

BADANIE WPŁYWU TEMPERATURY NA PRZENIKALNOŚĆ
DIELEKTRYCZNĄ GLEBY – OPIS LABORATORYJNEGO ZESTAWU
POMIAROWEGO ORAZ ZASTOSOWANEGO OPROGRAMOWANIA*

W. Skierucha

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27
e-mail: skieruch@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono opis laboratoryjnego zestawu pomiarowego do badania wpływu temperatury na przenikalność dielektryczną gleby wyznaczaną metodą reflektometryczną. Wyniki prac służą opracowaniu i weryfikacji fizyczno-matematycznego modelu zależności wybranych parametrów gleby od jej właściwości elektromagnetycznych oraz do poprawienia dokładności pomiaru wilgotności objętościowej gleby z wykorzystaniem metody reflektometrycznej (TDR). Prezentowany zestaw jest przeznaczony również do określania wpływu temperatury na inne wielkości fizyczne oraz do badania zmian parametrów przyrządów pomiarowych na zmiany temperatury otoczenia.

S ł o w a k l u c z o w e: przenikalność dielektryczna, wilgotność gleby, reflektometria czasowa, TDR, elektryczna konduktywność gleby

WSTĘP

Przedmiotem badań, którym służy opisany poniżej zestaw pomiarowy jest określenie wpływu temperatury na przenikalność dielektryczną gleb. Efektem końcowym jest natomiast opracowanie modelu fizycznego opisującego zmianę przenikalności dielektrycznej gleby powodowaną zmianą jej temperatury dla gleb zróżnicowanych pod względem budowy, wilgotności i przy zróżnicowanych właściwościach roztworu glebowego. Opracowany i zweryfikowany model pozwoli

* Praca została częściowo wykonana w ramach projektu badawczego 6 P06B 020 20 finansowanego przez KBN.

na jednoznaczną interpretację wpływu wybranych parametrów fizycznych gleby na jej właściwości elektromagnetyczne i będzie służył do kalibracji reflektometrycznych mierników wilgotności oraz elektrycznej konduktywności gleby. Potrzeba realizacji wyznaczonego celu wynika z niejednoznaczności wpływu temperatury gleby na przenikalność dielektryczną gleby [9]:

- przenikalność dielektryczna dla wilgotnej gleby maleje ze wzrostem temperatury, bo maleje przenikalność dielektryczna dla obecnej w glebie wody kapilarnej,
- przenikalność dielektryczna wilgotnej gleby rośnie ze wzrostem temperatury, bo przybywa w niej wody kapilarnej kosztem ubytku wody związanej z cząsteczkami fazy stałej.
- wzrost elektrycznej konduktywności gleby ze wzrostem temperatury może powodować, że część urojona zespolonej przenikalności dielektrycznej gleby będzie na tyle duża, że w sposób istotny może zmienić wartość odczytu miernika TDR.

Osiągnięcie wyznaczonego celu planuje się przez zebranie danych z pomiarów określonych wielkości fizycznych i opracowanie uogólnionego modelu fizycznego. Materiał badawczy stanowią gleby mineralne o zróżnicowanym składzie granulometrycznym oraz wielkości powierzchni właściwej fazy stałej. Każda z badanych próbek glebowych będzie miała wyznaczone następujące parametry fizyczne:

- θ [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] wilgotność objętościową metodą termograwimetryczną,
- ϵ przenikalność dielektryczną metodą reflektometryczną metodą reflektometryczną dla różnych wartości temperatury,
- σ [S m^{-1}] konduktywność elektryczną gleby metodą stanu ustalonego i metodą reflektometryczną, dla różnych wartości temperatury,
- σ_E [S m^{-1}] konduktywność elektryczna roztworu NaCl , który służy do nawilżania próbek glebowych (zmierzona konduktometrem),
- ρ [g cm^{-3}] gęstość gleby metodą termograwimetryczną,
- u [%] uziarnienie jako procentowa zawartością frakcji iłu.

Z powodu dużej ilości planowanego materiału badawczego oraz złożoności zastosowanych metod pomiarowych eksperyment realizowany jest automatyzowanie eksperymentu. Polega kontroli eksperymentu przez komputer, zbierający dane za pośrednictwem czujników wielkości nieelektrycznych, przetwarzaniu sygnału pomiarowego na mierzalną wielkość elektryczną i wykorzystaniu techniki mikroprocesorowej do kontroli poszczególnych etapów procesu pomiarowego.

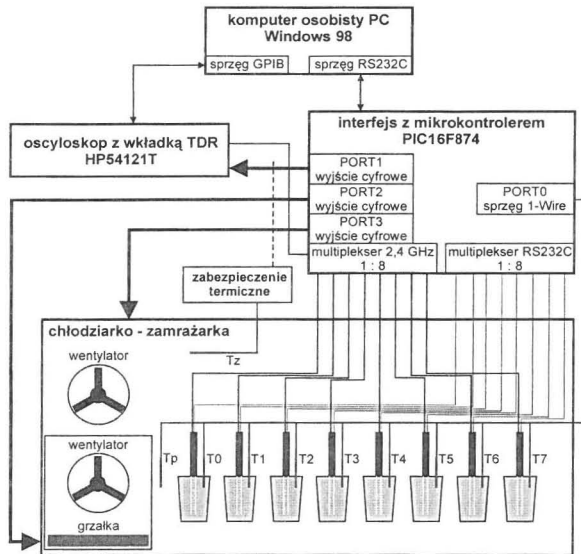
Dane otrzymane z pomiarów służą do wyznaczenia modelu fizycznego postaci $\varepsilon = f(\theta, T, \sigma, \rho, u)$. Na bazie analizy statystycznej można określić istotność statystyczna zmiennych niezależnych w powyższej zależności.

Wyniki prac służą opracowaniu i weryfikacji fizyczno-matematycznego modelu zależności wybranych parametrów gleby od jej właściwości elektromagnetycznych oraz do poprawienia dokładności pomiaru wilgotności objętościowej, θ , gleby z wykorzystaniem metody reflektometrycznej (TDR). Metoda ta zdobywa coraz większą popularność na świecie dzięki jej niewątpliwym zaletom: minimalizacji wpływu czujnika pomiarowego na badany obiekt, możliwości jednoczesnego pomiaru wilgotności objętościowej, elektrycznej konduktywności oraz temperatury gleby przy pomocy tego samego czujnika. Zakres stosowania tej metody oznaczania wilgotności nie ogranicza się tylko do gleb. Przetwarzanie produktów rolniczych, przechowalnictwo, budownictwo to dziedziny potencjalnego stosowania tej metody pomiaru.

OPIS LABORATORYJNEGO ZESTAWU POMIAROWEGO

Zestaw składa się z trzech funkcjonalnych modułów sterowanych za pośrednictwem komputera osobistego pracującego w systemie Windows 98: oscyloskopu szerokopasmowego z wkładką TDR, interfejsu specjalizowanego, oraz chłodziarko-zamrażarki z wentylatorami i grzałką (Rys.1). Poniżej opisane są poszczególne elementy prezentowanego zestawu.

Program zarządzający pracą całego systemu pomiarowego napisany został w języku Visual Basic, zapewniając użytkownikowi przyjazne środowisko obiektowe. Okienko robocze programu opisujące aktualny stan prowadzonego eksperymentu przedstawione jest na Rys. 2.



Rys. 1. Zestaw laboratoryjny do mierzenia wpływu temperatury na przenikalność dielektryczną gleby.

Fig. 1. Laboratory setup for the determination of temperature effect on soil dielectric permittivity.

The screenshot shows a software window titled "Pomiar Ręczny" (Manual Measurement). It is divided into several sections:

- Wartości początkowe (w °C) temperatury w komorze** (Initial values in °C in the chamber):

55	Górna temp. graniczna
5	Dolna temp. graniczna
25,0000	Temp. początkowa regul.
10	Skok temperatury
- Wartości aktualne (w °C) temperatury w komorze** (Actual values in °C in the chamber):

44,2500	Temp. powietrze
45,2500	Temp. gleba
45,0000	Temp. aktualna regul.
- Table of active channels and measurements:**

Aktywność kanału	Nr sondy	Temp. [°C]	Wskaźnik kondukt. [mV]
<input checked="" type="checkbox"/> Kanał #0	010	44,6875	15,67
<input checked="" type="checkbox"/> Kanał #1	004	45,0625	624,99
<input checked="" type="checkbox"/> Kanał #2	001	45,2500	9,53
<input checked="" type="checkbox"/> Kanał #3	012	44,8125	60,41
<input checked="" type="checkbox"/> Kanał #4	013	44,6875	37,06
<input checked="" type="checkbox"/> Kanał #5	006	45,0000	84,48
<input checked="" type="checkbox"/> Kanał #6	007	45,1875	37,91
<input checked="" type="checkbox"/> Kanał #7			
- Buttons and options:**
 - Wybór czujników temperatury komory (PORT0)
 - Zapisz wyniki pomiarów (checked)
 - Start, Stop, Powrót, Wyczyść tabelę
 - Port selection buttons: (Port4Lo), Port4Hi, Port3Lo, Port3Hi, Port2Lo, Port2Hi

Rys. 2. Okienko robocze programu przedstawiające stan prowadzonego eksperymentu.

Fig. 2. Application window presenting the state of the conducted experiment.

Użytkownik przed uruchomieniem pomiarów musi wprowadzić parametry początkowe: górną i dolną temperaturę regulacji oraz skok temperatury. Wartości przedstawione na Rys. 2 oznaczają, że pomiary będą dokonywane w granicach od 5°C do 55°C temperatury komory termostatowanej co 10°C. Należy również zaznaczyć, które z kanałów pomiarowych systemu będą aktywne oraz rozważyć opcję zapisu wyników w zbiorze. W czasie trwania eksperymentu poszczególne okienka przedstawiające wyniki pomiarów są aktualizowane. Pomiar następuje gdy wartości temperatury powietrza w komorze (T_p), temperatury gleby badanej próbki glebowej (T_0 , T_1 , ... lub T_7) oraz aktualnej temperatury regulacji osiągną tą samą, stabilną wartość z tolerancją $\pm 0,4^\circ\text{C}$. Zmniejszenie tolerancji regulacji jest możliwe, lecz okupione jest znacznym wydłużeniem czasu stabilizacji temperatury w komorze. Przy ustawieniach takich jak na Rys. 2 pełny cykl pomiarów od 5°C do 55°C realizowany jest w czasie ok. 12 godzin. Wtedy uruchamiane są sekwencyjnie poszczególne moduły systemu pomiarowego przedstawione poniżej w opisie interfejsu PIC16F874.

Sekwencja pomiarowa wykonywana jest dla każdej sondy aktywnej systemu w określonej temperaturze regulacji. Po wykonaniu pomiarów wszystkich aktywnych sond, następuje skokowa zmiana temperatury regulacji oraz przejście

programu do algorytmu stabilizacji temperatury w komorze termostatowanej wokół nowej temperatury regulacji. Po osiągnięciu stabilizacji termicznej wokół tej temperatury następuje pomiar poszczególnych sond aktywnych. Do osiągnięcia jednorodności temperatury powietrza w komorze termostatowanej należy zapewnić jego ciągły ruch. Realizowane jest to przez wentylatory pracujące w nieprzerwany sposób podczas pracy systemu pomiarowego. Przerwanie sekwencji regulacji dokonuje użytkownik, gdy uzna, że zebrana została dostateczna ilość danych.

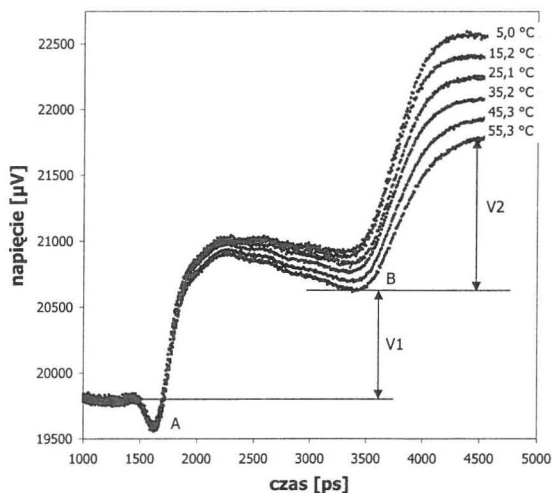
Komputer PC posiada sprzęg cyfrowy GPIB [6] (General Purpose Interface Bus) za pomocą którego sterowany jest oscyloskop szerokopasmowy HP54121T z wkładką reflektometryczną [4]. Moduły oprogramowania załączonego do karty GPIB umożliwiają jej programowanie z poziomu języka Visual Basic, a w szczególności zapis graficznej reprezentacji reflektogramu do pliku tekstowego. Analiza reflektogramu, po zaimportowaniu plików tekstowych generowanych przez program obsługi eksperymentu, do arkusza kalkulacyjnego umożliwia wyznaczenie dwóch parametrów wykorzystywanych później w wyznaczeniu wilgotności objętościowej oraz elektrycznej konduktywności badanej próbki gleby (Rys. 3):

- czasu propagacji impulsu w falowodzie równoległym sondy pomiarowej, tzn. czasu między punktami A i B na Rys. 3, z którego później wyznaczana jest wilgotność objętościowa próbki glebowej [2,5]
- stosunku napięć (zaznaczonych jako V_2/V_1 na Rys. 3), z którego wyznaczana jest elektryczna konduktywność próbki glebowej [2].

Zadaniem interfejsu zbudowanego na bazie mikrokontrolera PIC16F874 [7] jest interpretacja komend wysyłanych z PC przez sprzęg RS232C przez program sterujący eksperymentem. Interfejs obsługuje takie komendy jak:

- ustawienie/zerowanie wyjścia cyfrowego PORT1, służącego do załączenia/wyłączenia zasilania oscyloskopu HP54121T (poprzez stycznik półprzewodnikowy),
- ustawienie/zerowanie wyjścia cyfrowego PORT2, służącego do załączenia/wyłączenia grzałki w komorze termostatowanej (poprzez stycznik półprzewodnikowy),
- ustawienie/zerowanie wyjścia cyfrowego PORT3, służącego do załączenia/wyłączenia zasilania komory termostatowanej (poprzez stycznik półprzewodnikowy),
- obsługę sprzęgu 1-Wire [3] realizowanego przez PORT0-wejście/wyjście cyfrowe, służącego do rejestracji temperatury gleby w pojemnikach, w których umieszczone są badane próbki glebowe,
- wybór kanału w multiplekserze RS232C do połączenia sondy pomiarowej,

- obsługę komunikacji szeregowej między interfejsem i wybraną sondą pomiarową,
- obsługę komunikacji szeregowej między interfejsem i komputerem PC,
- wybór kanału multipleksera mikrofalowego 2,4 GHz.



Rys. 3. Seria reflektogramów zarejestrowanych przez zestaw pomiarowy dla tej samej próbki glebowej dla różnych wartości temperatury tej próbki.

Fig. 3. Set of reflectograms registered by the presented setup for the same soil sample in different temperatures.

W celu rejestracji automatycznej z wielu sond jednocześnie zastosowano dwa multipleksery. Multipleksler szerokopasmowy 2,4 GHz jest konstrukcją własną [8]. Zastosowano w nim zintegrowany przełącznik mikrofalowy z arsenku galu (GaAs). Wcześniej otrzymane wyniki wskazują, że przełącznik ten najlepiej spełnia wymagania stawiane przez metodę TDR do pomiaru czasu propagacji impulsu elektromagnetycznego w falowodzie równoległym umieszczonym w glebie, w porównaniu z dotychczas stosowanymi.

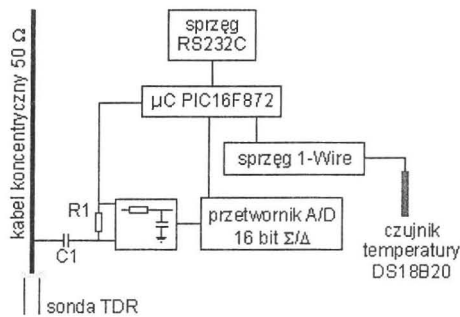
Multipleksler RS232C służy do komunikacji z między interfejsem i sondą pomiarową. Istnieje możliwość pominięcia interfejsu PIC16F874 i bezpośrednie połączenie pojedynczej sondy pomiarowej do komputera PC. Wtedy niezależnie od wybranego kanału realizowany będzie pomiar tylko z podłączonej sondy. Zatem działanie interfejsu PIC16F874 jest transparentne z punktu widzenia sondy pomiarowej.

Sprzęg 1-Wire z połączeniu z czujnikami temperatury Dallas DS18B20 [3] stanowi bardzo wygodny i dokładny sposób pomiaru temperatury. Czujniki te można łączyć równolegle ograniczając liczbę przewodów do dwóch, przewodu komunikacji cyfrowej i przewodu masy. Przetwarzanie wielkości nieelektrycznej jaką jest temperatura na sygnał cyfrowy dokonywane w czujniku jako reakcja na otrzymaną komendę. Wynik pomiaru przesyłany jest z powrotem do urządzenia nadrzędnego w postaci cyfrowej, czyli odpornej na zakłócenia. Przed pomiarem temperatury określonego czujnika należy go zaadresować, tzn. wysłać określony numer seryjny adresowanego czujnika, czyli ciąg zer i jedynek do wszystkich czujników połączonych równolegle. Następny rozkaz pomiaru temperatury aktywuje tylko czujnik zaadresowany, pozostałe są wyłączone. Dodatkową zaletą czujników temperatury 1-Wire jest bardzo mały pobór prądu, zasilanie tego czujnika pobierane jest z linii sygnału cyfrowego. Jedyną niedogodnością systemu 1-Wire jest złożony protokół komunikacyjny, realizujący poszczególne komendy w określonej sekwencji czasowej, co wymaga zastosowania mikrokontrolera.

Sondy pomiarowej przedstawiona jest schematycznie na Rys. 4. Składa się ona ze sprzęgu szeregowego, łączącego ją z multiplekserem interfejsu PIC16F874 lub bezpośrednio z łączem szeregowym komputera PC.

Część cyfrowa i analogowa zintegrowane są w jednej obudowie z sondą TDR składającą się z kabla koncentrycznego i prętów stalowych falowodu równoległego. Działanie części cyfrowej i analogowej polega na wykonywaniu rozkazów przychodzących z jednostki nadrzędnej, tzn. pomiaru temperatury sondy czujnikiem 1-Wire oraz pomiaru konduktywności gleby. Rozkazy dekodowane są i wykonywane przez $\mu\text{C PIC16F872}$.

Steruje on sprzęgiem 1-Wire oraz 16-bitowym przetwornikiem analogowo-cyfrowym pracującym według metody Sigma/Delta [1]. Pomiar konduktywności elektrycznej gleby polega na pomiarze spadku napięcia na znanym oporze R1. Wielkość tego spadku zależy rezystancji zastępczej gleby między elektrodami stalowych prętów sondy TDR. Wymuszeniem generującym badany spadek napięcia jest sygnał prostokątny o wypełnieniu $\frac{1}{2}$, częstotliwości 100 kHz, generowany przez $\mu\text{C PIC16F872}$. Zastosowanie sygnału przemiennego o takiej częstotliwości podyk-



Rys. 4. Budowa sondy pomiarowej.

Fig. 4. Schematic diagram of the measurement probe.

towane jest koniecznością uniknięcia polaryzacji elektrycznej układu elektroda-gleba, fałszującej pomiar. Pomiar temperatury sondy niezbędny jest do dokonania korekty temperaturowej konduktywności elektrycznej oraz podzespołów elektronicznych zintegrowanych z rozważaną sondą.

Czujnik sondy umieszczony został w jej obudowie (zalaną żywicą epoksydową). W rozważanym eksperymencie badającym wpływ temperatury na przenikalność dielektryczną gleby korzysta się z innych czujników temperatury, umieszczonych razem z prętami sondy w badanej glebie. Działanie to jest podyktowane istnieniem dużych gradientów temperatury między glebą a obudową sondy pomiarowej (różnica temperatury między sondą a glebą dochodzi do ± 1 °C). Spowodowało to uzupełnienie zestawu pomiarowego o dodatkowe czujniki temperatury, umieszczone bezpośrednio w badanych próbkach glebowych (czujniki T0, T1, ..., T7). Zaletą prezentowanej metody pomiaru konduktywności gleby jest to, że pomiar dokonywany jest w bezpośredniej bliskości obiektu badanego, co eliminuje błędy spowodowane przesyłaniem analogowego sygnału na znaczne odległości. Sygnał zawierający wynik pomiaru jest sygnałem cyfrowym, przesyłanym do jednostki nadrzędnej (komputera PC lub interfejsu PIC 16F874) sprzęciem szeregowym RS232C.

Komora termostatowana stanowi przystosowana chłodziarko-zamrażarka. Umieszczono w niej grzałkę oraz dwa wentylatory, które zapewniają ciągły ruch powietrza, a przez to minimalizację gradientu temperaturowego wewnątrz komory. Umieszczenie w komorze grzałki, załączenie której realizowane jest zdalnie stwarza niebezpieczeństwo niekontrolowanego wzrostu temperatury grożące pożarem. Może to nastąpić przy np. zawieszeniu programu w czasie gdy grzałka jest załączona. Aby się przed tym zabezpieczyć zainstalowano niezależny system pomiaru temperatury w komorze, ustawiony tak, aby po przekroczeniu zadanej temperatury granicznej resetował μ C PIC16F874, powodując jednocześnie ustawienie wyjść cyfrowych PORT0, PORT1, PORT2 na wartościach odpowiadających wyłączeniu sterowanych przez nie modułów systemu.

WNIOSKI

Prezentowany system realizuje automatyczną rejestrację danych złożonego systemu pomiarowego składającego się nie tylko z urządzeń rejestrujących, ale również z urządzeń wymuszających zmienne i zarazem kontrolowane warunki pomiaru. Zastosowane oprzyrządowanie i oprogramowanie mogą być wykorzystane do badania wpływu temperatury na inne parametry fizyczne badanych materiałów jak również zachowanie się przyrządów elektronicznych.

PIŚMIENNICTWO

1. AD7705/AD7706 2/3 Channel 16-Bit Sigma-Delta ADC, Analog Devices, 1998.
2. **Dalton F. N., van Genuchten M. Th.:** The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, 38, 237-250, 1986.
3. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Data Sheet, Dallas Semiconductors – Maxim.
4. HP54121T Digitizing Oscilloscope Programming Manual, Hewlett-Packard, Publication 54121-90907, 1989.
5. **Malicki M. A., Skierucha W. M.:** A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse. *Irrigation Science*, 10, 153-163, 1989.
6. Measurement Computing: GPIB Hardware Manual, Rev. 5, March 2002.
7. Microchip PIC16F87X Data Sheet, 28/40-Pin 8-bit CMOS FLASH Microcontrollers, DS30292C, 2001.
8. **Skierucha W.:** Przełączniki mikrofalowe stosowane w reflektometrycznych systemach pomiaru wilgotności gleby. XXXII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów MKM2000. Rzeszów-Jawor, 11-15.09.2000.
9. **Skierucha W.:** Wpływ temperatury na przenikalność dielektryczną gleby w aspekcie reflektometrycznego (TDR) pomiaru jej wilgotności objętościowej. *Acta Agrophysica*, 22, 163-172, 1999.

TEMPERATURE EFFECT ON SOIL DIELECTRIC PERMITTIVITY:
DESCRIPTION OF LABORATORY SETUP AND APPLIED SOFTWARE*W. Skierucha*

Institute of Agrophysics, Polish academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27
e-mail: skieruch@demeter.ipan.lublin.pl

S u m m a r y : The paper presents the description of laboratory setup for the determination of temperature effect on dielectric permittivity of soil measured by reflectometric method.

The result of the research will help to develop and verify the model of relation between the selected soil physical parameters and its electromagnetic properties as well as improve the accuracy of soil moisture measurement determined by Time Domain Reflectometric method (TDR). The presented setup may also be used for determination of temperature effect on other physical parameters as well as for testing the measuring devices behavior in variable ambient temperature.

K e y w o r d s : dielectric permittivity, soil moisture, time domain reflectometry, TDR, soil electrical conductivity.