

ELEKTRYCZNY POMIAR WILGOTNOŚCI GLEBY METODĄ TDR

M. A. Malicki, W. Skierucha

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

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

Streszczenie. W artykule omówiono reflektometrię czasową (TDR - Time Domain Reflectometry) w zastosowaniu do wyznaczania wilgotności gleby. Ponieważ TDR operuje impulsem napięcia stanowiącym paczkę decymetrowych fal sinusoidalnych, wilgotna gleba zachowuje się w ich polu elektrycznym jak izolator, którego przenikalność elektryczna (stała dielektryczna) jest warunkowana jedynie wilgotnością oraz gęstością. Mierząc przenikalność elektryczną gleby metodą TDR i znając jej gęstość można wyznaczyć wilgotność tej gleby.

Słowa kluczowe: pomiar wilgotności, przenikalność elektryczna gleby, stała dielektryczna gleby.

WSTĘP

Kluczowym zagadnieniem agrofizyki jest status wody (tzn. jej ilość, potencjał, zasolenie, natlenienie i temperatura [22]), ponieważ każde z badanych w jej zakresie zjawisk jest nim uwarunkowane. Szczególnie ważna jest tutaj możliwość monitoringu statusu wody. Monitoring statusu wody realizuje się w oparciu o technikę cyfrową. Ze względu na to, że w cyfrowych systemach akwizycji danych czytelne są wyłącznie sygnały elektryczne, stosowane w nich czujniki muszą przetwarzać mierzoną wielkość na proporcjonalny sygnał elektryczny. Najtrudniejszym do elektrycznego pomiaru parametrem statusu wody w systemie: gleba-roślina-atmosfera jest wilgotność gleby, ponieważ przepływ prądu przez glebę jest warunkowany nie tylko jej wilgotnością, lecz również porowatością, uziarnieniem, kwasowością, temperaturą oraz zasoleniem.

ELEKTRYCZNY POMIAR WILGOTNOŚCI GLEBY

Zasadniczym czynnikiem kwalifikującym metodę pomiaru jest jej selektywność, tzn. niewrażliwość na wpływ czynników innych niż mierzony. Sелеktywność uwalnia od potrzeby indywidualnej kalibracji pomiarów, tzn. od empirycznego wyznaczania specyficznej dla każdej gleby, na każdej głębokości jej profilu, funkcji przetwarzania.

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 elektryczna przenikalność (stała dielektryczna) wody przewyższa przenikalność stałej fazy gleby (względna stała dielektryczna wody w polu o częstotliwości poniżej 10 GHz i w temperaturze 18°C, wynosi 81, podczas gdy względna stała dielektryczna fazy stałej wynosi w tych warunkach 4÷5). Ponieważ elektryczna przenikalność gleby jest warunkowana jej wilgotnością, nasuwa się wniosek, że elektryczny pomiar wilgotności gleby należy oprzeć o pomiar jej przenikalności elektrycznej (stałej dielektrycznej).

Próby elektrycznego pomiaru wilgotności gleby oparte o pomiar pojemności elektrycznej występującej pomiędzy wprowadzonymi do niej elektrodami (tzw. metoda „elektropojemnościowa”), są nieustannie podejmowane od końca IXX wieku [1,3,4,9,11,12,29,31]. Przyniosły one wiele metod, gdzie zmiany w odczycie elektrycznej pojemności kondensatora z glebą jako dielektrykiem przypisuje się zmianom wilgotności gleby, ponieważ stała dielektryczna wody przewyższa (w przybliżeniu 20-krotnie) stałą dielektryczną stałej fazy gleby.

Mimo zasadności, elektropojemnościowe pomiary wilgotności gleby okazały się nieselektywne. Parametry odnośnych formuł przetwarzania (tzn. zależności: wilgotność-pojemność) okazały się niestabilne i zależne od temperatury gleby, jej zasolenia, uziarnienia, gęstości, kwasowości, jak też od częstotliwości napięcia elektrycznego zasilającego obwód pomiarowy [2,5,10,14,23,24,30]. Tak więc metoda elektrycznego pomiaru wilgotności gleby pozostaje obiektem nieustającego zainteresowania.

Stosowane w metodach elektropojemnościowych częstotliwości napięcia sinusoidalnego zasilającego zbudowany z dwu równoległych metalowych płyt lub prętów czujnik (kondensator) nie przekraczają wartości rzędu 10^7 Hz, co w świetle

analizy dyspersji częstotliwościowej czujnika jest stukrotnie za mało [14]. Z drugiej strony, stosowanie optymalnej częstotliwości, rzędu 10⁹ Hz, powoduje spadek długości fali do wartości porównywalnej z wymiarami elektrod czujnika. Czujnik zachowuje się wtedy jak falowód, gdzie na skutek częściowych odbić napięcia od nieciągłości impedancji układu generator-czujnik powstaje fala stojąca o znacznej amplitudzie, która fałszuje pomiar elektrycznej pojemności czujnika. Niedogodność tę można ominąć stosując reflektometrię czasową, TDR (Time Domain Reflectometry), która operuje impulsem napięcia stanowiącym paczkę fal sinusoidalnych o szerokim paśmie częstotliwości. TDR, zwana często „radarem kablowym” [26], powstała w latach dwudziestych w celu lokalizacji uszkodzeń linii przesyłowych (telekomunikacyjnych, energetycznych i innych). Polega ona na wymuszaniu skoku napięcia (impulsu krokowego lub szpilkowego) na wejściu badanej linii, co powoduje jego propagację wzdłuż tej linii [17], a następnie na rejestracji momentu powrotu impulsu odbitego (echa) od nieciągłości impedancji linii w miejscu jej uszkodzenia (oraz kształtu impulsu, z którego można ocenić charakter tego uszkodzenia). TDR jednoznacznie wykrywa i lokalizuje wszystkie nieciągłości impedancji układu.

Osiągalna w ostatnich latach szybkość narastania impulsów napięcia elektrycznego pozwala na wykrywanie nieciągłości impedancji o wzajemnej odległości rzędu centymetra i mniej. Ten wzrost rozdzielczości TDR umożliwił jej zastosowanie do pomiaru elektrycznej przenikalności gleb z zastosowaniem jako czujnika względnie krótkiego (rzędu centymetra) odcinka linii transmisyjnej, złożonej z dwu równoległych, wbijanych do gleby, prętów.

Przeciętny czas narastania, tr , impulsów stosowanych w testerach kabli TDR wynosi około 150 ps. Czas ten jest związany z szerokością bw (bandwidth) pasma częstotliwości fal sinusoidalnych kształtujących zbocze impulsu następująco [28]:

$$bw = 0,35 tr^{-1} \quad (1)$$

co dla $tr = 150$ ps odpowiada częstotliwości około 2.3 GHz. Częstotliwość ta, w świetle wspomnianej częstotliwościowej zależności (dyspersji) odpowiedzi czujnika w glebie, odpowiada w przybliżeniu środkowi pasma 0.4 ÷ 5 GHz, gdzie dyspersja zanika. Ponieważ TDR operuje w zakresie częstotliwości pola elektrycznego rzędu 10⁹ Hz, wilgotna gleba zachowuje się jak izolator, którego stała dielektryczna jest warunkowana jedynie wilgotnością oraz gęstością [19]. Fakt ten czyni TDR szczególnie przydatną do elektrycznych pomiarów wilgotności gleby.

TDR w zastosowaniu do pomiaru wilgotności gleby

Począwszy od roku 1980 do reflektometrycznych pomiarów wilgotności gleby, w polu i w laboratorium, powszechnie stosuje się tester kabli transmisyjnych Tektronix model 1502 B [7], który operuje impulsem krokowym o czasie narastania około 150 ps. Przeznaczone do testowania elektrycznych obwodów wysokiej częstotliwości reflektometry czasowe (TDR), oferowane przez kilku zaledwie producentów jak: Iwatsu, Le-Croy, Hyperlabs, Tektronix oraz Hewlett-Packard są drogie, duże i ciężkie, ponieważ generowanie krokowych impulsów napięcia o skrajnie krótkim czasie narastania rzędu 10 ps oraz o poprawnym kształcie, tzn. o zanedbywalnym przeskoku i oscylacjach [25], jest zadaniem na pograniczu możliwości technicznych. Jednakże w reflektometrze czasowym o zastosowaniu ograniczonym tylko do wyznaczania wilgotności gleby można stosować łatwiejszy w realizacji oraz w interpretacji impuls szpilkowy, o dłuższym niż we wspomnianych reflektometrach czasie narastania, wynoszącym około 300 ps [16,17].

Pierwszy polowy oraz laboratoryjny miernik TDR oryginalnie przeznaczony do jednoczesnego pomiaru elektrycznej przenikalności, a więc i wilgotności, oraz elektrycznej konduktywności i temperatury, a więc i zasolenia gleby został opracowany i wykonany w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie w latach 1989-1999 [15,18], przy czym, ze względu na procedury patentowe w toku, publikowano tylko jego najprostszą wersję w uogólnionej formie [13,16,17].

Wilgotność objętościowa, θ_{TDR} , jest liczona ze stałej dielektrycznej, ε , oraz gęstości gleby, ρ , na podstawie formuły [19]:

$$\theta_{TDR} = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 0,819 - 0,168\rho - 0,159\rho^2}{7,17 + 1,18\rho} \quad (2)$$

Stałą dielektryczną, ε , wyznacza się z pomiaru prędkości propagacji, v , impulsu elektromagnetycznego w glebie, z następującego związku:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (3)$$

gdzie c jest prędkością światła w próżni. Biorąc pod uwagę, że dla większości przypadków magnetyczna przenikalność gleby $\mu = 1$ oraz przekształcając (3) względem współczynnika załamania, $\sqrt{\varepsilon}$, otrzymujemy:

$$\sqrt{\varepsilon} = \frac{c}{v} = \frac{c}{2L} t \quad (4)$$

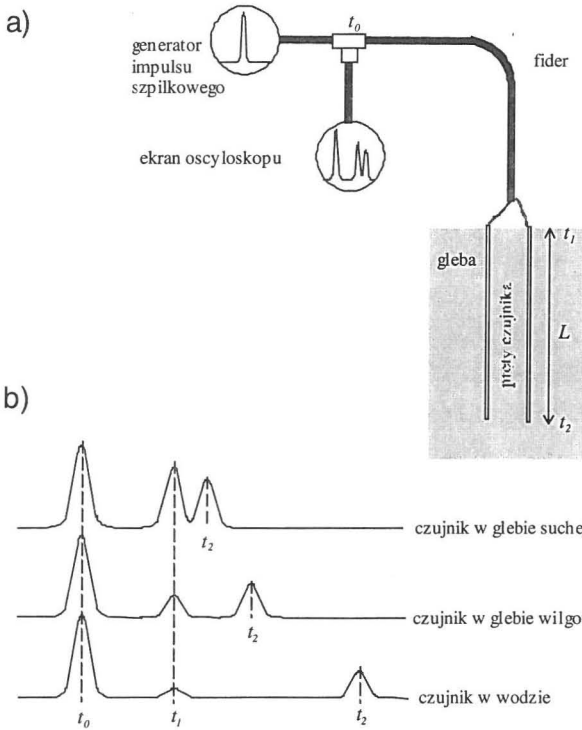
gdzie: L jest długością prętów czujnika (patrz Rys. 1a) oraz t jest czasem w jakim impuls pokonuje w glebie drogę $2L$.

Zasadę reflektometrycznego pomiaru prędkości propagacji impulsu elektromagnetycznego w glebie (lub w innym materiale) ilustruje Rys. 1. Do gleby wprowadza się odcinek symetrycznej linii transmisyjnej, zwany dalej czujnikiem, który jest wykonany z dwu równoległych, niez izolowanych metalowych prętów. Jeden z końców czujnika łączy się za pośrednictwem innej linii transmisyjnej (np. przewodu współosiowego), zwanej dalej fiderem, z generatorem impulsu napięcia elektrycznego (Rys. 1a). Skok doprowadzonego do fidera napięcia powoduje rozwinięcie się impulsu elektromagnetycznego, który biegnie tym fiderem w kierunku czujnika, osiąga w chwili t_1 jego początek i biegnie dalej, już w glebie, ku jego końcowi, do którego dociera w chwili t_2 .

Ponieważ w miejscu połączenia fidera z czujnikiem występuje skok impedancji elektrycznej (impedancja fidera różni się od impedancji czujnika), część energii impulsu zostaje w momencie t_1 odbita i wraca w kierunku generatora. Pozostałość biegnie dalej (już w glebie) i w momencie t_2 , po dotarciu do końca czujnika odbija się jeszcze raz z powodu skoku impedancji na końcu czujnika i także wraca w kierunku generatora.

Rysunek 1b ilustruje obraz impulsu oraz jego odbić widziany na ekranie dołączonego do fidera oscyloskopu. Impuls inicjalny dociera do trójnika w chwili t_0 , biegnie dalej i podlega wspomnianym odbiciom, widocznym na ekranie w chwilach t_1 i t_2 . Im większa wilgotność gleby, θ , tym większa jej przenikalność elektryczna, ε , i tym mniejsza prędkość propagacji, v , impulsu w glebie, a więc tym dłuższy jest interwał czasu $t_2 - t_1$. Mierząc czas: $t = t_2 - t_1$, dzielący momenty odbić impulsu od początku i od końca czujnika oraz znając długość, L , czujnika, wylicza się, zgodnie z (4), wartość $\sqrt{\varepsilon}$ a następnie, zgodnie z (2), liniowo związaną z nią objętościową wilgotność gleby, θ_{TDR} .

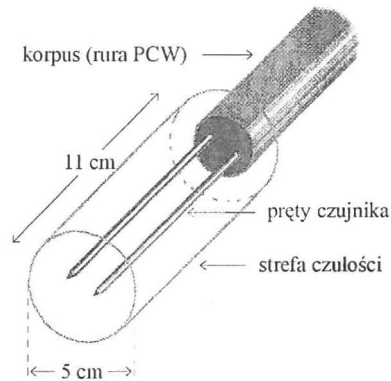
Strefę czułości czujnika, definiowaną jako bryła, poza obrębem której wilgotność nie wpływa na odczyt, wyznacza, w przybliżeniu, opisany na jego prętach cylinder o wysokości równej około 1,1 długości prętów i średnicy około trzykrotnie większej od ich rozstawienia (Rys. 2).



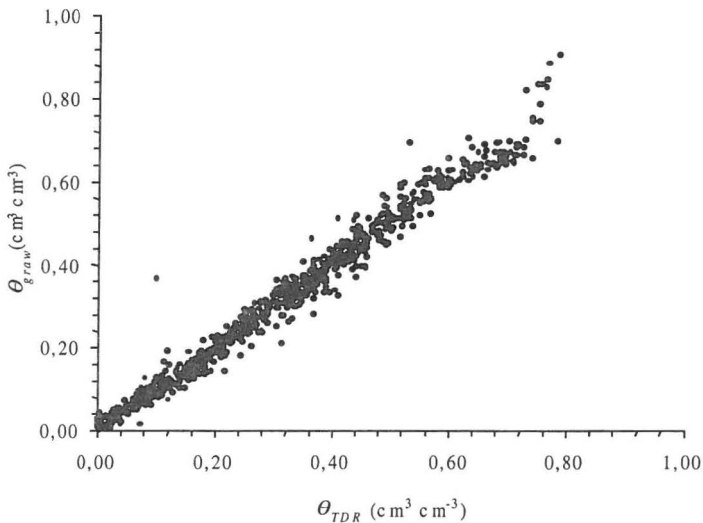
Rys. 1. Zasada reflektometrycznego pomiaru wilgotności gleby. a) podstawowe składniki układu, b) obraz impulsu oraz jego odbić widziany na ekranie oscyloskopu.

Fig. 1. Principle of the reflectometric measurement of soil moisture. a) basic components of the system, b) the pulse and its reflections as seen on the screen of the oscilloscope.

Rysunek 3 ilustruje porównanie pomiarów wilgotności objętościowej wykonanych metodą reflektometryczną, θ_{TDR} , z oznaczeniami grawimetrycznymi metodą suszarkową, θ_{grav} , dla 61 różnych gleb mineralnych i organicznych o gęstościach z przedziału $0,086 < \rho < 1,78 \text{ g cm}^{-3}$ [19]. Małe rozproszenie danych pozwala uznać elektryczną metodę pomiaru wilgotności gleb opartą o TDR za zadowalającą. Należy tu zaznaczyć, że metoda sprawdziła się również w zastosowaniu do ziarna zbóż oraz dla drewna [20, 21].



Rys. 2. Strefa czułości czujnika TDR.
Fig. 2. Region of influence of the TDR sensor.



Rys. 3. Porównanie pomiarów wilgotności objętościowej gleby wykonanych techniką reflektometryczną, θ_{TDR} , z oznaczeniami grawimetrycznymi, θ_{grav} , dla próbek o gęstościach $0,086 < \rho < 1,78 \text{ g cm}^{-3}$. $\theta_{TDR} = 0,0001 + 1,00 \theta_{grav}$, $R^2 = 0,9801$, $SD = 0,028$ (SD jest dewiacją standardową).

Fig. 3. Comparison of soil moisture data obtained using TDR, θ_{TDR} , with data obtained using the oven-drying method, θ_{grav} , for samples having bulk densities $0.086 < \rho < 1.78 \text{ g cm}^{-3}$ (g cm^{-3}). $\theta_{TDR} = 0.0001 + 1.00 \theta_{grav}$, $R^2 = 0.9801$, $SD = 0.028$ (SD is standard deviation).

WNIOSKI

1. Metoda reflektometryczna, TDR (Time Domain Reflectometry), sprawdza się, w odniesieniu do innych spośród elektrycznych (dielektrycznych) metod pomiarów wilgotności gleby, najlepiej.
2. TDR jest szczególnie przydatna do elektrycznych pomiarów wilgotności gleby, ponieważ częstotliwości sinusoidalnych fal napięcia tworzących zbrocze pobudzającego czujnik impulsu leżą w paśmie około $0,5 \div 5 \text{ GHz}$, gdzie, przy konduktywności gleby nie przekraczającej 1 S m^{-1} , pasożytniczy w polaryzacji elektrycznej gleby udział prądu przewodzenia jest pomijalny, zatem częstotliwościowa dyspersja elektrycznej przenikalności gleby praktycznie nie występuje.
3. TDR jest szczególnie wygodna w zastosowaniu do równoległych pomiarów wilgotności oraz zasolenia gleby, ponieważ odczyt obydwu zmiennych dotyczy tej samej próbki (strefa czułości czujnika TDR jest dla obydwu zmiennych zbliżona).

4. Metodę TDR należy rozwijać w kierunku opracowania „inteligentnej” sondy, co uczyni system monitoringu odpornym na przypadkowe, globalne przerwy w rejestracji (jeśli uszkodzeniu ulegnie jedna lub kilka sond, system pracuje dalej, w oparciu o pozostałe).

PIŚMIENNICTWO

1. **Arble W.C., Shaw M.D.:** Bibliography on the methods for determining soil moisture. Eng. Res. Bull. B-78, Coll. of Eng. End. Arch., Univ. Park, Penn., 1959.
2. **Arulanandan K., Mitchell J.K.:** Low frequency dielectric dispersion of clay-water electrolyte systems. Clays and Clay Minerals, Vol. 16, 337-351, 1968.
3. **Chernyak G.Ya.:** Dielectric methods for investing moist soils. Israel Program for Scientific Translations Ltd. IPST Cat. No. 1831, Jerusalem. Available from the U.S. Dept. of Commerce, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, Springfield, Va. 22151, 1967.
4. **Dean T.J., Bell J.P., Baty A.J.B.:** Soil moisture measurement by an improved capacitance technique: I. Sensor design and performance. Journal of Hydrology, 93, 67-78, 1987.
5. **Deighton T.:** The effect of the movement of soil salts on standardization values of electrodes used in moisture determinations. J. Agric. Sci., 13, 1923.
6. **Easy Test:** Soil water status monitoring devices: 20-815 Lublin 56, PO. Box 24, Solarza 8b, Brochure 2002.
7. **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), 1-73. Marcel Dekker, New York, 1991.
8. **Hewlett Packard:** TDR fundamentals for use with HP 54120T digitizing oscilloscope and TDR, Application note 62, 1988.
9. **Hoekstra P., Delaney A.:** Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. Journal of Geophysical Research, 79, 1699-1708, 1974.
10. **Kiselev N.F.:** Dielectric characteristics of certain soils over the frequency range 0.1-250 MHz. Moscow University, Soil Science Bulletin, 29, 1/2, 19-22, 1974.
11. **Malicki M.A.:** Przegląd metod pomiaru wilgotności gleb i ocena ich przydatności w badaniach polowych. Problemy Agrofizyki, PAN, Zakład Agrofizyki, Ossolineum, 31, 1980.
12. **Malicki M.:** A capacity meter for the investigation of soil moisture dynamics. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 220, 201-214, 1983.
13. **Malicki M.:** A reflectometric (TDR) meter of moisture content in soils and other capillary-porous materials. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 388, 107-114, 1990.
14. **Malicki M. A.:** Wpływ fizycznych właściwości gleby na elektryczne parametry układu elektrody|gleba w aspekcie pomiaru jej wilgotności i zasolenia (in Polish). *Acta Agrophysica*, IA PAN, 1993.

15. **Malicki M.A.:** Elektryczny pomiar wilgotności i zasolenia gleby z zastosowaniem techniki reflektometrycznej (TDR). ZPPNR, z. 429, 215-221, 1996.
16. **Malicki M., Skierucha W.:** A manually controlled soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse. Proceedings of the International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status, Logan, Utah, USA, Vol. 1, 103-109, July 6-10, 1987.
17. **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.
18. **Malicki M.A., Skierucha W.M., patenty:**
Reflektometryczny miernik wilgotności ciał kapilarno-porowatych - zwłaszcza gleby. Pat. Nr. 154440, UP PRL, Warszawa 1987.
Wieloczułnikowy próbnik do reflektometrycznego pomiaru wilgotności, zwłaszcza gleby. Pat. Nr. 266616, UP PRL, Warszawa, 1987.
Impulsnyj reflektometriczeskij izmierzitel wlaźnosti kapillarno-poristich tieł. Gosudarstwienyj Rejester Izobrietienij, Nr. 1835069, 1988.
Reflektometrischer Feuchtigkeitsmesser für kapillar-porose Körper, insbesondere für den Boden. Pat. DD 271 380 A5, Ausschliessungspaten DDR, 1988.
Reflectometric moisture meter for capillary-porous materials, especially for the soil. Pat. Nr. 4,918,375, USA, 1990.
Reflektometryckij meric vlhkosti pro kapilarnie porezni materialy, zejmena pro zeminu. Federalni Urad Pro Vynalezny, Ceska a Slovenska Federativni Republika. Pat. Nr. PV 4552-88.X, 1991.
Reflectometric moisture meter for capillary-porous materials, especially for the soil. European Patent Office, Pat. Nr. 88110563.9-2204 0297604, Germany, 1992.
Reflectometric moisture meter for capillary-porous materials, especially for the soil. Israel Patent Office, Pat. Nr. 86743, Israel, 1992.
19. **Malicki M.A., Plagge R., Roth C.H.:** Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. European Journal of Soil Science, 47, 357-366, 1996.
20. **Malicki M. A., Kotliński J.:** Dielectric determination of moisture of cereals grain using time domain reflectometry. International Agrophysics, Vol. 12, Nr. 3, 209-215, 1998.
21. **Malicki M. A., Kotliński J.:** Dielectric determination of moisture of wood using time domain reflectometry. International Agrophysics, Vol. 12, Nr. 3, 217-220, 1998.
22. **Malicki M. A.:** Metodyczne zagadnienia monitoringu statusu wody w wybranych materiałach biologicznych. *Acta Agrophysica*, 19, 1999.
23. **Matsui S., Shirai K.:** Electrode interfacial impedance during the measurement of conductive and dielectric properties of soil. Bulletin of the Faculty of Agriculture, Mie University, No. 44, 225-240, 1972.
24. **Mehran M., Arulanandan K.:** Low frequency conductivity dispersion in clay-water-electrolyte systems. Clays and Clay Minerals, Vol. 25, 39-48, 1977.

25. **Nahman N.S.:** Picosecond-domain waveform Measurements. Proceedings of the IEEE, Vol. 66, No. 4, 441-454, 1978.
26. **Oliver B.M., Cage J.M.:** Electronic measurements and instrumentation. Inter-university Electronics Series, Vol. 12. McGraw-Hill Book Company, USA, 61-64, 1971.
27. **Skierucha W.:** Zależność propagacji impulsu elektromagnetycznego w glebie od jej wybranych właściwości. Praca doktorska, IA PAN, Lublin 1996.
28. **Strickland J.A.:** Time-Domain Reflectometry measurements. Tektronix Inc. Beaverton, Oregon 97005, 1970.
29. **Thomas A.M.:** In situ measurement of moisture in soil and similar substances by fringe capacitance. Journal of Scientific Instrumentation, 43, 21-27, 1966.
30. **Troickij N.B.:** Frequency-moisture dependence of electrical parameters of the soil. Doklady WASHNIL, No. 3, 43-45, 1973.
31. **Whitney M., Gardner F., Briggs L. J.:** An electrical method of determining the moisture content of arable soils. U.S. Dept. Agr., Div. Soils, Bull. 6, 1897.

ELECTRIC MEASUREMENT OF SOIL MOISTURE USING TDR

M. A. Malicki, W. Skierucha

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

Summary. The only sensors that can be integrated in modern data acquisition systems must be read electrically, therefore electric methods were considered. Soil is a complex material having unstable characteristics. For this reason it is the most difficult task to monitor soil water status, particularly to electrically determine soil moisture. Special attention was focused to the time domain reflectometry, TDR, as a semiselective electric method for the determination of soil moisture.

Key words: TDR, soil water, wood moisture, grain moisture, soil salinity.