium which determines this quantity. Concerning the problem of electrical measurement of soil moisture, the medium determining the soil moisture is water and the unique property of water is polar structure of its molecules (the permanent dipole moment of a water molecule is equal to 1.87 D). The polarity of water molecules results in the domination of water dielectric permittivity over the soil solid phase dielectric permittivity (below 10 GHz and for 18°C the relative dielectric permittivity of water is 81, while 4+5 for the soil solid phase). Thus, because

moisture determines dielectric permittivity of soil, therefore it is widely accepted to monitor the soil moisture as based on the measurement of its dielectric permittivity.

Soil water is an electrolyte conducting electrical current because of the presence of ions in it. Therefore soil in the electric field possesses dual nature; it behaves as dielectric (isolator) and conductor simultaneously. Thus, the soil dielectric permittivity is a complex value, where the real part is determined by soil moisture and imaginary part by soil salinity. Salinity makes the dielectric measurement of the soil moisture troublesome and sometimes impossible. Because of the soil salinity a soil specific calibration of readings is necessary.

The paper discusses conditions where the dielectric soil moisture measurement would not be affected by the electrical conductivity introduced by the soil electrolyte. The frequency of electric field applied to excite the soil of a defined salinity is discussed, having in mind to free the interpretation of dielectric soil moisture measurement from the influence of soil electrical conductivity.

Keywords: dielectric method, soil water content.