

Wojciech SKIERUCHA, Andrzej WILCZEK

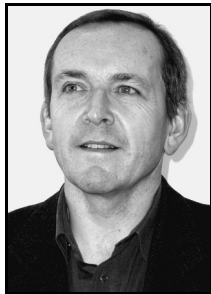
INSTYTUT AGROFIZYKI IM. BOHDANA DOBRZAŃSKIEGO PAN W LUBLINIE, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

## Identyfikacja błędów pomiaru niskich wartości wilgotności gleby sondą reflektometryczną TDR

Dr hab. inż. Wojciech SKIERUCHA

Wojciech Skierucha urodził się w 1956 r. w Lublinie. Tytuł magistra inżyniera elektronika uzyskał w 1980 r. po ukończeniu studiów w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Od 1985 r. pracuje w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie, obecnie na stanowisku docenta. Jego zainteresowania koncentrują się na rozwoju czujników i systemów monitorowania wielkości fizyko-chemicznych w zastosowaniu do wielofazowych materiałów porowatych, takich jak gleba.

e-mail: w.skierucha@ipan.lublin.pl



Mgr Andrzej WILCZEK

Andrzej Wilczek urodził się w 1972 r. w Lublinie. Tytuł magistra fizyki uzyskał w 1998 r. po ukończeniu studiów na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. Od 2003 r. pracuje w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie, na stanowisku fizyka. Jego zainteresowania koncentrują się na rozwoju czujników, metod pomiaru oraz aparatury pomiarowej do badania właściwości fizyko-chemicznych materiałów porowatych, szczególnie właściwości dielektrycznych gleby.

e-mail: a.wilczek@ipan.lublin.pl



### Streszczenie

W pracy podjęto próbę identyfikacji źródeł błędów pomiaru małych wartości wilgotności gleby sondą reflektometryczną TDR, które powstają na skutek efektu splotu sygnałów. Wykazano, że wybór mediów kalibracyjnych o wartościach przenikalności elektrycznej bliskich dolnemu i górnemu zakresowi pomiarowego przenikalności elektrycznej mierzonej gleby zmniejsza błąd pomiaru tej wielkości i w konsekwencji błąd pomiaru wilgotności gleby oraz umożliwia użycie sond TDR o różnych długościach prętów.

**Słowa kluczowe:** przenikalność elektryczna, wilgotność gleby, splot sygnałów, TDR.

### Identification of errors of low soil water content measurements by TDR reflectometric sensors

#### Abstract

Reflectometric TDR sensors working in time domain (TDR – Time Domain Reflectometry) are successfully used for laboratory and field measurements of the soil bulk dielectric permittivity and, indirectly, the soil water content. Commonly applied methods for calibrating these sensors use two media, in which the respective parallel waveguides of the TDR sensor are inserted into: air – for low and water – for high values of dielectric permittivity. However, the variability range of the soil bulk dielectric permittivity is much smaller than the one associated with these calibration media. Application of air to calibration of short TDR sensors causes output waveform overlapping errors of the pulse reflected from the rods beginning with the pulses reflected from the rods open termination, which results in a relative time shift of these pulses. In the paper there is shown the way how to minimise these errors, called convolution effect errors, by application of other than air and water calibration media. The authors try to identify the error sources of low soil water content values measured by a TDR reflectometric sensor caused by the convolution effect. It is shown that the proper choice of calibration media having dielectric permittivity values close to low and high limits of the measurement range of the measured porous medium (soil) decreases the dielectric permittivity measurement error and, consequently, the measurement error of water content as well as enables application of variable length TDR sensors.

**Keywords:** dielectric permittivity, soil water content, convolution effect, TDR.

### 1. Wstęp

Wykorzystanie techniki reflektometrii czasowej (TDR – time domain reflectometry) do pomiarów in situ wilgotności objętościowej  $\theta$  ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ) materiałów porowatych (gleby) jest obecnie powszechne [1]. Wielkością mierzoną jest prędkość  $v$  podróży elektrycznego impulsu szpilkowego lub skoku jednostkowego o czasie narastania/opadania 100-300 ps w badanym ośrodku. Przy założeniu braku podatności magnetycznej badanego ośrodka oraz jego konduktywności elektrycznej nie przekraczającej

$0,4 \text{ Sm}^{-1}$  [3], prędkość ta zależy od przenikalności elektrycznej  $\varepsilon$  tego ośrodka zgodnie z uproszczonym wzorem:

$$v \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{2L}{\Delta t}, \quad (1)$$

gdzie:  $c$  jest prędkością światła w próżni,  $L$  długością równoległego falowodu czujnika,  $\Delta t$  jest odległością w czasie między odbiciem impulsu analizującego od początku i od końca otwartego falowodu.

Dwójka w liczniku równania (1) wskazuje, że jest to metoda odbiciowa i czas podróży impulsu w falowodzie jest podwójny. Czujnikiem w technice TDR jest falowód równoległy, zwykle w postaci dwóch lub trzech metalowych prętów umieszczonych w badanym ośrodku porowatym. Warunkiem koniecznym poprawnej pracy urządzeń TDR jest jednorodność badanego ośrodka.

Kalibracja metody TDR pomiaru wilgotności gleby jest dwuetapowa. Należy najpierw skalibrować sondę w celu minimalizacji niepewności pomiaru przenikalności elektrycznej badanego ośrodka, czyli wyznaczyć zależność  $\varepsilon=f(v)$ , a następnie na podstawie referencyjnych suszarkowych pomiarów wilgotności objętościowej gleby dokonać kalibracji ostatecznej, tzn. wyznaczyć zależność  $\theta=f(\varepsilon)$ . Celem niniejszej pracy jest identyfikacja błędów kalibracji sondy TDR w celu zmniejszenia niepewności pomiaru pozornej przenikalności elektrycznej gleby.

### 2. Kalibracja sondy TDR

Gleba składa się z trzech faz: ciała stałego, wody i powietrza. Ponieważ względna przenikalność elektryczna wody  $\varepsilon_w$  w temperaturze pokojowej wynosi około 80, co znacznie przewyższa odpowiednie wartości dla pozostałych faz, suchej gleby  $\varepsilon_s < 5$ , powietrza  $\varepsilon_a = 1$ , zatem wartość pozornej przenikalności elektryczna wilgotnej gleby z zależności (1) niesie informację o jej wilgotności.

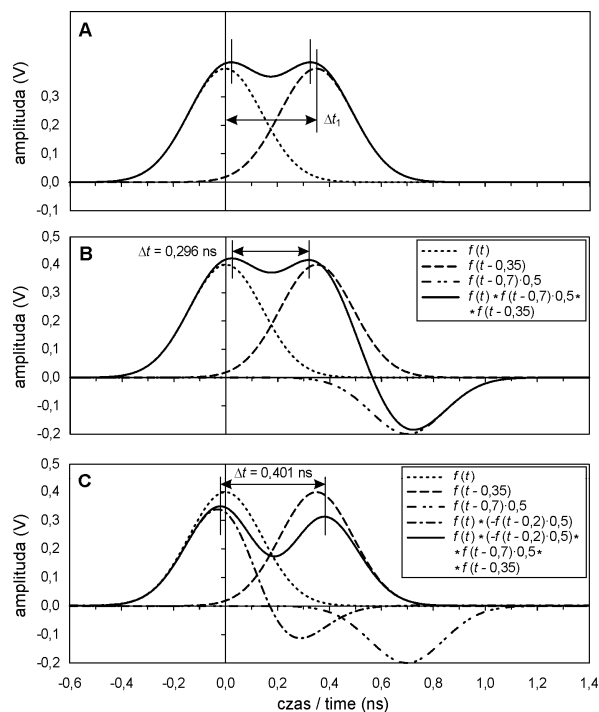
Pomiar wilgotności gleby w sposób pośredni miernikiem TDR jest nieniszczący, wykorzystuje nieznaczną objętość materiału, wynik uzyskuje się w kilka sekund, możliwa jest automatyzacja pomiaru i stosowanie multipleksowania czujników TDR umożliwiając rejestrację czasowej i przestrzennej zmienności wilgotności gleby w profilu glebowym. Przedstawione cechy techniki TDR powodują, że dotychczas stosowana metoda suszarkowa realizująca pomiar bezpośredni staje się anachroniczna i wykorzystywana jest głównie do kalibracji czujników TDR [2, 3], czyli wyznaczenia zależności  $\theta=f(\varepsilon_b)$ .

Miernik wilgotności gleby opracowany w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie [4] używa impulsu szpilkowego do analizy reflektogramu.

Błąd wyznaczenia wilgotności gleby techniką TDR spowodowany jest następującymi przyczynami [4]: błędem kalibracji,

niewłaściwą instalacją sond, np. w ośrodku niejednorodnym, błędnym pomiarem czasu  $\Delta t$  wynikający z niedoskonałości sprzętowych i programowych miernika. Błędy kalibracyjne spowodowane są niedoskonałą selektywnością pomiaru, tzn. wpływem tekstury gleby, jej gęstości, temperatury oraz strat dielektrycznych. Jednakże dla większości niezasolonych gleb mineralnych ten ostatni element, generowany przez część urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej jest pomijalny, chociaż może być znaczący [3]. Eliminacja błędów wynikających z niewłaściwej instalacji sond TDR wymaga doświadczenia użytkownika i wstępnej znajomości lokalnej zmienności parametrów fizycznych gleby w badanej lokalizacji. W dalszej części podjęta zostanie próba analizy błędów pomiaru wilgotności gleby techniką TDR spowodowanych przez efekt nakładania się, inaczej splotu dwóch sygnałów [5]: impulsu padającego  $f$  przemieszczającego się z generatora w mierniku TDR w kierunku sondy TDR i odbitego  $g$  przemieszczającego się w kierunku przeciwnym ( $-\tau$ ) i przesuniętego w czasie ( $t$ ):

$$(f * g)(t) = \int f(\tau)g(t - \tau)d\tau. \quad (2)$$



Rys. 1. Symulacja splotu sygnałów z pierwotnych i wtórnych odbić od otwartego końca prętów sondy TDR (linia pogrubiona)

Fig. 1. Simulation of convolution effects of primary and secondary reflection from the TDR probe rods open end (thick line)

Symulacja splotu przedstawiona jest na rys. 1. Kształt impulsu inicjalnego  $f(t)$  uzyskany został z funkcji krzywej Gaussa:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-a \cdot (t - \mu)^2\right), \quad (3)$$

gdzie:  $t$  oznacza czas,  $\mu$  jest wartością średnią, współczynnik  $a$  modyfikuje czasy narastania i opadania impulsu. Dla  $a = 25$  uzyskano czasy odpowiadające rzeczywistym wartościom w używanym mierniku TDR (około 250 ps). Zmiana wartości  $\mu$  powoduje przesunięcie w poziomie natomiast zwiększenie wartości współczynnika  $a$  zmniejsza czas narastania/opadania impulsu.

Końcowy produkt splotu sygnałów padającego i odbitego jest efektem kilku zjawisk. Przyjęto następujące założenia: (1) impuls odbity w fazie z końca prętów sondy TDR jest przesunięty w czasie o 350 ps w stosunku do impulsu inicjalnego (odpowiada to czasowi pokonania podwójnego odcinka faldowodu równoległego

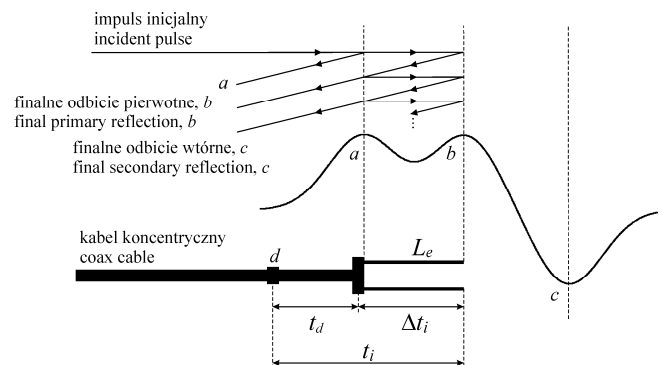
o długości 5 cm i umieszczonego w powietrzu), (2) nie występuje tłumienie sygnału podczas jego przemieszczania się wzdłuż prętów faldowodu sondy TDR, (3) czas narastania i opadania impulsu inicjalnego wynosi 250 ps, (4) sonda umieszczona jest w powietrzu i jej długość wynosi 5 cm.

### Splot impulsów padającego i impulsów odbitych

Najprostszym przypadkiem jest splot inicjalnego impulsu  $f(t)$ , zaznaczonego krzywo kropkowaną na rys. 1A, oraz impulsu odbitego od otwartego końca faldowodu równoległego  $f(t - 0,35)$  zaznaczonego krzywą kreskową, który jest przesunięty w czasie w stosunku do impulsu inicjalnego o  $\Delta t_1 = 350$  ps. Produkt splotu będący krzywą pogrubioną rejestrowaną przez oscyloskop przedstawia lokalne maksima odległe od siebie o 304 ps chociaż maksima impulsów składowych splotu oddzielone są od siebie o 350 ps.

### Efekt odbicia wtórnego

Mechanizm powstawania odbić sygnału inicjalnego od otwartego końca sondy TDR umieszczonej w badanym ośrodku przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Odbicia impulsu inicjalnego od nieciągłości impedancji sondy TDR. Symbole a, b, c i d reprezentują odpowiednio: odbicie od początku prętów sondy, pierwotne i wtórne odbicia od otwartego końca sondy oraz znacznik czasu na kablu koncentrycznym

Fig. 2. Reflections of the incident TDR pulse from the impedance discontinuities of the TDR probe. The symbols a, b, c and d represent: reflection from the beginning of the probe rods, primary and secondary reflection from the open termination of the probe rods and the time marker in the coaxial feeding cable, respectively

Odbicie zaznaczone symbolem  $a$  jest w fazie z sygnałem inicjalnym. Część inicjalnego impulsu przemieszcza się wzdłuż prętów sondy w ośrodku i odbija się od otwartego końca prętów nie zmieniając fazy, podążając w kierunku do kabla koncentrycznego. Gdy ten powracający impuls dociera do nieciągłości impedancji na początku prętów sondy, jego lokalizacja w czasie zaznaczona jest na reflektogramie jako punkt  $b$ . Jednakże następuje również odbicie sygnału powracającego od nieciągłości w punkcie  $b$ , jego podróz w kierunku końca prętów sondy i następne odbicie w kierunku powrotnym, co jest zaznaczone na reflektogramie jako punkt  $c$ . Odbicia sygnału między początkiem prętów sondy i jego końcem w rzeczywistych warunkach nie będą widoczne ponieważ zostaną w końcu słumione, co jest spowodowane stratnością dielektryczną ośrodka otaczającego pręty faldowodu TDR. Dalsza analiza nie uwzględnia odbić trzeciego i dalszych stopni ponieważ pojawiają się one na reflektogramie w bezpiecznej odległości od pomiarowego okienka czasowego.

Efekt splotu trzech elementarnych sygnałów: inicjalnego, pierwotnego (odbitego od początku prętów sondy) oraz wtórnego (odbitego od końca prętów sondy)  $f(t)*f(t-0,7)·0,5*f(t-0,35)$  przedstawia rys. 1B. Trzeci sygnał przesunięty jest w czasie o 2·350 ps i słumiony do połowy amplitudy impulsu inicjalnego. W porównaniu z przypadkiem opisanym rys. 1A, odcinek czasu  $\Delta t$  między końcowymi impulsami obserwowanymi na oscyloskopie został skrócony do wartości 296 ps.

### Wpływ kształtu impulsu inicjalnego

Impulsy inicjalne generowane w różnych egzemplarzach przyrządów TDR nie są jednakowe, co wynika ze względów technicznych. Każdy z impulsów inicjalnych w testowanym sprzęcie miał ujemny przerzut widoczny na opadającym zboczu sygnału przekraczającego poziom ustalony. Rys. 1C przedstawia taki impuls inicjalny jako splot sygnałów  $f(t)*(-f(t-0,2)-0,5)$ , gdzie pierwszy czynnik jest teoretycznym impulsem inicjalnym, drugi stanowi ujemną połowę jego wartości przesuniętą w czasie o 200 ps.

Efekt splotu  $f(t)*(-f(t-0,2)-0,5)*f(t-0,7)-0,5*f(t-0,35)$ , który powstał z trzech omawianych czynników przedstawiony jest na rys. 1C (krzywa pogrubiona). Odcinek czasu  $\Delta t = 401$  ps między ostatecznymi odbiciami od początku i końca prętów sondy TDR uległ znacznemu zwiększeniu w porównaniu z przypadkiem elementarnych impulsów, które były oddalone od siebie o 350 ps.

Obserwowane efekty splotu impulsu inicjalnego z impulsem odbitym od sondy TDR są przyczyną powstawania błędów pomiaru przenikalności elektrycznej i w konsekwencji wilgotności gleby, szczególnie w zakresie małych wilgotności i krótkich sond TDR, gdzie impulsy padający i odbite nakładają się na siebie. Może być to szczególnie widoczne gdy podczas kalibracji sond TDR używane są materiały o małych wartościach przenikalności elektrycznej.

Efekt konwolucji jest również obecny na reflektogramie generowanym z impulsu krokowego, który jest powszechnie używany w technice TDR do wyznaczania wilgotności gleby. Niniejsza praca analizuje efekt konwolucji w sygnale TDR o kształcie impulsu szpilkowego [6, 7, 8, 9].

### 3. Eksperyment

Parametry kalibracyjne sondy TDR przedstawiono poniżej. Znacznik czasu reprezentowany jako punkt  $d$  na rys. 2, jest punktem nieciągłości impedancji sztucznie utworzonym na kablu koncentrycznym między miernikiem i sondą TDR. Zakłada się, że odbicie sygnału inicjalnego od tego znacznika nie wpływa na kształt reflektogramu z sondy TDR. Zgodnie z oznaczeniami na rys. 2 można wyprowadzić następujące zależności:

$$t_1 = t_d + \Delta t_1 = t_d + \frac{2L_e \sqrt{\varepsilon_1}}{c} = t_d + \frac{2L_e n_1}{c}, \quad (4)$$

$$t_2 = t_d + \Delta t_2 = t_d + \frac{2L_e n_2}{c}, \quad (5)$$

gdzie indeksy 1 i 2 oznaczają dwa ośrodki o wartościach przenikalności elektrycznej  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$ , których pierwiastki kwadratowe oznaczane jako  $n_1$  i  $n_2$  nazywane są współczynnikami odbicia. Wielkości  $t_d$  oraz  $L_e$  są parametrami kalibracyjnymi sondy, nazywanymi odpowiednio: czasem martwym i długością elektryczną. Po przekształceniu wzorów (4) i (5) ich wartości wynoszą:

$$t_d = \frac{t_1 n_2 - t_2 n_1}{n_2 - n_1}; \quad L_e = \frac{c(t_2 - t_1)}{2(n_2 - n_1)}. \quad (6)$$

Wartość współczynnika odbicia  $n_i$  badanego ośrodka, na podstawie którego wyznacza się wilgotność gleby (na bazie innej kalibracji  $\theta=f(\varepsilon)$  nie omawianej w niniejszej pracy) obliczana jest z zależności:

$$n_i = (t_i - t_d) \cdot \frac{c}{2 \cdot L_e}. \quad (7)$$

Wartości parametrów kalibracyjnych  $t_d$  oraz  $L_e$  sondy TDR mogą różnić się od siebie po zastosowaniu różnych materiałów kalibracyjnych, co wynika głównie z efektu splotu sygnałów inicjalnych z odbitymi. Aby oszacować błąd stąd wynikający dokonano

kalibracji sondy TDR dla różnych materiałów kalibracyjnych oraz porównano wyniki uzyskanych parametrów kalibracyjnych dla sondy TDR.

### Material i metody

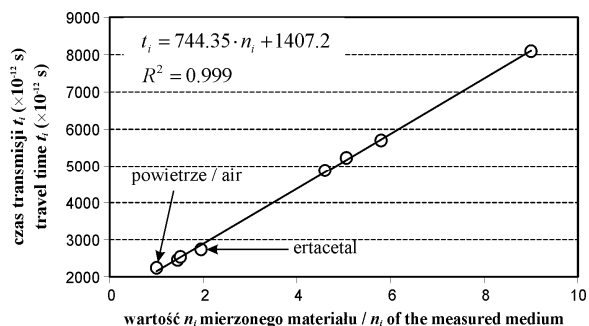
Pomiary TDR przeprowadzono miernikiem FOM/mts przy użyciu sondy FP/mts, które zostały opracowane i wykonane w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie [4]. Długość prętów sondy TDR wynosiła 10 cm, a odległość między prętami – 13 mm. Do kalibracji sondy TDR użyto dwóch materiałów stałych: ertacetalu i teflonu oraz pięciu cieczy: benzenu, acetonu, etanolu i metanolu. Parametry dielektryczne tych materiałów są dostępne w ogólnie dostępnych tabelach fizycznych i w literaturze [4]. Pomiary w materiałach stałych dokonano z użyciem dwóch cylindrów z ertacetalu i teflonu o średnicy 5 cm i długości 15 cm, w których wywiercono centralnie dwa otwory o średnicy 2 mm (równej średnicy prętów sondy TDR). W otwory te włożono ściśle pręty sondy w celu dokonania pomiarów parametrów kalibracyjnych sondy. Pomiary wykonywane były w laboratorium w temperaturze  $20 \pm 1^\circ$ .

### 4. Wyniki i dyskusja

Czas podróży  $t_i$  impulsu w powietrzu i mediach kalibracyjnych zmierzony miernikiem TDR dla różnych mediów kalibracyjnych przedstawia rys. 3. Pokazuje on doskonałą zależność liniową, dla której nachylenie linii trendu oraz przesunięcie mogą być wykorzystane do określenia parametrów kalibracyjnych  $t_d$  i  $L_e$  sondy TDR:

$$t_d = 1407.2 \times 10^{-12} \text{ s}, \quad L_e = \frac{c}{2} \cdot 744.35 \approx 0.11165 \text{ (m)}. \quad (8)$$

Wartości parametrów kalibracyjnych  $t_d$  oraz  $L_e$  z wzoru (6) wyznaczone dla rozważanych mediów przedstawione w tabeli 1 różnią się od między sobą.



Rys. 3. Czas podróży impulsu w sondzie TDR umieszczonej w różnych mediach kalibracyjnych

Fig. 3. Pulse travel time in the TDR probe inserted in various calibration media

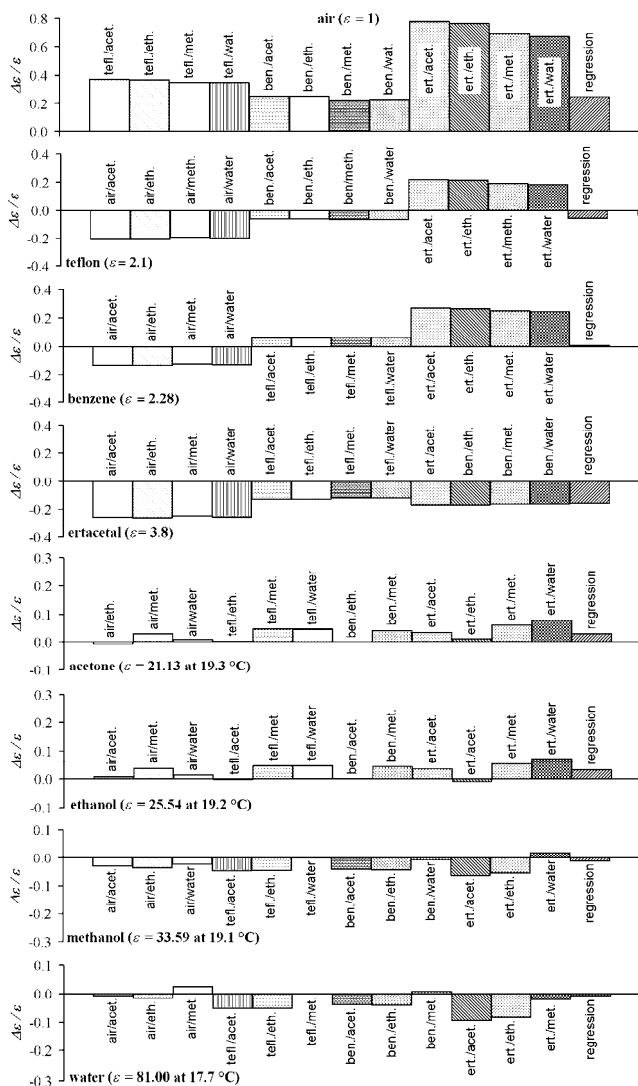
Tab. 1. Parametry kalibracyjne sondy TDR:  $t_d$  (ps) przedstawione czcionką normalną i  $L_e$  (m) przedstawione kursywą

Tab. 1. TDR probe calibration parameters:  $t_d$  (ps) presented in normal and  $L_e$  (m) italic font

medium 1	medium 2							
	pow.	teflon	benz.	ertac.	acet.	etan.	meta.	woda
pow.	-	1759	1656	1714	<b>1505</b>	<b>1502</b>	<b>1518</b>	<b>1508</b>
teflon	<i>0,072</i>	-	516	1636	<b>1338</b>	<b>1340</b>	<b>1374</b>	<b>1373</b>
benz.	<i>0,087</i>	<i>0,201</i>	-	1845	<b>1389</b>	<b>1389</b>	<b>1422</b>	<b>1417</b>
ertac.	<i>0,079</i>	<i>0,085</i>	<i>0,069</i>	-	<b>1160</b>	<b>1173</b>	<b>1238</b>	<b>1258</b>
acet.	<b>0,110</b>	<b>0,115</b>	<b>0,114</b>	<b>0,121</b>	-	1373	1749	1530
etan.	<b>0,111</b>	<b>0,115</b>	<b>0,114</b>	<b>0,120</b>	<i>0,114</i>	-	2041	1565
meta.	<b>0,108</b>	<b>0,112</b>	<b>0,111</b>	<b>0,115</b>	<i>0,102</i>	<i>0,095</i>	-	1369
woda	<b>0,110</b>	<b>0,112</b>	<b>0,111</b>	<b>0,114</b>	<i>0,109</i>	<i>0,109</i>	<i>0,112</i>	-

Wartości zalecane dla kombinacji parametrów kalibracyjnych przedstawione grubą czcionką w tab. 1 posiadają następujące wartości średnie i odchylenia standardowe:  $L_{eAve}=0.113$  m,  $L_{eStdDev}=0.037$  m,  $t_{dAve}=1369$  ps,  $t_{dStdDev}=115$  ps. Wartości te są bliskie obliczonym z linii trendu przedstawionej w (8).

Względny błąd pomiaru przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon/\epsilon$  badanych mediów kalibracyjnych przedstawiony jest na rys. 4, które odnoszą się do mediów kalibracyjnych odpowiednio o stosunkowo małej i dużej wartości przenikalności elektrycznej. Wiadąc, że dla każdej kombinacji mediów kalibracyjnych wyznaczona przenikalność elektryczna powietrza jest zawyżona. Wynika to z efektu splotu przrzedu impulsu inicjalnego z impulsem odbitym od końca prętów sondy. Wartości  $\Delta\epsilon/\epsilon$  dla teflonu i benzenu są podobne, tzn. użycie powietrza jako medium kalibracyjnego powoduje заниżenie, a ertacetalu zawyżenie wyników. Użycie powietrza jako medium kalibracyjne powoduje wzrost wartości  $t_d$  (patrz tabela 1) i w konsekwencji obliczone wartości  $\Delta t$  z wzorów (4) i (5) są mniejsze. Znaczące jest to, że zastosowanie parametrów kalibracyjnych sondy TDR uzyskanych z linii trendu o parametrach przedstawionych w (9) dało względnie małe wartości błędów względnego  $\Delta\epsilon/\epsilon$ . Dotyczy to obu grup materiałów kalibracyjnych charakteryzujących się zarówno małymi, jak i dużymi wartościami przenikalności dielektrycznej  $\epsilon$ .



Rys. 4. Błąd względny  $\Delta\epsilon/\epsilon$  z pomiarów TDR dla wybranych materiałów i różnych kombinacji mediów kalibracyjnych

Fig. 4. Relative error  $\Delta\epsilon/\epsilon$  from TDR measurements for selected materials and various combinations of calibration media

W praktyce kalibracja sond TDR większą niż dwa liczbą mediów kalibracyjnych jest uciążliwa, szczególnie w warunkach

polowych. Z tego powodu użytkownik powinien wybrać dwa media kalibracyjne o wartościach przenikalności elektrycznej umieszczonych w pobliżu wartości granicznych pomiarowego zakresu zmienności  $\epsilon$  dla danego obiektu. Dodatkowo, użycie cieczy zamiast ciał stałych do kalibracji sond TDR daje bardziej wiarygodne rezultaty. Spowodowane jest to zapewnieniem pewnego kontaktu między prętami sondy i materiałem kalibracyjnym.

## 5. Wnioski

Efekt konwolucji skutkuje błędnym wyznaczeniem parametrów kalibracyjnych sond TDR i w konsekwencji niedoszacowaniem mierzonych wartości wilgotności gleby w przypadku pomiarów materiałów o małej zawartości wody. Można tego uniknąć używając sond TDR o dostatecznie długich, równoległych prętach metalowych, z których zbudowana jest ta sonda. Jednakże z punktu widzenia ekonomii przeprowadzonych eksperymentów oraz często spotykanej niejednorodności gleby, istnieje potrzeba minimalizacji objętości pomiarowej i użycia krótkich sond TDR.

Nie zaleca się używania powietrza jako medium kalibracyjnego dla sond TDR o długości prętów poniżej 10 cm z powodu występowania efektu konwolucji w miernikach TDR, dla których czas narastania/opadania impulsu analizującego wynosi poniżej 250 ps. Dostateczne wyostrzenie impulsu analizującego umożliwia kalibrację w powietrzu sond krótszych od 10 cm, jednakże wymogi techniczne na sprzęt pomiarowy TDR są znacznie wyższe, co wiąże się z koniecznością poniesienia wyższych kosztów.

Wybór materiału do kalibracji sond TDR powinien uwzględniać jeden materiał o małej (powietrze, benzen lub ertacetal) i drugi o dużej wartości przenikalności elektrycznej (acetone, etanol, metanol lub woda). Wskazane jest, żeby wartości przenikalności dielektrycznej materiałów kalibracyjnych były w pobliżu dolnej i górnej granicy zakresu pomiarowego. Kombinacja dwóch mediów kalibracyjnych o małej lub o dużej wartości przenikalności elektrycznej może spowodować błąd pomiaru wielkości badanej.

## 6. Literatura

- [1] Robinson D.A., Campbell C.S., Hopmans J.W., Hornbuckle B.K., Jones S.B., Knight R., Ogden F., Selker J., Wendroth O.: Soil moisture measurement for ecological and hydrological water-scale observatories: a review. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 358-389, 2008.
- [2] Malicki M.A., Plagge R., Roth C.H.: Reduction of soil matrix effect on TDR dielectric moisture determination by accounting for bulk density or porosity. *European Journal of Soil Science*, 47(3), 357-366, 1996.
- [3] Topp G.C., Zegelin S., White I.: Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soils. *Soil Science Society of American Journal*, 64, 1244-1252, 2000.
- [4] Skierucha W., Wilczek A., Aloghina O.: Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements. *Sensors and Actuators A. Physical*, 147, 544-552, 2008.
- [5] van Gemert M.J.C.: High-frequency time-domain methods in dielectric spectroscopy, Philips Resources Report, 28, 530-572, 1973.
- [6] Heimovaara T.J. Design of triple-wire Time Domain Reflectometry probes in practice and theory, *Soil Science Society of American Journal*, 57, 1410-1417, 1993.
- [7] Jacobsen O.H., Schojning P. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture, *Journal of Hydrology*, 151, 147-157, 1993.
- [8] Or D., Wraith J.M.: Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: a physical model, *Water Resources Research*, 35(2), 371-383, 1999.
- [9] Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.: Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, 16, 574-582, 1980.