

Wpłynęło 28.10.2011 r.
Zrecenzowano 17.01.2012 r.
Zaakceptowano 02.04.2012 r.
A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

ZASOLENIE GLEBY WYZNACZANE SENSORAMI FDR, DZIAŁAJĄCYMI W ZMIENNEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

**Andrzej WILCZEK^{1) AEF}, Wojciech SKIERUCHA^{1) ADF},
Grzegorz JANIK^{2) BCD}, Jolanta CIEŚLA^{1) BCD}, Viliam PICHLER^{3) BDF}**

¹⁾ Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie

²⁾ Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska

³⁾ Uniwersytet Techniczny w Zwoleńiu, Wydział Ochrony Środowiska, Katedra Leśnictwa, Słowacja

Streszczenie

Pomiar zasolenia gleby jest dokładnie opisany w literaturze, zwłaszcza przez autorów zajmujących się badaniem parametrów fizykochemicznych gleby w rejonach zagrożonych suszą. Zasolenia gleby, rozumianego jako elektryczna konduktywność ekstraktu roztworu glebowego, nie można zmierzyć w sposób selektywny. Wynika to z faktu, że na pomiar wpływa nie tylko zawartość soli w postaci rozpuszczonych jonów, ale także wilgotność gleby, temperatura i tekstura. Zatem pomiar poziomu zasolenia gleby, szczególnie w warunkach polowych, nadal wymaga prac związanych z metodyką oraz stosowaną aparaturą pomiarową. Idealny miernik zasolenia gleby powinien mierzyć chwilowe wartości wszystkich elementów istotnie wpływających na wynik pomiaru, w tym samym czasie i w tym samym miejscu. Zastosowanie sensorów dielektrycznych, tj. sensorów działających w technice TDR (ang. “time domain reflectometry”) [TOPP i in. 1980] i FDR (ang. “frequency domain reflectometry”) [HILHORST, DIRKSEN 1994], umożliwiło integrację czujników wilgotności, przewodnictwa elektrycznego i temperatury gleby w jednym urządzeniu pomiarowym. W artykule przedstawiono elektryczny model sensora FDR, działającego w zakresie częstotliwości od 10–500 MHz, przeznaczonego do pomiaru stanu zasolenia gleby, określonego jako pochodna cząstkowa jej przewodnictwa elektrycznego w stosunku części rzeczywistej zespolonej przenikalności elektrycznej. Jego innowacyjność polega na zastosowaniu szerokiego zakresu częstotliwości pomiaru w celu identyfikacji czynników wpływających na zasolenie gleby, objawiających się w różny sposób przy zmianie częstotliwości sygnału badanego.

Słowa kluczowe: metrologia agrofizyczna, reflektometria częstotliwościowa, sondy reflektometryczne, wilgotność gleby, zasolenie gleby

WSTĘP

Zasolenie gleby jest definiowane jako wagowa zawartość soli w jednostce objętości wody glebowej i podawana w gramach na litr wody. Ze względu na niemożność wyznaczenia tej wartości bez pobrania próbki do badań laboratoryjnych, do wyrażania poziomu zasolenia wykorzystywana jest elektryczna konduktywność elektrolitu ekE (wody glebowej). Mierzona wartość ekE jest liniowo zależna od zawartości soli i wyrażana w jednostkach $S \cdot m^{-1}$. Najczęściej stosowaną metodą pomiaru zasolenia jest pomiar elektrycznej konduktywności pasty glebowej, otrzymywanej przez zmieszanie w odpowiednich proporcjach wody destylowanej z próbką glebową. Inną metodą jest instalowanie na trwale w glebie sączków, za pomocą których otrzymywany jest elektrolit, którego mierzy się konduktywność. Do określania konduktywności wykorzystywane są także bloczki kapilarno-porowate z umieszczonymi w nich elektrodami pomiarowymi. W bloczkach tych wielkość porów jest tak dobrana, aby były one ciągle nasycone elektrolitem glebowym w możliwie najszerszym zakresie wilgotności badanej gleby. Występuje wtedy równowaga stężeń elektrolitu glebowego i elektrolitu zawartego w porach bloczka. Metody te, ze względu na długi czas reakcji lub konieczność pobierania próbki, nie nadają się do zastosowań w systemach monitoringu. W celu rozwiązania tego problemu pojęto próby wykorzystania metod elektrooporowych, opartych na pomiarze elektrycznej konduktywności gleby ekG . Wartość ekG zależy nie tylko od ekE , ale także od wilgotności gleby i jej właściwości fazy stałej. Pomiar zasolenia metodami elektrooporowymi przyjęto stosować w wilgotnościach bliskich nasycenia ze względu na pomijalny wpływ wilgotności na wartość pomiaru [RHOADES 1984], co uniemożliwia zastosowanie tych metod do monitoringu poziomu zasolenia gleby, ponieważ stan jej nasycenia występuje bardzo rzadko. W celu selektywnego i szybkiego pomiaru zasolenia gleby metodą *in situ*, możliwego do zastosowań w systemach monitoringu, podjęto próbę poszukiwania parametru, który w sposób niezależny od wilgotności i temperatury byłby skorelowany z ekE , a więc zasoleniem gleby. Takim parametrem okazał się wskaźnik zasolenia WZ gleby, który został wprowadzony przez MALICKIEGO [1993], jako wartość pochodnej cząstkowej elektrycznej konduktywności gleby po pozornej przenikalności elektrycznej.

$$WZ = \frac{\partial ekG}{\partial \varepsilon} \quad (1)$$

Do wyznaczenia WZ wykorzystał on metodę TDR (ang. „time domain reflectometry”) [MALICKI, SKIERUCHA 1989], w której pozorną przenikalność elektryczną i elektryczną konduktywność gleby wyznaczano z prędkości przemieszczania się impulsu elektromagnetycznego i jego tłumienia w falowodzie umieszczonym w glebie. Wskaźnik zasolenia jest funkcją elektrycznej konduktywności elektrolitu glebowego, niezależną od wilgotności objętościowej gleby.

Zauważono, że WZ zależy od uziarnienia (tekstury) gleby. Podano również zależność między zasoleniem gleby (rozumianym jako elektryczna konduktywność elektrolitu glebowego ekE), wskaźnikiem zasolenia i zawartością frakcji piasku w glebie. Celem tej pracy było zbadanie, czy jest możliwe wyznaczenie wskaźnika zasolenia sondą dwuprętową FDR, opracowaną w Instytucie Agrofizyki PAN wraz z metodyką pomiaru [SKIERUCHA, WILCZEK 2010].

METODY BADAŃ

Opracowana w IA PAN metoda umożliwia wyznaczenie widma częstotliwościowego zespolonej przenikalności elektrycznej badanej próbki glebowej:

$$\varepsilon = \text{Re}(\varepsilon) + j \text{Im}(\varepsilon) \quad (2)$$

Wiadomo, że część urojona zespolonej przenikalności elektrycznej dla elektrolitu o określonej konduktywności elektrycznej [HASTED 1973] równa jest sumie dwóch składowych opisanych wzorem:

$$\text{Im}(\varepsilon) = \varepsilon_d + \frac{\sigma_{DC}}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (3)$$

gdzie:

- ε_d – stratność elektryczna,
- ε_0 – przenikalność elektryczna próżni,
- σ_{DC} – konduktywność stałoprądowa.

Wielkość stratności elektrycznej ε_d wynika z zachowania się cząsteczek polarnych wody w zmiennym polu elektrycznym. Zachowanie się tej składowej w funkcji częstotliwości zależy od wielu czynników, takich jak: ilość wody swobodnej opisywana modelem Debye'a, ilość wody związanej zależna od powierzchni fazy stałej gleby oraz zawartości cząstek koloidalnych, wywołujących efekt Maxwella-Wagnera. Cząsteczki wody związanej, znajdujące się w pobliżu fazy stałej gleby, mają ograniczoną swobodę ruchu, wynikającą z oddziaływania międzycząsteczkowego, co powoduje, że część energii pola elektrycznego zamienia się w ciepło. Stratność elektryczna dla wody swobodnej zwiększa się wraz ze wzrostem częstotliwości pola elektrycznego, podczas gdy dla cząsteczek wody związanej maleje. Dla gleby w zakresie częstotliwości 10^8 MHz oba procesy mogą się równoważyć, jak również jeden z nich może dominować.

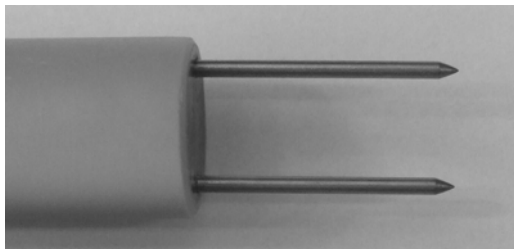
Drugą składową równania (2), dominującą w zakresie niskich częstotliwości, jest konduktywność stałoprądowa σ_{DC} badanego materiału, która reprezentuje przewodnictwo jonowe. Składowa ta zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do częstotliwości zewnętrznego pola elektrycznego.

W pracy wyznaczono wskaźnik zasolenia za pomocą metody FDR. W tym przypadku wzór na wskaźnik zasolenia (1) został zmodyfikowany tak, że pozorną przenikalność elektryczną ε , wyznaczaną metodą TDR, zastąpiono wartością średnią części rzeczywistej przenikalności elektrycznej, wyznaczonej dla pasma 390–485 MHz, a ekG zastąpiono elektryczną konduktywnością stałoprądową σ_{DC} .

$$WZ = \frac{\partial \sigma_{DC}}{\partial \text{Re}(\varepsilon)} \quad (4)$$

Materiałem badanym była próbka czarnej ziemi pochodząca z Annopola. Gleba ta znajduje się w banku gleb Polski zebranych w IA PAN [GLIŃSKI i in. 1991] w Lublinie i ma nadany numer 529. Badaną glebę pobrano z głębokości ok. 70 cm, w związku z tym w jej składzie granulometrycznym występowała wyłącznie frakcja piasku. Charakteryzowała się ona małą zawartością materii organicznej – poniżej 0,7%. Gęstość tej gleby wynosi $1,76 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$, powierzchnia właściwa $8 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, a wilgotność nasycenia 0,27. Glebę wybrano tak, aby na wielkość mierzonej przenikalności elektrycznej wpływały w minimalnym stopniu czynniki inne niż wilgotność i zasolenie. Takimi czynnikami mogą być np. pęcznienie gleby lub duża zawartość składników pochodzenia organicznego. Aby zbadać wpływ zasolenia przygotowano 5 serii po 10 próbek gleby, które umieszczono w plastikowych pojemnikach o objętości roboczej 125 ml, a następnie suszono w temperaturze 105°C przez 24 godziny. Po wysuszeniu próbki gleby zostały szczelnie zamknięte i zważone. Dla każdej serii wilgotność próbek zmieniano równomiernie co 0,1 wilgotności nasycenia, dozując odpowiednie ilości roztworu do określonej objętości wysuszonej gleby. W celu uzyskania zmiennego zasolenia, do uwilgotnienia każdej serii próbek użyto roztworów KCl o wartościach konduktywności elektrycznej 0, 5, 10, 15 i $20 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Aby uzyskać jednorodny rozkład wilgotności próbek, były one szczelnie zamykane w pojemnikach i wygrzewane w temperaturze 45°C przez trzy dni. Na tak przygotowanych próbkach dokonywano pomiarów widma zespolonej przenikalności elektrycznej.

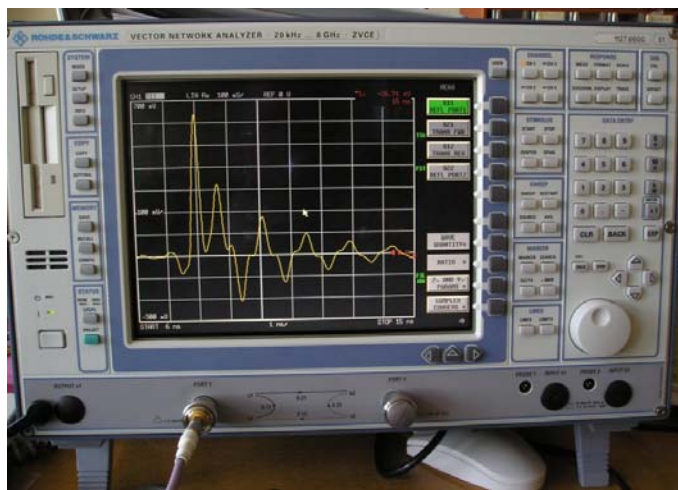
W pomiarach zastosowano sondę dwuprętową (fot. 1). Sondę zbudowano z dwóch prętów ze stali nierdzewnej o średnicy 2 mm, długości 30 mm i rozstawie 13 mm. Pomiary wykonywano za pomocą wektorowego analizatora sieci typu



Fot. 1. Dwuprętowa sonda pomiarowa wykorzystywana w badaniach (fot. A. Wilczek)

Photo 1. Two-rods probe used in measurements (photo A. Wilczek)

ZVCE firmy Rohde&Schwarz (fot. 2) [Rohde&Schwarz 2001], o zakresie częstotliwości pomiarowych od 20 kHz do 8 GHz. Anizatorem mierzono zespolony współczynnik odbicia S11 od sondy dwupętowej umieszczonej w badanym ośrodku. Zmierzony parametr był podstawą do wyznaczenia widma zespolonej przenikalności elektrycznej badanego ośrodku z zastosowaniem odpowiedniego modelu i metodyki kalibracyjnej.



Fot. 2. Wektorowy analizator sieci wykorzystywany do wyznaczenia przenikalności elektrycznej badanej gleby (fot. A. Wilczek)

Photo 2. Vector Network Analyzer used to determine the dielectric permittivity of analysed soil (photo A. Wilczek)

WYNIKI BADAŃ

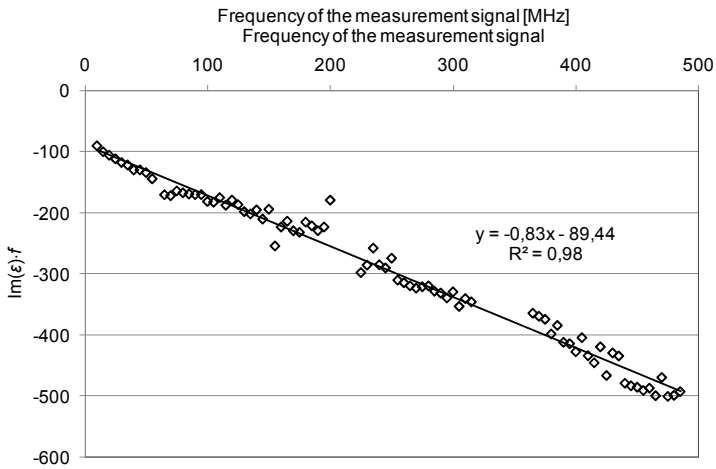
Uzyskanie informacji o konduktywności gleby z pomiaru widma częstotliwościowego części urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej wymaga analizy obu jej składowych. Jeśli pomiar jest wykonywany dla jednej częstotliwości, to składowe te są nierozróżnialne. Jeśli istnieje możliwość analizy widma częstotliwościowego odpowiedzi badanego materiału na zewnętrzne wymuszenie elektryczne, to możliwa jest separacja składowych na podstawie znajomości ich zachowania w funkcji częstotliwości. Pomiar metodą FDR umożliwia taką analizę, jeśli przyjmie się założenie, że stratność elektryczna ϵ_d jest stała w zakresie zmian częstotliwości sygnału pomiarowego f . W celu poprawnego wykonania analizy z widma usunięto trzy pasma częstotliwości, w których występowały rezonanse zakłócające pomiar. Były to zakresy: 60–65, 205–220, 320–360 MHz. Aby można było znaleźć oba elementy ϵ_d i σ_{DC} z wzoru (3), przekształcono go mnożąc obustronnie przez f , otrzymując zależność postaci:

$$\text{Im}(\varepsilon)f = af + b \quad (5)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} a &= \varepsilon_d && \text{– stratność elektryczna,} \\ b &= \sigma_{DC}/2\pi\varepsilon_0. \end{aligned}$$

Uzyskano zależność liniową, dla której metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono współczynnik nachylenia a oraz przesunięcie b (rys. 1).

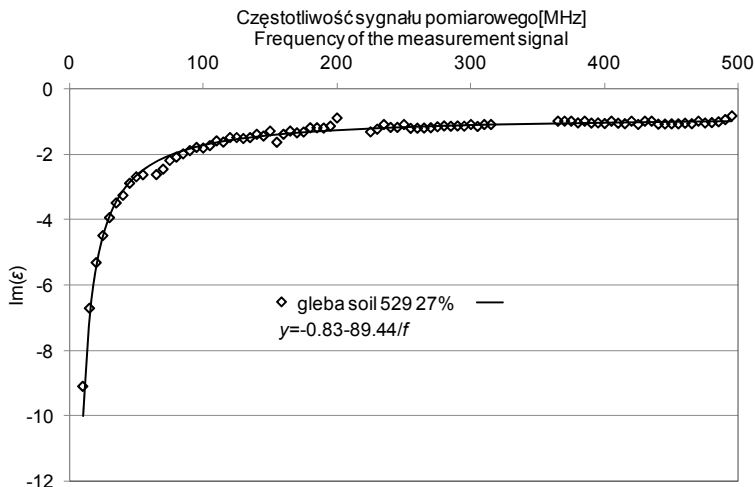


Rys. 1. Wyznaczanie stratności elektrycznej ε_d i konduktywności stałoprądowej σ_{DC} z prostoliniowej charakterystyki $\text{Im}(\varepsilon)f$ na przykładzie wybranej próbki gleby 529 o wilgotności objętościowej 27%, nawilżanej wodą destylowaną; źródło: wyniki własne

Fig. 1. Determination of dielectric loss ε_d and direct current conductivity σ_{DC} from linear characteristic of $\text{Im}(\varepsilon)f$ based on selected sample of 529 soil with 27% volumetric water content moisturized with distilled water; source: own studies

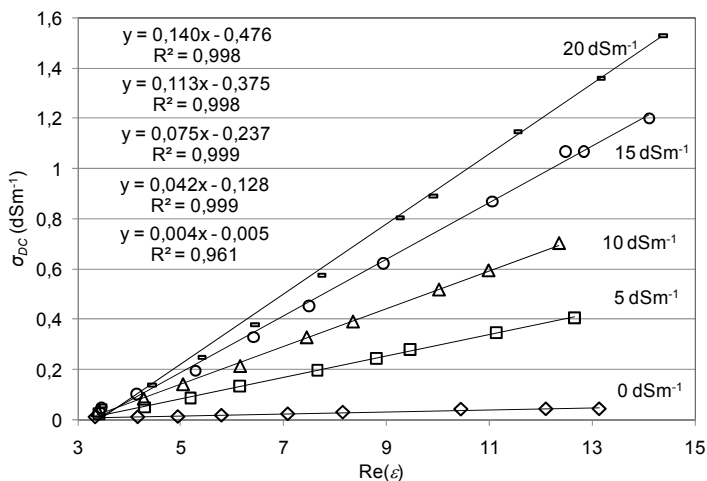
W celu sprawdzenia, czy uzyskane współczynniki dają dobrze dopasowaną charakterystykę wstawiono je do wzoru (3), a uzyskany wykres nałożono na wyniki pomiarów (rys. 2).

Widać bardzo dobre dopasowanie zarówno dla niskich, jak i wysokich częstotliwości, co pozwala sądzić, że opracowana metoda wyznaczania konduktywności stałoprądowej z widma części urojonej przenikalności elektrycznej może zostać użyta do dalszej obróbki danych. W powyższy sposób przetworzono wszystkie wyniki dla 50 próbek gleby 529 nawilżanych roztworami KCl. Analizując otrzymane wyniki konduktywności dla tych próbek można określić WZ – wskaźnik zasolenia jako nachylenie prostoliniowych zależności występujących między wyznaczoną konduktywnością stałoprądową i częścią rzeczywistą przenikalności elektrycznej (wyznaczoną dla pasma 390–485 MHz) (rys. 3). Ponadto na rysunku tym



Rys. 2. Część urojona przenikalności elektrycznej z nałożoną wyznaczoną funkcją $y = -a - b/f$ dla wybranej próbki gleby 529 o wilgotności objętościowej 27%, nawilżanej wodą destylowaną; źródło: wyniki własne

Fig. 2. Imaginary part of dielectric permittivity with overlapped function $y = -a - b/f$ for selected sample of 529 soil with 27% volumetric water content moisturized by distilled water; source: own studies



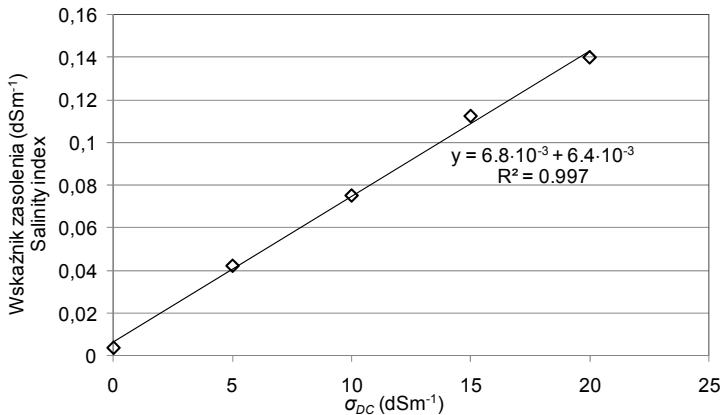
Rys. 3. Wskaźnik zasolenia jako nachylenie prostoliniowych charakterystyk elektrycznej kondukcyjności gleby w funkcji części rzeczywistej przenikalności elektrycznej; źródło: wyniki własne

Fig. 3. Salinity index as a slope of linear characteristics of electrical conductivity of soil versus real part of dielectric permittivity; source: own studies

można zaobserwować liniowy przebieg charakterystyk nawet dla niskich wilgotności próbek.

Wysokie współczynniki determinacji na poziomie 0,99 świadczą o dobrej selektywności i przydatności metody FDR do pomiaru wskaźnika zasolenia gleby. W przypadku niskich konduktywności współczynnik determinacji zmniejsza się do wartości 0,96, co oznacza mniejszą dokładność metody dla gleb niezasolonych.

Zgodnie z danymi z literatury [MALICKI 1993], wskaźnik zasolenia powinien liniowo zależeć od konduktywności roztworu nawilżającego (rys. 4). Analizując nachylenie i przesunięcie wpasowanej linii trendu można stwierdzić, że wartości te nie odbiegają od opisanych w literaturze dla gleb mineralnych. Potwierdza to przydatność opisywanej powyżej metody FDR do pomiaru wskaźnika zasolenia.



Rys. 4. Zależność wskaźnika zasolenia od konduktywności roztworów KCl użytych do nawilżania próbek glebowych; źródło: wyniki własne

Fig. 4. The relationship between salinity index and electrical conductivity of KCl solutions used to moisturize soil samples; source: own studies

WNIOSKI

Zastosowana w pracy metoda FDR wraz z sondą pomiarową umożliwia na podstawie analizy otrzymanego widma zespolonej przenikalności elektrycznej wyznaczenie wskaźnika zasolenia z dokładnością porównywalną dla metody TDR. W literaturze podano, że wskaźnik zasolenia może być stosowany w ograniczonym zakresie wilgotności, gdzie $\varepsilon > 6$ ze względu na utratę liniowości funkcji (1) poniżej tej wartości. W przypadku metody FDR (rys. 3) linowość funkcji (2) została zachowana w całym zakresie pomiaru. Wykonanie pomiarów dla jednego typu gleby nie pozwala dokonać porównania, dotyczącego wpływu tekstury gleby na wskaźnik zasolenia i wymaga przeprowadzenia dalszych badań.

LITERATURA

- GLIŃSKI J., OSTROWSKI J., STĘPNIEWSKA Z., STĘPNIEWSKI W. 1991. Bank próbek glebowych reprezentujących gleby mineralne Polski. Problemy Agrofizyki. T. 66. ISBN 8304039397 ss. 61.
- HASTED J.B. 1973. Aqueous Dielectrics. London. Hapman and Hall. ISBN 0412098008 ss. 137.
- HILHORST M.A., DIRKSEN C. 1994. Water content sensors: Time domain versus frequency domain. W: Symp. and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infra-structure, and Mining Applications. Northwestern Univ., Evanston, 7–9 Sept. 1994. Special publ. SP19–94. Washington U.S. Dep. of Interior, Bureau of Mines s. 23–33.
- MALICKI M.A. 1993. Wpływ fizycznych właściwości gleby na elektryczne parametry układu elektrody/gleba w aspekcie pomiaru jej wilgotności i zasolenia. Rozprawa habilitacyjna. Acta Agrophysica. Vol. 1 s. 57–63.
- MALICKI M.A., SKIERUCHA W. 1989. A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300ps rise-time needle pulses. Irrigation Science. Vol. 10 s. 153-163.
- RHOADES J.D. 1984. Principles and methods of monitoring soil salinity. Ecological studies: analysis and synthesis. Vol. 51 s. 130–142.
- Rohde&Schwarz 2001. Operating Manual Vector Network Analyzer ZVR/ZVRE/ZVRL.
- SKIERUCHA W. WILCZEK A. 2010. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10–500 MHz frequency range [online]. Sensors. Vol. 10 [Dostęp: 05.04.2010]. Dostępny w Internecie: <http://www.mdpi.com/1424-8220/10/4/3314>
- TOPP G.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research. Vol. 3 s. 574–582.

*Andrzej WILCZEK, Wojciech SKIERUCHA, Grzegorz JANIK,
Jolanta CIEŚLA, Viliam PICHLER*

SOIL SALINITY DETERMINED BY FDR SENSORS WORKING IN VARIABLE FREQUENCY

Key words: *agro-physical metrology, frequency reflectometry, reflectometric probe, soil moisture, soil salinity*

Summary

Measurement of salinity of the soil is thoroughly described in the literature, especially by authors dealing with the examination of physicochemical parameters of soil in areas threatened by drought. Soil salinity, treated as electrical conductivity of the soil solution, can't be measured in a selective way. This follows from the fact that on the measurement has influence not only the salt content in the form of dissolved ions, but also soil moisture, temperature and texture. Thus, measurement of soil salinity, especially in field conditions require continued work on the methodology and measuring apparatus used. The ideal meter of soil salinity should be measured instantaneous values of all elements of significantly affecting the measurement result, at the same time and same place. The use of dielectric sensors working in the time and frequency domain reflectometry method, opened up new opportunities to integrate measurement sensors of humidity, electrical conductivity and soil temperature in one device. The article presents the electrical model of the FDR sensor designed to measure the salinity of soil as a partial derivative its electrical conductivity to relative real part of complex dielectric permittivity, working in the frequency range from 10–500 MHz. His innovation is to use a wide range of measuring frequency in order to identify factors influencing the soil salinity observed by changing the test frequency.