

Autoreferat
z działalności naukowo-badawczej

dr Andrzej Wilczek

Zakład Metrologii i Modelowania Procesów Agrofizycznych
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk,
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

Lublin 2018



1. Imię i nazwisko

Andrzej Wilczek

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

- 2009 Stopień doktora nauk rolniczych w zakresie agronomii, specjalność agrofizyka. Tytuł rozprawy doktorskiej: "Wpływ wilgotności i zasolenia gleby na jej przenikalność dielektryczną wyznaczoną metodą reflektometrii częstotliwościowej". Praca została wyróżniona decyzją Rady Naukowej Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie
- 2004-2008 Dyplom ukończenia studiów doktoranckich w nauk rolniczych – agronomii – agrofizyki w Instytucie Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN w Lublinie.
- 2001-2002 Dyplom Studium Podyplomowego Telekomunikacji, Informatyki i Zarządzania CITCOM-PW Politechniki Warszawskiej na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych, Instytutu Telekomunikacji, Instytutu Informatyki.
- 1993-1998 Tytuł magistra fizyki, Uniwersytet Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie, Wydział Matematyki i Fizyki kierunek fizyka.
Tytuł pracy magisterskiej: „Wieloparametryczna akwizycja danych ze spektrometru koincydencyjnego”.
- 1993 Świadectwo dojrzałości w Technikum Elektronicznym w Zespole Szkół Elektronicznych w Lublinie, kierunek telekomunikacja, specjalność telekomunikacja.



3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

01/2010 – obecnie	Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, adiunkt
11/2007 – 01/2010	Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, asystent
05/2003 – 11/2007	Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, fizyk

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego

Rozwój dielektrycznych metod badawczych do wyznaczania wilgotności, zasolenia oraz dyspersji dielektrycznej gleby.

autorzy, tytuł, rok wydania, nazwa wydawnictwa

1. Wilczek A., Szyplowska A., Kafarski M., Nakonieczna A., Skierucha W.:
Electromagnetic simulations for salinity index error estimation.
Measurement Science and Technology 2017, 28 014012
IF₂₀₁₆=1.585 30 pkt MNiSW
2. Wilczek, A.; Szyplowska, A.; Kafarski, M.; Skierucha, W. A Time-Domain Reflectometry Method with Variable Needle Pulse Width for Measuring the Dielectric Properties of Materials. Sensors 2016, 16, 191.
IF₂₀₁₆ =2.677 30 pkt MNiSW
3. Nakonieczna A, Kafarski M, Wilczek A, Szyplowska A, Janik G, Albert M, Skierucha W. Detection of Atmospheric Water Deposits in Porous Media Using the TDR Technique. Sensors. 2015, 15(4):8464-8480.
IF₂₀₁₅=2.033 30 pkt MNiSW
4. Wilczek A, Szyplowska A, Skierucha W, Cieśla J, Pichler V, Janik G. Determination of Soil Pore Water Salinity Using an FDR Sensor Working at Various Frequencies up to 500 MHz. Sensors. 2012, 12(8):10890-10905.
IF₂₀₁₂=1.953 25 pkt MNiSW
5. Wilczek A., Szyplowska A., Kafarski M., Nakonieczna A., Paszkowski B., Skierucha W. Miernik TDR do pomiaru parametrów dyspersyjnych materiałów porowatych w szczególności gleby. Patent PAT.227864
Data zgłoszenia 2015.03.26, uzyskania 2017.09.05
30 pkt MNiSW punktacja dla oceny parametrycznej jednostek



6. Wilczek A., Szyplowska A., Skierucha W., Kafarski M., Nakonieczna A.
Sonda TDR do pomiaru objętości wody pochodzącej z osadów
atmosferycznych. Patent PAT.224933
Data zgłoszenia 2013.11.29, uzyskania 2016.08.16
30 pkt MNiSW punktacja dla oceny parametrycznej jednostek

Liczba punktów MNiSW publikacji wchodzących w skład osiągnięcia
naukowego wg. wykazu MNiSW z dnia 8 grudnia 2017: **115+60**

Całkowity IF publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego wg. daty
opublikowania **8.248**

Mój wkład jako autora wiodącego w przypadku trzech publikacji dotyczył ustalenia koncepcji badań oraz opracowania wyników i wniosków. W publikacji 3 nadzorowałem projekt i konstrukcję czujnika wykonałem pomiary polowe oraz brałem udział w interpretacji wyników. Publikacje 2 i 3 powstały na podstawie zgłoszonych wcześniej patentów 5 i 6, których byłem pomysłodawcą. Byłem głównym autorem przygotowującym manuskrypt w przypadku dwóch prac 1, 2 i zgłoszeń patentowych 5, 6, w przypadku dwóch pozostałych prac 3, 4 współuczestniczyłem w przygotowaniu manuskryptu.

- b) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

WSTĘP

Materiały porowate w agrofizyce są najczęściej materiałami niejednorodnymi o zróżnicowanej strukturze będącej połączeniem trzech faz: stałej, ciekłej i gazowej. Jako jedną z metod do badania interakcji fazy ciekłej i stałej wykorzystuje się spektroskopię dielektryczną (zakres częstotliwości pomiarowych powyżej 10 MHz) gdzie wpływ warstwy podwójnej na powierzchni elektrod może zostać zaniedbany oraz spektroskopię impedancyjną (zakres niższych i bardzo niskich częstotliwości pomiarowych) gdzie badany jest cały zbiór zjawisk: chemicznych, elektrodowych, powierzchniowych, przewodnictwa elektrycznego i przenikalności elektrycznej mających wpływ na impedancję elektrod. Metody komplementarne do spektroskopii dielektrycznej to np. spektroskopia magnetycznego rezonansu jądrowego NMR lub

spektroskopia nieelastycznego rozpraszania neutronów, które ze względu na bardzo skomplikowaną i kosztowną aparaturę pomiarową są niemożliwe do zastosowania w warunkach przemysłowych i polowych.

Badanie procesów agrofizycznych zachodzących w materiałach porowatych, a w szczególności w glebie wymaga ze względu na mnogość zjawisk w nich zachodzących interdyscyplinarnego podejścia badawczego. Jednym z wielu narzędzi badawczych stosowanych w celach poznawczych są metody pomiarowe i symulacyjne reflektometrii w dziedzinie czasu. Opierają się one na pomiarze względnej przenikalności elektrycznej, która jest wielkością charakteryzującą materiały nieprzewodzące lub słabo przewodzące podlegające zjawiskom polaryzacji elektrycznej. Jest ona wielkością zespoloną wykazująca zmienność w funkcji wielu czynników takich jak częstotliwość czy natężenie pola elektrycznego, temperatura, ciśnienie. Wielkość ta w ciałach stałych wykazuje się znaczną stabilnością i z tego powodu nazwano ją stałą dielektryczną. W przypadku cieczy względna przenikalność elektryczna jest wielkością zmienną zależną głównie od temperatury i przedstawiana jest w postaci widma opisywanego modelami dielektrycznymi. Szczególnym przypadkiem jest woda, która ze względu na swoje unikalne właściwości dielektryczne staje się doskonałym obiektem badań w przypadku gdy wchodzi ona w interakcje z powierzchnią fazy stałej ciał kapilarno-porowatych.

W badaniach procesów agrofizycznych najbardziej popularnym zastosowaniem metod dielektrycznych jest pomiar wilgotności objętościowej tych materiałów. Jednakże naukowe zagadnienia związane z zastosowaniem metod dielektrycznych są znacznie bardziej złożone pozostawiając wiele miejsca na dalsze badania podstawowe w tej dziedzinie. Woda posiadając cząsteczkową budowę polarną polaryzuje się zmieniając orientację w taki sposób, aby jej dipol elektryczny ustawiony był równoległe do linii zewnętrznego pola elektrycznego (polaryzacja dipolowa). Jednocześnie zjawisko to podlega zmianom przy powierzchni fazy stałej. Woda znajdująca się przy powierzchni fazy stałej, zwana wodą związaną, posiada inne właściwości dielektryczne niż woda swobodna. Podczas zmian wilgotności i temperatury zmienia się proporcja pomiędzy wodą związaną i wodą swobodną. Dodatkowo, woda związana zmienia swoje parametry dielektryczne także ze względu na to, że wraz ze zmniejszaniem wilgotności zatrzymywana jest w kapilarach o coraz mniejszej średnicy znajdujących się w innych składnikach mineralnych lub organicznych gleby. Wraz ze zmianą wilgotności zmienia się również stężenie

roztworu wody glebowej, które ma wpływ na właściwości dielektryczne wody swobodnej. Również zmiany temperatury mają znaczący wpływ na właściwości dielektryczne wody swobodnej.

Połączenie ze sobą wielu czynników oraz badanie wpływu ich zmienności pozwala zdobywać nową wiedzę na temat zjawisk zachodzących w ciałach kapilarno-porowatych. Z tego powodu badanie właściwości dielektrycznych materiałów oraz wykorzystanie tych właściwości do opisu zjawisk fizycznych ma bardzo duże znaczenie. Konieczne jest więc opracowywanie i badanie nowych metod pomiarowych pozwalających na detekcję zjawisk agrofizycznych w warunkach polowych lub zwiększenie dokładności i czułości metod obecnie stosowanych. Rozszerzenie możliwości metod pomiarowych o nowe cechy detekcyjne pozwoli lepiej poznać inne właściwości tych materiałów takich jak zasolenie, dyspersja dielektryczna, głębokość wnikania pola (strefa czułości, zastosowanie w interpretacji pomiarów satelitarnych), jak również zjawisk osadów atmosferycznych. Z metodycznego punktu widzenia zwiększenie dokładności czy czułości pomiaru wymaga jedynie modyfikacji instrumentów pomiarowych już istniejących, czyli ich ulepszenia. Jednak zwiększenie dokładności wiąże się niejednokrotnie z pokonaniem barier związanych ze zmianą zasady działania czujnika (np. z rezystancyjnej na dielektryczną) i wynika z konieczności usunięcia wad występujących w poprzednim rozwiązaniu takich jak niska selektywność czy wrażliwość na zakłócenia. W przypadku wskaźnika zasolenia, dyspersji dielektrycznej czy detekcji ilości osadów konieczne jest pokonanie trudności związanych z opracowaniem całkowicie nowych metod pomiarowych lub czujników. Obecnie nie są dostępne komercyjnie przyrządy do pomiaru wskaźnika zasolenia czy dyspersji dielektrycznej, a czujniki ilości osadów bazują na metodzie wagowej o małej odporności i selektywności względem czynników środowiskowych.

Zaprezentowane w osiągnięciu naukowym wyniki przedstawiają nowatorskie opracowanie czujników oraz techniki przetwarzania sygnałów w celu pomiaru tych wielkości. W związku z innowacyjnym charakterem prowadzonych badań dokonano dwóch zgłoszeń patentowych zakończonych udzieleniem prawa wyłącznego na te wynalazki.



CEL

Celem naukowym było opracowanie i zbadanie nowych metod poszerzających zakres zastosowań reflektometrii dielektrycznej w badaniach procesów agrofizycznych występujących w ciałach kapilarno-porowatych. Cele szczegółowe to:


- wyznaczanie wskaźnika zasolenia metodą FDR (ang. frequency-domain reflectometry) oraz zbadanie strefy czułości (głębokości wnikania pola elektromagnetycznego) i jej wpływu na błąd wyznaczania wskaźnika zasolenia,
- opracowanie metody pomiaru dyspersji dielektrycznej materiałów przy pomocy reflektometrii w dziedzinie czasu TDR (ang. time-domain reflectometry) z impulsem szpilkowym o modyfikowanych parametrach,
- opracowanie dielektrycznej metody detekcji osadów atmosferycznych i pomiaru ich ilości.

METODY

Do badań wykorzystano metody pomiarowe reflektometrii w dziedzinie czasu przy pomocy urządzeń pomiarowych TDR opracowanych w IA PAN. Pomiar w dziedzinie częstotliwości FDR prowadzono przy użyciu wektorowego analizatora sieci (VNA) z opracowanymi w IA PAN czujnikami. Uzyskane wyniki pomiarów w dziedzinie częstotliwości były wykorzystywane w symulatorze stanów przejściowych firmy Keysight (Advanced Design System), co pozwoliło przeprowadzić późniejszą weryfikację wyników z urządzeń TDR. W badaniach wykorzystano również symulacje elektromagnetyczne FEM i FDTD bazujące również na oprogramowaniu firmy Keysight (EMPro 3D EM Simulation Software). Pozwoliły one na znacznie łatwiejsze określenie parametrów sygnałów pomiarowych oraz zbadanie ich zachowania bez konieczności przeprowadzania pracochłonnych eksperymentów pomiarowych z próbkami gleby.

OPIS BADAŃ I OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Przedstawione wyniki badań są efektem prac koncepcyjnych związanych z patentami jak i prac badawczych oraz symulacyjnych pozwalających określić zakres zastosowań proponowanych metod. Praca 4 powstała w oparciu o kontynuację badań prowadzonych w ramach mojej pracy doktorskiej, które dostarczyły nowych informacji o wskaźniku zasolenia mierzonego metodami FDR. Praca 1 jest wynikiem prac w



7

projekcie SONATA (II.I.10), którego jestem współwykonawcą. Rozszerzyła ona wiedzę w zakresie określania błędu pomiaru wskaźnika zasolenia w materiałach niejednorodnych. Praca 2 i Patent 5 są wynikiem prac kierowanego przeze mnie projektu badawczego NCBiR TDRUPGRADE (II.I.8) dotyczącego unowocześnienia miernika TDR wilgotności, temperatury i zasolenia gleby, opracowanego wcześniej w IA PAN. Praca 3 i Patent 6 są wynikiem prac w projekcie badawczym NCBiR DISENSOR, którego byłem współwykonawcą.

Publikacja 1 pt.: "Electromagnetic simulations for salinity index error estimation"

Problem badawczy

Wskaźnik zasolenia jest parametrem pozwalającym na określenie wielkości stężenia roztworu soli w wodzie glebowej niezależnie od wilgotności gleby. Do jego wyznaczenia konieczny jest równoczesny pomiar zarówno elektrycznej konduktywności jak i przenikalności elektrycznej gleby. Konduktywność elektryczna gleby wyznaczana jest przy pomocy metod wykorzystujących sygnały elektryczne w zakresie niskich częstotliwości. Natomiast selektywny pomiar przenikalności elektrycznej gleby jest możliwy tylko w zakresie wysokich częstotliwości. Objętościowy rozkład wilgotności oraz elektrycznej konduktywność próbki glebowej w warunkach naturalnych jest najczęściej niejednorodny. Wynika to z występujących opadów deszczu oraz procesu parowania z powierzchni. Do powstawania gradientu wilgotności przyczynia się także oddziaływanie grawitacyjne czy zjawisko podsiąku kapilarnego. Parowanie powoduje silny wzrost stężenia soli w wodzie glebowej przy powierzchni gleby. Opad deszczu powoduje, że zachodzi proces odwrotny. Dostarczona na powierzchnię gleby woda zmniejsza stężenie soli w wodzie glebowej. Ze względu na gradient wilgotności sól zawarta w wodzie przemieszczana jest w dół profilu glebowego. W metodzie TDR pomiar elektrycznej konduktywności przebiega w możliwie największej objętości materiału ograniczonej wpływem tłumienia sygnału. Jest on wynikiem uśredniania w określonej objętości. Natomiast przenikalność elektryczna mierzona jest w zmiennej strefie czułości sondy TDR zależnej od geometrii sondy, wilgotności i dyspersji dielektrycznej badanego ośrodka [1-3]. Równoczesny pomiar tą samą sondą zachodzi więc w dwóch różnych strefach czułości. Niejednorodny rozkład wilgotności i konduktywności w objętości badanego materiału może być więc przyczyną błędów w wyznaczaniu wskaźnika zasolenia.



Celem pracy było symulacyjne zbadanie wpływu rozwarstwienia przestrzennego parametrów przenikalności i konduktywności elektrycznej gleby występującego równoległe do prętów sondy TDR na błąd pomiaru tych wielkości w aspekcie wyznaczania wskaźnika zasolenia gleby.

Badania własne, metodyka, wyniki

W pracy wykonano symulacje elektromagnetyczne dla różnych grubości warstw materiału o zróżnicowanej konduktywności i przenikalności elektrycznej otaczających sondę 3-prętową o rozstawie prętów 10 mm i ich długości 100 mm. Następnie wyznaczono błąd względny pomiaru przenikalności i konduktywności elektrycznej, gdzie grubość warstwy zmniejszano stopniowo wchodząc w zasięg pola elektrycznego sygnału pomiarowego sondy TDR. Symulacje przeprowadzono sekwencyjnie dla szesnastu wartości grubości materiału. Warstwa materiału, wewnątrz której umieszczono sondę była o 20 mm dłuższa niż pręty sondy, tak aby odbicie od zakończenia prętów było niezakłócone. Grubość materiału zmieniano od wartości 2 mm, 2,8 mm oraz w zakresie 4-30 mm co 2 mm. Symulacje przeprowadzono przy użyciu programu EMPro metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD ang. finite difference time domain) dla materiałów o właściwościach dielektrycznych opisanych jednobiegunowym modelem Debye'a. Symulacje wykonano dla czterech materiałów nieprzewodzących o wartości przenikalności elektrycznej 10, 20, 40, 80 oraz trzech materiałów przewodzących o konduktywności elektrycznej 20, 100, 200 $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ i stałej przenikalności elektrycznej równej 80. Pozostałe dwa parametry modelu Debye'a czyli czas relaksacji i przenikalność elektryczną przy nieskończonej częstotliwości dla wszystkich materiałów ustalono odpowiednio na 10 ps i 5. Łącznie dla wszystkich przypadków przeprowadzono 112 symulacji. W wyniku symulacji numerycznych otrzymano zespolone wartości współczynnika odbicia S_{11} . Określano także rozkład pola elektrycznego w celu wyznaczenia kształtu i rozmiaru strefy czułości sondy. Dodatkowo wyznaczano również impedancję sondy dla częstotliwości 10 MHz. Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono analizę błędów względnego konduktywności i przenikalności elektrycznej, wynikającego z ograniczonej strefy czułości sondy. Wyniki symulacji zostały pozytywnie zweryfikowane eksperymentem pomiarowym przy użyciu wektorowego analizatora sieci dla rzeczywistej sondy 3 prętowej, gdzie zmieniano grubość warstwy dielektryka poprzez przesuwanie przegród w pojemniku pomiarowym.

Podsumowanie i wnioski

Błędy względne wyznaczania przenikalności i konduktywności elektrycznej obliczone odpowiednio z czasu TDR i impedancji przy 10 MHz zależały od grubości materiału. Uzyskane wyniki rzeczywistych pomiarów były zgodne z wynikami uzyskanych w drodze symulacji, co potwierdziło skuteczność stosowania metod symulacyjnych do badań nad strefą czułości sondy reflektometrycznej. Wartości błędów względnych zwiększały się oraz różniły się między sobą dla przenikalności i konduktywności elektrycznej, gdy grubość materiału spadła poniżej 20 mm. Przy grubości większej niż 20 mm błąd wyznaczania przenikalności i konduktywności spadał poniżej 1%. Wykazano, że bezpieczna strefa czułości dla określenia wskaźnika zasolenia wynosiła 20 mm dla geometrii symulowanej sondy 3-prętowej. Dla materiału o grubości poniżej 20 mm, konduktywność elektryczna obliczona na podstawie amplitudy sygnału szpilkowego TDR była silnie zależna od jej bezwzględnej wartości, natomiast mierzona na podstawie impedancji nie wykazywała takiego zachowania.

Publikacja 4 pt: "Determination of Soil Pore Water Salinity Using an FDR Sensor Working at Various Frequencies up to 500 MHz"

Problem badawczy

Dokładna ocena zasolenia gleby zdefiniowanego jako przewodnictwo elektryczne wody glebowej jest bardzo ważnym zagadnieniem, szczególnie w suchych regionach, gdzie zasolenie gleby może znacznie wzrosnąć i stanowić zagrożenie dla roślin [4,5]. Pomiar zasolenia gleby jest dość skomplikowany, ponieważ wpływają na niego czynniki wywołujące błędy pomiarowe takie jak temperatura, wilgotność czy tekstura gleby. Dlatego rozwój nowych metod pomiaru i urządzeń do oceny stanu zasolenia gleby jest nadal ważnym kierunkiem badań. Pomiar stanu zasolenia gleby powinien być wykonywany w tym samym czasie i miejscu wraz z uwzględnieniem większości czynników wpływających na dokładność pomiaru. Realizacja tego zadania jest możliwa poprzez integrację różnych czujników w jednym urządzeniu pomiarowym [6,7] lub przez selektywną analizę sygnałów z czujników w celu rozróżnienia wielkości, takich jak wilgotność objętościowa gleby i konduktywność elektryczna za pomocą reflektometrii w dziedzinie czasu [8]. Techniki dyskryminacji czasami wymagają zwiększonej dokładności pomiaru i wykonaniu dodatkowych kalibracji, takich jak kalibracja sond TDR przy niskiej wilgotności gleby [9].

Zastosowanie czujników pozwalających na pomiar właściwości dielektrycznych gleby, w dziedzinie czasu lub częstotliwości (TDR lub FDR), otworzyło nowe możliwości detekcji wilgotności gleby, elektrycznej konduktywności i temperatury przy użyciu jednej sondy pomiarowej. Koncepcja wskaźnika zasolenia gleby X_s , opisująca stan zasolenia gleby, została wprowadzona przez Malickiego i Walczaka [10] jako jedno z wielu zastosowań techniki TDR do nieniszczącego i równoczesnego pomiaru transportu i stanu wody w glebie [11]. Wskaźnik zasolenia zdefiniowano jako pochodną cząstkową elektrycznej konduktywności gleby C_b po jej pozornej przenikalności elektrycznej ε_b (równanie (1)), gdzie obie zmienne wyznaczone są z przebiegu TDR w tym samym czasie i dla tej samej objętości gleby:

$$X_s = \frac{\partial C_b}{\partial \varepsilon_b} \quad (1)$$

Przenikalność i konduktywność elektryczna gleby zostały wyznaczone odpowiednio na podstawie prędkości impulsu TDR oraz jego tłumienia podczas propagacji wzdłuż równoległego falowodu TDR wprowadzonego do gleby jako czujnik [8,12]. Wykazano, że wartość X_s zależy przede wszystkim od zasolenia i tekstury gleby. Zasolenie gleby może być jednoznacznie określone na podstawie znajomości wskaźnika zasolenia X_s i zawartości frakcji piasku. Eksperymentalnie dowiedziono, że wskaźnik zasolenia gleby jako funkcja elektrycznej konduktywności wody glebowej jest niezależny od wilgotności objętościowej gleby dla wartości powyżej 0,2. Zastosowanie metody TDR do obliczania wskaźnika zasolenia przyjmuje pewne uproszczenia, które mogą wpłynąć na wynik. Wartość ε_b przybliża rzeczywistą część ε' zespolonej przenikalności elektrycznej i jest zależna od częstotliwości zewnętrznego pola elektrycznego. Również konduktywność elektryczna C_b obliczona na podstawie tłumienia impulsu TDR nie uwzględnia strat dielektrycznych ε_d .

Zespolona przenikalność elektryczna ε^* przedstawiona w równaniu (2) składa się z części rzeczywistej opisującej gromadzenie energii pola elektrycznego na sposób polaryzacji w ośrodku dielektrycznym oraz części urojonej, która określa straty energii. Straty te mogą być związane z rozpraszaniem energii zachodzącym podczas procesów polaryzacji (straty dielektryczne) jak i podczas przewodzenia prądu elektrycznego wewnątrz materiału.

$$\varepsilon^*(f) = \varepsilon'(f) - j \left(\varepsilon_d + \frac{C_b}{2\pi f \varepsilon_0} \right) = \text{Re}(\varepsilon^*) - j \text{Im}(\varepsilon^*), \quad (2)$$

gdzie $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ oznacza przenikalność elektryczną próżni.

W

Zależność zespolonej przenikalności elektrycznej gleby od częstotliwości pola elektrycznego została omówiona w literaturze, jednak nie określono zastosowanej częstotliwości [13], a w pracach [14,15] interpretacja została ograniczona do 50 lub 150 MHz, przy czym widmo częstotliwości otrzymano z przebiegu TDR [15]. W pracy [13], wykazano, że w porównaniu do metody TDR wyznaczenie obu składowych zespolonej przenikalności elektrycznej metodą FDR pozwoli uniknąć wpływu konduktywności elektrycznej na krzywą kalibracji wilgotności gleby. Dodatkowo, zastosowanie urządzeń FDR do pomiaru wilgotności i zasolenia gleby motywuje fakt, że mierniki TDR wymagają zastosowania impulsów o bardzo krótkim czasie narastania rzędu pikosekund, co znacząco przyczynia się do wzrostu kosztów tych urządzeń.

Celem pracy było przedstawienie zastosowania czujnika pracującego w oparciu o reflektometrię w dziedzinie częstotliwości FDR zaprojektowanego do oceny zasolenia gleby w szerokim zakresie jej wilgotności objętościowej i przewodnictwa elektrycznego. Nowatorskie było zastosowanie do tego celu metody FDR oraz zaproponowanie metodyki analizy uzyskanego widma. W ramach realizacji celu zbadano czy wskaźnik zasolenia oparty o dane z analizy widma jest skorelowany liniowo czy nieliniowo z konduktywnością elektryczną wody glebowej, a następnie określono konduktywność elektryczną wody glebowej w wybranych próbkach gleby w oparciu o niezależne pomiary widma części rzeczywistej i urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej w zakresie częstotliwości sygnału pomiarowego od 10 MHz do 500 MHz.

Badania własne, metodyka, wyniki

Zastosowanie szerokopasmowej metody FDR umożliwia wykonanie selektywnego pomiaru części rzeczywistej i urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej gleby. Dzięki temu przy pomiarach wilgotności gleby można zastąpić pozorną przenikalność elektryczną ϵ_b , uzyskaną w wyniku pomiaru metodą TDR, częścią rzeczywistą zespolonej przenikalności elektrycznej określoną metodą FDR w zakresie częstotliwości bliskim 400-500 MHz, gdzie wpływ konduktywności elektrycznej na część rzeczywistą zespolonej przenikalności elektrycznej gleby jest znikomy.

Badania przeprowadzono na pięciu glebach mineralnych przesianych i powietrznie suchych. Podstawowe właściwości fizyczne tych gleb podano w Tabeli 1.



Tabela 1. Wybrane właściwości fizyczne badanego materiału. RSD oznacza względne odchylenie standardowe (odchylenie standardowe / wartość średnia).

Nazwa	Gęstość [kg·m ⁻³]	Powierzchnia właściwa ^a [m ² ·g ⁻¹]	Masa wilgotność nasylenia [%]		Skład granulometryczny według FAO ^b [%]		
			Średnia	RSD	Piasek	Pył	II
568	1,415 ± 3	34	37,2	0,03	58	31	11
589	1,697 ± 4	10	22,4	0,04	88	11	1
601	1,380 ± 4	31	38,7	0,02	60	34	6
605	1,635 ± 7	10	23,8	0,07	95	4	1
less	1,382 ± 4	30	37,6	0,01	55	29	16

^a Metoda adsorpcji pary wodnej.

^b Dane na podstawie pracy [15].

Gleby pobrano z warstwy Ap, z głębokości 20-30 cm. Gęstość gleby określono w laboratorium dla 10-krotnego powtórzenia, ważąc próbki o znanej objętości, po uprzednim wysuszeniu w temperaturze 105 °C przez 24 godziny [16]. Pomiar wykonywano w pojemniku pomiarowym o objętości 120 cm³ (cylinder, średnica: 4,6 cm, wysokość: 7 cm). Wilgotność próbek gleby zmieniano od około 10% do bliskiej nasycenia. Każdą glebę nawilżono czterema roztworami (woda destylowana oraz roztwory KCl, Tabela 2), do siedmiu poziomów wilgotności. Przygotowano 35 pojemników z próbkami gleby dla każdego roztworu, co dało w sumie 140 pojemników. Pomiar FDR przeprowadzono trzykrotnie dla każdej próbki. Zastosowanie roztworów KCl o różnych przewodnościach elektrycznych C_s umożliwiło kontrolowanie części rzeczywistej i urojonej przenikalności elektrycznej badanego materiału w celu osiągnięcia zakładanej zmienności elektrycznej konduktywności gleby w zakresie 100-400 mS·m⁻¹, oraz wilgotności gleby od powietrznie suchej aż do bliskiej nasycenia.

Tabela 2. Parametry roztworów KCl zastosowanych do nawilżania materiału glebowego (wartości dla temperatury 21°C). Zakładane wartości C_s zostały obliczone z molowości [17] i potwierdzone na podstawie pomiarów.

Roztwór	Molowość KCl [mol·dm ⁻³]	Zakładane C_s [mS·m ⁻¹]
1	0,000	-
2	0,042	490
3	0,093	1,080
4	0,150	1,680

Do pomiarów zastosowano sondę FDR szczegółowo opisaną w pracy [18]. Sonda składała się z falowodu równoległego zbudowanego z dwóch nierdzewnych

prętów o długości 3 cm. Sonda o tak krótkich prętach podłączona do miernika TDR wymagałaby jeszcze krótszego czasu narastania impulsu, co jest możliwe w bardzo wyrafinowanych i drogich urządzeniach TDR. Przy sondach tego typu objętość mierzona badanej próbki była jednak większa niż w przypadku otwartej sondy koncentrycznej [19]. Do pomiaru zespolonego współczynnika odbicia S_{11} sygnału odbitego od sondy użytej w pomiarach zastosowano wektorowy analizator sieci (VNA), typ ZVCE firmy Rohde&Schwarz. Współczynnik odbicia jest zdefiniowany jako:

$$S_{11} = \frac{Z_p(\varepsilon^*) - Z_c}{Z_p(\varepsilon^*) + Z_c} \quad (3)$$

gdzie Z_p jest impedancją sondy, a $Z_c = 50\Omega$. Impedancja sondy zależy od zespolonej przenikalności elektrycznej materiału ε^* , w którym umieszczony został czujnik. Dlatego też zmierzony współczynnik odbicia jest również funkcją przenikalności elektrycznej próbki. Uzyskanie zależności odwrotnej: $\varepsilon^* = f(S_{11})$ pozwala na wyznaczenie zespolonej przenikalności elektrycznej ze zmierzonego współczynnika odbicia S_{11} dla każdej zadanej częstotliwości sygnału pomiarowego. Uzyskane wyniki pomiarów potwierdziły liniową zależność pomiędzy pierwiastkiem kwadratowym z rzeczywistej części przenikalności elektrycznej w paśmie 380–440 MHz (współczynnik załamania) [20], a wilgotnością objętościową gleby mierzoną standardową metodą termograwimetryczną. Natomiast dopasowując metodą najmniejszych kwadratów zmierzone widmo części urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej zgodnie z równaniem (2) wyznaczono konduktywność elektryczną próbki C_b przyjmując założenie, że stratność dielektryczna ε_d jest stała w zakresie do 500 MHz.

Dla metody FDR wskaźnik zasolenia może zostać zdefiniowany jako:

$$X_s = \frac{\partial C_b}{\partial \varepsilon'} \quad (4)$$

gdzie C_b wyznaczone jest z części urojonej, a ε' z części rzeczywistej widma zespolonej przenikalności elektrycznej.

Eksperymentalnie wartość X_s wyznaczono jako współczynnik kierunkowy z równań regresji liniowej C_b względem ε' . Stwierdzono, że X_s zależy liniowo od przewodności elektrycznej roztworu nawilżającego C_s . Przyjmując, że konduktywność elektryczna wody glebowej C_w , jest równa konduktywności elektrycznej roztworu nawilżającego C_s oraz znając współczynnik kierunkowy funkcji opisującej tę zależność, można obliczyć przewodnictwo wody glebowej z następującego wzoru:

$$C_w = \frac{X_S}{l} \quad (5)$$

Aby obliczyć wskaźnik zasolenia za pomocą metody przedstawionej powyżej, konieczne jest wykonanie szeregu pomiarów tej samej gleby nawilżonej do różnych poziomów wilgotności roztworem o tej samej przewodności elektrycznej. W celu praktycznego zastosowania tej metody, do warunków polowych ocena zasolenia powinna być oparta na pojedynczym pomiarze pojedynczej próbki gleby. Jeżeli relacja C_b w funkcji ε' jest liniowa to nie trzeba wykonywać serii pomiarów próbek o różnej wilgotności w celu ustalenia wartości wskaźnika zasolenia. Wystarczy jeden pomiar zespolonej przewodności elektrycznej pojedynczej próbki. Okazuje się, że linie zależności C_b w funkcji ε' , dopasowane do punktów danych dla danej gleby i wszystkich zastosowanych przewodności roztworu nawilżającego, krzyżują się przy pewnych wartościach granicznych części rzeczywistej przewodności elektrycznej ε_I i przewodności elektrycznej C_I . Gdy znane są te wartości dla danej gleby, możliwe jest obliczenie wskaźnika zasolenia przez określenie wartości pochodnej cząstkowej z odpowiedniego ilorazu różnic:

$$X_S = \frac{\partial C_b}{\partial \varepsilon'} \cong \frac{\Delta C_b}{\Delta \varepsilon'} = \frac{C_b - C_I}{\varepsilon' + \varepsilon_I} \quad (6)$$

Łącząc równania (5) i (6), przewodność elektryczną wody glebowej w porach można obliczyć na podstawie pojedynczego pomiaru wartości ε' i C_b próbki o nieznanym wcześniej zasoleniu i zawartości wody z następującego wzoru:

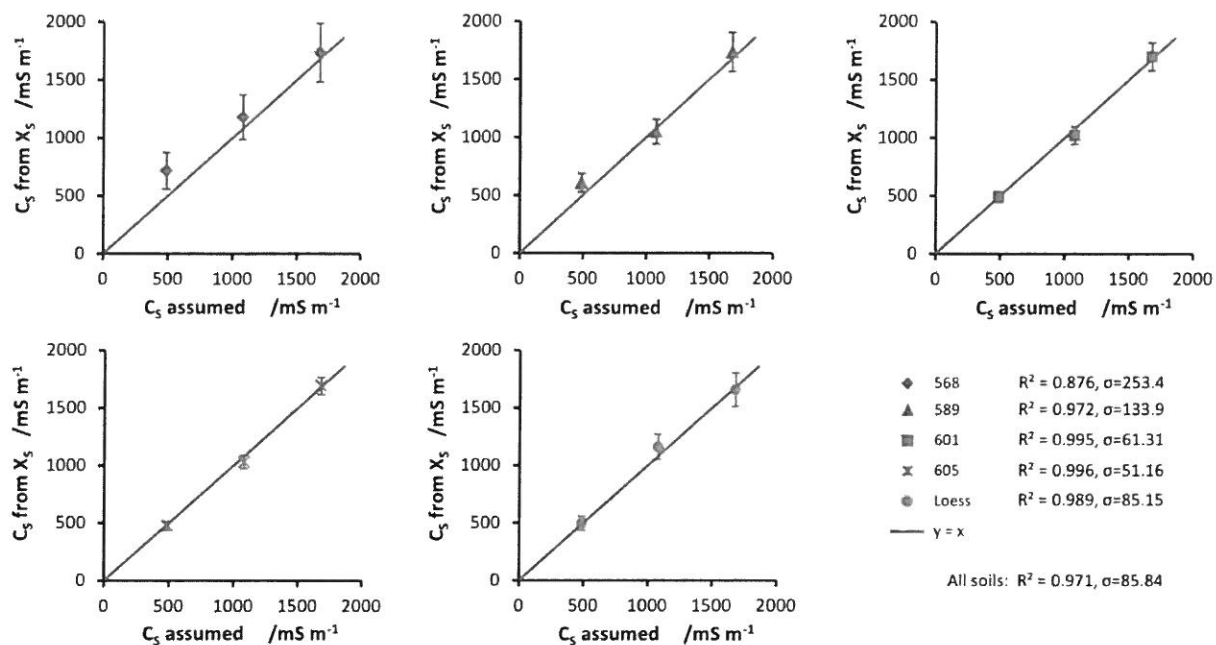
$$C_w = \frac{C_b - C_I}{l(\varepsilon' - \varepsilon_I)} \quad (7)$$

W celu dalszego przetestowania modelu liniowego wskaźnika zasolenia, obliczono elektryczną przewodność roztworu nawilżającego C_s , odejmując tzw. elektryczną przewodność resztkową C_r (przyjmowaną jako przewodność wody glebowej dla próbek nawilżanych wodą destylowaną) według wzoru:

$$C_s = C_w - C_r, \quad C_r \equiv C_w \text{ (woda destylowana)} \quad (8)$$

Wyniki można następnie porównać z C_s założonymi na podstawie molowości roztworów (Tabela 2). Wartości liczbowe obliczonego wskaźnika zasolenia przedstawiono na rysunku 1. Na rysunku tym widać wyraźnie, że stopień zgodności jest bardzo dobry. Przedstawione na rysunku wartości R^2 i odchylenia standardowe σ opisują, stopień zgodności założonych wartości C_s z wartościami wyznaczonymi z pomiarów. Największe błędy dopasowania występowały dla gleby nr. 568, która

wykazuje zarówno wysokie odchylenia w wartościach wyliczonych C_s , jak i wysokie słupki błędów. Najlepszym przypadkiem jest gleba nr. 605, która ma 95% frakcji piasku. Wskazuje to, że metoda wskaźnika zasolenia działa bardziej niezawodnie dla gleb o największej zawartości piasku. Ponieważ obliczone konduktywności elektryczne roztworów nawilżających zostały określone na podstawie modelu liniowego, wartości odpowiadające wodzie destylowanej są zerowe z definicji.



Rys.1. Konduktywności roztworów nawilżających obliczone z modelu liniowego wskaźnika zasolenia względem założonych konduktywności dla poszczególnych gleb, linia prosta ma nachylenie równe 1 i odpowiada maksymalnej zgodności.

Wybrane gleby piaszczyste, różniły się wartościami powierzchni właściwej (Tabela 1). W pracy podjęto próbę zastosowania modelu kwadratowego wskaźnika zasolenia, w którym wskaźnik zasolenia zależy od zawartości wody, zakładając że metoda ta pozwoli wykryć procesy adsorpcji i desorpcji jonów zachodzących na powierzchniach cząstek stałych gleby. Próba ta jednak nie przyniosła spodziewanych rezultatów.

Podsumowanie i wnioski

Pomiar zasolenia gleby za pomocą metody FDR umożliwia bezpośrednie uzyskanie części rzeczywistej i urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej. Uzyskane równanie (7) umożliwia ocenę zasolenia wody glebowej na podstawie pomiarów FDR konduktywności elektrycznej gleby i jej przenikalności elektrycznej.

Niektóre parametry tego równania zależą od składu granulometrycznego gleby oraz jej powierzchni właściwej. W celu usunięcia wpływu czynników powodujących błędy pomiarowe, wilgotność gleby wyznaczono z części rzeczywistej przenikalności elektrycznej w zakresie częstotliwości 380-440 MHz, elektryczną konduktywność gleby określono z widma części urojonej przenikalności elektrycznej dla niższych częstotliwości. Z badań wynika, że metoda wskaźnika zasolenia, wprowadzona w [10] do oceny zasolenia gleby za pomocą pomiarów TDR, może mieć zastosowanie również przy użyciu metody FDR. Dostosowanie metody wskaźnika zasolenia do użytkowania w pomiarach polowych wymagałoby poszerzenia zakresu pomiarów o większą ilość bardziej zróżnicowanych gleb oraz zastosowania większej zmienności konduktywności elektrycznej roztworów nawilżających. Model liniowego wskaźnika zasolenia pozwala określić elektryczną konduktywność wody glebowej znajdującej się w porach glebowych niezależnie od części rzeczywistej przenikalności elektrycznej czyli w sposób selektywny względem wilgotności gleby. Metodologia przedstawiona w badaniach może zostać rozszerzona w przyszłości o gleby z większą wartością powierzchni właściwej.

Publikacja 2 pt. "A Time-Domain Reflectometry Method with Variable Needle Pulse Width for Measuring the Dielectric Properties of Materials"

Patent 5 pt. "Miernik TDR do pomiaru parametrów dyspersyjnych materiałów porowatych w szczególności gleby"

Problem badawczy

Widmo zespolonej przenikalności elektrycznej materiałów o właściwościach dyspersyjnych opisuje wiele modeli o różnej liczbie czasów relaksacji z dodatkowym elementem opisującym wpływ konduktywności elektrycznej [21,22]. Stosowany sygnał TDR najczęściej występuje w postaci impulsu skokowego lub szpilkowego. Analiza amplitudy impulsu oraz czasu jego odbicia od końca sondy TDR pozwala na równoczesne określenie przenikalności i konduktywności elektrycznej badanego materiału [23-25]. Na zmianę amplitudy sygnału skokowego TDR oprócz konduktywności elektrycznej wpływa również dyspersja dielektryczna materiału [26]. Dotychczas zależność ta nie była wykorzystywana do oceny właściwości dyspersji dielektrycznej w postaci mierzonego czasu relaksacji badanego materiału ze względu na brak selektywności. Obecnie nie ma prostych metod pomiaru parametrów widma zespolonej przenikalności elektrycznej, które mogły by być stosowane w systemach

monitorowania w pomiarach polowych przy użyciu sond wieloprętowych, łatwych do instalacji w materiałach porowatych, takich jak gleba. W pracy przedstawiono metodę pomiaru czasu relaksacji dielektrycznej wykorzystującą opatentowaną w Instytucie Agrofizyki zmienną szerokość impulsu szpilkowego (Patent 5). Do tej pory metoda impulsów TDR o zmiennej szerokości nie została w tym celu zastosowana, a uzyskanie pełnej ochrony patentowej potwierdziło ten fakt. Dostępne na rynku urządzenia TDR używają impulsu o stałych parametrach kształtu (czas narastania, amplituda), które dobierane są przez producenta tych urządzeń na podstawie długości i geometrii zastosowanej sondy TDR [27]. Celem pracy była weryfikacja hipotezy, że możliwe jest jednoczesne określenie przenikalności i konduktywności elektrycznej, oraz czasu relaksacji τ mierzonego materiału na podstawie analizy czasu i amplitudy impulsów szpilkowych wygenerowanych przez urządzenie TDR, o różnej szerokości początkowego impulsu szpilkowego.

Badania własne, metodyka, wyniki

Charakterystyka widmowa impulsów TDR zależy od ich kształtu. Wykorzystując oprogramowanie Advanced Design Studio (ADS) [28], zbadano obwiednię widm powszechnie używanych sygnałów szpilkowych TDR dla szerokości 300 ps, 500 ps i 800 ps. Widma uzyskano, stosując transformatę Chirp Z dla częstotliwości powtarzania impulsu wynoszącej 10 MHz.

Z teorii sygnałów [29] wiadomo, że amplituda i gęstość widma zmieniają się wraz z częstotliwością powtarzania impulsów, podczas gdy kształt obwiedni widma pozostaje niezmienny. Z analizy widm zaobserwowano, że różnica amplitudy składowych przy częstotliwości 100 MHz wynosi 8 dB dla dwóch skrajnych szerokości impulsu, podczas gdy dla częstotliwości 1,5 GHz składowe amplitudy są prawie równe. W przypadku impulsu skokowego amplitudy składowych zaczynają się różnicować wraz z rosnącą częstotliwością, przy czym dla najniższych analizowanych częstotliwości pozostają one stałe niezależnie od różnych czasów narastania, co uniemożliwia zastosowanie takiego sygnału do wyznaczania czasu relaksacji dielektrycznej.

Aby uzyskać zależności funkcyjne amplitudy impulsów względem konduktywności elektrycznej i czasu relaksacji dielektrycznej, wykonano szereg symulacji numerycznych metodą FDTD, uzyskując wartości parametrów S_{11} dla



modelu sondy z geometrią odzwierciedlającą rzeczywistą sondę stosowaną w pomiarach weryfikacyjnych. Przeprowadzono symulacje dla materiałów o zdefiniowanych stałych wartościach przenikalności elektrycznej od 5 do 80. Symulacje numeryczne modelu sondy przeprowadzono w zakresie częstotliwości 20 MHz-8 GHz za pomocą programu EMPro [30]. Symulacje objęły 11 przypadków przewodnictwa elektrycznego w zakresie 0-0,5 S·m⁻¹ i 13 wartości czasu relaksacji w zakresie 1-13 ps. W wyniku otrzymano 143 pliki zawierające zespolone wartości parametru S₁₁. Analiza stanów przejściowych została przeprowadzona za pomocą programu ADS [28], w której zastosowano impulsy szpilkowe o amplitudzie 1 V i szerokości 300 ps oraz 800 ps. Szerokości impulsów zostały wybrane w taki sposób, aby zapewnić znaczną różnicę amplitudy przy zachowaniu dobrej rozdzielczości i czułości tej metody.

Materiałem weryfikacyjnym były wodne roztwory soli KCl o 14 wartościach konduktywności elektrycznej w zakresie od 50 μS·m⁻¹ do 0,5 S·m⁻¹ w stałej temperaturze 22 ± 0,35°C. Pomiarów parametrów S₁₁ przeprowadzono za pomocą wektorowego analizatora sieci typu ZVCE (Rohde & Schwarz) w zakresie częstotliwości 20 kHz-8 GHz, z dołączoną sondą pięcioprętową. Na podstawie wyznaczonych z symulacji elektromagnetycznych funkcji oraz ich współczynników, wyznaczono czas relaksacji roztworów w funkcji ich konduktywności elektrycznej. Czas relaksacji roztworów pozostawał w przybliżeniu stały i niezależny od przewodnictwa elektrycznego. Uzyskane wyniki wskazują, że czas relaksacji, przenikalność i konduktywność elektryczną badanych roztworów można wyznaczyć jednocześnie za pomocą prostej analizy amplitudy i czasu odbicia dwóch impulsów szpilkowych o różnych szerokościach. Pomimo iż konduktywność elektryczna oraz czas relaksacji mają wpływ na amplitudę impulsów TDR, nadmiarowość uzyskana dzięki zastosowaniu dwóch impulsów szpilkowych umożliwia selektywne wyznaczanie tych wielkości dla materiału o danej przenikalności elektrycznej.

Patent 5

Patent PAT.227864 uzyskał decyzję o udzieleniu prawa wyłącznego w dniu 5.09.2017.

Przedmiotem wynalazku jest miernik TDR do pomiaru parametrów dyspersyjnych materiałów porowatych, zwłaszcza do jednoczesnego wyznaczania stratności dielektrycznej, związanej z polaryzacją dielektryczną cząsteczek materiału glebowego, oraz wartości konduktywności elektrycznej EC gleby. Stratność dielektryczna gleby jest parametrem decydującym o stopniu tłumienia fal

elektromagnetycznych i zależna jest od długości fali. Dla złożonych materiałów porowatych, takich jak gleba, znajomość tego parametru ma zastosowanie w obszarach takich jak: pomiary satelitarne, kalibracja bezkontaktowych metod pomiaru wilgotności gleby, takich jak GPR, czy też w mikrofalowych metodach odbiciowych oraz podziemnej komunikacji bezprzewodowej. Ze względu na niehomogeniczność gleby w warunkach naturalnych oraz złożoną strukturę i skład chemiczny, pomiary laboratoryjne gleby stanowią poważny problem metrologiczny. Zastosowanie generatora o zmiennej szerokości impulsu szpilkowego umożliwia wykorzystanie zmiennej amplitudy składowych widma impulsów TDR o różnej szerokości. Gleba jako ośrodek dyspersyjny zachowuje się jak filtr pasmowo-przepustowy dla sygnału TDR, dzięki czemu amplituda impulsów różnicuje się w zależności od stratności dielektrycznej i charakteru jej zmian w funkcji częstotliwości. Z przeprowadzonych badań wynika ponadto, że impuls szpilkowy wykazuje duże możliwości modyfikacji widma poprzez zmianę jego szerokości. Wykorzystanie właściwości widmowych sygnałów szpilkowych o zróżnicowanej szerokości w znacznym stopniu ułatwia realizację pomiaru stratności dielektrycznej poprzez określenie stosunku amplitud sygnału odbitego oraz jego wartości bezwzględnej dla dwóch lub więcej różnych szerokości impulsu.

Zastrzeżenia patentowe:

1. Miernik TDR do pomiaru parametrów dyspersyjnych materiałów porowatych, wyposażony w generator impulsu szpilkowego z przetwornikiem analogowo-cyfrowym ADC, sondę pomiarową oraz elementy sterujące dla realizacji pomiaru metodą stroboskopową, znamienny tym, że zastosowano generator o zmiennej szerokości impulsu szpilkowego.
2. Miernik według zastrzeżenia 1, znamienny tym, że generator jest generatorem o skokowo zmiennej szerokości impulsu szpilkowego, pozwalającym na przełączenie przynajmniej dwóch szerokości z zakresu od 100ps do 3ns.
3. Miernik według zastrzeżenia 1 albo 2, znamienny tym, że wykonany jest jako zintegrowany z sondą pomiarową albo sonda pomiarowa połączona z jest miernikiem kablem koncentrycznym.

Podsumowanie i wnioski

W wyniku pracy opracowano metodykę pomiaru czasu relaksacji dielektrycznej przy zastosowaniu dwóch szerokości impulsu szpilkowego TDR na podstawie

rozwiązania zastrzeżonego w patencie 5 miernika wykorzystującego impulsy TDR o modyfikowanej szerokości. Korzystając z symulacji elektromagnetycznych określono charakter funkcji oraz wyznaczono jej współczynniki opisujące poszukiwane zależności pomiędzy parametrami modelu Debye'a, a czasem propagacji w sondzie TDR i amplitudą sygnałów szpilkowych o dwóch różnych szerokościach 300 ps i 800 ps. Uzyskane wyniki poddano weryfikacji przy pomocy rzeczywistych pomiarów sondą 5 prętową w wodzie podłączoną do wektorowego analizatora sieci. Uzyskane wyniki potwierdziły użyteczność opatentowanej metody wykazując możliwość jej zastosowania w innowacyjnym urządzeniu pomiarowym TDR.

Publikacja 3 pt: "Detection of Atmospheric Water Deposits in Porous Media Using the TDR Technique"

Patent 6 pt. "Sonda TDR do pomiaru objętości wody pochodzącej z osadów atmosferycznych"

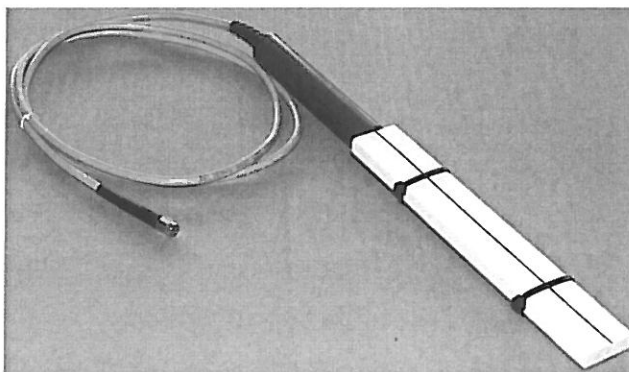
Problem badawczy

W regionach narażonych na suszę ilość wody dostarczanej do gleby w postaci osadu mgły, rosy, szronu lub bezpośredniej adsorpcji wody z atmosfery może przewyższać ilość opadów [31-33]. Z tego powodu osady atmosferyczne mogą być głównym źródłem wody dla roślin i innych żywych organizmów w ekosystemach suchych lub czasowo suchych [34-37]. W regionach suchych stosuje się technikę zbierania wody z mgły, która dryfuje z pobliskich oceanów [38-40]. Technika ta pozwala na pozyskiwanie znaczących ilości wody pitnej w miejscach, gdzie opady występują bardzo rzadko. Znajomość ilości wody pochodzącej z osadów atmosferycznych umożliwia dobranie gatunków roślin przystosowanych do konkretnych warunków wilgotnościowych. Jest to szczególnie ważne w obszarach, w których gleba jest podatna na erozję wodną i wiatrową, ponieważ odpowiednio ukształtowana pokrywa roślinna skutecznie zapobiega degradacji gleby [41]. Z tego powodu pomiary ilości wody i intensywności występowania osadów atmosferycznych mają kluczowe znaczenie z perspektywy ekologicznej, a także jako metoda badania procesów agrofizycznych związanych z dynamiką tworzenia i odparowywania osadów atmosferycznych. Monitorowanie osadów atmosferycznych jest również ważne w ochronie pomników i elementów konstrukcyjnych budynków przed szkodliwym wpływem wilgoci [42]. Obecnie stosowane czujniki osadów charakteryzują się szeregiem wad, takich jak niestabilność czasowa, temperaturowa, wrażliwość na wiatr

i inne czynniki atmosferyczne oraz brak możliwości zdalnego monitorowania osadów. Celem pracy było przetestowanie skonstruowanego na podstawie opatentowanego w Instytucie Agrofizyki czujnika osadów (Patent 6) oraz określenie jego poziomu detekcji i zdolności do śledzenia zmian natężenia ilości wody pochodzącej z osadu atmosferycznego. Testowanie obejmowało również zbadanie wrażliwości termicznej oraz przeprowadzenie badań polowych i porównawczych z zastosowaniem gleby jako materiału detekcyjnego.

Badania własne, metodyka, wyniki

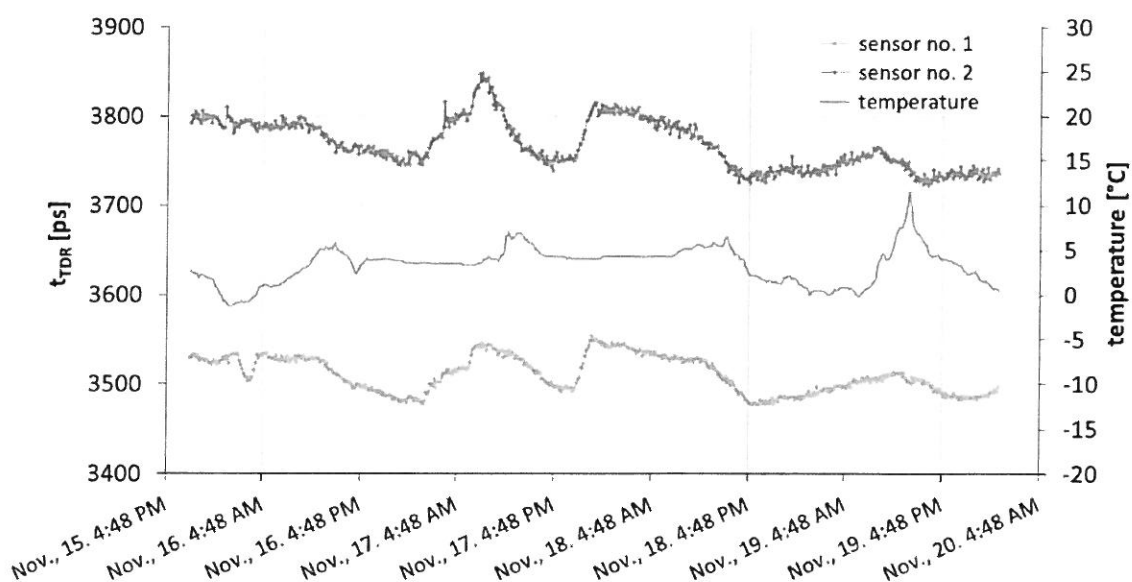
Konstrukcję czujnika do pomiarów atmosferycznego osadzania wody przedstawiono na rysunku 2. Elementem detekcyjnym, który służył jako kolektor wody, była płyta wykonana z ceramiki korundowej. Temperatura spiekania zastosowana podczas wytwarzania ceramiki wynosiła 1250 ° C, a porowatość końcowego materiału wynosiła około 25%. Taką ceramikę z powodzeniem stosowano również do wytwarzania tensjometrów glebowych, ze względu na bardzo dobre właściwości mechaniczne w porównaniu z innymi materiałami porowatymi [43] oraz dużą odporność na zmienne warunki atmosferyczne. Płytkę umieszczono pomiędzy płaską powierzchnią wykonaną z laminatu szklano-epoksydowego pokrytego miedzią, a drutem miedzianym. Warstwa metaliczna i drut uformowały linię transmisyjną TDR.



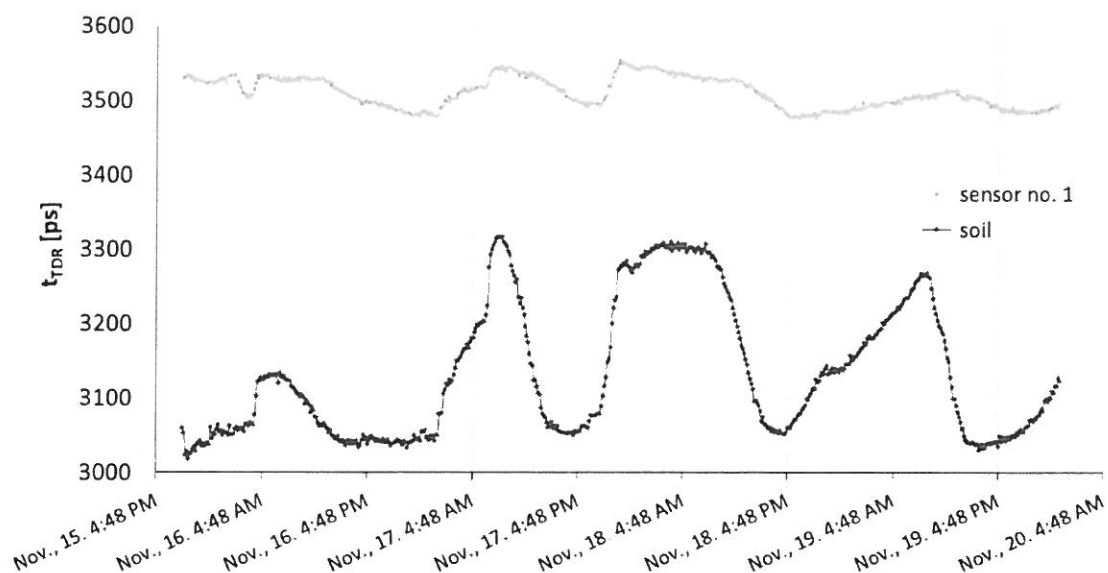
Rys.2. Czujnik do pomiaru ilości osadów atmosferycznych z ceramiczną płytą porowatą.

W celu sprawdzenia, czy odczyty zależą od objętością płytki badania przeprowadzono przy użyciu dwóch czujników o grubościach płytek równych 4,1 i 8,7 mm. Długość i szerokość płytek ceramicznych wynosiła odpowiednio 19,2 i 2,9 cm. Szerokość płytki porowatej została tak dobrana, aby obejmowała całą strefę czułości czujnika poniżej drutu. Górna powierzchnia obu płytek ceramicznych wynosiła

55,7 cm². Objętości płytek były równe odpowiednio 22,8 i 48,4 cm³. Wpływ temperatury zbadano analizując dane z kalibracji w sześciu temperaturach równych 5, 10, 15, 20, 25 i 30 °C. Po nasyceniu wodą płytki ceramicznej czujnika umieszczano go na wadze znajdującej się w komorze klimatycznej i podłączono do miernika TDR/MUX (<http://www.e-test.eu/laboratory-meter.html>). Oba urządzenia pomiarowe były podłączone do komputera i kontrolowane przez specjalnie przygotowaną aplikację z funkcją rejestrowania danych z wagi i miernika TDR. Podczas parowania wody z materiału porowatego czujnika, co minutę rejestrowano odczyty masy i czasu TDR. Zastosowana komora klimatyczna WKL 100 firmy Weiss Technik, stabilizowała zadane wartości temperatury oraz wilgotność, którą dla wszystkich przypadków ustawiono na 50%. Na podstawie pomiarów określono ilość wody potrzebną do nasycenia płytki ceramicznej czujników, która wynosiła odpowiednio 6,5 g i 15,75 g, a następnie maksymalną wartość zakresu pomiarowego osadu wynoszącą odpowiednio 1,2 mm H₂O i 2,8 mm H₂O. Kalibracja okazała się niezależna od temperatury. Przy założeniu rozdzielczości pomiaru TDR na poziomie 1 ps określono rozdzielczość czujników odpowiednio na poziomie $5,7 \cdot 10^{-4}$ mm H₂O oraz $1,3 \cdot 10^{-3}$ mm H₂O. Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie badań polowych. Czujniki podłączono do stacji pomiarowej zasilanej solarnie wraz ze specjalnie przygotowanym czujnikiem, gdzie w miejscu płytki ceramicznej umieszczono pojemnik z glebą o tej samej objętości co płytka, o grubości 8,7 mm. W trakcie pomiarów rejestrowano temperaturę czujników.



Rys.3. Rejestrowany czas TDR w pomiarach polowych z czujników osadu wraz ze zmianami temperatury. Grubość płytki czujników 1 - 4,1mm, 2 - 8,7 mm



Rys.4. Rejestrowany czas TDR w pomiarach polowych z czujnika osadu oraz czujnika wypełnionej glebą

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wybrany okres czasu kiedy nie występowały opady deszczu, a warunki termiczne sprzyjały występowaniu osadu rosy. Widać wyraźnie, że zastosowana metoda TDR zapewniła wystarczającą dokładność i rozdzielczość pomiarów. Do prawidłowej detekcji wymagana była duża czułość, ponieważ intensywność osadzania się wody jest bardzo niska. W zakresie pomiarowym eksperymentu polowego oszacowano błąd pomiaru jako równy ilości osadu $1,1 \cdot 10^{-3}$ i $2,7 \cdot 10^{-2}$ mm H₂O. Wysoka rozdzielczość była istotna dla przeprowadzonych eksperymentów, ponieważ pozwoliła zbadać dynamikę osadzania się wody na podstawie zmian zaobserwowanych w krótkim czasie. Przeprowadzony eksperyment polowy wykazał, że konstrukcja zaprojektowanego czujnika osadu oraz zastosowana metoda reflektometrii w dziedzinie czasu były odpowiednie do wykrywania i śledzenia dynamiki osadzania się wody z osadów atmosferycznych.

Patent 6

Patent PAT.224933 uzyskał decyzję o udzieleniu prawa wyłącznego w dniu 16.08.2016.

Przedmiotem wynalazku jest sonda wykorzystująca technikę TDR do pomiaru objętości wody pochodzącej z osadów atmosferycznych (np. rosy, osadzania mgły, adsorpcji pary wodnej). Wartością mierzona przez sondę jest objętość wody

przypadająca na jednostkę powierzchni. Monitoring wilgotności gleby, zmieniającej się między innymi w związku z osadem atmosferycznym, umożliwia modelowanie hydrologiczne i klimatyczne oraz weryfikację tych modeli. Obecnie stosowane metody pomiaru wody z osadu atmosferycznego związane są z wyznaczaniem dobowego rozkładu natężenia tych osadów, które w sposób rzeczywisty zasilają górną warstwę gleby. Zastosowany w płytce materiał porowaty nie zmienia w czasie swoich właściwości, co pozwala zapewnić wysoką powtarzalność pomiaru. Dodatkowo, wyniki uzyskuje się natychmiast ze względu na szybkie i równomierne pochłanianie wody pochodzącej z osadów atmosferycznych, przez kapilary porowatego materiału płytki. Dzięki temu minimalizuje się zależność wyniku pomiaru od warunków otoczenia.

Zastrzeżenia patentowe:

1. Sonda TDR do pomiaru objętości wody z osadów atmosferycznych mająca postać czujnika zbudowanego z falowodu równoległego znanymi tym, że czujnik wyposażony jest w kolektor wody, który ma postać płytki wykonanej z porowatego materiału o porowatości 10 – 30 %, korzystnie z ceramiki korundowej albo cyrkonowej, która umieszczona jest na płaskim laminacie foliowanym warstwą miedzi, gdzie warstwa metalu na laminacie stanowi pierwszy element pary elementów falowodu równoległego czujnika TDR, natomiast drugi element umieszczony jest na drugiej stronie płytki i ma postać drutu wykonanego ze stali kwasoodpornej albo nadrukowanej miedzianej ścieżki i podłączony jest do ścieżki o impedancji charakterystycznej mniejszej niż impedancja charakterystyczna kabla koncentrycznego, łączącego sondę z miernikiem TDR, przy czym oba elementy falowodu równoległego przylegają ściśle do płytki a laminat i nadrukowana miedziana ścieżka zabezpieczone są antykorozyjnie, korzystnie warstwą niklu lub złota.
2. Sonda według zastrzeżenia 1, znanymi tym, że sonda wyposażona jest w termometr.
3. Sonda według zastrzeżenia 1, znanymi tym, że po spodniej stronie laminatu umieszczona jest dodatkowo grzałka elektryczna lub ogniwo Peltiera z elektroniczną regulacją mocy.
4. Sonda według zastrzeżenia 1 albo 2, znanymi tym, że zestawiona jest z zespołu czujników TDR, przy czym grubość płytki każdego następnego czujnika jest różna od poprzedniej.



5. Sonda według któregoś z poprzednich zastrzeżeń znamiona tym, że zestawiona jest z zespołu czujników TDR stosujących płytki o różnej porowatości.

Podsumowanie i wnioski

Sprawdzono opracowane i opatentowane rozwiązania czujników osadów. Na podstawie pomiarów laboratoryjnych wykazano, że temperatura czujników nie wpływa na ich odczyty w badanym zakresie 5-30 °C. Na podstawie pomiarów polowych wyznaczono błąd pomiaru w granicach 0,0011-0,027 mm H₂O w zależności od grubości porowatej płytki korundowej. Wyniki pomiarów potwierdziły zgodność odczytów wykonanych przez czujnik z ceramiczną płytką porowatą z pomiarami przeprowadzonymi w próbce gleby. Uzyskane wyniki potwierdziły użyteczność opatentowanej metody wykazując możliwość jej zastosowania w innowacyjnym urządzeniu do pomiaru ilości osadów opartym na metodzie TDR.

PODSUMOWANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Opracowane metody i czujniki pozwoliły na wyznaczanie parametrów ośrodka takich jak dyspersja dielektryczna, wilgotność, wskaźnik zasolenia oraz prowadzenie monitoringu ilości osadów atmosferycznych. Posiadają również duży potencjał aplikacyjny i wdrożeniowy jako wyposażenie istniejących systemów monitoringu np. stacji agrometeorologicznych. Przedstawione wyniki wykazują, że pomiary właściwości dielektrycznych materiałów porowatych poprzez wykorzystanie do tego celu odpowiednich metod i czujników pozwalają na pozyskanie nowej wiedzy dotyczącej zarówno metod detekcji jak i opisu procesów agrofizycznych zachodzących w materiałach porowatych.



LITERATURA

1. Wagner N., Trinks E., Kupfer K. 2007 Determination of the spatial TDR- sensor characteristics in strong dispersive subsoil using 3D-FEM frequency domain simulations in combination with microwave dielectric spectroscopy Meas. Sci. Technol. 18 1137–46
2. Ferré P.A., Knight J.H., Rudolph D.L. Kachanoski R.G. 1998 The sample areas of conventional and alternative time domain reflectometry probes Water Resour. Res. 34 2971–9
3. Nissen H.H., Ferré P.A., Moldrup P. 2003 Sample area of two- and three-rod time domain reflectometry probes Water Resour. Res. 39 1289
4. Rhoades J.D., Chanduvi F., Lesch S. Soil Salinity Assessment: Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements; FAO Irrigation and Drainage Paper No. 57; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 1999; p. 150
5. Hendrikx J.M.H., Das B.S., Corwin D.L., Wraith J.M., Kachanoski R.G., Relationship between soil water solute concentration and apparent soil electrical conductivity. In Methods of Soil Analysis; Dane, J.H., Topp, G.C., Eds.; Soil Science Society of America: Madison, WI, USA, 2002; pp. 1275–1282.
6. Sun Y., Lammers P.S., Ma D., Lin J., Zeng Q. Determining soil physical properties by multi-sensor technique. Sens. Actuators A 2008, 147, 352–357.
7. Naderi-Boldaji M., Sharifi A., Jamshidi B., Younesi-Alamouti S., Minaee S. A dielectricbased combined horizontal sensor for on-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance. Sens. Actuators A 2011, 171, 131–137.
8. Noborio K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review. Comput. Electron. Agric. 2001, 31, 213–237.
9. Skierucha W., Wilczek A., Alokina O. Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements. Sens. Actuators A 2008, 147, 544–552.
10. Malicki M.A., Walczak R.T. Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. Eur. J. Soil Sci. 1999, 50, 505–514.
11. Slawinski C., Witkowska-Walczak B., Lipiec J., Nosalewicz A. Effect of aggregate size on water movement in soils. Int. Agrophys. 2011, 25, 53–58.
12. Dalton F.N., Herkelrath W.N., Rawlins D.S., Rhoades J.D. Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. Science 1984, 224, 989–990.
13. 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 Sci. Soc. Am. J. 2000, 64, 1244–1252.
14. Campbell J.E. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. Soil Sci. Soc. Am. J. 1990, 54, 332–341.
15. Heimovaara T.J. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms 1. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils. Water Resour. Res. 1994, 30, 189–199.
16. Malicki M.A., Plagge R., Roth C.H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. Eur. J. Soil Sci. 1996, 47, 357–366.

17. CRC Handbook of Chemistry and Physics; Weast, R.C., Ed.; CRC Press Inc.: Boca Raton, FL, USA, 1979.
18. Skierucha W., Wilczek A. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10–500 MHz frequency range. *Sensors* 2010, 10, 3314–3329.
19. Skierucha W., Walczak R.T., Wilczek A. Comparison of Open-Ended Coax and TDR sensors for the measurement of soil dielectric permittivity in microwave frequencies. *Int. Agrophys.* 2004, 18, 355–362.
20. Whalley W.R. Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. *J. Soil Sci.* 1993, 44, 1–9.
21. Mironov V.L., Bobrov P.P., Fomin S.V. Multirelaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model of Moist Soils. *IEEE Geosci. Remote Sens.* 2013, 10, 603–606.
22. Loewer M., Igel J., Wagner N. Frequency-dependent attenuation analysis in soils using broadband dielectric spectroscopy and TDR. In *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar GPR 2014 IEEE*, Brussels, Belgium, 30 June 30–4 July 2014; pp. 208–213.
23. Dalton F.N., Herkelrath W.N., Rawlins D.S., Rhoades J.D. Time domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* 1984, 224, 989–990.
24. Jones S.B., Wraith J.M., Or D. Time domain reflectometry measurement principles and applications. *Hydrol. Processes* 2002, 16, 141–153.
25. Malicki M.A., Walczak R.T. Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. *Eur. J. Soil Sci.* 1999, 50, 505–514.
26. Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.A., Or D., Friedman S.P. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone J.* 2003, 2, 444–475.
27. Skierucha W., Wilczek A., Szyplowska A., Sławiński C., Lamorski K. A TDR-based soil moisture monitoring system with simultaneous measurement of soil temperature and electrical conductivity. *Sensors* 2012, 12, 13545–13566.
28. Brochure Keysight EEsof EDA Advanced Design System, 2014, 5988-3326EN. Available online: www.keysight.com/en/pc-1297113 (accessed on 30 October 2015).
29. Szabatin J. Signal processing (in Polish), Warsaw University of Technology Teaching Resources. 2003.
30. Application Note—EEsof EDA EMPro 3D Electromagnetic Modeling and Simulation Environment, 2014, 5990-4819EN. Available online: www.keysight.com/en/pc-1297143 (accessed on 30 October 2015).
31. Singh J., Dhillon S.S. *Agricultural Geography*; Tata McGraw-Hill Education: New Delhi, India, 2004.
32. Agam N., Berliner P.R. Diurnal Water Content Changes in the Bare Soil of a Coastal Desert. *J. Hydrometeor.* 2004, 5, 572–590.
33. Agam N., Berliner P.R. Dew formation and water vapour adsorption in semi-arid environments—A review. *J. Arid Environ.* 2006, 65, 922–933.
34. Nikolayev V.S., Beysens D., Gioda A., Milimouk I., Katiushin E., Morel J.-P. Water recovery from dew. *J. Hydrol.* 1996, 182, 19–35.



35. Lan S., Hu C., Rao B., Wu L., Zhang D., Liu Y. Non-rainfall water sources in the topsoil and their changes during formation of man-made algal crusts at the eastern edge of Qubqi Desert, Inner Mongolia. *Sci. China Life Sci.* 2010, 53, 1135–1141.
36. Kaseke K.F., Mills A.J., Brown R., Esler K.J., Henschel J.R., Seely M.K. A Method for Direct Assessment of the “Non Rainfall” Atmospheric Water Cycle: Input and Evaporation From the Soil. *Pure Appl. Geophys.* 2012, 169, 847–857.
37. Kaseke K.F., Mills A.J., Esler K.J., Henschel J.R., Seely M.K., Brown R. Spatial Variation of “Non-Rainfall” Water Input and the Effect of Mechanical Soil Crusts on Input and Evaporation. *Pure Appl. Geophys.* 2012, 169, 2217–2229.
38. Klemm O., Schemenauer R.S., Lummerich A., Cereceda P., Marzol V., Corell D., van Heerden J., Reinhard D., Gherezghiher T., Olivier J., et al. Fog as a Fresh-Water Resource: Overview and Perspectives. *AMBIO* 2012, 41, 221–234.
39. Park K.-C., Chhatre S.S., Srinivasan S., Cohen R.E., McKinley G.H. Optimal Design of Permeable Fiber Network Structures for Fog Harvesting. *Langmuir* 2013, 29, 13269–13277.
40. Heng X., Luo C. Bioinspired Plate-Based Fog Collectors. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2014, 6, 16257–16266.
41. Meissner R., Seeger J., Rupp H., Seyfarth M., Borg H. Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation lysimeter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2007, 170, 335–344.
42. Roels S., Carmeliet J., Hens H., Adan O., Brocken H., Cerny R., Pavlík Z., Ellis A.T., Hall C., Kumaran K., et al. A comparison of different techniques to quantify moisture content profiles in porous building materials. *J. Therm. Envel. Build. Sci.* 2004, 27, 261–276.
43. Sławiński C., Cymerman J., Witkowska-Walczak B., Lamorski K. Impact of diverse tillage on soil moisture dynamics. *Int. Agrophys.* 2012, 26, 301–309.



5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

- przed uzyskaniem stopnia doktora

Po ukończeniu studiów magisterskich na wydziale Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie w 1998 roku rozpocząłem pracę w firmie LANEX S.A. W 2002 roku ukończyłem Studium Podyplomowe Telekomunikacji, Informatyki i Zarządzania CITCOM-PW Politechniki Warszawskiej na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Instytutu Telekomunikacji oraz Instytutu Informatyki. W 2003 roku rozpocząłem pracę w Zakładzie Hydrotermofizyki Środowiska Glebowego i Materiałów Rolniczych kierowanym przez prof. dr hab. Ryszarda Walczaka (obecnie Zakładzie Metrologii i Modelowania Procesów Agrofizycznych) w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie. W latach 2004-2008 byłem uczestnikiem studiów doktoranckich.

Moje zainteresowania naukowe skupiały się na badaniu materiałów porowatych (w szczególności gleby) o zróżnicowanej wilgotności na podstawie pomiaru ich przenikalności elektrycznej przy użyciu metod reflektometrii w dziedzinie czasu i częstotliwości, gdzie byłem wykonawcą projektu unijnego FP5 Centrum Doskonałości AGROPHYSICS (II.1.1). Zajmowałem się również konstruowaniem wielokanałowych mierników potencjometrycznych do projektów (II.1.2-3).

Brałem udział w badaniu właściwości dielektrycznych pyłów pochodzenia rolniczego sondą koncentryczną z otwartym końcem w celu zwiększenia skuteczności elektrofiltru opracowanego przez zespół z Politechniki Lubelskiej kierowany przez prof. dr hab. Wiktora Pietrzyka. (II.1.4). Wynikiem tych prac jest współautorstwo w publikacji z listy JCR (II.A.1).

W latach 2008-2009 byłem wykonawcą projektu promotorskiego pt.: "Wpływ wilgotności i zasolenia gleby na jej przenikalność dielektryczną wyznaczoną metodą reflektometrii częstotliwościowej" (II.1.5), którego kierownikiem był dr hab. inż. Wojciech Skierucha. Projekt ten zakończył się obroną mojej rozprawy doktorskiej o tym samym tytule z wyróżnieniem Rady Naukowej Instytutu Agrofizyki PAN.

W ramach projektu INTERREG (II.1.6) realizowałem prace aplikacyjne związane z rozwojem czujników oraz systemów monitoringu właściwości fizycznych i chemicznych środowiska glebowego. Wynikiem tych prac jest współautorstwo w publikacji z listy JCR (II.A.2).



Przed obroną doktoratu byłem współautorem dwóch oryginalnych prac w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (wykaz prac poz. II.A.1-2), których Impact factor wynosi łącznie **2.626**, a liczba punktów **44** MNiSW. Mój dorobek naukowy obejmował współautorstwo jednej monografii i 10 rozdziałów w monografiach tematycznych, 10 prac w czasopismach recenzowanych bez Impact factor (15 punktów MNiSW), 42 doniesień konferencyjnych i jednego zgłoszenia patentowego (II.B.ZP1).

- po uzyskaniu stopnia doktora

Wyniki mojej pracy doktorskiej zostały opublikowane w pracy pt. *"A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10-500 MHz frequency range"* w czasopiśmie *Sensors* (II.A.3) i jest to praca o największej ilości cytowań w moim dorobku, równej 40. W trakcie dalszych prac zajmowałem się rozwijaniem zastosowań metody reflektometrii w dziedzinie czasu TDR. W trakcie realizacji prac badawczych brałem udział w opracowaniu i testowaniu rozwiązań technicznych bezprzewodowego bezobsługowego systemu monitoringu wilgotności, temperatury i konduktywności elektrycznej gleby. Uczestniczyłem także w samej instalacji systemu w trudno dostępnych miejscach Poleskiego Parku Narodowego. Wynikiem tych prac jest współautorstwo w publikacji z listy JRC (II.A.5) pt.: *"A TDR-based soil moisture monitoring system with simultaneous measurement of soil temperature and electrical conductivity"*. W publikacji tej przedstawiono elementy systemu monitoringu oraz szczegółowy opis kluczowych rozwiązań technicznych. W wyniku nieprzerwanego działania systemu zebrano dane w okresie dwóch lat z 4 punktów pomiarowych transektu o długości 3,8 km w interwale jednogodzinnym.

W latach 2012-2013 byłem kierownikiem projektu pt. *"Opracowanie prototypu transmisyjnej sondy dwuprętowej do pomiaru zespolonej przenikalności elektrycznej materiałów ciekłych pochodzenia rolniczego"* (II.I.7), przyznanego przez Urząd Marszałkowski Województwa Lubelskiego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Wsparcie Regionalnej Sieci Współpracy, Priorytet VIII Regionalne Kadry Gospodarki. Wyniki projektu zostały przedstawione w formie referatu na konferencji *International Conference on Agrophysics ICA2013* (III.B.59). Opracowany prototyp czujnika stał się następnie inspiracją do opracowania nowych rozwiązań, takich jak zgłoszenie patentowe (II.B.ZP.2) pt. *"Sonda TDR do wyznaczania przestrzennego*

rozkładu wilgotności gleby”, którego jestem głównym pomysłodawcą oraz pierwszym autorem.

Kontynuując prace związane z metodą TDR, pozyskałem projekt badawczy finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych PBS1 pt.: „*Unowocześnienie reflektometrycznego miernika do selektywnego pomiaru wilgotności materiałów porowatych*” TDRUPGRADE (II.I.8), jednocześnie zostając jego kierownikiem. Prace mojego zespołu skupiały się na opracowaniu rozwiązań technicznych pozwalających uzyskać znacznie wyższą dokładność pomiaru wilgotności objętościowej gleby w stosunku do rozwiązań dostępnych komercyjnie. Jednocześnie prowadzono badania naukowe mające na celu weryfikację przydatności opracowanych rozwiązań.

W wyniku tego projektu powstały 2 prace z listy JRC i 4 patenty. Jedna z tych prac (I.B.2) i jeden patent (I.C.1) weszły w skład mojego osiągnięcia naukowego. W pracy (II.A.8) pt. „*Soil complex dielectric permittivity spectra determination using electrical signal reflections in probes of various lengths*”, wykazano, że stosując sondy o różnej długości prętów można wyznaczyć widmo zespolonej przenikalności dielektrycznej gleby, zwiększając w ten sposób selektywność pomiaru wilgotności objętościowej gleby biorąc pod uwagę inne właściwości fizyczne gleby takie jak jej gęstość, powierzchnia właściwa czy skład granulometryczny.

Powstały także 3 inne patenty (II.B.1; II.B.3-4), których jestem głównym pomysłodawcą oraz pierwszym autorem. Patenty te obejmują rozwiązania elektroniczne pozwalające na rozszerzenie możliwości pomiarowych sond TDR oraz unowocześnienie samego generatora impulsu szpilkowego, którego parametry i stabilność czasowa są krytyczne dla prawidłowego działania urządzenia TDR. Opracowane rozwiązania są obecnie przedmiotem dalszych badań. Szczególnie patent pt. „*Zintegrowana sonda TDT do pomiaru wilgotności materiałów porowatych*” (II.B.4) przyczynił się do pozyskania finansowania międzynarodowego projektu współpracy polsko-niemieckiej na rzecz zrównoważonego rozwoju STAIR (II.I.11), w ramach którego powstaje unikalne rozwiązanie sondy profilowej do pomiaru wilgotności, temperatury i konduktywności elektrycznej gleby na różnych poziomach profilu glebowego.

Byłem również wykonawcą projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych PBS1 pt.:

„Sensory dielektryczne do badania wilgotności gleby oraz jakości materiałów i produktów rolniczych”, DISENSOR kierowanego przez prof. dr hab. inż. Wojciecha Skieruchę. W wyniku tego projektu powstało 5 prac z listy JRC i dwa patenty, których jestem współautorem, w tym jedna z prac (I.B.3) i patent (I.C.2) wchodzące w skład mojego osiągnięcia naukowego. W projekcie tym brałem udział w rozwijaniu metody spektroskopii impedancyjnej oraz reflektometrii w dziedzinie częstotliwości FDR, skupiając się na ich zastosowaniu do badania jakości produktów pochodzenia rolniczego.

Jedno z ważniejszych zbadanych zagadnień to określenie przydatności metod spektroskopii impedancyjnej w zakresie częstotliwości 20 Hz – 2 MHz do detekcji substancji konserwujących jako dodatków do żywności. Wyniki badań zostały zaprezentowane w dwóch publikacjach z listy JCR pt. „Application of a coaxial-like sensor for impedance spectroscopy measurements of selected low-conductivity liquids” (II.A.6) oraz pt. “Electrical impedance measurements for detecting artificial chemical additives in liquid food products” (II.A.9). Z kolei w pracy pt. “A low-frequency sensor for determination of honey electrical properties in varying temperature conditions” (II.A.7), przedstawiono wyniki badań właściwości elektrycznych miodu w zmiennych warunkach temperaturowych. Uzyskane informacje mogą być przydatne w rozpoznawaniu niewłaściwego sposobu przechowywania i konfekcjonowania miodu. Po zakończeniu projektu ukazała się praca dotycząca badań stopnia dojrzałości jabłek pt. “Evaluation of apple maturity with two types of dielectric probes” (II.A.13), w której zaprezentowano metodykę oraz czujniki dielektryczne mogące mieć zastosowanie również do badań innych owoców czy warzyw.

W ramach długoletniej współpracy z Uniwersytetem Przyrodniczym we Wrocławiu, który w swoich badaniach wykorzystuje urządzenia TDR opracowane w IAPAN, powstała praca pt. “Application of the TDR technique for the detection of changes in the internal structure of an earthen flood levee” (II.A.12), której jestem współautorem. W publikacji tej podjęto zagadnienia ochrony przeciwpowodziowej polegającej na detekcji zmian w wewnętrznej strukturze wałów przeciwpowodziowych metodą TDR. Metoda detekcji polega na wykrywaniu zmian gęstości gleby podczas długotrwałego naporu wody, a otrzymane wyniki pozwalają wnioskować o przydatności tej metody do predykcji i monitoringu zagrożeń związanych z przerwaniem wałów. Współpraca

z Uniwersytetem Przyrodniczym we Wrocławiu zaowocowała także pozyskaniem finansowania projektu BIOSTRATEG 3 (II.I.13) pt. „Mobilny system iniekcyjnego, precyzyjnego nawadniania i nawożenia, zaspokajający indywidualne potrzeby rośliny”, którego kierownikiem jest dr hab. inż. Grzegorz Janik. W projekcie tym biorę udział w opracowaniu i budowie elementów detekcyjnych działających w oparciu o metody reflektometryczne do pomiaru wilgotności gleby. Opracowywane detektory różnią się wymaganiami konstrukcyjnymi ze względu na ich wykorzystanie w różnych warunkach polowych (stacjonarnych, mobilnych) oraz laboratoryjnych.

Od 2014 roku biorę również aktywny udział we współpracy z Zakładem Układów i Aparatury Mikrofalowej Politechniki Warszawskiej na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych, Instytutu Systemów Elektronicznych, gdzie wspólnie z dr. inż. Arkadiuszem Lewandowskim realizujemy prace wykorzystujące infrastrukturę pomiarową Laboratorium Spektroskopii Dielektrycznej Instytutu Agrofizyki. W roku 2017 nasza współpraca zaowocowała pozyskaniem finansowania projektu wdrożeniowego TANGO 2 pt. „Czujnik wilgotności i zasolenia gleby dla systemów bezprzewodowego wielopunktowego monitoringu wykorzystujący szerokopasmowa reflektometrię częstotliwościową”, a także jedną publikacją realizowaną w ramach projektu SONATA8 (II.A.11) pt. „0.05-3 GHz VNA characterization of soil dielectric properties based on the multiline TRL calibration”, w której opisano wyniki zastosowania innowacyjnej metody kalibracji wielolinowej, umożliwiającej bezpośredni pomiar widma przenikalności elektrycznej gleby w zamkniętych celkach współosiowych.

Prowadzona współpraca IAPAN z Instytutem Ekologii Technicznego Uniwersytetu w Berlinie, w której aktywnie uczestniczę od 2007 roku, zaowocowała w 2017 roku wspólnym projektem polsko-niemieckiej współpracy na rzecz zrównoważonego rozwoju STAIR (II.I.11). W projekcie tym jestem odpowiedzialny za przeprowadzenie symulacji elektromagnetycznych oraz nadzorowanie budowy i przygotowanie projektów testowych detektorów umieszczonych w sondzie profilowej na podstawie patentu opracowanego wcześniej w wyniku kierowanego przeze mnie projektu TDRUPGRADE.

Realizuję również prace w działalności statutowej Instytutu Agrofizyki w zadaniu piątym pt. „Zastosowanie spektroskopii dielektrycznej do badania właściwości biomateriałów”. W ramach prac w tym zadaniu powstało zgłoszenie

patentowe którego jestem pierwszym autorem (II.B.ZP3), dotyczące szybkiego i powtarzalnego łączenia linii współosiowych lub falowodowych mającego zastosowanie w pomiarach biomateriałów.

Obecnie jako wykonawca jestem zaangażowany w 4 projekty naukowe, w tym trzy krajowe: SONATA 8 (II.I.10), TANGO 2 (II.I.12) i BIOSTRATEG 3 (II.I.13) oraz jeden międzynarodowy projekt polsko-niemieckiej współpracy na rzecz zrównoważonego rozwoju STAIR (II.I.11).

Jestem członkiem Komitetu Organizacyjnego międzynarodowej konferencji naukowej ISEMA2018 - International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, organizowanej przez IA PAN w Lublinie w terminie 3-7 czerwca 2018 r.

Jestem współautorem łącznie 105 doniesień konferencyjnych, w tym 63 po uzyskaniu stopnia doktora. Do chwili obecnej ukazało się łącznie 24 oryginalnych prac naukowych mojego współautorstwa (które nie wliczają się do osiągnięcia naukowego), w tym 11 w czasopiśmie znajdujących się w bazie Journal Citation Reports, których sumaryczny impact factor z roku opublikowania i liczba punktów MNiSW wynoszą odpowiednio 21.84 i 322. Liczba punktów dla czasopism bez IF wyniosła 109. Sumaryczny IF (wraz z osiągnięciem naukowym) wynosi 30.088, a liczba punktów MNiSW 437. Liczba cytowań moich prac według bazy Web of Science Core Collection wynosi 151 (bez autocytowań 120), a indeks Hirscha 7. W sumie (wraz z osiągnięciem naukowym) jestem pierwszym autorem pięciu patentów (I.C.1-2; II.B.1; II.B.3-4), współautorem jednego patentu (II.B.2) oraz pierwszym autorem dwóch zgłoszeń patentowych (II.B.ZP2-3), będących wynikiem prac naukowych realizowanych w ramach obu projektów PBS1 (II.I.8-9). Na dwa z tych patentów Instytut Agrofizyki zawarł umowy licencyjne z prywatnym przedsiębiorcą dotyczące prawa korzystania z wynalazku i „know-how”. Dotychczas byłem kierownikiem 2 projektów badawczych, a w roli wykonawcy uczestniczyłem lub uczestniczę w realizacji łącznie 5 projektów badawczych.

Działalność dydaktyczna i popularyzująca naukę

W mojej działalności dydaktycznej i popularyzującej naukę w latach 2004-2011 brałem udział we wszystkich corocznie organizowanych Piknikach Naukowych Polskiego Radia Bis i Centrum Nauki Kopernik, największej w Europie

plenerowej imprezie popularyzującej naukę, a także od początku istnienia od roku 2004 w Lubelskich Festiwalach Nauki. W roku 2015 na zaproszenie międzynarodowej firmy Umwelt-Geräte-Technik GmbH (<http://www.ugt-online.de/en/contact/>) wygłosiłem referat pt. „Project and validation of an automatic system for soil moisture regulation using TDR technique” (II.K.1). Wyniki mojej działalności naukowej prezentowałem w formie referatów na konferencjach międzynarodowych takich jak: International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (III.B.68, III.B.91), International Symposium on Sensor Science (III.B.82), IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes (III.B.98). Prowadziłem także wykłady z Metrologii Agrofizycznej dla studentów Studiów Doktoranckich w Instytucie Agrofizyki PAN oraz coroczne prezentacje stanowisk pomiarowych i eksperymentów prowadzonych w Laboratorium Spektroskopii Dielektrycznej dla studentów Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Obecnie pełnię funkcję promotora pomocniczego w dwóch przewodach doktorskich, Pani mgr inż. Małgorzaty Dawid, tytuł rozprawy: „Intensywność infiltracji wody z atmosfery w okresach bezopadowych w warunkach różnej wilgotności gleby” Instytutu Kształtowania i Ochrony Środowiska, Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu oraz mgr. Bartosza Paszkowskiego, tytuł rozprawy: „Właściwości dielektryczne miodu i oleju roślinnego”, Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie.

Jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Agrofizycznego (od 2004 roku), członkiem Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej (od 2014 roku) oraz członkiem European Geosciences Union (od 2018 roku). Ponadto wykonałem recenzje 7 artykułów naukowych do czasopism takich jak: Progress in Electromagnetics Research, Acta Agrophysica, Ecological Engineering, Soil Use and Management, Hydrology, Water. Wykonałem również jedną recenzję projektu wdrożeniowego dla United States Department of Agriculture National Institute of Food and Agriculture NIFA Grant application for federal assistance Small Business Innovation Research (III.O.1).



Zestawienie liczbowe mojego dorobku naukowego znajduje się w tabeli poniżej. Ponadto wykaz opublikowanych prac naukowych oraz informacje o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki dołączam do dokumentów jako Załącznik 4.

Dorobek naukowy	Przed uzyskaniem stopnia doktora	Po uzyskaniu stopnia doktora	Razem
Oryginalne opublikowane prace twórcze, w tym:	23	28	51
- w czasopismach z IF stanowiące część osiągnięcia naukowego	nd	4	4
- pozostałe prace twórcze w czasopismach z IF	2	11	13
- pozostałe prace twórcze w czasopismach bez IF	21	13	34
Sumaryczny IF	2.626	30.088	32.714
Punkty MNiSW	59	546	605
Patenty przyznane	0	6	6
Zgłoszenia patentowe	1	2	3
Udział w realizacji projektów badawczych finansowanych ze źródeł zewnętrznych	6	7	13
Komunikaty opublikowane w materiałach konferencyjnych, w tym:	42	63	105
- krajowych	16	17	33
- międzynarodowych	26	46	72
Recenzje publikacji	0	7	7
Recenzje projektów	0	1	1

19.06.2018

Andrzej Wilczek