

**Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie**

ACTA AGROPHYSICA

19

Marek A. Malicki

**METODYCZNE ZAGADNIENIA MONITORINGU
STATUSU WODY W WYBRANYCH
MATERIAŁACH BIOLOGICZNYCH**

Lublin 1999

Komitet redakcyjny

prof. dr hab. Jan Gliński, czł. koresp. PAN

prof. dr hab. Krystyna Konstankiewicz

doc. dr hab. Ryszard Dębicki

Opiniował do druku

prof. dr hab. Ryszard Turski

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27
tel. (0-81) 744-50-61, e-mail: fundacja@demeter.ipan.lublin.pl

Publikacja indeksowana przez

Polish Scientific Journals Contents - Agric. & Biol. Sci.
w sieci Internet pod adresem <http://saturn.ci.uw.edu.pl/psjc/>
lub <http://ciuw.warman.net.pl/alf/psjc/>

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 5 S306 009 06
finansowanego przez Komitet Badań Naukowych

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 1999

ISBN 83-87385-24-7

ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 150 egz. Ark. wyd. 8,4

Skład komputerowy: dr hab. Marek A. Malicki

Druk: Zakład Usług Poligraficznych TEKST s.c., ul. Wspólna 19, 20-344 Lublin

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	
1.1. Pomiar jako podstawa badań naukowych	1
1.2. Model w prognozie oraz w optymalizacji	2
1.3. Statusu wody jako istotne zagadnienie agrofizyki	3
1.4. Monitoring statusu wody	4
1.4.1. Zagadnienie minimum zmiennych opisujących status wody	4
2. MONITORING STATUSU WODY W GLEBIE	5
2.1. Wymagania i możliwości	5
2.2. Elektryczny pomiar wilgotności oraz zasolenia gleby	6
2.2.1. Metoda konduktometryczna oraz dielektryczna	7
2.2.1.1. Uwarunkowania konduktometrycznego pomiaru zasolenia gleby	9
2.2.1.2. Uwarunkowania dielektrycznego pomiaru wilgotności gleby	9
2.2.1.3. Dyspersja stałej dielektrycznej wody jako szansa selektywnego pomiaru wilgotności gleby	13
2.2.2. Waloryzacja dostępnych metod dielektrycznego pomiaru wilgotności gleby	15
2.3. Pomiar wilgotności oraz zasolenia gleby metodą (TDR)	17
2.3.1. Wczesne zastosowania TDR w pomiarach wilgotności gleby	18
2.3.2. Zasada reflektometrycznego pomiaru wilgotności gleby	19
2.3.3. Reflektometryczny pomiar elektrycznej konduktywności gleby w stanie nieustalonym	24
2.3.4. Reflektometryczny pomiar elektrycznej konduktywności gleby w stanie ustalonym	27
2.3.5. Wyznaczanie zasolenia gleby na podstawie jej przenikalności dielektrycznej oraz konduktywności elektrycznej	29

3. POMIAR WILGOTNOŚCI WYBRANYCH MATERIAŁÓW ROŚLINNYCH	
METODĄ TDR	30
3.1. Dielektryczny pomiar wilgotności ziarna zbóż	30
3.2. Dielektryczny pomiar wilgotności drewna	34
4. ELEKTRYCZNY POMIAR POTENCJAŁU WODY	40
4.1. Dielektryczny pomiar potencjału wody w glebie	42
4.1.2. Sonda elektropojemnościowa	42
4.1.3. Sonda TDR	46
5. ELEKTRYCZNE WYZNACZANIE NATLENIEŃ GLEBY	49
5.1. Parametry natlenienia gleby	49
5.1.1. Pomiar potencjału redoks w glebie	50
5.1.1.1. Fizykochemiczne podstawy pomiaru potencjału redoks	50
5.1.1.2. Zasada pomiaru potencjału redoks	52
5.1.2. Pomiar potencjalnej gęstości strumienia tlenu w glebie (ODR)	53
5.1.2.1. Fizykochemiczne podstawy pomiaru ODR	54
5.1.2.2. Zasada Pomiaru ODR	55
5.2. Potencjał redoks oraz prąd redukcji tlenu jako wskaźniki natlenienia gleby	60
6. ELEKTRYCZNY POMIAR TEMPERATURY GLEBY	62
6.1. Problem pomiaru temperatury gleby	62
6.2. WieloczuJNIKOWY termometr termoelektryczny do rejestracji chwilowych profili temperatury gleby	64
6.3. Weryfikacja wieloczuJNIKOWEGO termometru termoelektrycznego do rejestracji chwilowych profili temperatury gleby	67
7. PODSUMOWANIE	69
8. PRZYKŁADY REALIZACJI INSTRUMENTALNYCH	70
8.1. Zasada działania miernika TDR	70
8.2. Laboratoryjny zestaw TDR do wyznaczenia przenikalności dielektrycznej oraz konduktywności elektrycznej materiałów porowatych	72
8.2.1. Sonda TDR do pomiaru wilgotności i zasolenia gleby	74
8.2.2. Sonda TDR do pomiaru wilgotności drewna	75

8.2.3. Sonda TDR do pomiaru wilgotności ziarna	76
8.3. Zasada działania miernika potencjału redoks	77
8.4. Trójelektrodowy pomiar ODR	78
8.4.1. Zasada trójelektrodowego pomiaru ODR	78
8.4.2. Zasada działania trójelektrodowego miernika ODR	79
8.5. Systemy monitoringu statusu wody w glebie IA PAN	81
8.5.1. Zasada działania wielokanalowego monitora statusu wody w glebie	81
8.5.2. LOM/mpts	83
8.5.2.1. Parametry LOM/mpts	83
8.5.2.2. Sondy współpracujące z LOM/mpts	86
8.5.2.2.1. Sonda LP/ms	86
8.5.2.2.1.1. Parametry sondy LP/ms	87
8.5.2.2.2. Sonda LP/p	88
8.5.2.2.2.1. Parametry sondy LP/p	89
8.5.2.2.3. Sonda LP/t	90
8.5.2.2.3.1. Parametry sondy LP/t	91
8.5.3. D-LOG/mts	92
8.5.3.1. Parametry D-LOG/mts	93
8.5.3.2. Sondy współpracujące z D-LOG/mts, sonda FP/m oraz FP/mts	94
8.5.3.2.1. Parametry sond FP/m, FP/mts	98
8.5.4. E_h -LOG/16	98
8.5.4.1. Parametry E_h -LOG/16	100
9. PIŚMIENNICTWO	101
SUMMARY	108

1. WSTĘP

1.1. Pomiar jako podstawa badań naukowych

W procesie podporządkowywania natury woli człowieka nauka gra rolę zasadniczą, ponieważ właściwe jej warsztatowi analityczna forma opisu zjawisk oraz wnioskowanie są warunkami koniecznymi matematycznego modelowania, a zatem przewidywania przebiegu procesów oraz ich następstw. Mówiąc ogólnie, aby zmienić istniejący stan rzeczy trzeba go najpierw obiektywnie ocenić, a następnie podjąć stosowne, oparte o tę ocenę, działania. Pomiar, rozumiany jako technika obiektywnej oceny, jest więc tutaj czynnikiem podstawowym. Rolę pomiaru w nauce jako podstawy wnioskowania ilustrują poniższe cytaty.

“Matematyczny opis wiedzy jest probierzem prawdziwości nauki. Celem nauki jest opisanie wiedzy na podstawie danych wyrażonych w kategoriach matematycznych. Ten punkt widzenia odzwierciedla się, między innymi, w stwierdzeniu lorda Kelvina: "Często powiadam, że kiedy możesz zmierzyć to o czym mówisz i kiedy możesz wyrazić to liczbami, to już wiesz cokolwiek o tym, ale jeżeli nie możesz zmierzyć tego, jeżeli nie możesz wyrazić tego liczbami, to twoja wiedza jest uboga i niewystarczająca: to może być dopiero początek wiedzy, uczyniłeś zaledwie mały krok w kierunku nauki, bez względu na to, co jest przedmiotem twoich rozważań.” ” [87].

“Wyróżnia się dwa rodzaje informacji, informację jakościową wyrażoną przez pojęcia koloru, smaku, zapachu lub przez wnioskowanie logiczne – oraz ilościową wyrażoną w postaci liczbowej. Celem nauk ścisłych jest wykrycie obiektywnych praw świata materialnego i przedstawienie ich w postaci ilościowej. Zatem informacja ilościowa stanowi podstawę poznania naukowego. Zasadniczym źródłem informacji pomiarowej jest eksperyment pomiarowy bezpośrednio dostarczający liczbowej charakterystyki badanego obiektu lub zjawiska. Rolę informacji pomiarowej w procesie poznania trafnie określają słowa wypowiedziane przez Mendelejewa – “Nauka zaczyna się wtedy, kiedy zaczyna się mierzenie.” ” [32].

“Człowiek, dążąc do coraz pełniejszego poznania świata, musi coraz dokładniej mierzyć otaczające go zjawiska i rzeczy. Historia rozwoju wiedzy i techniki jest więc ściśle związana z rozwojem metod i środków pomiarowych

oraz stopniowym udoskonalaniem jednostek miar, gdyż **wyniki pomiarów są głównym źródłem obiektywnego poznania.**

...

W obecnych czasach szybkiego rozwoju nauki i techniki metrologia nabiera szczególnego znaczenia jako nauka o mierzeniu, będącym głównym źródłem informacji, bez których nie jest możliwe sterowanie żadnym procesem naukowym, technicznym lub gospodarczym. Jest to dyscyplina nie tylko podstawowo związana z rozwojem wiedzy i kultury materialnej ludzkości od początku jej dziejów, lecz również znajdująca niezmiernie ważne zastosowania praktyczne w przemyśle, handlu, komunikacji, służbie zdrowia, sporcie oraz w życiu codziennym obywateli.” [89].

1.2. Model w prognozie oraz w optymalizacji

Prognozyka, zdefiniowana jako umiejętność przewidywania rozwoju wydarzeń [75], jest narzędziem kształtowania przyszłości. Jej podstawą jest wnioskowanie oparte o wydarzenia przeszłe i ich uwarunkowania.

Optymalizacja, zdefiniowana jako technika matematycznego określania najkorzystniejszych rozwiązań, jest narzędziem eksperymentu wirtualnego, opartego o symulujący wydarzenia model matematyczny (gdzie wszystko dzieje się “na niby”, bo zarówno podmiot wydarzeń jak i ich przebieg nie istnieją materialnie).

Prognozyka i optymalizacja minimalizują ryzyko oraz skutki niewłaściwych decyzji, a w przypadku eksperymentu metodą próby i błędu znacząco obniżają koszt przedsięwzięcia (np. pominawszy koszt prac przygotowawczych, dziewiczy lot pierwszego promu kosmicznego “Challenger” został przeprowadzony drogą symulacji “komputerowej” z zerowym ryzykiem utraty załogi oraz promu, za cenę zbliżoną do kosztu elektryczności zużytej przez komputer).

Prognoza oraz optymalizacja są dzisiaj realizowane w oparciu o modele numeryczne (“komputerowe”). Modele te realizuje się w dwu zasadniczych płaszczyznach:

- w płaszczyźnie algorytmu, gdzie przystawalność modelu jest warunkowana doбором i następstwem poszczególnych instrukcji programu oraz przyjętych

uproszczeń i przybliżeń, jak również

- w płaszczyźnie danych wejściowych, określających warunki brzegowe i początkowe modelowanego procesu, od których jakości zależy wiarygodność generowanych przez model wyników. Mówiąc potocznie, perfekcyjny model na nic się przyda jeśli nie wprowadzimy na jego wejście danych zawierających liczbową charakterystykę modelowanego obiektu lub zjawiska, uzyskanych drogą odpowiednich **pomiarów**.

Ponieważ modelowanie zjawisk i procesów w czasie krótszym niż rzeczywisty jest kluczem do kształtowania przyszłości, **pomiar i model stały się zasadniczymi obiektami zainteresowania** i stanowią w nauce ważny przedmiot badań jak też kluczowe narzędzia jej warsztatu.

1.3. Status wody jako istotne zagadnienie agrofizyki

Agrofizyka jest dziedziną, która powstała w wyniku wylaniającej się potrzeby poznania fizycznych elementów biologicznego środowiska roślin warunkujących fotosyntezę (światło, ciepło, woda), a więc i plon. Stosowanie właściwego fizyce warsztatu badawczego i interpretacyjnego czyni agrofizykę oryginalną, interdyscyplinarną dziedziną nauki (tak jak geofizykę, biofizykę oraz im podobne, gdzie problemami są fizyczne aspekty właściwych tym dziedzinom zagadnień).

Specyfika badań agrofizycznych leży nie tylko w wyborze przedmiotu badań lecz również w stosowaniu fizyki wraz z właściwym jej warsztatem badawczym i interpretacyjnym, gdzie matematyczna formalizacja procedur poznawczych umożliwia ich doskonalenie oraz optymalizację zastosowań. Przedmiotem badań są tutaj fizyczne procesy w kontinuum gleba-roślina-atmosfera oraz technika ich regulacji.

Praktyczną aplikacją agrofizyki, jest prognozowanie następstw procesów fizycznych oraz regulacja warunkujących je czynników pod kątem optymalizacji produkcji rolniczej. Uzależnienie rozwoju biomasy od nie dających się, jak dotąd, regulować czynników fizycznych, jak też skutki modyfikowania tych, które regulować można, ocenia się pod kątem jej ilości i jakości. Stąd konieczność poszerzenia tradycyjnego obszaru zagadnień agrofizyki o fizyczne uwarunkowania właściwości materiału rolniczego [24].

Kluczowym zagadnieniem agrofizyki jest status wody, ponieważ każde z badanych w jej zakresie zjawisk jest nim uwarunkowane (tzn, ilością wody, jej potencjałem, zasoleniem, natlenieniem i temperaturą).

Wzajemne uzależnienie (interakcja) procesów w kontinuum gleba-roślina-atmosfera oraz ich wpływ na efektywność produkcji roślinnej narzucają dobór zagadnień dotyczących procesów i zjawisk dla tego układu wspólnych i jednoczesnych oraz kierunkują je na fizyczne uwarunkowania właściwości gleby, jak również materiału roślinnego. Właściwy fizyce matematyczny sposób interpretacji wyników badań pozwala na formalizację wnioskowania, która jest warunkiem koniecznym matematycznego modelowania, a więc i prognozowania dyskutowanych procesów oraz ich następstw.

1.4. Monitoring statusu wody

Monitoring (dozór) statusu wody, definiowany jako przestrzenno-czasowa rejestracja tych właściwości wody które warunkują objęte przedmiotem badań zjawiska, jest podstawowym instrumentem w badaniach przyrodniczych (jak też w procedurach przemysłowych). Możliwość monitoringu statusu wody jest, jak wspomniano wyżej, szczególnie ważna w agrofizyce, ponieważ każde z objętych zakresem jej badań zjawisk jest warunkowane właściwościami wody obecnej w składnikach badanego systemu.

1.4.1. Zagadnienie minimum zmiennych opisujących status wody

Ilość zmiennych potrzebnych do opisu statusu wody w materiale porowatym jest zależna od charakteru rozważanego zagadnienia i jest, jak dotąd, kwestią arbitralnego wyboru. W większości przypadków praktycznych status wody jest wyrażany jedną zmienną: wilgotnością materiału. Jedna zmienna: - wilgotność - wystarcza w odniesieniu do drewna jako budulca. Dwie zmienne wystarczają (w kategoriach praktycznych) by wyrazić status wody w ziarnie: jego wilgotność oraz temperatura. Gleba jest materiałem w którym status wody powinien być wyrażany minimum pięcioma zmiennymi: ilością wody (wilgotnością gleby), jej potencjałem, zasoleniem, natlenieniem oraz temperaturą.

Materiałem biologicznym najtrudniejszym do monitorowania statusu zawartej w nim wody jest **gleba**, ponieważ jej budowa jest złożona zaś właściwości są niestabilne.

Najtrudniejszym do określenia statusu zawartej w glebie wody parametrem jest **wilgotność gleby**, ponieważ wyniki pomiarów muszą mieć postać sygnału elektrycznego, podczas gdy przepływ prądu przez glebę jest warunkowany nie tylko jej wilgotnością (patrz niżej).

Biorąc pod uwagę powyższe oraz zakładając, że rozwiązania które są skuteczne w pomiarze wilgotności gleby są również skuteczne w pomiarze wilgotności innych materiałów biologicznych o mniej zróżnicowanej budowie, zaś wymagania jakie stawia się czujnikom, metodzie oraz aparaturze stosowanym do monitoringu wilgotności gleby nie przekraczają wymagań w stosunku do innych materiałów rolniczych, dalsze rozważania przeprowadzono w odniesieniu do monitoringu, a zwłaszcza pomiaru, wilgotności gleby.

2. MONITORING STATUSU WODY W GLEBIE

2.1. Wymagania i możliwości

Monitoring statusu wody w glebie, rozumiany jako rejestracja w przestrzeni i w czasie jej wilgotności, potencjału, zasolenia, natlenienia i temperatury jest warunkiem koniecznym modelowania procesów zachodzących w kontinuum gleba-roślina-atmosfera, a więc i prognozowania ich następstw jak również kontrolowania tych procesów. Pełni on tutaj rolę czynnika weryfikującego oraz, w przypadku tzw. modeli kroczących, korygującego (gdzie na podstawie danych monitoringu warunki początkowe oraz brzegowe są co pewien czas korygowane).

Monitoring statusu wody w glebie realizuje się z zastosowaniem systemów automatycznych, opartych o technikę cyfrową. Ponieważ w cyfrowych systemach akwizycji danych czytelne są wyłącznie sygnały elektryczne, stosowane w nich czujniki muszą przetwarzać mierzoną wielkość na proporcjonalny sygnał elektryczny. Wymagania jakie stawia się czujnikom,

metodzie oraz aparaturze stosowanym do “elektrycznego” monitoringu statusu wody w glebie to:

- możliwość automatycznej, ciągłej rejestracji danych *in situ* w sposób zapewniający bezinwazyjność w stosunku do gleby oraz obserwowanych procesów,
- selektywność (niewrażliwość metody na czynniki inne niż wybrany),
- bezpieczeństwo i prostota (nieszkodliwość stosowanego medium oraz zbędność specjalizacji ze strony użytkownika).

W odniesieniu do aktualnego potencjału metrologii wielkości agrofizycznych możliwość realizacji monitoringu wody w glebie jest, w stosunku do poszczególnych jej parametrów, zróżnicowana:

- elektryczny pomiar temperatury jest łatwy, ponieważ elektryczne czujniki temperatury gleby są komercyjnie dostępne,
- elektryczny pomiar potencjału jest możliwy w odniesieniu do jego składowej matrycowej w zakresie 0–950 mbar z zastosowaniem tensjometru z elektrycznym przetwornikiem tensometrycznym, zaś powyżej 950 mbar, aż do wartości odpowiadającej punktowi trwałego więdnięcia roślin (ok $1.5 \cdot 10^4$ mbar), przy pomocy bloczków kapilarno-porowatych [6] oraz psychrometrów termoelektrycznych [71],
- natlenienie można mierzyć elektrycznie (patrz 5) albo oceniać w oparciu o napowietrzenie gleby, które jest wielkością kompatybilną do jej wilgotności,
- metoda **elektrycznego pomiaru zasolenia oraz zawartości wody w glebie** (wilgotności gleby) jest przedmiotem nieustających poszukiwań.

2.2. Elektryczny pomiar wilgotności oraz zasolenia gleby

Zasadniczym czynnikiem kwalifikującym metodę elektrycznego pomiaru wilgotności czy zasolenia gleby jest jej selektywność, tzn. niewrażliwość funkcji przetwarzania (kalibracji) na wpływ czynników innych niż mierzony. Te czynniki to między innymi: porowatość gleby, jej uziarnienie, kwasowość, temperatura oraz zasolenie w przypadku pomiaru wilgotności i wilgotność w przypadku pomiaru zasolenia. Selektywność umożliwia pominięcie indywidualnej kalibracji pomiarów, tzn. empirycznego wyznaczania

specyficznej dla każdej gleby, na każdej głębokości jej profilu, funkcji przetwarzania.

Kluczem do rozwiązania problemu elektrycznego pomiaru danej wielkości w sposób selektywny jest znalezienie takiej elektrycznej właściwości medium warunkującego tę wielkość, która jest dla niego unikatowa.

W odniesieniu do problemu elektrycznego pomiaru wilgotności gleby medium warunkującym wilgotność jest woda a jej unikatową właściwością jest polarna struktura molekuł (molekuła wody posiada trwały moment dipolowy równy 1.87 D). Polarność molekuł wody sprawia, że elektryczna przenikalność (stała dielektryczna) wody dominuje przenikalność stałej fazy gleby (względna stała dielektryczna wody w polu o częstotliwości poniżej 10 GHz i w temperaturze 18°C, wynosi 81, podczas gdy względna stała dielektryczna fazy stałej wynosi w tych warunkach $4 \div 5$). Ponieważ elektryczna przenikalność gleby jest warunkowana jej wilgotnością nasuwa się wniosek, że elektryczny pomiar wilgotności gleby należy oprzeć o pomiar jej przenikalności elektrycznej (stałej dielektrycznej).

Podobnie, w odniesieniu do problemu elektrycznego pomiaru zasolenia gleby, medium warunkującym zasolenie są obecne w glebie sole a właściwością unikatową jest ich jonowa postać. Zdolność przenoszenia ładunku elektrycznego przez obecne w "wodzie glebowej" jony sprawia, że gleba przewodzi prąd elektryczny. Zatem elektryczny pomiar zasolenia gleby należy oprzeć o pomiar jej konduktywności elektrycznej.

2.2.1. Metoda konduktometryczna oraz dielektryczna

Próby elektrycznego pomiaru wilgotności gleby oparte o pomiar oporności albo pojemności elektrycznej występującej pomiędzy wprowadzonymi do niej elektrodami są nieustannie podejmowane od końca ubiegłego wieku [2, 8, 13, 15, 16, 17, 29, 35, 41, 44, 46, 88, 97]. Przyniosły one wiele metod, z których żadna nie jest wolna od wad, więc nie kwalifikuje się jako ostateczna.

Zmiany w odczycie elektrycznej oporności gleby są - przy ustalonym zasoleniu, geometrii fazy stałej i temperaturze - przypisywane zmianom

wilgotności, w związku z uzależnieniem od niej krętości łączących elektrody ścieżek elektrolitu wiodących prąd elektryczny (gdy wilgotność maleje, krętość, a zarazem oporność elektryczna, rośnie i odwrotnie). Podobnie, zmiany w odczycie elektrycznej pojemności kondensatora z głębą przypisuje się zmianom wilgotności, ponieważ dielektryczna przenikalność wody przewyższa (w przybliżeniu 20-krotnie) przenikalność dielektryczną stałej fazy gleby.

Mimo zasadności powyższych założeń, elektropojemnościowe i elektrooporowe pomiary wilgotności gleby okazały się nieselektywne (tzn. podatne na inne niż wilgotność czynniki), a więc nieprzydatne do zastosowań rutynowych. Parametry odnośnych formuł przetwarzania (tzn. związków: wilgotność-oporność oraz wilgotność-pojemność) okazały się niestabilne i zależne od temperatury gleby, jej zasolenia, uziarnienia, gęstości, kwasowości, jak też od częstotliwości napięcia elektrycznego zasilającego obwód pomiarowy [3, 14, 34, 40, 41, 50, 68, 70, 95].

Analizę przyczyn ograniczających przydatność elektropojemnościowych oraz elektrooporowych (elektrokonduktywnych) metod pomiaru wilgotności gleby oraz warunki w jakich możliwa jest interpretacja elektrycznych parametrów stosowanego czujnika w kategoriach wyrażających zawartość i zasolenie wody w glebie omówiono gdzie indziej [50]. Za podstawę rozważań przyjęto, że wyniki pomiarów elektrycznych właściwości gleby (jak też innych substancji porowatych nasączonych elektrolitem) dokonywanych z zastosowaniem elektrod w kontakcie galwanicznym (tzn. umożliwiającym przeniesienie ładunku elektrycznego przez granicę: elektroda|gleba) dotyczą nie samej gleby, ale całości układu, tzn. układu: elektroda|gleba (UEG), gdzie kontakt elektroda|gleba pełni rolę granicy: przewodnik elektronowy|przewodnik jonowy. Należy tu zaznaczyć, że każdy umieszczony w glebie elektrooporowy lub elektropojemnościowy czujnik zasolenia albo wilgotności (reagujący na te właściwości gleby, które warunkują jej przenikalność oraz konduktywność elektryczną) może być dyskutowany jako układ elektroda|gleba (UEG). Z powyższego powodu, oraz dlatego że w automatycznych systemach akwizycji danych integrowalne są wyłącznie czujniki elektryczne, wpływ właściwości gleby na elektryczne parametry UEG wydaje się być w metrologii agrofizycznej zagadnieniem zasadniczym.

2.2.1.1. Uwarunkowania konduktometrycznego pomiaru zasolenia gleby

Od roku 1970 notuje się nasilenie poszukiwań metody oceny zasolenia gleby, opartej o pomiar jej oporności (albo konduktywności) elektrycznej. Bezpośredni elektrokonduktywny (elektrooporowy) pomiar zasolenia gleby nie jest możliwy, gdyż elektryczna konduktywność gleby zależy nie tylko od koncentracji soli w roztworze (w "wodzie glebowej") ale również od jej wilgotności, porowatości i uziarnienia, które warunkują krętość łączących elektrody ścieżek elektrolitu. [25, 39, 72, 78].

Poszukuje się zatem takiej interpretacji odczytów elektrycznej konduktywności gleby, aby jej zmiany można było przypisać zmianom elektrycznej konduktywności elektrolitu (wody glebowej) przyjętej jako miara zasolenia [31], niezależnie od wilgotności gleby i od geometrii jej fazy stałej.

2.2.1.2. Uwarunkowania dielektrycznego pomiaru wilgotności gleby

Jak wspomniano, zmiany w odczycie dielektrycznej przenikalności gleby (elektrycznej pojemności kondensatora z glebą) przypisuje się zmianom jej wilgotności, ponieważ przenikalność dielektryczna wody (względna wartość równa 81 w 18 °C) dominuje przenikalnością dielektryczną fazy stałej gleby (względna wartość równa ok. 4.5). Stąd wynika, że elektryczny pomiar wilgotności należy oprzeć o pomiar, skorelowanej z nią, dielektrycznej przenikalności gleby. Takie rozwiązanie problemu nie jest jednakże oczywiste z dwu powodów:

- składniki stałej fazy gleby podlegają polaryzacji deformacyjnej (indukowanej), a więc jej gęstość wpływa na wypadkową przenikalność dielektryczną gleby
- gleba w polu elektrycznym wykazuje dwoistą naturę: - przewodnika oraz izolatora jednocześnie i dlatego dielektryczna przenikalność gleby jest wielkością zespoloną, a więc jej wartość zależy nie tylko od ilości wody w glebie (wilgotności), lecz również i od jej konduktywności elektrycznej (zasolenia), co utrudnia selektywny pomiar wilgotności.

Przedstawiona niżej dyskusja dotyczy problemu występowania warunków

fizycznych, w których dielektryczny pomiar wilgotności gleby byłby selektywny, tzn. wolny od interakcji elektrycznej konduktywności gleby oraz gęstości jej fazy stałej. Celem rozważań jest określenie sposobu, w jaki należy pobudzać glebę polem elektrycznym by interpretacja jej odpowiedzi na to pobudzenie odnosiła się wyłącznie od zawartej w glebie wody.

Przenikalność dielektryczna, ϵ , roztworu wodnego, zwanego dalej elektrolitem, jest wielkością zespoloną, której wartość zależy od częstotliwości pola elektrycznego, f . Jej składowa rzeczywista, $\text{Re}(\epsilon)$, oraz urojona, $\text{Im}(\epsilon)$, wynoszą odpowiednio [7, 26]:

$$\text{Re}(\epsilon) = \epsilon' \quad (1)$$

$$\text{Im}(\epsilon) = \epsilon'' + \frac{\sigma_e}{\omega\epsilon_0} \quad (2)$$

gdzie:

σ_e - elektryczna konduktywność elektrolitu, (S m^{-1})

ω - pulsacja pola, równa $2\pi f$, (s^{-1})

ϵ' - składowa rzeczywista zespolonej przenikalności dielektrycznej wody

ϵ'' - składowa urojona zespolonej przenikalności dielektrycznej wody

ϵ_0 - dielektryczna przenikalność próżni

Składową rzeczywistą, ϵ' , i urojoną, ϵ'' , zespolonej przenikalności dielektrycznej wody wyrażają formuły Cole-Cole [7, 26]:

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \left[1 + (\omega\tau)^{1-h} \sin \frac{h\pi}{2} \right]}{1 + (\omega\tau)^{2(1-h)} + 2(\omega\tau)^{1-h} \sin \frac{h\pi}{2}} \quad (3)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_\infty) (\omega\tau)^{1-h} \cos \frac{h\pi}{2}}{1 + (\omega\tau)^{2(1-h)} + 2 (\omega\tau)^{1-h} \sin \frac{h\pi}{2}} \quad (4)$$

gdzie:

τ - czas relaksacji polaryzacji orientacyjnej, (s),

ε_∞ - względna stała dielektryczna wody gdy $\omega > 1/\tau$,

ε_S - względna stała dielektryczna wody gdy $\omega = 0$,

h - parametr wyrażający interakcję dipoli wody: $0 < h < 1$.

Podstawiając (4) do (2) otrzymujemy $\text{Im}(\varepsilon)$ dla elektrolitu:

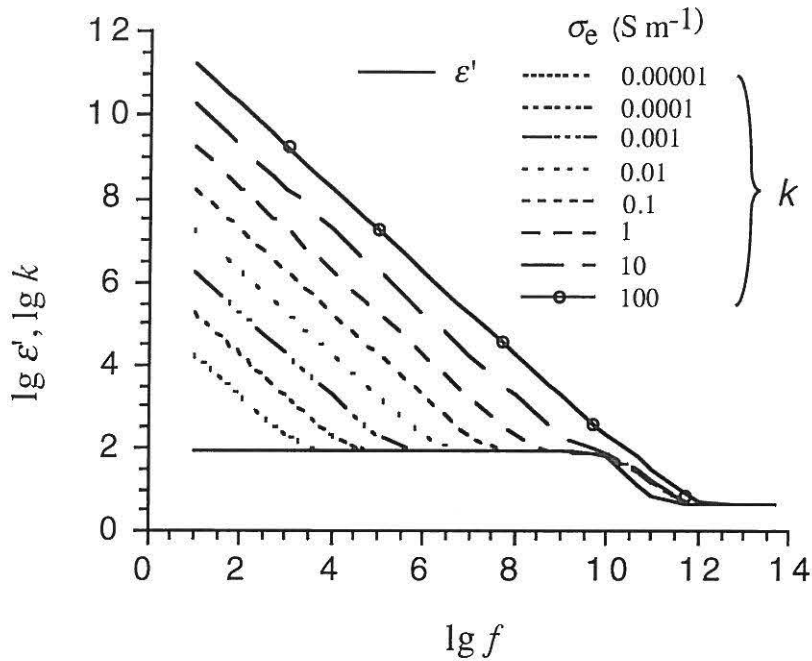
$$\text{Im}(\varepsilon) = \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_\infty) (\omega\tau)^{1-h} \cos \frac{h\pi}{2}}{1 + (\omega\tau)^{2(1-h)} + 2 (\omega\tau)^{1-h} \sin \frac{h\pi}{2}} + \frac{\sigma_e}{\omega\varepsilon_0} \quad (5)$$

Wartość bezwzględna (moduł), k , zespolonej przenikalności dielektrycznej elektrolitu, ε , wynosi:

$$k = |\varepsilon| = \sqrt{[\text{Re}(\varepsilon)]^2 + [\text{Im}(\varepsilon)]^2} \quad (6)$$

Rozwiązanie (3) i (5) pozwala znaleźć dyspersję ε' oraz k , tzn. zależność ich wartości od częstotliwości pola elektrycznego.

Rysunek 1 przedstawia częstotliwościową dyspersję modułu, k , zespolonej przenikalności elektrolitu, ε , oraz dyspersję jej składowej rzeczywistej, ε' , dla różnych konduktywności elektrolitu, σ_e .



Rys. 1. Częstotliwościowa dyspersja składowej rzeczywistej, ϵ' , oraz modulu, k , zespolonej przenikalności dielektrycznej elektrolitu dla jego różnych konduktywności, σ_e .

Fig. 1. Frequency dispersion of the real part, ϵ' , and modulus, k , of the complex dielectric permittivity of electrolyte at its different conductivities, σ_e .

W obliczeniach przyjęto:

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1},$$

$$\epsilon_s = 81,$$

$$\epsilon_\infty = 4.23 \text{ [26]},$$

$$h = 0.013 \text{ [26]},$$

$$\tau = 9.3 \times 10^{-12} \text{ s [26]}.$$

Z rysunku widać, że w określonym paśmie częstotliwości oraz w określonym zakresie konduktywności $k = \varepsilon'$. Znaczący to, że składowa urojona dielektrycznej przenikalności elektrolitu, ε'' , jest wtedy pomijalna i elektrolit zachowuje się jak izolator. Prawa granica wspomnianego pasma jest warunkowana stratami dielektrycznymi (relaksacyjnymi) wody i wynosi ok. 10^{10} Hz, zaś lewa zależy od elektrycznej konduktywności elektrolitu, σ_e .

Można zauważyć, że:

- im mniejsza jest wartość σ_e , tym niższa jest częstotliwość graniczna pola elektrycznego, od której począwszy roztwór zachowuje się jak izolator,
- przy odpowiednio wysokiej, ale niższej od 10^{10} Hz, częstotliwości pola elektryczny prąd polaryzacji materiału przewodzącego jest zdominowany przyczynkiem orientacyjnej polaryzacji wody jeśli elektryczna konduktywność tego materiału nie przekracza wartości rzędu 10 S m^{-1} .

2.2.1.3. Dyspersja stałej dielektrycznej wody jako szansa selektywnego pomiaru wilgotności gleby

Z powyższego wynika, że dla gleby której konduktywność elektryczna nie przekracza wartości rzędu 1 S m^{-1} , umieszczonej w polu elektrycznym o częstotliwości większej od 10^8 Hz, prąd przewodzenia związany z polaryzacją przestrzenną jest pomijalny. Zatem płynący w układzie elektrody|gleba zmienny prąd elektryczny nie zależy od elektrycznej konduktywności gleby i jest:

- przy $f \leq 10^{10}$ Hz, wynikiem polaryzacji dielektrycznej; - orientacyjnej i deformacyjnej obecnej w glebie wody oraz deformacyjnej stałej fazy gleby,
- przy $f > 10^{10}$ Hz, wynikiem jedynie polaryzacji deformacyjnej obecnej w glebie wody oraz fazy stałej gleby. Zatem sposobem eliminacji przyczynka fazy stałej do dielektrycznego pomiaru wilgotności (dowolnego materiału) byłby pomiar różnicowy, w polu o $f < 10^{10}$ Hz oraz $f > 10^{10}$ Hz, zgodnie

z przesłankami dyskutowanymi niżej.

Oznaczmy przenikalność dielektryczną w polu o częstotliwości rzędu 10^9 Hz jako ε_9 oraz w polu o częstotliwości rzędu 10^{12} Hz jako ε_{12} . Przenikalność dielektryczną mieszaniny dielektryków wieloskładnikowych można wyrazić jako [1, 84]:

$$\varepsilon^\alpha = C_1 \varepsilon_1^\alpha + C_2 \varepsilon_2^\alpha + C_3 \varepsilon_3^\alpha + \dots + C_n \varepsilon_n^\alpha \quad (7)$$

gdzie C_i jest koncentracją i -tego składnika, ε_i jest jego przenikalnością dielektryczną zaś α jest arbitralnym parametrem korekcyjnym: $-1 < \alpha < 1$. Podstawiając za koncentrację wody, fazy stałej oraz powietrza odpowiednio: θ , S i η oraz przyjmując ε_9 oraz ε_{12} wody odpowiednio: 81 oraz 4.2 [26] otrzymujemy:

$$\varepsilon_9^\alpha = \theta 81^\alpha + S \varepsilon_S^\alpha + \eta \varepsilon_P^\alpha \quad (8)$$

oraz:

$$\varepsilon_{12}^\alpha = \theta 4.2^\alpha + S \varepsilon_S^\alpha + \eta \varepsilon_P^\alpha \quad (9)$$

gdzie ε_P - stała dielektryczna powietrza.

Przyjmując dla gleby $\alpha = 0.5$ [50, 80] znajdujemy, zgodnie z (8) i (9):

$$\sqrt{\varepsilon_9} - \sqrt{\varepsilon_{12}} = \theta(\sqrt{81} - \sqrt{4.2}) = \Delta \quad (10)$$

Stąd trzymujemy formułę przetwarzania (kalibracji):

$$\theta = 0.144 \Delta \quad (11)$$

Ponieważ zmienna Δ jest zależna tylko od zawartości wody to wynik dielektrycznego pomiaru wilgotności gleby nie jest warunkowany ani jej zasoleniem gleby ani gęstością. Zatem wydaje się, że różnicowy dielektryczny pomiar wilgotności gleby byłby selektywny. Możliwy sposób technicznej realizacji wyznaczania Δ to pobudzenie wprowadzonego do gleby odcinka

linii transmisyjnej impulsem napięcia o czasie narastania około 20 ps, a następnie analiza reflektogramu odpowiedzi układu elektrodygleba w domenie częstotliwości z zastosowaniem transformaty Fouriera.

Można sądzić, że chociaż aktualne środki techniczne nie pozwalają na stosowanie tak szybkich impulsów w praktycznych warunkach badań terenowych, wykorzystanie częstotliwościowej dyspersji stałej dielektrycznej wody do selektywnego pomiaru wilgotności gleby wydaje się kwestią najbliższej przyszłości.

2.2.2. Waloryzacja dostępnych metod dielektrycznego pomiaru wilgotności gleby

Najczęściej stosowanym sposobem oceny przenikalności elektrycznej gleby w dielektrycznych pomiarach jej wilgotności jest pomiar elektrycznej pojemności kondensatora z glebą jako "dielektrykiem" [21, 30, 45]. Stosowane w metodach elektropojemnościowych częstotliwości napięcia sinusoidalnego zasilającego zbudowany z dwu równoległych metalowych płyt lub prętów kondensator (czujnik) nie przekraczają wartości rzędu 10^7 Hz, co w świetle rezultatów powyższej analizy dyspersji częstotliwościowej UEG jest stukrotnie za mało [50]. Z drugiej strony, stosowanie optymalnej częstotliwości rzędu 10^9 Hz powoduje spadek długości fali do wartości porównywalnej z wymiarami elektrod czujnika, który zachowuje się wtedy jak falowód. Na skutek częściowych odbić napięcia od nieciągłości impedancji układu generator-czujnik powstaje w nim fala stojąca, która w takich warunkach osiąga znaczną amplitudę. Technologią pomiaru stosowaną w takich przypadkach jest interferometria (reflektometria częstotliwościowa, FDR, - frequency domain reflectometry), oparta o pomiar współczynnika fali stojącej, WFS, gdzie odczytuje się, zależną od przenikalności dielektrycznej materiału, amplitudę i fazę fali stojącej. Jeśli w układzie występuje kilka nieciągłości impedancji, FDR z falą sinusoidalną o ustalonej częstotliwości wykrywa wypadkową wartość WFS, co nie pozwala odróżnić przyczynków pochodzących od poszczególnych nieciągłości układu.

Układ generator-czujnik każdego miernika elektropojemnościowego zawiera teoretycznie co najmniej dwie nieciągłości impedancji: jedną w miejscu połączenia elektrod czujnika z linią zasilającą (fiderem) i drugą w miejscu gdzie kończą się prowadzące falę elektrody czujnika, zaś praktycznie zawsze występuje ich więcej. W takim przypadku technologia FDR wymaga stosowania wielu pomiarów z zastosowaniem wielu częstotliwości napięcia sinusoidalnego i staje się niewygodna [28].

Wspomniane niedogodności interferometrii mikrofalowej pozwala ominąć technologia zwana reflektometrią czasową, TDR (Time Domain Reflectometry), która, w przeciwieństwie do FDR z pojedynczą falą sinusoidalną, operuje impulsem napięcia zawierającym fale sinusoidalne o szerokim paśmie częstotliwości. Technologia TDR [74], zwana często "radarem kablowym", powstała w latach 20-tych w celu lokalizacji uszkodzeń linii przesyłowych, tzn. linii telekomunikacyjnych, energetycznych i innych. Polega ona na wymuszaniu skoku napięcia (impulsu krokowego lub szpilkowego) na wejściu badanej linii, co powoduje jego propagację wzdłuż tej linii [83], a następnie na rejestracji momentu powrotu impulsu odbitego (echa) od nieciągłości impedancji linii w miejscu jej uszkodzenia (oraz kształtu impulsu, z którego można ocenić charakter tego uszkodzenia). TDR, w odróżnieniu od FDR, jednoznacznie wykrywa i lokalizuje wszystkie nieciągłości impedancji układu.

Postęp w technice szybkich impulsów pozwolił na poszerzenie dziedziny zastosowań reflektometrii czasowej, TDR, poza testowanie linii przesyłowych. Osiągalna w ostatnich latach szybkość narastania impulsów napięcia elektrycznego umożliwia wykrywanie nieciągłości o wzajemnej odległości rzędu centymetra i mniej. Wzrost rozdzielczości przestrzennej TDR umożliwił jej zastosowanie do pomiaru dielektrycznej przenikalności gleb z zastosowaniem jako czujnika względnie krótkiego odcinka linii transmisyjnej złożonej z dwu równoległych, wbijanych do gleby, prętów. Przeciętny czas narastania, t_r , impulsów stosowanych w testerach kabli TDR wynosi około 150 ps. Czas ten jest związany z szerokością bw (bandwidth) pasma częstotliwości fal sinusoidalnych kształtujących zbocze impulsu następująco [86]:

$$bw = 0.35 tr^{-1} \quad (12)$$

co dla $tr = 150$ ps odpowiada częstotliwości około 2.3 GHz, która, w świetle dyskutowanej tu dyspersji częstotliwościowej właściwości UEG, odpowiada w przybliżeniu środkowi pasma częstotliwości gdzie dyspersja przenikalności dielektrycznej gleby zanika (tzn. pasma 0.4 - 5 GHz). Fakt ten czyni technologię TDR szczególnie przydatną do dielektrycznych pomiarów wilgotności gleby.

2.3. Pomiar wilgotności oraz zasolenia gleby metodą TDR

Jak wspomniano, postęp w technice szybkich impulsów umożliwił analizę elektrycznych właściwości materiału w polu elektrycznym o częstotliwości w zakresie mikrofalowym, z zastosowaniem reflektometrii czasowej, TDR - Time Domain Reflectometry [12, 48, 51].

TDR operuje w zakresie częstotliwości pola elektrycznego rzędu 10^9 Hz, gdzie wilgotna gleba zachowuje się jak izolator, którego stała dielektryczna jest warunkowana wilgotnością gleby. Z tego powodu wyniki elektrycznych (dielektrycznych) pomiarów wilgotności gleby z zastosowaniem TDR nie są warunkowane właściwościami innymi niż jej wilgotność oraz gęstość [65]. Ostatnim osiągnięciem opartym o technikę TDR jest, równoległy z pomiarem stałej dielektrycznej, pomiar elektrycznej konduktywności gleby, na podstawie której określa się jej zasolenie [10, 38, 63, 64, 94]. Zasolenie wyraża się koncentracją obecnego w glebie elektrolitu [31]. Z powodu trudności związanych z wyznaczaniem tak zdefiniowanego zasolenia, za jego miarę przyjmuje się wielkość pośrednią - elektryczną konduktywność ekstraktu, σ_e , który pobiera się po nasyceniu próbki gleby wodą destylowaną. Procedura ta, zaproponowana przez US Salinity Laboratory, została uznana jako standardowa. Jej wadą jest fakt, że nie nadaje się ona do pomiarów w warunkach terenowych. Stosowaną w warunkach *in situ* alternatywą [50, 63] jest pomiar elektrycznej konduktywności gleby, σ , z której, po odpowiedniej kalibracji, można wyznaczyć elektryczną konduktywność elektrolitu glebowego, σ_e . Jednakże σ zależy również od wilgotności gleby.

Zatem dla wyznaczenia zasolenia gleby należy równoległe z σ mierzyć jej wilgotność.

2.3.1. Wczesne zastosowania TDR w pomiarach wilgotności gleby

Chociaż możliwość zastosowania zasilanej impulsem napięcia symetrycznej linii transmisyjnej do wyznaczania dielektrycznej przenikalności gleby została wykazana stosunkowo wcześnie [33] pierwsza udana próba zastosowania TDR do pomiaru wilgotności gleby w oparciu o pomiar jej przenikalności dielektrycznej miała miejsce na początku lat 70-tych. Davis i Chudobiak [12] badali przydatność technologii TDR do obserwacji dynamiki wilgotności gleby, stosując reflektometr szerokopasmowy (którego charakterystyk nie cytują). Czujnikiem wilgotności był osadzony w glebie odcinek symetrycznej linii transmisyjnej (dwa równoległe pręty metalowe, średnicy 1.1 cm, długości 99 cm, odległe o 5.1 cm). Dodatkowo rezultaty podobnych badań podjętych przez innych [11, 58, 90, 91, 92, 93] spowodowały gwałtowny wzrost zainteresowania zastosowaniem TDR do pomiaru wilgotności gleb.

Badania w laboratorium prowadzono w oparciu o oscyloskop Tektronix 7603 z wkładką TDR 7S12 [12, 19, 91]. Do pomiarów w polu stosowano i do dziś jest szeroko stosowany przenośny tester kabli [27, 81, 82, 90], oryginalnie przeznaczony do lokalizacji uszkodzeń linii jak również do wstępnego rozpoznawania charakteru tych uszkodzeń (przerwa, upływność o impedancji z przewagą składnika aktywnego lub pasywnego itp). Obydwa wspomniane reflektometry stosują impuls krokowy o czasie narastania odpowiednio 45 ps oraz 140 ps.

Począwszy od roku 1980 powszechnie stosuje się do reflektometrycznych pomiarów wilgotności gleb w polu tester kabli transmisyjnych Tektronix model 1502B [21], który operuje impulsem krokowym o czasie narastania około 150 ps. Przeznaczone do testowania elektrycznych obwodów wysokiej częstotliwości reflektometry czasowe (TDR), oferowane przez kilku zaledwie najbardziej renomowanych producentów jak: Iwatsu, Le-Croy, Hyperlabs, Tektronix oraz Hewlett-Packard są względnie drogie, duże i ciężkie, ponieważ generowanie krokowych impulsów napięcia o

skrajnie krótkim czasie narastania rzędu 10 ps oraz o poprawnym kształcie, tzn. o zanedbywalnym przeskoku i oscylacjach [73], jest zadaniem na pograniczu możliwości technicznych. Jednakże w reflektometrze czasowym o zastosowaniu ograniczonym tylko do wyznaczania wilgotności gleby można stosować łatwiejszy w realizacji oraz w interpretacji impuls szpilkowy, o dłuższym niż we wspomnianych reflektometrach czasie narastania wynoszącym około 300 ps [58, 59].

Pierwszy polowy oraz laboratoryjny aparat TDR oryginalnie przeznaczony do jednoczesnego pomiaru elektrycznej przenikalności, a więc i wilgotności, oraz elektrycznej konduktywności i temperatury, a więc i zasolenia gleby został opracowany i wykonany w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie [51, 58, 59, 61], przy czym, ze względu na niezakończone procedury patentowe publikowano w formie uogólnionej tylko jego najprostszą wersję [48, 58, 59].

2.3.2. Zasada reflektometrycznego pomiaru wilgotności gleby

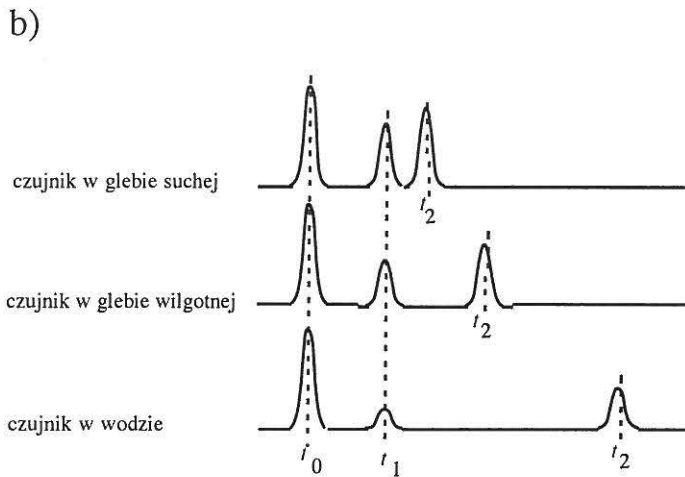
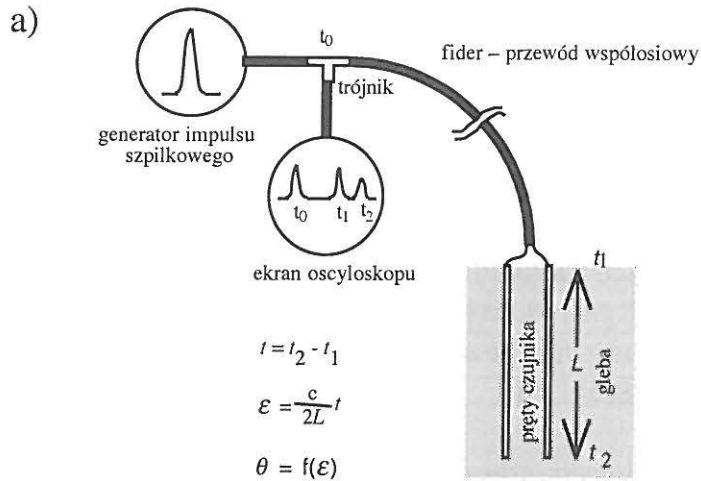
Wilgotność objętościowa, θ , jest liczona ze stałej dielektrycznej, ε , oraz gęstości gleby, ρ , na podstawie formuły [65]:

$$\theta_{\text{TDR}} = \frac{\sqrt{\varepsilon - 0.819 - 0.168\rho - 0.159\rho^2}}{7.17 + 1.18\rho} \quad (13)$$

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

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (14)$$

gdzie c - prędkość światła w próżni.



Rys. 2. Zasada reflektometrycznego pomiaru wilgotności gleby. a) podstawowe składniki układu, b) obraz impulsu oraz jego odbić widziany na ekranie oscyloskopu.

Fig. 2. Principle of the reflectometric measurement of soil moisture. a) basic components of the system, b) the pulse and its reflections as seen on the screen of the oscilloscope.

Zakładając, że dla większości przypadków magnetyczna przenikalność gleby, $\mu=1$ oraz przekształcając (14) względem współczynnika załamania, $\sqrt{\epsilon}$, otrzymujemy:

$$\sqrt{\epsilon} = \frac{c}{v} = \frac{c}{2L} t \quad (15)$$

gdzie c – prędkość światła w próżni, L – długość prętów czujnika (patrz Rys. 2a) oraz t – czas w jakim impuls pokonuje w glebie drogę $2L$ (droga impulsu w glebie wynosi $2L$ bo dyskutowany dystans jest pokonywany dwukrotnie: raz przez impuls transmitowany do gleby i drugi raz, przez odbity od końca prętów).

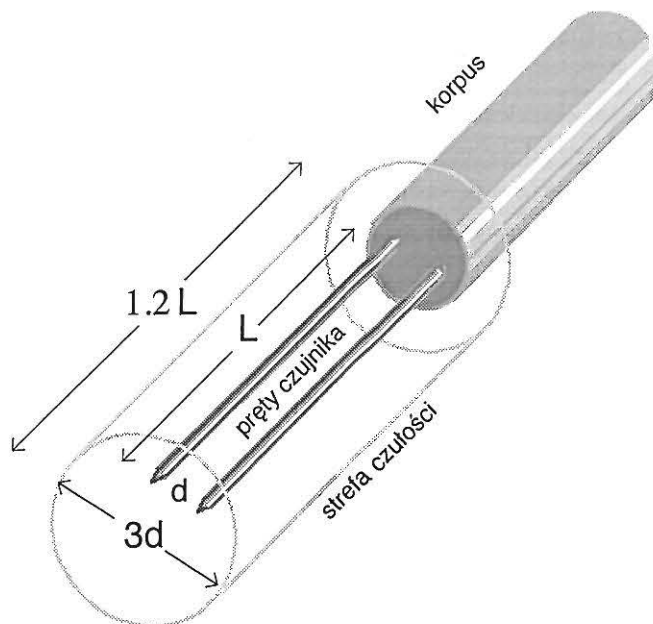
Zasadę reflektometrycznego pomiaru prędkości propagacji impulsu elektromagnetycznego w glebie (lub w innym materiale porowatym) ilustruje Rys. 2a. Do gleby wprowadza się odcinek symetrycznej linii transmisyjnej, zwany dalej czujnikiem, który jest wykonany z dwu równoległych, niezolowanych metalowych prętów. Jeden z końców czujnika łączy się za pośrednictwem innej linii transmisyjnej (np. przewodu współosiowego), zwanej dalej fiderem, z generatorem impulsu napięcia elektrycznego. Skok doprowadzonego do fidera napięcia powoduje rozwinięcie się impulsu elektromagnetycznego, który biegnie tym fiderem w kierunku czujnika, osiąga w chwili t_1 jego początek i biegnie dalej, już w glebie, ku jego końcowi, do którego dociera w chwili t_2 .

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

Rysunek 2b ilustruje obraz impulsu oraz jego odbić widziany na ekranie dołączonego do fidera oscyloskopu. Impuls inicjalny dociera do trójkąta w chwili t_0 , biegnie dalej i podlega wspomnianym odbiciom, widocznym na ekranie w chwilach t_1 i t_2 . Im większa wilgotność gleby, θ , tym większa jej

przenikalność dielektryczna, ϵ , i tym mniejsza prędkość propagacji, v , impulsu w glebie, a więc tym dłuższy jest interwał czasu $t_2 - t_1$. Mierząc czas: $t = t_2 - t_1$, dzielący momenty odbić impulsu od początku i od końca czujnika oraz znając długość, L , czujnika, wylicza się, zgodnie z (15), wartość $\sqrt{\epsilon}$, a następnie liniowo związaną z nią objętościową wilgotność gleby, θ (patrz (13)).

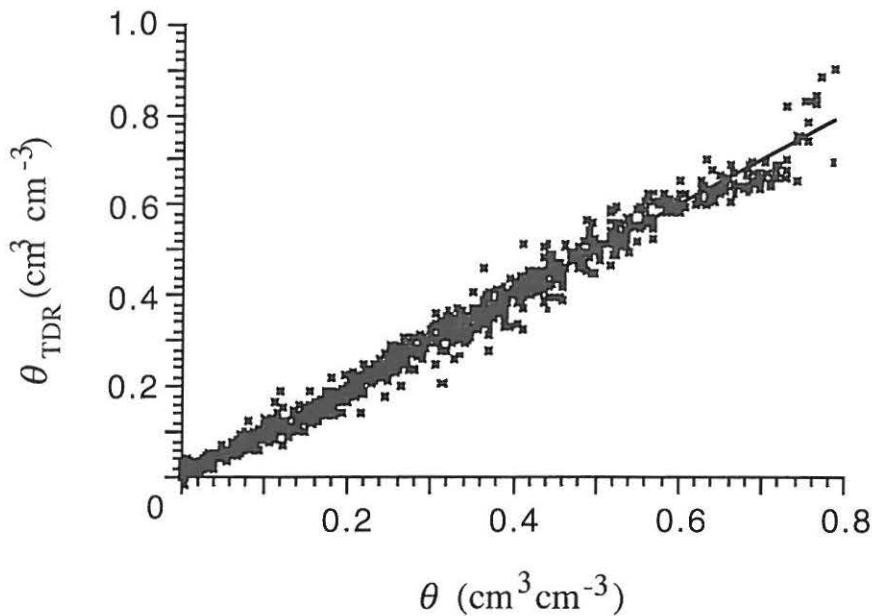
Strefę czułości czujnika, definiowaną jako bryła, poza obrębem której wilgotność nie wpływa na odczyt, wyznacza, w przybliżeniu, opisany na jego prętach cylinder o wysokości równej około 1.2 długości prętów i średnicy około trzykrotnie większej od ich rozstawienia, jak schemtycznie pokazano na Rys. 3.



Rys. 3. Strefa czułości czujnika TDR.

Fig. 3. Region of influence of the TDR sensor.

Rysunek 4 ilustruje porównanie pomiarów wilgotności objętościowej wykonanych techniką reflektometryczną, θ_{TDR} , z oznaczeniami grawimetrycznymi (metodą suszarkową), θ , dla 61 różnych gleb mineralnych i organicznych o gęstościach z przedziału $0.086 \leq \rho \leq 1.78$ (g cm^{-3}).



Rys. 4. Porównanie pomiarów wilgotności objętościowej gleby wykonanych techniką reflektometryczną, θ_{TDR} , z oznaczeniami grawimetrycznymi, θ , dla próbek o gęstościach $0.086 \leq \rho \leq 1.78$ (g cm^{-3}).

Fig. 4. Comparison of soil moisture data obtained using TDR, θ_{TDR} , with data obtained using the oven-drying method, θ , for samples having bulk densities $0.086 \leq \rho \leq 1.77$ (g cm^{-3}).

$\theta_{\text{TDR}} = 0.0001 + 1.00 \theta$, $R^2 = 0.9801$, $SD = 0.028$ (SD is standard deviation).

2.3.3. Reflektometryczny pomiar elektrycznej konduktywności gleby w stanie nieustalonym

TDR jest technologią, która stwarza możliwość jednoczesnego pomiaru wilgotności gleby, θ , jak również jej konduktywności elektrycznej, σ , tym samym czujnikiem. W oparciu o tę technikę można, oprócz warunkowanej wilgotnością prędkości propagacji impulsu elektromagnetycznego w glebie, równocześnie, tym samym czujnikiem, mierzyć elektryczną konduktywność gleby, σ , która jest warunkowana zarówno jej wilgotnością jak i zasoleniem. Impuls napięcia elektrycznego, U_{in} , który wchodzi do gleby, jest w momencie jej opuszczania, po odbiciu się od końca prętów i pokonaniu drogi $2L$, słumiony do poziomu U_{out} . Stosunek tych dwu amplitud wyznacza elektryczną konduktywność gleby [10, 94]:

$$\sigma = \frac{1}{120\pi L} \ln\left(\frac{U_{in}}{U_{out}}\right) \sqrt{\varepsilon} \quad (16)$$

gdzie ε - względna stała dielektryczna gleby.

Wyniki pomiaru elektrycznej konduktywności gleby metodą TDR oparte o pomiar tłumienia propagującego w niej impulsu elektromagnetycznego (EM) są obarczone nadmiernym błędem. Wydaje się, że błąd ten wynika z zaniedbania przyczynka strat dielektrycznych do ww. tłumienia oraz z nieliniowości związku pomiędzy współczynnikiem tłumienia fal elektromagnetycznych w glebie, γ , a elektryczną konduktywnością gleby, σ .

W procesie tłumienia, jakiemu podlega impuls na swej drodze w ośrodku materialnym, można wyróżnić trzy mechanizmy. Energia impulsu jest:

- wypromieniowywana w otoczenie,
- absorbowana przez składniki ośrodka w procesie ich dielektrycznej polaryzacji, gdzie zamienia się ona na ciepło związane z wzajemnym "tarcieniem" reorientowanych i odkształcanych w polu elektrycznym cząstek,
- zamieniana na ciepło w procesie przepływu prądu przewodzenia.

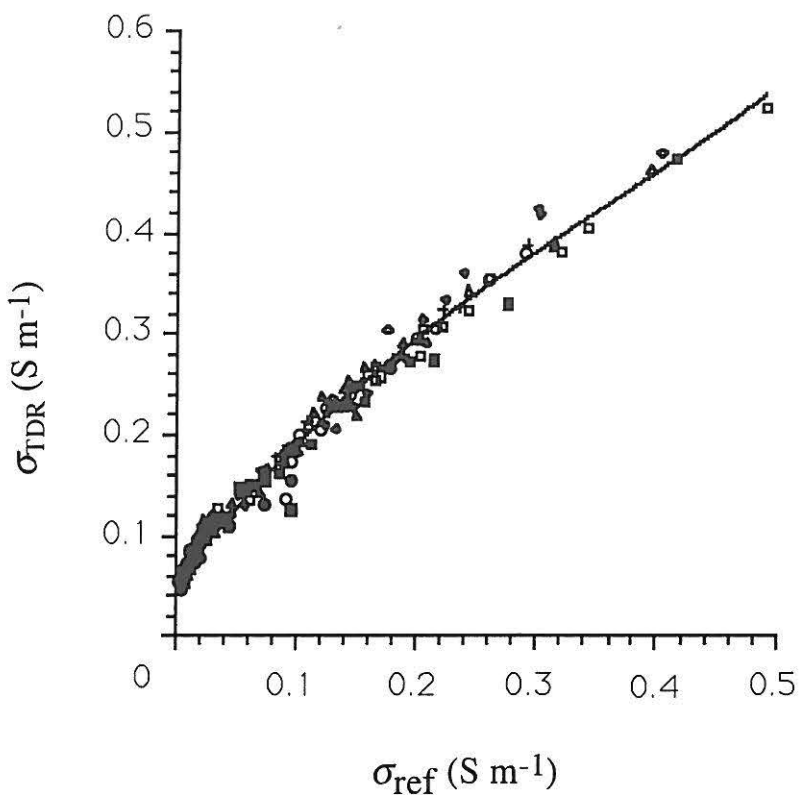
Ponieważ za straty w procesie dielektrycznej polaryzacji materiału odpowiedzialna jest urojona składowa jego przenikalności dielektrycznej, ϵ'' , to gdy $\sigma \rightarrow 0$ (jak w przypadku gleb suchych lub wilgotnych ale niezasolonych), ϵ'' dąży do skończonej, niezerowej, wartości. Wynika stąd, że współczynnik tłumienia fal EM, γ , ma wtedy skończoną, proporcjonalną do ϵ'' , wartość. Należy więc oczekiwać, że dielektryczne straty związane z ϵ'' wnoszą czytelny wkład do tłumienia propagujących się w glebie fal EM, prowadząc w ten sposób do błędnej interpretacji współczynnika tłumienia, γ , w kategoriach σ .

Przyjęto hipotezę, że wartości elektrycznej konduktywności gleby, σ , wyznaczanej na podstawie pomiaru współczynnika tłumienia impulsu EM w glebie są zawyżone o pozorną konduktywność gleby, σ_0 , wywodzącą się z tłumienia związanego ze stratami dielektrycznymi ϵ'' . By sprawdzić tę hipotezę badano związek pomiędzy współczynnikiem tłumienia fal EM w glebie, γ , a jej elektryczną konduktywnością, σ [64]. Badaniami objęto dziewięć gleb o różnej, leżącej w granicach $0.03 \div 0.68 \text{ g g}^{-1}$ zawartości frakcji ilu. Z każdej gleby sporządzono próbki o pięciu stopniach nawilżenia, leżących w przedziale od powietrznej suchości do nasycenia. Do nawilżania próbek stosowano roztwór KCl o siedmiu stężeniach z przedziału $0.00 - 0.30 \text{ mol l}^{-1}$.

Mierzono:

- przenikalność dielektryczną, ϵ (a zarazem wilgotność, θ_{TDR}) gleby metodą TDR,
- wilgotność gleby, θ , metodą termograwimetryczną (suszarkową),
- elektryczną konduktywność gleby, σ_{ref} , metodą porównawczą, SU (patrz 2.3.4)
- gęstość gleby, ρ , metodą termograwimetryczną.

Z otrzymanego zbioru 341 piątek: $\epsilon, \theta_{\text{TDR}}, \theta, \sigma_{\text{ref}}, \rho$, wyliczono współczynnik tłumienia fal EM w glebie, γ , a następnie elektryczną konduktywność gleby, σ_{TDR} , otrzymując w ten sposób podzbiór 341 par: $\sigma_{\text{TDR}}, \sigma_{\text{ref}}$.



Rys. 5. Porównanie reflektometrycznych pomiarów elektrycznej konduktywności gleby, σ_{TDR} , z pomiarami σ_{ref} wykonanymi metodą porównawczą SU dla próbek gleb o różnej zawartości ilu.

Fig. 5. Comparison of electrical conductivity of soil, σ_{TDR} , obtained using TDR with reference data, σ_{ref} , obtained using steady state method, SU, for soils having different clay content.

Zawartość ilu w g g⁻¹ (clay content in g g⁻¹): ● - 0.03, ▲ - 0.09, ◆ - 0.11, ■ - 0.32, + - 0.36, ○ - 0.41, △ - 0.56, ◇ - 0.62, □ - 0.68.

$$\sigma_{\text{TDR}} = 0.052 + 1.58 \sigma_{\text{ref}} - 2.22 \sigma_{\text{ref}}^2 + 2.08 \sigma_{\text{ref}}^3, R = 0.993.$$

Rysunek 5 ilustruje zależność $\sigma_{\text{TDR}}(\sigma_{\text{ref}})$. Widać, że zależność ta nie wykazuje symetrii 1:1. Wpasowanie w powyższy zbiór wielomianu umożliwia korektę jego symetrii, czyniąc reflektometryczną metodę pomiaru elektrycznej konduktywności gleby przydatną.

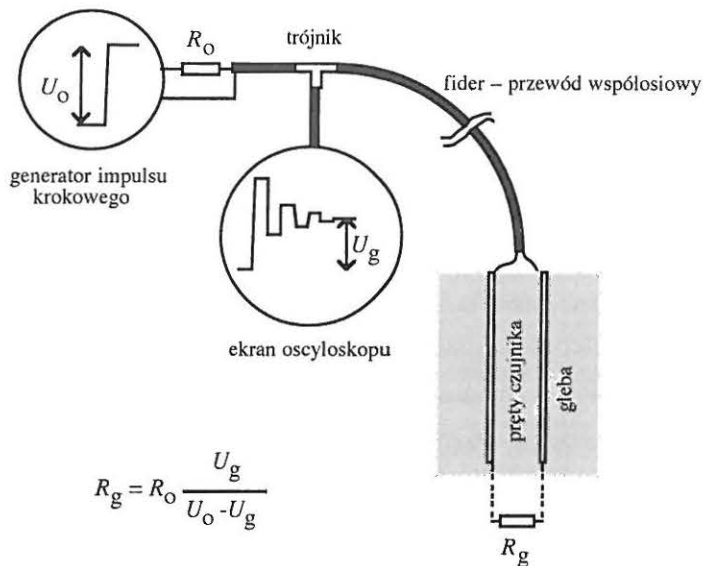
2.3.4. Reflektometryczny pomiar elektrycznej konduktywności gleby w stanie ustalonym

Alternatywą w stosunku do reflektometrycznej metody pomiaru elektrycznej konduktywności gleby, σ , opartej o pomiar współczynnika tłumienia, γ , jest reflektometryczna metoda stanu ustalonego, TDR_{SU} , z zastosowaniem impulsu krokowego, gdzie podstawą oceny σ jest podział napięcia elektrycznego na umieszczonym w glebie czujniku i połączonym z nim w szereg oporniku. Pomiar z zastosowaniem TDR_{SU} polega na zarejestrowaniu spadku napięcia na czujniku z opóźnieniem rzędu 10^{-7} s, tzn. na tyle późno, by napięcie w sondzie już się ustaliło a polaryzacja elektrochemiczna jeszcze się nie rozwinęła.

Rysunek 6 ilustruje zasadę pomiaru. Układ pomiarowy jest zasilany impulsem krokowym o napięciu U_0 . W stanie ustalonym, tzn. po zaniku odbić i po naładowaniu się pojemności układu (głównie pojemności fidera), czujnik stanowi skupione obciążenie rezystywne, R_g , i napięcie w linii osiąga wartość U_g , wprost proporcjonalną do mierzonej oporności R_g układu prętów w glebie. Znając U_0 , R_0 i mierząc U_g można policzyć R_g :

$$R_g = R_0 \frac{U_g}{U_0 - U_g} \quad (17)$$

gdzie R_0 jest opornością wewnętrzną generatora impulsu.



Rys. 6. Zasada reflektometrycznego pomiaru elektrycznej konduktywności gleby metodą TDR_{SU}.

Fig. 6. Principle of TDR_{SU} determination of the soil electrical conductivity.

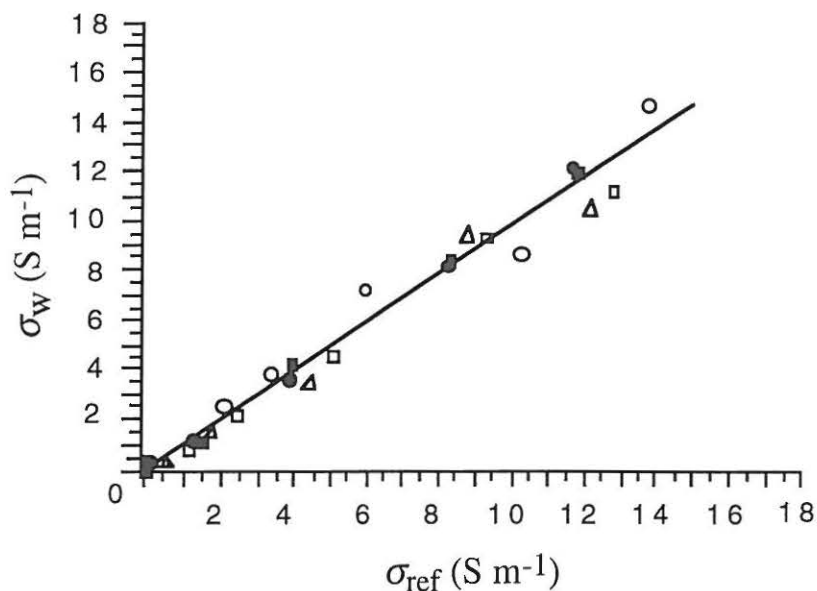
Praktycznie napięcie U_g mierzy się z opóźnieniem w stosunku do momentu generacji impulsu wynoszącym około $0.1 \div 10 \mu s$, kiedy odbicia już zanikły, pojemność fidera naładowała się do wartości U_g , zaś polaryzacja elektrochemiczna w układzie elektrodygleba nie zdążyła się jeszcze rozwinąć w zauważalnym stopniu.

Ponieważ wielkością interesującą jest elektryczna konduktywność gleby, σ , formułę konwersji $U_g(\sigma)$ wyznacza się umieszczając czujnik we wzorcowych roztworach KCl o różnych konduktywnościach.

2.3.5. Wyznaczanie zasolenia gleby na podstawie jej przenikalności dielektrycznej oraz konduktywności elektrycznej

Zauważono, że pochodna $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ nie zależy od wilgotności w przedziale od około 0.2 do nasycenia. Zależy ona natomiast od elektrycznej konduktywności obecnego w glebie elektrolitu (“wody glebowej”), σ_w , która jest przyjętą miarą zasolenia gleby [50, 63, 67].

Do oceny względnego zasolenia gleby zaproponowano wskaźnik zasolenia $SX = \partial\sigma/\partial\varepsilon$, którego wartość, w przeciwieństwie do konduktywności elektrycznej σ , nie zależy od wilgotności gleby [63].



Rys. 7. Porównanie zasolenia, σ_w , wyznaczonego dyskutowaną metodą z zasoleniem realnym, σ_{ref} , dla próbek o wilgotnościach objętościowych $\theta > 0.20$: ○ - glina pylasta, □ - utwór pyłowy, ● - piasek rzeczny, ■ - piasek kwarcowy, △ - piasek gliniasty.

Fig. 7. Comparison of salinity data, σ_w , obtained using the discussed method with reference data, σ_{ref} , for samples having volumetric water contents $\theta > 0.20$: ○ - silty loam, □ - silt, ● - river sand, ■ - quartz sand, △ - loamy sand.

$$\sigma_w = -0.14 + 0.970\sigma_{ref}, R^2 = 0.9722, SD = 0.742.$$

Znaleziono, że na podstawie wskaźnika zasolenia, SX , oraz zawartości frakcji piasku, sc , można ocenić bezwzględną wartość zasolenia gleby, σ_w :

$$\sigma_w = \frac{SX}{0.00570 + 0.0000710 sc} \quad (18)$$

Rysunek 7 pokazuje porównanie zasolenia, σ_w , liczonego z powyższej formuły, z wyznaczonym metodą 4-elektrodową [72, 77], σ_{ref} .

Należy podkreślić, że możliwość jednoczesnego wyznaczania, potrzebnych do oceny zasolenia gleby, konduktywności elektrycznej oraz stałej dielektrycznej z tej samej objętości (strefy czułości), czyni technologię TDR szczególnie atrakcyjną.

3. POMIAR WILGOTNOŚCI WYBRANYCH MATERIAŁÓW ROŚLINNYCH METODĄ TDR

Jak wspomniano w 1.4.1 należy oczekiwać, że rozwiązania skuteczne w pomiarze wilgotności gleby, są również skuteczne w pomiarze wilgotności innych materiałów biologicznych o mniej, niż gleba, zróżnicowanej budowie, jak np. materiał roślinny. Niżej omówiono weryfikację reflektometrii czasowej w zastosowaniu do pomiaru wilgotności ziarna zbóż [54] oraz drewna [55].

3.1. Dielektryczny pomiar wilgotności ziarna zbóż

Konstrukcja reflektometrycznej sondy do pomiaru wilgotności ziarna została opisana w 8.2.3. Sonda składa się z fidera i czujnika. Fider jest odcinkiem transmisyjnej linii współosiowej, której rolą jest przesyłanie impulsu elektrycznego z generatora do czujnika i odwrotnie. Czujnikiem sondy jest odcinek linii współosiowej, stanowiący pojemnik na ziarno. Dielektrykiem wypełniającym przestrzeń pomiędzy wewnętrznym i zewnętrznym przewodem linii jest tutaj ziarno, wypełniające pojemnik (czujnik).

Nieciągłości impedancji sondy w złączu fidera z czujnikiem oraz na końcu pojemnika powodują częściowe odbicia impulsu. Czas dzielący impulsy odbite jest skorelowany z dielektryczną przenikalnością, a więc i wilgotnością badanego ziarna.

Badano związek pomiędzy dielektryczną przenikalnością ziarna pszenżyta, kukurydzy, jęczmienia, wyki, rzepaku i pszenicy, a jego wilgotnością [54]. Charakterystyki badanych próbek ziarna zawiera Tabela 1. Ponieważ porowatość, η , oraz gęstość, ρ , próbki zależą liniowo od jej wilgotności, θ , w tabeli podano odpowiednie, wiążące te wielkości, równania regresji.

Próbki ziarna o różnych wilgotnościach i równomiernym nawilżeniu uzyskano mieszając (mieszadłem elektrycznym) ziarno z wodą w odmierzonych proporcjach i pozostawiając je w pomieszczeniu o temperaturze 20 ± 3 °C na 2 doby.

Tabela 1. Wybrane właściwości badanego ziarna.

Table 1. Selected properties of the investigated grain.

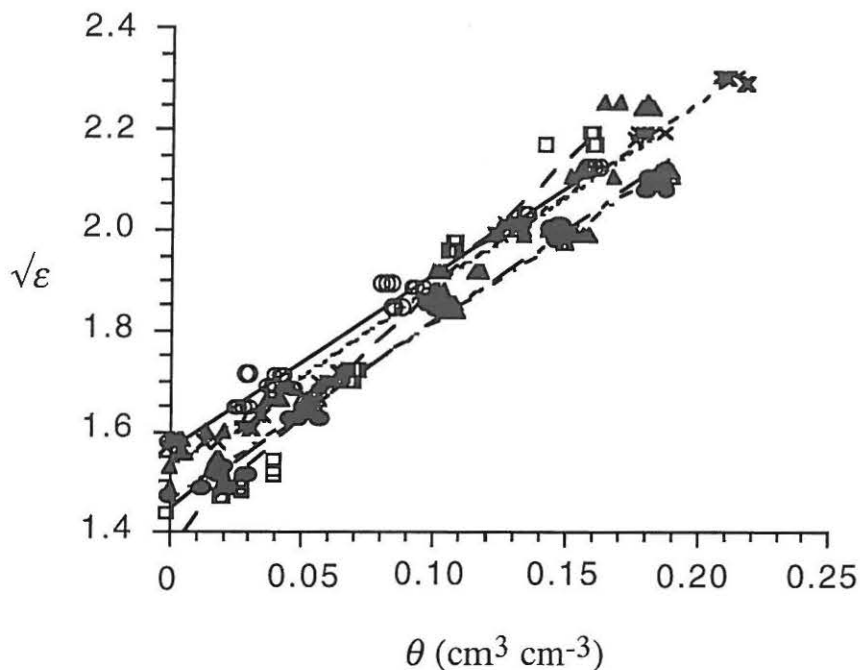
gatunek	<i>pH</i>	$\sigma_{V(5:1)}$ * dS m ⁻¹	porowatość próbki, η (cm ³ cm ⁻³)	gęstość próbki, ρ (g cm ⁻³)
pszenżyto	4.84	1.15	$\eta = 0.500 + 0.283\theta$ R= 0.8046	$\rho = 0.678 - 1.45\theta$ R= 0.9933
kukurydza	5.45	0.19	$\eta = 0.545 - 0.306\theta$ R= 0.5563	$\rho = 0.726 - 1.60\theta$ R= 0.9977
jęczmień	5.41	1.21	$\eta = 0.550 + 0.222\theta$ R= 0.6870	$\rho = 0.666 - 1.36\theta$ R= 0.9934
wyka	5.95	2.42	$\eta = 0.419 + 0.270\theta$ R= 0.8680	$\rho = 0.835 - 1.53\theta$ R= 0.9947
rzepak	5.94	1.09	$\eta = 0.386 + 0.492\theta$ R= 0.9055	$\rho = 0.665 - 1.27\theta$ R= 0.9956
pszenica	5.01	1.18	$\eta = 0.486 + 0.586\theta$ R= 0.9592	$\rho = 0.752 - 2.01\theta$ R= 0.9871

* elektryczna konduktywność ekstraktu wodnego uzyskanego ze zmieszania próbki z wodą w proporcjach 5 części (wagowych) wody na jedną część próbki.

Wypełniając pojemnik sondy badanym ziarnem mierzono czas propagacji impulsu wzdłuż tego pojemnika (czujnika), stosując zestaw TDR

omówiony w 8.2, a następnie wyznaczano przenikalność dielektryczną ziarna, ϵ , zgodnie z:

$$\sqrt{\epsilon} = t \frac{c}{2L} \quad (19)$$



Rys. 8. Zależność przenikalności dielektrycznej, ϵ , badanego ziarna od jego wilgotności objętościowej, θ , oraz równania regresji $\sqrt{\epsilon}(\theta)$ dla poszczególnych gatunków ziarna.

Fig. 8. Relations between dielectric constant, ϵ , and volumetric water content, θ , and lines of $\sqrt{\epsilon}(\theta)$ regression for the investigated cereal grains.

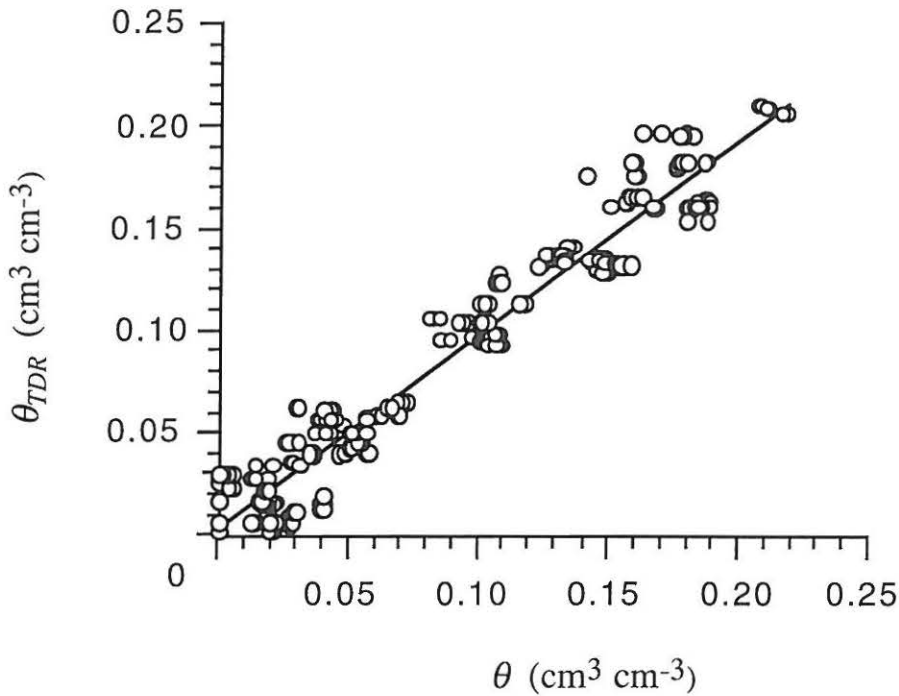
- pszenica (wheat): $\sqrt{\epsilon} = 1.56 + 3.46\theta$; $R = 0.994$; $SD = 0.021$
- □ - rzepak (rape): $\sqrt{\epsilon} = 1.37 + 5.11\theta$; $R = 0.999$; $SD = 0.038$
- ✕ - wyka (vetch): $\sqrt{\epsilon} = 1.52 + 3.67\theta$; $R = 0.995$; $SD = 0.029$
- jęczmień (barley): $\sqrt{\epsilon} = 1.44 + 3.68\theta$; $R = 0.996$; $SD = 0.022$
- ▲ - pszenżyto (Triticale): $\sqrt{\epsilon} = 1.46 + 3.55\theta$; $R = 0.996$; $SD = 0.021$
- ▲ --- kukurydza (maize): $\sqrt{\epsilon} = 1.52 + 3.61\theta$; $R = 0.978$; $SD = 0.050$.

gdzie:

t - czas propagacji impulsu w ziarnie na drodze $2L$,

c - prędkość światła w próżni.

Rysunek 8 ilustruje zależność względnej stałej dielektrycznej od wilgotności dla badanych gatunków ziarna. Widać, że $\sqrt{\epsilon}$ i θ są, dla każdego gatunku ziarna odrębnie, silnie skorelowane zaś parametry regresji $\sqrt{\epsilon}(\theta)$ są dla poszczególnych gatunków ziarna różne.



Rys. 9. Porównanie wilgotności ziarna wyznaczonej techniką reflektometryczną, θ_{TDR} , na podstawie formuły konwersji wspólnej dla wszystkich badanych gatunków z wilgotnością wyznaczoną termogravimetrycznie. SD - dewiacja standardowa.

Fig. 9, TDR-determined moisture of grain, θ_{TDR} , versus that determined gravimetrically, θ , using oven-drying method. SD is standard deviation.

$\theta_{TDR} = 0.004 + 0.945\theta$, $R^2 = 0.9448$, $SD = 0.0153$.

Badanie wpływu gęstości próbki, ρ , oraz jej gęstości cząsteczkowej, $\rho_s = \rho/(1-\eta)$, na regresję $\sqrt{\varepsilon}(\theta)$ wykazało, że wpływ tych wielkości nie jest zasadniczym czynnikiem powodującym zróżnicowanie parametrów regresji $\sqrt{\varepsilon}(\theta)$. Uwzględnienie ρ i ρ_s zwiększyło wartość współczynnika korelacji, R , na trzecim miejscu po przecinku. Uwzględnienie wpływu porowatości próbki dawało rezultaty gorsze.

Znaleziono dla poszczególnych gatunków ziarna zbiory par $\sqrt{\varepsilon}, \theta$ połączono w jeden zbiór, wspólny dla wszystkich badanych gatunków, a następnie wyznaczono równanie ich regresji $\sqrt{\varepsilon}(\theta)$. Równanie to wykorzystano jako funkcję konwersji (kalibrację metody) do przeliczania zmierzonej reflektometrycznie przenikalności dielektrycznej, ε , ziarna na jego wilgotność objętościową, θ :

$$\theta = \frac{(\sqrt{\varepsilon} - 1.48)}{3.80} \quad (20)$$

Rysunek 9 ilustruje porównanie wilgotności objętościowej ziarna zmierzonej techniką reflektometryczną, θ_{TDR} , z wilgotnością objętościową wyznaczoną termograwimetrycznie, θ .

Widać, że chociaż TDR w zastosowaniu do elektrycznych pomiarów wilgotności ziarna jest metodą nieselektywną, tzn. wymagającą kalibracji odrębnej dla każdego gatunku, to ze względu na bliskie parametry równań regresji $\sqrt{\varepsilon}(\theta)$, można ją stosować z zaniechaniem kalibracji indywidualnej kosztem mniejszej dokładności pomiarów.

3.2. Dielektryczny pomiar wilgotności drewna

Konstrukcja reflektometrycznej sondy do pomiaru wilgotności drewna jest opisana w 8.2.2. Sonda składa się z fidera i czujnika. Fider jest odcinkiem transmisyjnej linii współosiowej, której rolą jest przesyłanie impulsu elektrycznego z generatora do czujnika i odwrotnie. Czujnik jest odcinkiem równoległej linii transmisyjnej zbudowanej z dwu równoległych prętów

stalowych, które wprowadza się do drewna tak, by jego strefa czułości była wypełniona badanym drewnem. Mechaniczne oraz elektryczne dopasowanie fidera i czujnika zapewnia płytka sprzęgająca, wykonana z dwustronnie pokrytego miedzią folią laminatu szklano-epoksydowego o grubości 1.5 mm. Sonda jest połączona z generatorem impulsu napięcia elektrycznego. Nieciągłości impedancji sondy w złączu fidera z czujnikiem oraz na końcu prętów czujnika powodują częściowe odbicia impulsu. Czas dzielący impulsy odbite (czas propagacji na długości prętów) jest skorelowany z dielektryczną przenikalnością, a więc i wilgotnością badanego drewna.

Badano związek pomiędzy dielektryczną przenikalnością drewna sosnowego, bukowego i dębowego, a jego wilgotnością [55]. Charakterystyki badanych próbek drewna ilustruje Tabela 2.

Tabela 2. Wybrane właściwości badanych próbek oraz parametry regresji $\sqrt{\epsilon(\theta)}$

Table 2. Chosen properties of the investigated woods and parameters of $\sqrt{\epsilon(\theta)}$ relation

gatunek	porowatość ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	gęstość próbki (g cm^{-3})	gęstość fazy stałej (g cm^{-3})	odczyn ekstraktu wodnego (pH)	konduktywność ekstraktu wodnego w 25 °C (dS m^{-1})	przesunięcie, <i>itc</i>	nacylenie, <i>slp</i>	R^2
sosna	0.681	0.398	1.25	5.60	0.10	1.36	5.75	0.9947
buk	0.659	0.757	2.22	5.69	0.27	1.62	5.80	0.9977
dąb	0.197	0.653	0.813	3.94	0.15	1.70	10.3	0.9856

Próbki drewna o różnych wilgotnościach i równomiernym nawilżeniu uzyskano w sposób opisany niżej. Drewno pocięto na prostopadłościenne klocki o wymiarach: 90 x 70 x 10 mm, po 20 klocków każdego gatunku. W środku każdego klocka wywiercono dwa otwory o średnicy 2 mm (Rys. 10). Połowę klocków zanurzono w naczyniu z wodą destylowaną i umieszczono w komorze próżniowej, gdzie, pod ciśnieniem ok. 20 mm Hg, zostały one nasycone wodą. Pozostałe klocki wysuszono w 105°C.

Klocki “mokre” (tzn. nasycone wodą destylowaną) i “suche” (tzn. wysuszone w 105°C) nakładano na pręty sondy (patrz Rys.10) w różnych proporcjach ilościowych, tak, by wysokość przygotowanej w ten sposób próbki była równa długości prętów czujnika. By uniemożliwić wymianę wody pomiędzy próbką a jej otoczeniem obie grupy klocków, tzn. mokrych oraz suchych, zawijano w folię poliuretranową cienką na tyle, by jej obecność nie zaburzała pomiaru.

Wilgotność, θ , przygotowanej w ten sposób próbki wynosiła:

$$\theta = \eta \frac{N_m}{N} \quad (21)$$

gdzie:

η - porowatość drewna (równa jego wilgotności w nasyceniu wodą)

N_m - ilość klocków mokrych

N - ilość klocków w próbce (mokrych i suchych)

Instalację sondy TDR w próbce ilustruje Rys.10.

Stosując zestaw TDR (patrz 8.2.) mierzono czas propagacji impulsu w drewnie o różnej wilgotności, skąd wyznaczano jego przenikalność dielektryczną, ϵ , zgodnie z:

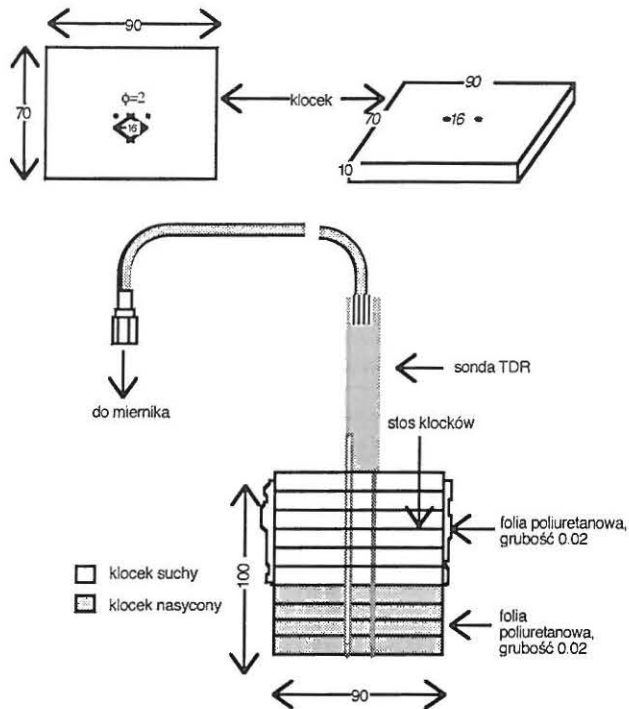
$$\sqrt{\epsilon} = t \frac{c}{2L} \quad (22)$$

gdzie:

t - czas propagacji impulsu w drewnie na drodze $2L$,

c - prędkość światła w próżni,

L - długość prętów czujnika.



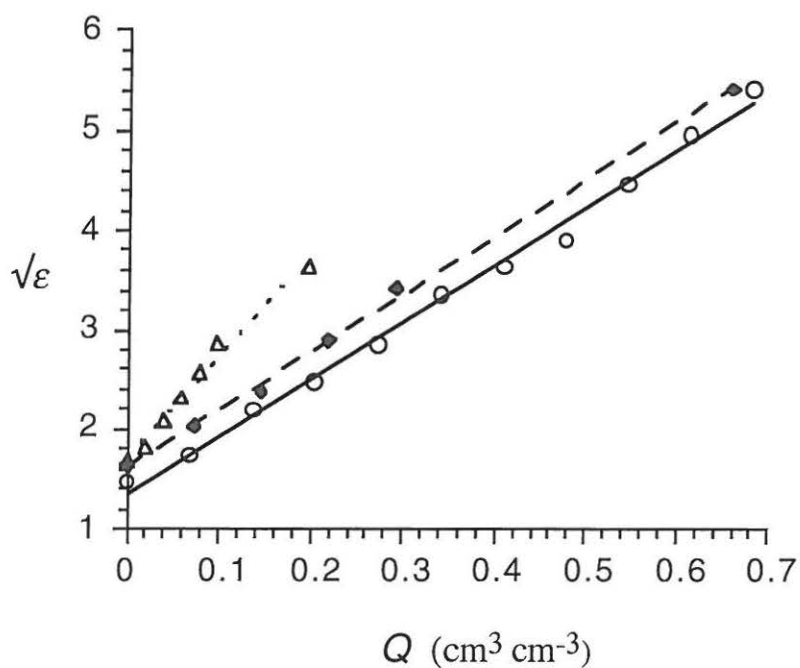
Rys. 10. Instalacja sondy TDR w próbce drewna o kontrolowanej wilgotności. Wilgotność stosu jest średnią ważoną z wilgotności poszczególnych klocków. Wymiary w mm.

Fig. 10. Installation of the TDR probe in a sample of wood having determined moisture. Moisture of the pile is the weighted average determined by ratio of dry and saturated slices constituting the pile. Dimensions in mm.

Rysunek 11 ilustruje zależność dielektrycznej przenikalności badanego drewna od jego wilgotności. Parametry regresji $\sqrt{\epsilon(\theta)}$ dla badanych próbek są zawarte w Tabeli 2. Widać, że parametry te są dla poszczególnych gatunków drewna różne. Znalaziono, że przesunięcie, *itc*, oraz nachylenie, *slp*, diskutowanych regresji, są skorelowane z porowatością, η , badanych próbek:

$$itc = 1.80 - 0.47\eta, \quad R = 0.7187 \quad (23)$$

$$slp = 12.2 - 9.60\eta; \quad R = 0.9995 \quad (24)$$



Rys. 11. Zależność przenikalności dielektrycznej, ϵ , drewna od jego wilgotności, θ .

Fig.11. Relative dielectric constant, ϵ , versus moisture, θ , of wood.

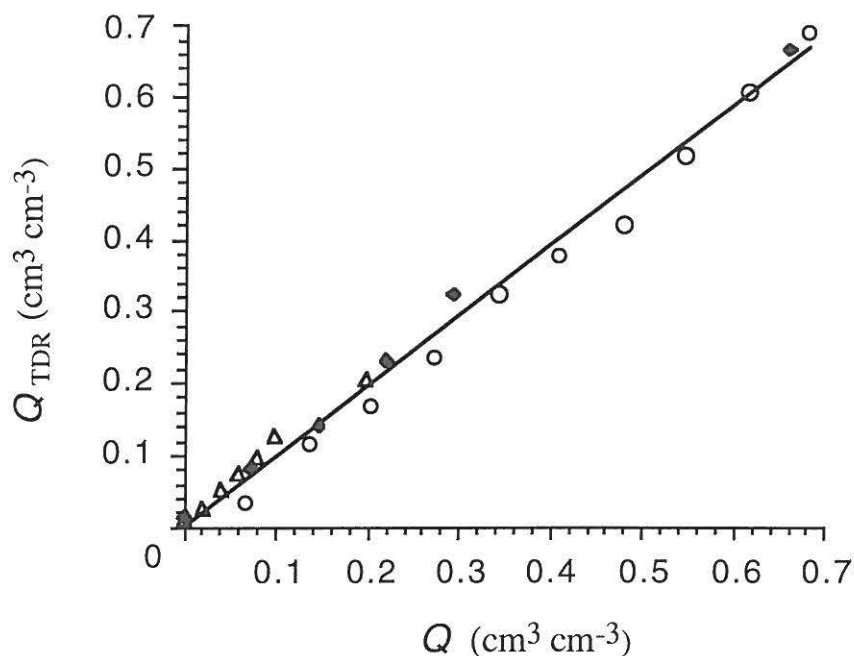
—○— sosna, $\sqrt{\epsilon} = 1.36 + 5.75\theta$, $R^2 = 0.9946$, $SD = 0.0900$

--△-- dąb, $\sqrt{\epsilon} = 1.70 + 10.3\theta$, $R^2 = 0.9857$, $SD = 0.0813$

-◆- buk, $\sqrt{\epsilon} = 1.62 + 5.80\theta$, $R^2 = 0.9978$, $SD = 0.0649$.

Zakładając, że związek $\sqrt{\epsilon}(\theta)$ ma taki sam charakter jak dla gleby, tzn:

$$\sqrt{\varepsilon} = itc + slp\theta \quad (25)$$



Rys. 12. Porównanie wilgotności drewna zmierzonej techniką reflektometryczną, θ_{TDR} , z wyznaczoną termogravimetrycznie, θ . Legenda jak na Rys. 11. *SD* - dekiacja standardowa.

Fig. 12. Comparison of moisture of wood determined using TDR, θ_{TDR} , with that determined gravimetrically, θ , using the oven-drying method. Legend the same as in Fig. 11. *SD* is standard deviation.

$$\theta_{\text{TDR}} = 0.0001 + 1.006\theta, R^2 = 0.9924, SD = 0.019.$$

wyznaczono formułę przetwarzania dla reflektometrycznego pomiaru

wilgotności drewna (równanie kalibracji):

$$\theta_{\text{TDR}} = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1.80 + 0.47\eta}{12.2 - 9.60\eta} \quad (26)$$

gdzie θ_{TDR} jest wilgotnością objętościową drewna wyznaczoną metodą reflektometryczną.

Rysunek 12 ilustruje porównanie wilgotności objętościowej drewna zmierzonej techniką reflektometryczną, θ_{TDR} z wyznaczoną termo grawimetrycznie, θ . Widać, że jeśli znana jest porowatość próbki, to TDR w zastosowaniu do elektrycznych pomiarów wilgotności rozważanych tu gatunków drewna jest metodą selektywną, tzn. nie wymagającą kalibracji odrębnej dla każdego gatunku.

W celu wdrożenia omawianej metody badania przydatności TDR do pomiaru wilgotności drewna należy kontynuować, aby:

- dopełnić pokazane tu wstępne wyniki badań o pozostałe, ważne ze względów przemysłowych, gatunki drewna.
- opracować powierzchniową, bezprętową sondę TDR, by pomiary nie wymagały wiercenia otworów w badanej próbce.

4. ELEKTRYCZNY POMIAR POTENCJAŁU WODY

Potencjał wody można ogólnie zdefiniować jako energię wiążącą jej jednostkową ilość. Wyznacza się go pośrednio, poprzez pomiar wybranej, warunkowanej tą energią, mierzalnej bezpośrednio wielkości fizycznej, jak ciśnienie kapilarne wody, wilgotność substancji porowatej w równowadze termodynamicznej z wodą, wilgotność powietrza glebowego w równowadze termodynamicznej z wodą, temperatura zamarzania wody i inne.

Czujniki stosowane w monitoringu potencjału wody w glebie muszą być przystosowane do pracy w polu. Popularne w polowych pomiarach potencjału wody tensjometry ciśnieniowe (gdzie ciśnienie wody w oddzielonej porowatą

przegrodą komorze równoważy się z ciśnieniem kapilarnym wody w glebie) działają w ograniczonym zakresie $1 \div 2.90$ pF, przy czym nie mierzą one potencjału całkowitego, a tylko jego składową matrycową, związaną z ciśnieniem kapilarnym wody w glebie [71].

W związku z rozwojem modeli przenoszenia masy i energii w glebie narasta potrzeba uwzględniania potencjału całkowitego o wartościach większych, 6 pF i więcej, tak więc ograniczone możliwości tensjometru ciśnieniowego przestają wystarczać.

Alternatywą jest psychrometryczny czujnik względnej wilgotności powietrza glebowego, H , z której, w warunkach równowagi termodynamicznej pary wodnej z wodą ciekłą obecną w matrycy glebowej, można wyznaczyć potencjał wody zgodnie z formułą Schofielda [76]:

$$\Psi(\text{pF}) = 6.502 + \log(2 - \log H) \quad (27)$$

Jednak, przeciwnie do tensjometru ciśnieniowego, czujnik psychrometryczny reaguje na zmiany potencjału wody w górnym zakresie wartości, powyżej 4 pF. Zatem, w pożądanym zakresie pomiaru potencjału w warunkach polowych, $0 \div 6$, pF istnieje przedział $2.90 \div 4.00$ pF, dla którego brak polowego czujnika.

Nadzieję rozwiązania problemu pokłada się w stosowaniu bloczków porowatych które, w warunkach równowagi termodynamicznej z glebą, nawilżają się do wartości wynikającej z charakterystyki retencji wody w materiale bloczka, aż do momentu wyrównania się potencjału wody w bloczku i w glebie. Tak więc mierząc wilgotność bloczka, można, w oparciu o krzywą retencji wody w jego materiale, wyliczyć potencjał zawartej w nim wody (równy potencjałowi wody w glebie).

Zagadnienie sprowadza się zatem do elektrycznego pomiaru wilgotności porowatego materiału w równowadze termodynamicznej z glebą. Wilgotność tę próbuje się wyznaczać się mierząc elektryczną przewodność materiału bloczka [71]. Jednak elektryczna przewodność materiału bloczka jest warunkowana nie tylko ilością zawartej w nim wody, lecz również jej

zasoleniem, tak więc bloczki porowate w zastosowaniu do pomiaru potencjału wody w glebach zasolonych nie spełniają oczekiwań.

W związku z powyższym nasuwa się spostrzeżenie, że metodę bloczków porowatych można uniezależnić od zasolenia gleby mierząc ich wilgotność metodą dielektryczną z zastosowaniem TDR, gdzie elektryczna konduktywność wody, a więc jej zasolenie, praktycznie nie wpływa na wynik pomiaru.

Niżej opisano próbę zastosowania dielektrycznych sond, elektropojemnościowej oraz reflektometrycznej, do pomiaru potencjału wody w glebie, które opracowano oraz zweryfikowano w ramach Projektu Badawczego 5 S306 009 06 Komitetu Badań Naukowych.

4.1. Dielektryczny pomiar potencjału wody w glebie

Skonstruowano dielektryczne sondy, elektropojemnościową oraz reflektometryczną, TDR i zweryfikowano ich przydatność w zastosowaniu do elektrycznego pomiaru potencjału wody w glebie.

Pomiary z zastosowaniem sondy elektropojemnościowej oraz sondy TDR były wykonywane odpowiednio mostkiem pojemności Meratronik C-315 oraz zestawem TDR do reflektometrycznego wyznaczania przenikalności i konduktywności elektrycznej gleby (patrz 8.2). Porównawcze wartości potencjału wody wyznaczono na podstawie krzywej retencji wody w glebie. Wilgotność gleby mierzono sondą TDR do pomiaru wilgotności i zasolenia (patrz 8.2.1).

4.1.2. Sonda elektropojemnościowa

Podstawą pomiaru potencjału wody w glebie przy pomocy sondy elektropojemnościowej jest związek pomiędzy potencjałem wody, Ψ , a względną prężnością jej pary, $e/e_0 = H$. W warunkach równowagi termodynamicznej:

$$\Psi = \frac{RT}{V_0} \ln \frac{e}{e_0} = \frac{RT}{V_0} \ln H \quad (28)$$

gdzie:

R - stała gazowa równa $8.314 \text{ (J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$,

T - temperatura (K),

V_0 - objętość molowa wody ($\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}$),

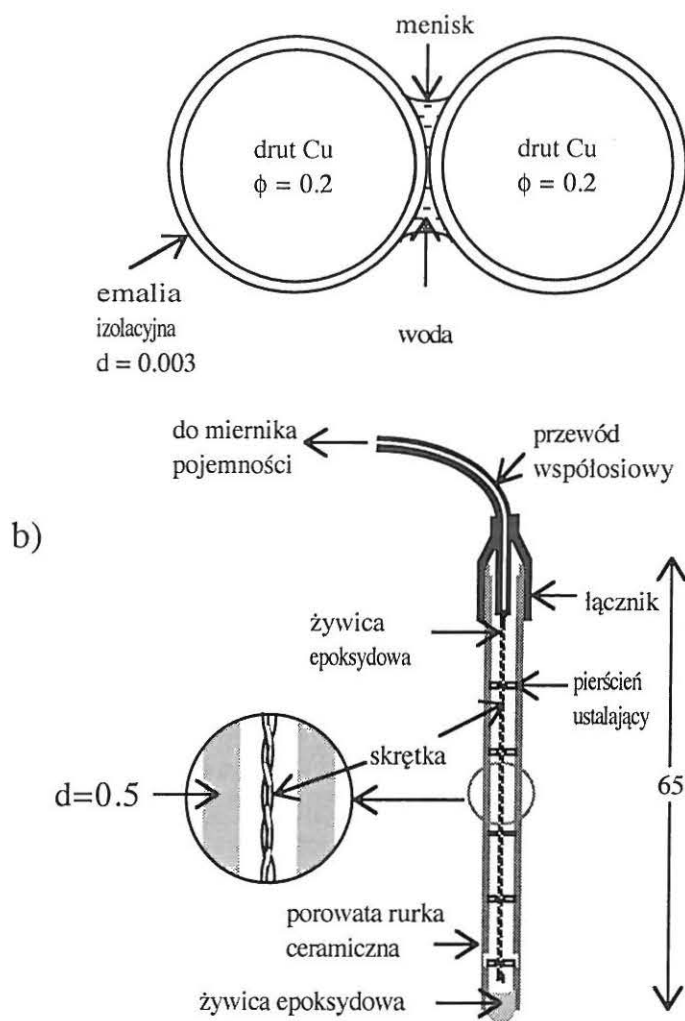
H - względna wilgotność powietrza w glebie.

W glebie, gdzie powietrze pozostaje bliskie nasycenia parą wodną w prawie całym zakresie zmian jej wilgotności, na stykach ziarn fazy stałej gleby zachodzi proces kondensacji pary wodnej, któremu towarzyszy gromadzenie się wody oddzielonej od powietrza meniskiem. W warunkach równowagi termodynamicznej krzywizna tego menisku jest jednoznacznie związana ze względną prężnością pary wodnej nad meniskiem, a więc i potencjałem wody, zgodnie z (28).

Sonda elektropojemnościowa do pomiaru potencjału wody składa się z fidera (przewodu łączącego czujnik z miernikiem) oraz z czujnika. Konstrukcja sondy jest modyfikacją hygrometru kapilarnego, dostosowaną do badań w laboratorium [45, 47].

Zasadę konstrukcji oraz działania czujnika ilustruje Rys. 13. Czujnikiem jest skrętka dwu emaliowanych drutów miedzianych, które są od siebie galwanicznie odizolowane. Ceramiczna rurka chroni czujnik od mechanicznego kontaktu z glebą. Pomiędzy drutami skrętki występuje niewielka pojemność elektryczna. Jeśli sonda znajduje się w wilgotnym powietrzu, wtedy na styku drutów czujnika zachodzi proces kondensacji pary wodnej, któremu towarzyszy gromadzenie się wody oddzielonej od powietrza meniskiem. W warunkach równowagi krzywizna tego menisku jest jednoznacznie związana ze względną prężnością pary wodnej, a więc z potencjałem wody.

Zatem geometria czujnik-woda jest równoważna geometrii faza stała-woda i dlatego w warunkach równowagi termodynamicznej ilość zgromadzonej w czujniku wody (tzn. wilgotność czujnika) zależy od jej

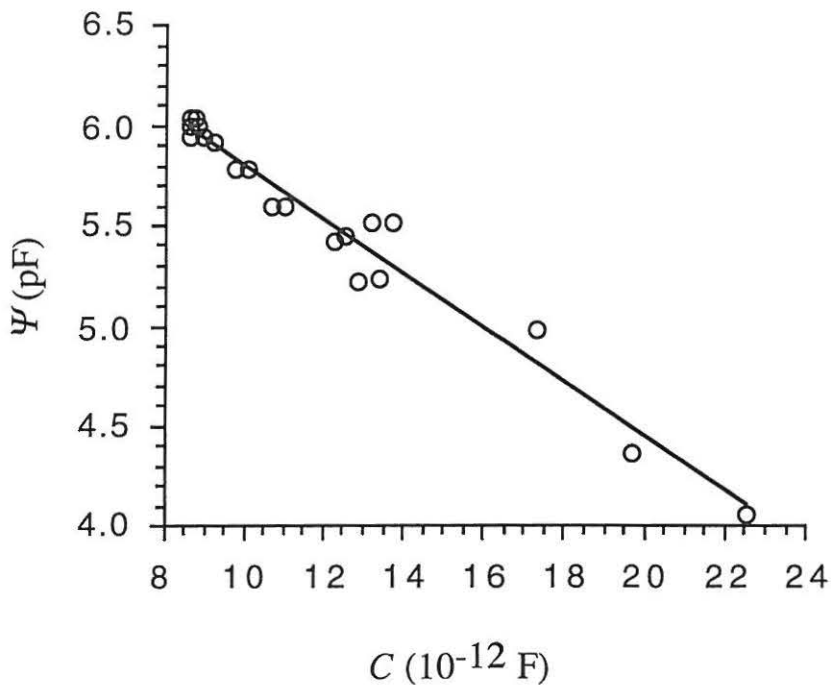


Rys. 13. Elektropojemnościowy czujnik sondy do pomiaru potencjału wody. a) przekrój poprzeczny - zasada działania, b) przekrój podłużny - zasada konstrukcji. Wymiary w mm.

Fig. 13. Electrocapacitive sensor for water potential. a) cross-section - principle of operation, b) longitudinal section - principle of design. Dimensions in mm.

potencjału. Ponieważ woda posiada dużą przenikalność dielektryczną, to im

więcej wody gromadzi się na styku drutów czujnika, tym większa jest jego wilgotność a więc i pojemność elektryczna. Ciąg zależności: potencjał - prężność pary - krzywizna menisku - wilgotność czujnika - elektryczna pojemność czujnika, pokazuje, że mierząc elektryczną pojemność, C , czujnika w badanym ośrodku w warunkach równowagi, można wyznaczyć potencjał wody, Ψ , w tym ośrodku. Ważną cechą diskutowanego czujnika jest jego wrażliwość na potencjał całkowity oraz pomijalna histereza zależności $C(\Psi)$.



Rys. 14. Zależność pomiędzy elektryczną pojemnością, C , skłębki czujnika i potencjałem wody, Ψ , wyznaczona dla czujnika unieszczonego nad roztworami KCl o różnych stężeniach.

Fig. 14. Relation between electrical capacitance, C , of the sensor strand and water potential, Ψ , for solutions of KCl of different concentration.

$$\Psi = 7.15 - 0.14C, R^2 = 0.9641.$$

By zweryfikować omawianą sondę, umieszczano ją w próbkach gleby

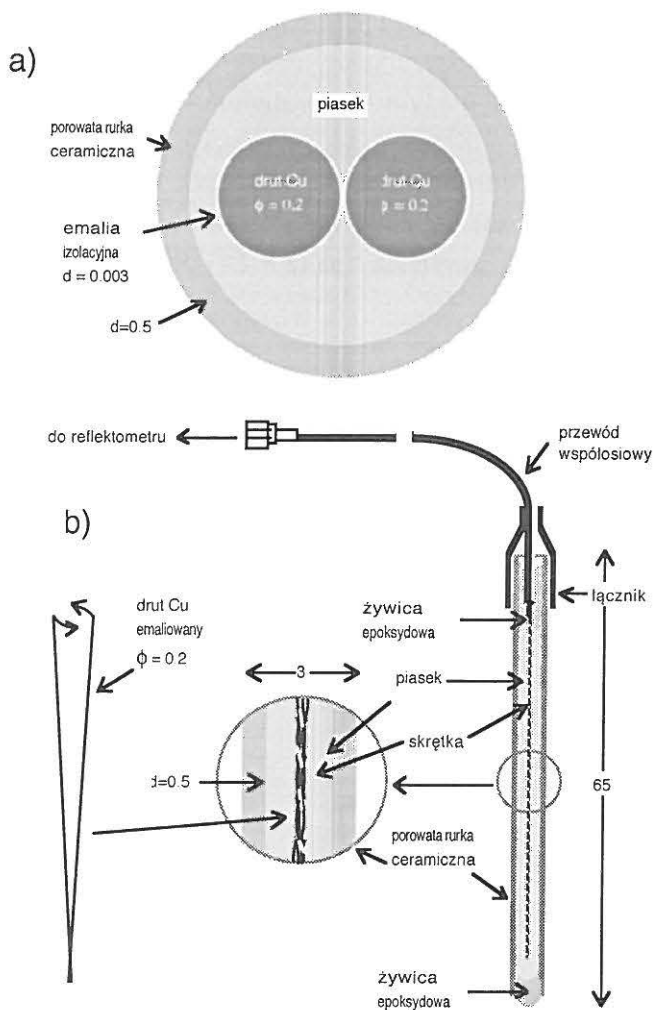
pyłowej o różnych wilgotnościach. Razem z nią instalowano w tych samych próbkach sondę TDR wilgotności i zasolenia (patrz 8.2.1) do równoległych pomiarów wilgotności, z której, na podstawie krzywej retencji wody w glebie, wyznaczano porównawcze wartości potencjału. Rejestrowano wyniki z obu sond podczas swobodnego wysychania próbki.

Rysunek 14 ilustruje związek pomiędzy elektryczną pojemnością, C , czujnika umieszczonego w parze wodnej o różnej prężności, zatem o różnym potencjale wody, Ψ , w temperaturze 20°C. Znaleziono, że dla $4 < \Psi < 6$ pF wartości Ψ i C są skorelowane liniowo, podczas gdy w zakresie potencjału $0 < \Psi < 3$ pF zależność $C(\Psi)$ nie wykazuje silnej korelacji.

4.1.3. Sonda TDR

Sonda TDR do pomiaru potencjału wody składa się z fidera (przewodu współosiowego łączącego czujnik z miernikiem) oraz z czujnika. Zasadę działania oraz konstrukcji czujnika ilustruje Rys. 15. Czujnikiem jest skrętka dwu emaliowanych drutów miedzianych, które są zwarte na końcu (odcinek drutu złożono w literę V i skręcono go, jak pokazuje Rys. 15 b). Skrętka pełni tutaj rolę symetrycznej linii transmisyjnej. By zapewnić stabilność geometrii czujnika, skrętkę umieszczono wewnątrz porowatej rurki ceramicznej. Całość wypełniono wybraną frakcją piasku, zwaną dalej wypełniaczem, wydzieloną drogą przesiewania przez odpowiednie sita.

Jeśli sonda jest zainstalowana, tzn. jej ceramiczna rurka jest w mechanicznym kontakcie z glebą, woda przepływa pomiędzy glebą a wypełniaczem sondy tak długo, aż potencjały wody w wypełniaczu i w glebie otaczającej czujnik wyrównają się. W warunkach równowagi termodynamicznej wilgotność wypełniacza odpowiada potencjałowi obecnej w nim wody. Ponieważ woda posiada dużą przenikalność dielektryczną, to im większa jest wilgotność wypełniacza tym większa jest jego przenikalność dielektryczna i tym mniejsza prędkość propagacji biegnącego w nim impulsu, a zatem dłuższy czas jego podróży wzdłuż skrętki.



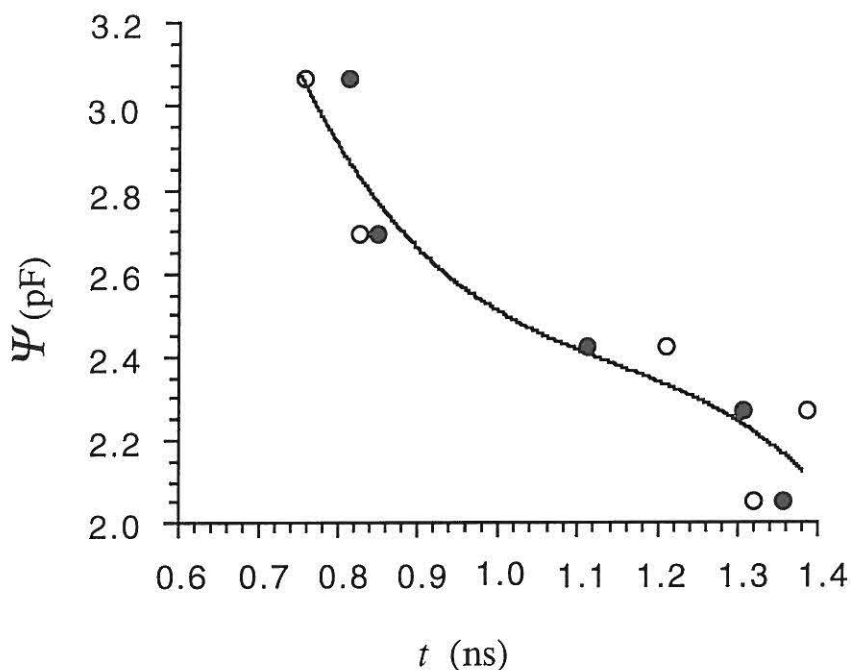
Rys.15. Reflektometryczny czujnik sondy TDR do pomiaru potencjału wody. a) przekrój poprzeczny - zasada działania, b) - przekrój podłużny - zasada konstrukcji. Wymiary w mm.

Fig. 15. TDR sensor for water potential. a) cross-section - principle of operation, b) longitudinal section - principle of design. Dimensions in mm.

Ciąg zależności: potencjał - wilgotność wypełniacza - przenikalność

dielektryczna wypełniacza - prędkość propagacji impulsu w wypełniaczu - czas propagacji impulsu w wypełniaczu na podwójnej długości czujnika, pokazuje, że mierząc w warunkach równowagi termodynamicznej prędkość albo czas propagacji impulsu w wypełniaczu sondy umieszczonej w badanym materiale, można wyznaczyć potencjał wody w tym materiale.

By zweryfikować omawianą sondę, umieszczano ją w próbkach gleby pyłowej o różnych wilgotnościach, tak jak w przypadku sondy elektropojemnościowej. Razem z nią instalowano w tych samych próbkach sondę TDR wilgotności i zasolenia (patrz 8.2.1) do równoległych pomiarów



Rys. 16. Czas propagacji, t , impulsu na podwójnej długości czujnika sondy TDR w zależności od potencjału wody, Ψ , dla dwu różnych uziarnień wypełniacza.

Fig. 16. Relation between the round-trip propagation time along the TDR sensor, t , and water matrix potential, Ψ , for variable textured fill-in.

○ - $0.50 < \phi < 0.25$; ● - $0.25 < \phi < 0.10$, $\psi = 13.2 - 26.8\theta + 22.7\theta^2 - 6.61\theta^3$, $R^2 = 0.8876$.
wilgotności, z której, na podstawie krzywej retencji wody w glebie,

wyznaczano porównawcze wartości potencjału. Rejestrowano wyniki z obu sond podczas swobodnego wysychania próbki.

Rysunek 16 ilustruje związek pomiędzy czasem propagacji impulsu na długości czujnika sondy a wartością potencjału wody. Do badań sporządzono sondy różniące się rozmiarami frakcji wypełniacza. Zastosowano wypełniacze o następujących granicznych średnicach równoważnych ziarn piasku: 1.00–0.50, 0.50–0.25, 0.25–0.10, 0.10–0.050 mm. Sondy instalowano w próbkach gleby pyłowej o wilgotnościach tak dobranych, by równomiernie pokrywały one pełny zakres zmian. Widać, że w zakresie wartości potencjału $2 < \Psi < 3$ pF korelacja $\Psi(t)$ jest wyraźna.

Podsumowując, należy zauważyć, że chociaż dyskutowane tu elektryczne czujniki potencjału wody cechują się ograniczonym zakresem pomiaru ($2 \div 3.2$ pF dla sondy reflektometrycznej oraz $4 \div 6$ pF dla sondy elektropojemnościowej) to zakresy te częściowo uzupełniają się. A zatem równoległe instalowanie obydwu czujników umożliwia pomiar potencjału wody w zakresie jego zmian, $2 < \Psi < 6$ pF.

5. ELEKTRYCZNE WYZNACZANIE NATLENIEŃ GLEBY

5.1. Parametry natlenienia gleby

Rolę tlenu w procesach glebowych omówili inni [23]. Przedstawiony tutaj materiał został ograniczony pod kątem dyskusji podstawowych zjawisk do rozmiaru niezbędnego by uczynić go wygodnym w czytaniu, bez sięgania do źródeł.

Dynamika procesów redoks (ich szybkość i kierunek) jest oceniana na podstawie pomiaru potencjału redoks, tzn. elektrodowego potencjału elektrycznego, który samorzutnie wykształca się na zanurzonej w wilgotnej glebie platynie.

Potencjalna gęstość strumienia dyfuzji tlenu w glebie, *ODR* (oxygen diffusion rate), jest oceniana na podstawie amperometrycznego pomiaru prądu elektrodowej reakcji redukcji cząsteczkowego tlenu, przebiegającej

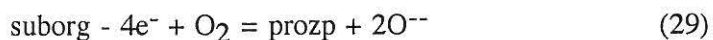
w roztworze glebowym na powierzchni umieszczonej w glebie elektrody platynowej i wywołanej przyłożonym do tej elektrody, ujemnym względem gleby, potencjałem elektrycznym 400 mV [49].

5.1.1. Pomiar potencjału redoks w glebie

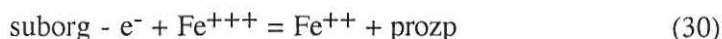
Genezę reakcji redoks można poglądowo przedstawić następująco: roztwór glebowy dąży, jak każdy układ materialny, do obniżenia energii chemicznej właściwą dla swej specyfiki drogą. Określone składniki roztworu glebowego, zwane reduktorami, wykazują tendencję do pozbywania się elektronów na rzecz innych, wykazujących tendencję do ich pobierania, zwanych utleniaczami, obniżając tą drogą energię chemiczną roztworu.

5.1.1.1. Fizykochemiczne podstawy pomiaru potencjału redoks

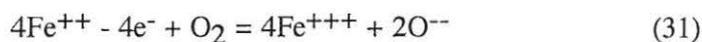
W trybie pomiaru potencjału redoks mierzona jest siła elektromotoryczna ogniwa elektrochemicznego złożonego z roztworu glebowego i dwu elektrod: wskaźnikowej z platyny, Pt, oraz porównawczej, nasyconej elektrody kalomelowej, NEK. Mechanizm samogeneracji elektrodowego potencjału redoks jest, w uproszczeniu, następujący: reakcje chemiczne typu redoks, którym towarzyszy przenoszenie elektronów z substancji utlenianej (reduktora) na zredukowaną (utleniacz) zachodzą w glebach nieustannie. Reduktorem (donatorem elektronów) jest w glebie głównie rozkładająca się substancja organiczna, zaś utleniaczem (akceptorem elektronów) obecny w roztworze glebowym tlen cząsteczkowy. Niżej pokazano (zaniedbując stosunki stechiometryczne) zasadę mechanizmu redukcji cząsteczkowego tlenu przez substancję organiczną, suborg, uwalniającą w procesie rozkładu elektrony, które w pierwszym etapie reakcji redukują go do postaci jonowej, mogącej wchodzić w dalsze reakcje z produktami rozpadu, prozp, i/albo z innymi składnikami roztworu:



Tlen, jako najbardziej agresywny składnik roztworu (jego cząsteczki pobierają elektrony łatwiej niż inne składniki roztworu), spełnia w stosunku do innych rolę osłony zapobiegającej ich redukcji. W warunkach niedoboru tlenu rolę utleniacza przejmują głównie związki żelaza, manganu, azotu i siarki, które, ulegając redukcji, powodują oglejenie z wszystkimi jego ujemnymi dla gleby konsekwencjami. Przykładem może być redukcja jonów żelazowych do żelazawych:



W warunkach dostatku tlenu zredukowane składniki roztworu glebowego utleniają się, uwalniając elektrony podobnie jak substancja organiczna w reakcji opisanej równaniem (29). Przykładem może być reakcja utleniania jonów żelazawych do żelazowych:



Procesy według (30) i (31) zachodzą równolegle z przewagą redukcji w warunkach niedoboru tlenu i utleniania w warunkach jego dostatku. Metal stosunkowo łatwo wymienia z otoczeniem elektrony swobodne. Elektroda z materiału "szlachetnego" (tzn. takiego, którego jony nie występują w roztworze), wprowadzona do gleby w której przeważają reakcje redukcji, pobiera elektrony od obecnych w roztworze glebowym składników redukujących, ładując się przez to ujemnie. Jeśli w glebie przeważają reakcje utleniania, elektroda oddaje elektrony utleniającym składnikom roztworu ładując się przez to dodatnio. Kształt i wymiary elektrody nie wpływają na wartość przyjmowanego przez nią potencjału. Gdyby roztwór glebowy zawierał jeden tylko składnik o różnym stopniu utlenienia (jedną parę redoks), potencjał przyjmowany przez elektrodę z platyny wynosiłby zgodnie z formułą:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_{\text{Ox}}}{C_{\text{red}}} \quad (32)$$

gdzie:

C_{Ox} i C_{red} - stężenia składników gleby występujących w formie utlenionej i zredukowanej jednocześnie (np. jonów Fe^{+++} i Fe^{++}),

E_0 - potencjał normalny elektrody, gdy $C_{\text{red}} = C_{\text{Ox}}$,

R - stała gazowa,

T - temperatura,

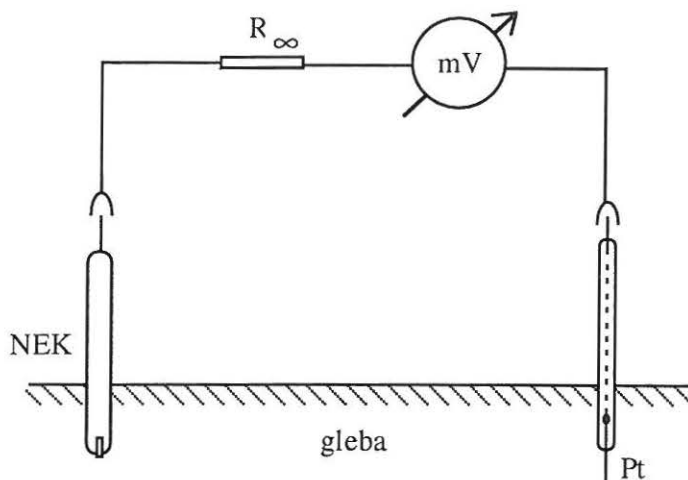
F - liczba Faradaya,

n - liczba przenoszonych w reakcji elektronów.

Widać, że znak i wartość potencjału (redoks) takiej elektrody zależy od jakości tworzącego daną parę redoks składnika (E_0), ilości przenoszonych w reakcji redoks elektronów oraz od stosunku stężeń składnika występującego jednocześnie w formie utlenionej i zredukowanej. Jeśli przyjąć, że czynnikiem zmiennym układu redoks w danej glebie są stosunki stężeń tworzących ten układ par, to dynamika potencjału redoks odzwierciedla kierunek i nasilenie dynamiki procesów redoks a więc i warunkującą je dynamikę natleniania tej gleby.

5.1.1.2. Zasada pomiaru potencjału redoks

Zasadę pomiaru potencjału redoks ilustruje Rys. 17. Szereg elektrochemiczny: Pt roztwór glebowy NEK tworzy ogniwo elektrochemiczne typu redoks. Siłę elektromotoryczną tego ogniwa mierzy się elektrometrycznie, tzn. bez czerpania z niego prądu elektrycznego, by nie zaburzać pomiaru skutkami elektrochemicznej polaryzacji elektrody wskaźnikowej. Praktycznie możliwy jest jedynie pomiar quasielektrometryczny, który realizuje się stosując woltomierz o możliwie dużej oporności wewnętrznej, symbolizowanej na rysunku szeregowym opornikiem R_∞ .



Rys. 17. Zasada pomiaru potencjału redoks. Szereg elektrochemiczny: Pt|elektrolit|NEK tworzy ogniwo elektrochemiczne typu redoks o sile elektromotorycznej, SEM, zależnej od stężeń składników tej samej jakości o różnym stopniu utlenienia. SEM tego ogniwa jest mierzona quasidektrometrycznie.

Fig. 17. Principle of the measurement of the oxidation-reduction potential. The electrochemical series : Pt|solution|NEK constitutes a redox type electrochemical cell having the electromotive force, EMF, conditioned by ratio of concentration of constituents appearing at different degree of oxidation.

5.1.2. Pomiar potencjalnej gęstości strumienia tlenu w glebie (ODR)

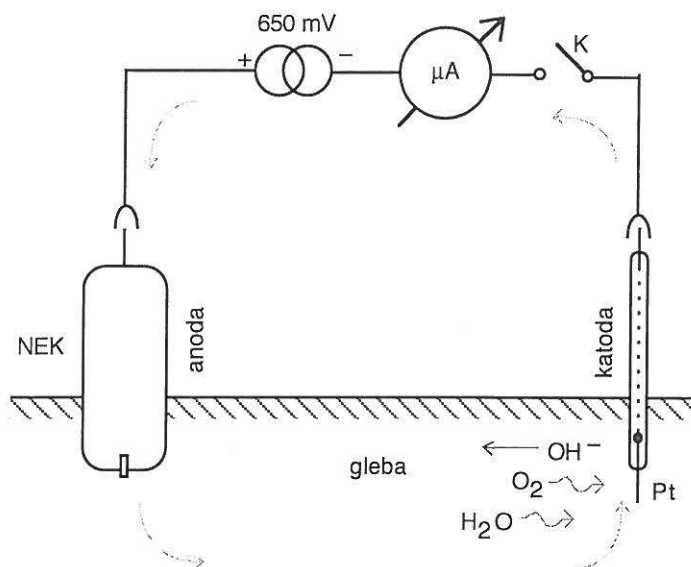
Czynnikami wyczerpującymi tlen w glebie są mikroorganizmy aerobowe, korzenie roślin i reakcje utleniania. Zapotrzebowanie na tlen jest pokrywane w całości wtedy, gdy może on dopływać z intensywnością nie mniejszą niż jest wyczerpywany. Ponieważ współczynnik dyfuzyjności tlenu w wodzie jest około 10^4 razy mniejszy niż w powietrzu, problem niedoboru tlenu występuje w glebach podmokłych, gdzie zapotrzebowanie na tlen najczęściej przewyższa możliwości jego dyfuzyjnego dopływu. Intensywność dyfuzji tlenu ku rozważanemu punktowi jest zatem, poza jego koncentracją w otoczeniu tego

punktu, uwarunkowana sumaryczną grubością błonek wodnych (manżetek) przez które dyfunduje, usytuowanych na i pomiędzy ziarnami stałej fazy gleby.

5.1.2.1. Fizykochemiczne podstawy pomiaru *ODR*

By określić potencjalny strumień tlenu w glebie, *ODR*, należy wytworzyć warunki, w których koncentracja tlenu w rozważanym punkcie w roztworze glebowym byłaby zerowa. Potencjalna intensywność dyfuzji, wywołana maksymalnym w takich warunkach gradientem koncentracji tlenu, może być wtedy określona drogą pomiaru gęstości strumienia jego dyfuzyjnego przepływu ku temu punktowi.

ODR w glebie określa się amperometrycznie, techniką zapożyczoną przez Lemona i Ericksona [37] z polarografii. Jako anihilator rozpuszczonego w roztworze glebowym tlenu cząsteczkowego stosuje się "punktową" elektrodę platynową, spolaryzowaną ujemnie w stosunku do roztworu napięciem 400 mV (650 mV względem NEK). W praktyce stosuje się różne rozwiązania konstrukcyjne elektrody (katody) *ODR*. Wersją "klasyczną" jest typowa konstrukcja, stosowana w laboratoryjnych badaniach potencjału roztworów redoks. Stanowi ją drut platynowy o średnicy 0.5 mm i długości 10 mm wystający z końca szklanej bagietki. Jej przydatność do badań w glebie jest niewielka ze względu na małą odporność mechaniczną platyny. Elektroda "ołówkowa" [42], gdzie drut platynowy kontaktuje z glebą jedynie powierzchnią swego przekroju poprzecznego, jest mechanicznie wytrzymała ale wymaga stosowania mikroamperomierza czułego odpowiednio do niskiej wartości mierzonego prądu redukcji, wynikającej z jej niewielkiej powierzchni aktywnej. Elektroda "wielokrotna" [85] zapewnia dostateczną odporność mechaniczną i większy, odpowiednio do krotności powierzchni aktywnej, prąd redukcji. Wadą takiej elektrody jest niemożność weryfikacji ilości aktualnie kontaktujących z roztworem glebowym obszarów aktywnych (nie wiadomo ile drutów Pt kontaktuje aktualnie powierzchnią swego przekroju z roztworem).



Rys. 18. Zasada pomiaru pomiaru *ODR*. Cząsteczkowy tlen jest wyczerpywany z roztworu glebowego z otoczenia katody z wydajnością ograniczoną jego dyfuzyjnym dopływem. Anihilatorem tlenu jest reakcja jego redukcji na Pt, zachodząca pod wpływem elektrycznego potencjału katody -650 mV. Przepływ prądu w obwodzie jest wynikiem redukcji tlenu na katodzie Pt.

Fig. 18. Principle of the measurements of *ODR* in the soil. Molecular oxygen is exhausted with the rate limited by its diffusive inflow from the soil solution in the neighbourhood of the Pt cathode under -650 mV potential. The current in the circuit results from reduction of oxygen at the Pt cathode.

Wadą wszystkich trzech rozwiązań jest zagęszczanie gleby w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni aktywnej każdej z elektrod, zachodzące podczas ich wprowadzania do gleby.

By zwiększyć reprezentatywność pomiaru, w praktyce stosuje się wiele (dziesięć lub więcej) katod jednocześnie.

5.1.2.2. Zasada Pomiaru *ODR*

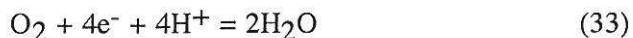
Rysunek 3 ilustruje zasadę pomiaru *ODR* metodą amperometryczną Lemona i Ericksona [37]. Po zamknięciu klucza K źródło napięcia polaryzu-

je katodę, Pt, potencjałem 650 mV ujemnym względem gleby. W układzie Pt|gleba powstaje wymuszone tym czynnikiem zewnętrznym pole elektryczne powodujące polaryzację przestrzenną. Obecne w elektrolicie (“wodzie glebowej”) kationy osiadają na katodzie bez wymiany ładunku. W układzie rozwija się wewnętrzne pole elektryczne o przeciwnym zwrocie, które kompensuje pole zewnętrzne [53]. Jeśli w wodzie glebowej brak rozpuszczonego tlenu cząsteczkowego, to po ustaleniu się równowagi (praktycznie 5÷20 minut) wypadkowe pole elektryczne w układzie jest bliskie zera i prąd elektryczny praktycznie nie płynie. Jeśli tlen występuje, redukuje się on na katodzie, wywołując przepływ proporcjonalnego prądu elektrycznego. Ten prąd redukcji, J , (odczytywany z mikroamperomierza μA) jest podstawą wyznaczania *ODR*.

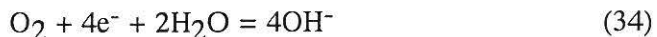
Absolutna wartość potencjału NEK wynosi +250 mV (w 10°C). Dlatego (zaniedbując pasożytnicze spadki napięcia na opornościach wewnętrznych źródła napięcia 650 mV, na NEK oraz na mikroamperomierzu) absolutna wartość skoku napięcia w na granicy Pt|gleba wynosi -400 mV. Jest ono zbyt małe by wywołać elektrolizę wody ale dostateczne aby wywołać elektrodową reakcję redukcji niektórych składników roztworu, głównie cząsteczek tlenu.

Najbardziej prawdopodobny, z wielu proponowanych [9, 4] mechanizm redukcji cząsteczkowego tlenu na platynie w roztworze wodnym jest następujący:

w środowisku kwaśnym:

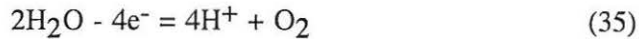


w środowisku obojętnym lub zasadowym:

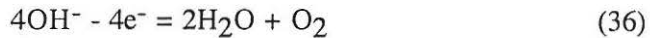


Mechanizm uzupełniających elektrodowych reakcji utleniania, zachodzących na granicy: anoda roztwór glebowy, zależy od materiału anody. Jeśli anoda nie ulega elektrolitycznemu rozpuszczaniu ich przebieg jest następujący:

w środowisku kwaśnym:



w środowisku obojętnym lub zasadowym:



Ponieważ reduktorem (donatorem elektronów) jest tu zasilana z obwodu pomiarowego katoda Pt, w obwodzie prądowym płynie zaznaczony strzałkami prąd elektryczny, J , proporcjonalny do intensywności reakcji redukcji tlenu. Jego nośnikami w glebie są, zależnie od kwasowości roztworu glebowego, dyfundujący ku katodzie Pt tlen cząsteczkowy oraz jony wodoru lub woda zaś ku anodzie woda lub jony hydroksylowe. Jakość nosników i kierunek ich dyfuzji dla przypadku środowiska obojętnego zaznaczono na Rys. 18.

Uogólniając, jeśli potencjał katody jest wyższy od potencjału elektrolizy wody ale niższy od zera wtedy prąd redukcji tlenu dominuje i przyczynki od jednoczesnej redukcji innych składników można pominąć. Prąd redukcji tlenu, J , jest wprost proporcjonalny do ODR , więc:

$$ODR = \frac{J}{S} k \quad (37)$$

gdzie:

J - natężenie prądu redukcji (A),

S - powierzchnia elektrody (m^2),

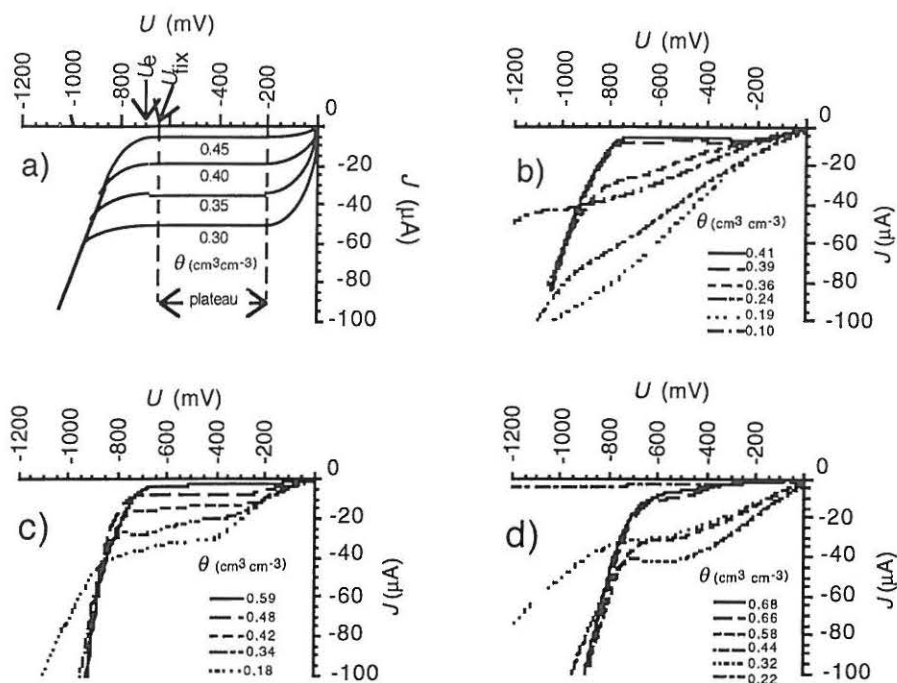
k - równoważnik elektrochemiczny, wyrażający masę substancji wydzielonej drogą elektrolizy przy przepływie ładunku 1C, równy dla tlenu $8.29\text{E}-5$ (g C^{-1}).

Należy zauważyć, że elektrycznie obojętne cząsteczki tlenu nie migrują w polu elektrycznym. Dopływ tlenu do katody jest wynikiem gradientu jego stężenia jest więc przepływem dyfuzyjnym. Jeśli katoda anihiluje tlen intensywniej od możliwości jego dopływu z otoczenia, wtedy wartość potencjału katody nie wpływa na prąd redukcji zaś jedynym jego ograniczeniem jest potencjalna gęstość strumienia tlenu w glebie, *ODR*.

Wychodząc z podstaw polarografii zakłada się, że wydajność omawianej reakcji [36, 37, 69, 79] jest dostatecznie duża by tlen cząsteczkowy mógł być wyczerpywany z otoczenia elektrody szybciej niż uzupełniany dyfuzyjnie. Natężenie prądu tej reakcji jest wtedy ograniczone jedynie intensywnością dyfuzyjnego dopływu tlenu cząsteczkowego poprzez glebę ku elektrodzie, jest więc miarą potencjalnego strumienia dyfuzji tlenu w glebie. Charakterystyka amperometryczna reakcji powinna zatem wykazywać plateau polarograficzne, tzn. prąd redukcji, J , nie powinien zależeć od potencjału katody, U , w granicach $-0.7 \div -0.2$ V. Rysunek 19 a ilustruje wyidealizowaną zależność prądu redukcji cząsteczkowego tlenu na katodzie Pt w glebie o różnym stopniu uwilgotnienia, a więc o różnej dyfuzyjności tlenu. Występowanie plateau $J(U)$ wskazuje, że w przedziale potencjału $-0.700 \div -0.200$ V czynnikiem ograniczającym prąd redukcji jest dyfuzyjność tlenowa gleby, *ODR*.

W warunkach praktycznych prąd redukcji molekularnego tlenu na platynowej katodzie znacząco zależy od jej potencjału w pełnym zakresie wilgotności gleby, tak więc plateau zależności $J(U)$ praktycznie nie występuje [5, 20, 52, 69]. Z tego powodu konieczną jest stabilizacja potencjału katody na umownym poziomie, U_{fix} , wyższym od potencjału elektrolizy wody. Wartość U_{fix} , nie została do tej pory ujednoczona i bywa arbitralnie wybierana z przedziału $-0.800 \div -0.480$ V [5], co utrudnia porównywanie danych pochodzących od różnych autorów.

Na Rys. 19 pokazano zależność $J(U)$ dla różnych wilgotności wybranych gleb. Widać, że w przedziale napięcia $-650 \div 0$ mV prąd redukcji cząsteczkowego tlenu, J , jest wyraźnie warunkowany przez wilgotność gleby, tak więc również przez jej dyfuzyjność, *ODR*. Można zauważyć, że jedynie dla



Rys. 19. Zależność prądu redukcji, J , tlenu w glebie o różnej wilgotności, θ , od potencjału, U , katody Pt. a) krzywa wyidealizowana, b) utwór pyłowy, c) gleba ilasta, d) gleba torfowa.

Fig. 19. Relationship between oxygen reduction current, J , and the Pt cathode polarizing potential, U , for soils having different moistures, θ . a) idealized curve, b) silt, c) clay, d) peat.

wilgotności bliskiej nasycenia występuje quasiplateau polarograficzne, podczas gdy dla pozostałych prąd redukcji wyraźnie zależy od potencjału katody i dlatego potencjał katody miernika musi być stabilizowany. Wydajność reakcji elektrodowej jest ograniczona nie tylko transportem reagentów ku elektrodzie ale i produktów od elektrody ku roztworowi, przy czym decydujący wpływ na tę wydajność ma najwolniejszy czynnik danej reakcji. W omawianym tu przypadku najwolniejszym czynnikiem jest dyfuzyjny odpływ z powierzchni

katody Pt jonów hydroksylowych, które częściowo adsorbują się na niej. Sądzi się [69, 79], że to zjawisko jest główną przyczyną braku polarograficznego plateau amperometrycznej charakterystyki reakcji redukcji tlenu.

5.2. Potencjał redoks oraz prąd redukcji tlenu jako wskaźniki natlenienia gleby

Ponieważ potencjał redoks zależy od składu roztworu glebowego, jego kwasowości i koncentracji poszczególnych, tworzących pary redoks, składników, interpretacja jego pomiarów jest ograniczona do kategorii jakościowych i opiera się na badaniach empirycznych. Tabela 3 ilustruje związek zaobserwowany [22] między wartością potencjału redoks, E , a warunkami natlenienia gleb.

Tabela 3. Potencjał redoks jako wskaźnik natlenienia
Table 3. Potential redox as the index of oxygenation

E (mV)	warunki natlenienia
$400 < E$	gleby utleniane
$100 < E < 400$	gleby średnio redukowane
$-100 < E < 100$	gleby redukowane
$-300 < E < -100$	gleby silnie redukowane

Ponieważ bezwładność procesów redoks (zwłoka w "odpowiedzi" nową równowagą elektrochemiczną na gwałtowną zmianę warunków natlenienia) może sięgać miesięcy, pomiar odzwierciedla raczej "kumulatywną historię" natlenienia gleby niż jego stan aktualny. Aktualne warunki natlenienia można natomiast ocenić na podstawie pomiaru *ODR*.

Dyskutowana metoda amperometrycznego pomiaru *ODR* jest kontrowersyjna. O jej niedoskonałości stanowią głównie:

- brak polarograficznego plateau amperometrycznej charakterystyki redukcji cząsteczkowego tlenu na umieszczonej w glebie platynie
- złożoność efektu "zatrutowania" katody Pt jonami hydroksylowymi nie pozwalająca na jego ilościowe uwzględnienie,

- niejasny udział dyfuzyjnego strumienia wody wydzielającej się podczas redukcji tlenu, który, drogą unoszenia, może zwiększać lub zmniejszać (zależnie od kwasowości gleby) dyfuzyjny dopływ tlenu do katody Pt.
- nieuniknione podczas instalacji katod Pt zagęszczanie gleby, które zmniejsza, w sposób niekontrolowany, jej dyfuzyjność tlenową.

Wymienione wady ograniczają stosowalność metody i klasyfikują ją w grupie metod półilościowych. Zakres interpretowalności pomiarów *ODR* sprowadza się zatem do kategorii jakościowych. Tabela 4 ilustruje empiryczny związek zaobserwowany [36] pomiędzy wartością *ODR* a warunkami wzrostu roślin.

Tabela 4. *ODR* jako wskaźnik warunków wzrostu roślin

Table 4. *ODR* as the index of plant growth conditions

<i>ODR</i> ($\times 10^{-8}$ g cm ⁻² min ⁻¹)	warunki wzrostu
<i>ODR</i> < 20	zahamowanie wzrostu roślin
20 < <i>ODR</i> < 50	zahamowanie niektórych
procesów metabolicznych	
50 < <i>ODR</i>	wzrost roślin niehamowany

Prąd redukcji, a więc i *ODR*, jest silnie uwarunkowany uwilgotnieniem. Przy wilgotności gleby z zakresu wartości potencjału wody większych od ok. $\Psi = 3.3$ pF metoda nie może być stosowana, gdyż ułamkowy udział powierzchni katody, częściowo tylko pokrytej, w tych warunkach, błoną roztworu glebowego, uniemożliwia interpretację pomiaru. Należy sądzić, że wartość *ODR* jest też uwarunkowana koncentracją tlenu poza zewnętrzną granicą warstwy zubożonej (tzn w dalszym otoczeniu katody Pt, odległym na tyle, że anihilacja tlenu na katodzie nie powoduje tam widocznych zmian koncentracji tlenu). Wynika stąd, że *ODR* nie jest parametrem gleby, ponieważ dla porównawczej oceny tlenowej dyfuzyjności gleb należałoby uwzględnić wilgotność przy której wykonano pomiar i koncentrację tlenu w glebie.

Należy zaznaczyć, że diskutowana metoda amperometrycznego pomiaru *ODR*, chociaż kontrowersyjna co do poprawności, nie ma jak dotąd alternatywy dla badań w polu.

6. ELEKTRYCZNY POMIAR TEMPERATURY GLEBY

6.1. Problem pomiaru temperatury

Przyjmijmy, że temperatura badanego ośrodka wynosi T . Ponieważ każdy termometr wskazuje wyłącznie temperaturę swego czujnika, T_C , to aby zmierzyć temperaturę tego ośrodka przy pomocy termometru, muszą być spełnione następujące warunki:

$$T_C = T' \quad (38)$$

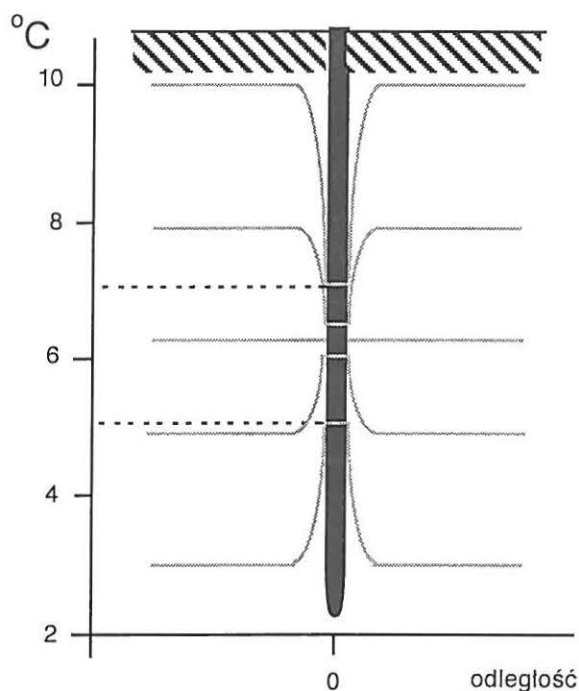
oraz:

$$T' = T \quad (39)$$

gdzie T' jest temperaturą w miejscu osadzenia czujnika.

Warunek (39) oznacza, że obecność termometru nie może zaburzać rozkładu temperatury w ośrodku. Warunek ten jest możliwy do spełnienia gdy czujnik termometru jest mechanicznie wyizolowany, tzn. nie przymocowany do żadnego korpusu. W większości przypadków praktycznych czujnik termometru musi być zintegrowany z jakimś korpusem, który umożliwia manipulowanie nim. Taki, w większości przypadków pionowo zainstalowany w profilu gleby, korpus stanowi mostek cieplny.

W większości zagadnień wymiany ciepła i masy w glebie zakłada się przepływ jednowymiarowy z pionowym kierunkiem strumienia. Jeśli przewodność cieplna korpusu jest większa od przewodności cieplnej badanej gleby wtedy jednowymiarowy ruch ciepła w glebie zamienia się w trójwymiarowy, gdzie pozioma składowa strumienia ciepła jest różna od zera. Ciepło zaczyna płynąć w poziomie, do i od korpusu. Dodatkowy przepływ ciepła w poziomie zniekształca pole temperatury wewnątrz korpusu termometru oraz w jego sąsiedztwie (Rys. 20). Wtedy, mimo spełnienia



Rys. 20. Zaburzenie pola temperatury w glebie spowodowane obecnością w jej profilu pionowego pręta, którego przewodność cieplna przewyższa cieplną przewodność gleby. Rozpiętość temperatury na długości pręta wynosi w jego środku $5 \div 7$ °C zamiast $3 \div 10$ °C, jak ma to miejsce w glebie otaczającej ten korpus.

Fig. 20. Disturbance of field of the soil temperature as caused by the installed vertical rod having heat conductivity bigger than that of the neighbouring soil.

warunku (38), pomiar jest nieadekwatny na skutek zaburzenia temperatury ośrodka w miejscu osadzenia termometru, a więc $T' \neq T$.

Znaleziony rozkład temperatury w profilu gleby można uznać za reprezentatywny, jeśli spowodowane wprowadzonym korpusem termometru zaburzenie nie powoduje błędów przekraczających przyjętą wartość.

Elektryczne termometry przeznaczone do pomiaru temperatury gleby posiadają korpusy z metalowych rurek o średnicy ok. 10 mm oraz grubości

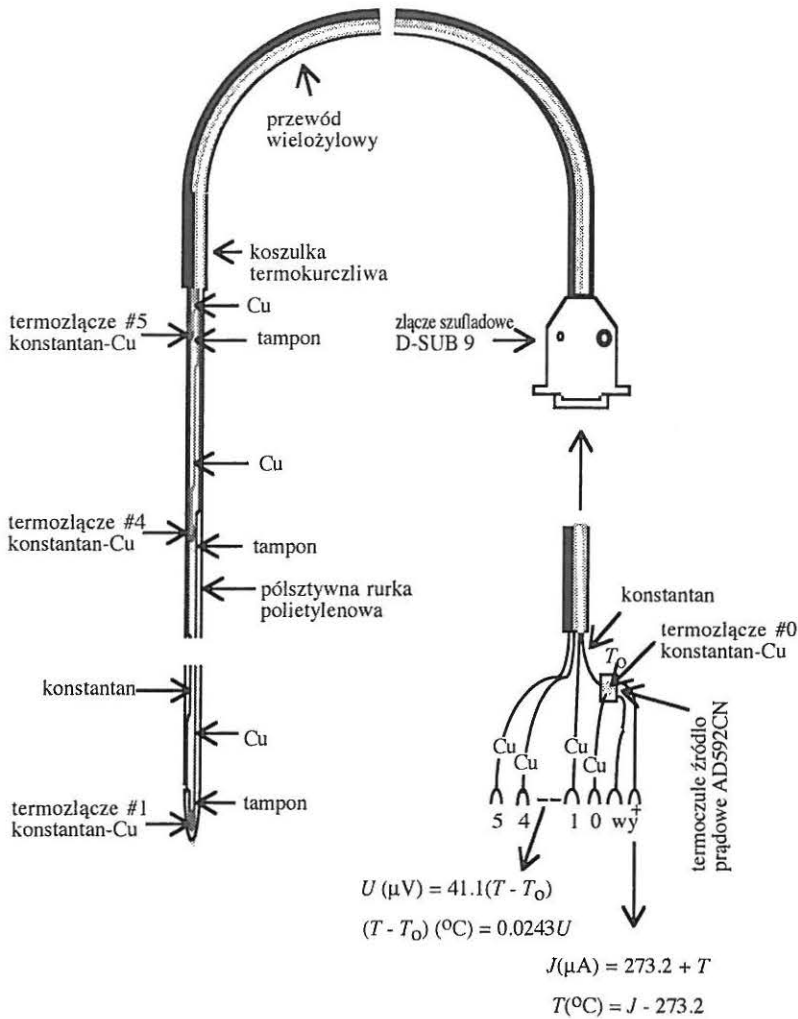
ścianki ok. 3 mm, co sprawia, że ich przewodność cieplna jest wielokrotnie większa od przewodności cieplnej gleby, a więc wprowadzane korpusem takiego termometru zaburzenie może powodować nadmierny błąd pomiaru.

6.2. Wieloczułkowy termometr termoelektryczny do rejestracji chwilowych profili temperatury gleby

Opisane rozwiązanie jest modyfikacją wcześniejszego [56, 57]. Próbник termometru posiada krańcowo niską przewodność cieplną a jego konstrukcja pozwala na stosowanie zwyczajnego przewodu elektrycznego do ich włączenia w system monitoringu temperatury.

Termometr jest instalowany w glebie na stałe w otworze nakłutym uprzednio stalową igłą o średnicy równej średnicy korpusu próbника termometru (Rys. 21). Korpus próbника jest rurką z półsztywnego plastiku (polietylenu) o średnicy 3 mm, grubości ścianki 0.5 mm i długości do 1.5 m. Wewnątrz korpusu umieszczone są czujniki temperatury w ilości i rozmieszczeniu stosownie do wymagań użytkownika. Czujnikami są termozłącza miedź-konstantan. Ich rozmieszczenie jest ustabilizowane mostkami cieplnymi z nicianych okrętek nasyconych lepiszczem, zwiększającymi przewodność cieplną korpusu w kierunku do niego prostopadłym. Elektryczne przewody termopar są wyprowadzone ponad powierzchnię gleby i zakończone wielowtykiem.

Zaletą rozwiązania jest mała przewodność cieplna próbника na kierunku gradientu mierzonej temperatury (wzdłuż korpusu) przy stosunkowo dużej w kierunku do niego poprzecznym. Pozwala to na zminimalizowanie zaburzeń badanego profilu temperatury, powodowanych "zwarcie cieplnym" wprowadzanym przez korpus termometru (mostek cieplny). Przewodność cieplna termometru glebowego z korpusem wykonanym z cienkiej półsztywnej plastikowej rurki, zawierającej wewnątrz kilka cienkich (0.1 mm) przewodów elektrycznych i podzielonej na sekcje korkami (okrętkami) ograniczającymi konwekcję zamkniętego w nim powietrza jest, w porównaniu z termometrami aktualnie dostępnymi (posiadającymi korpusy ze stalowych albo aluminiowych rurek o średnicy ok. 10 mm i grubości ścianki ok. 3 mm) około 10 000 razy mniejsza i zbliżona do przewodności cieplnej suchej

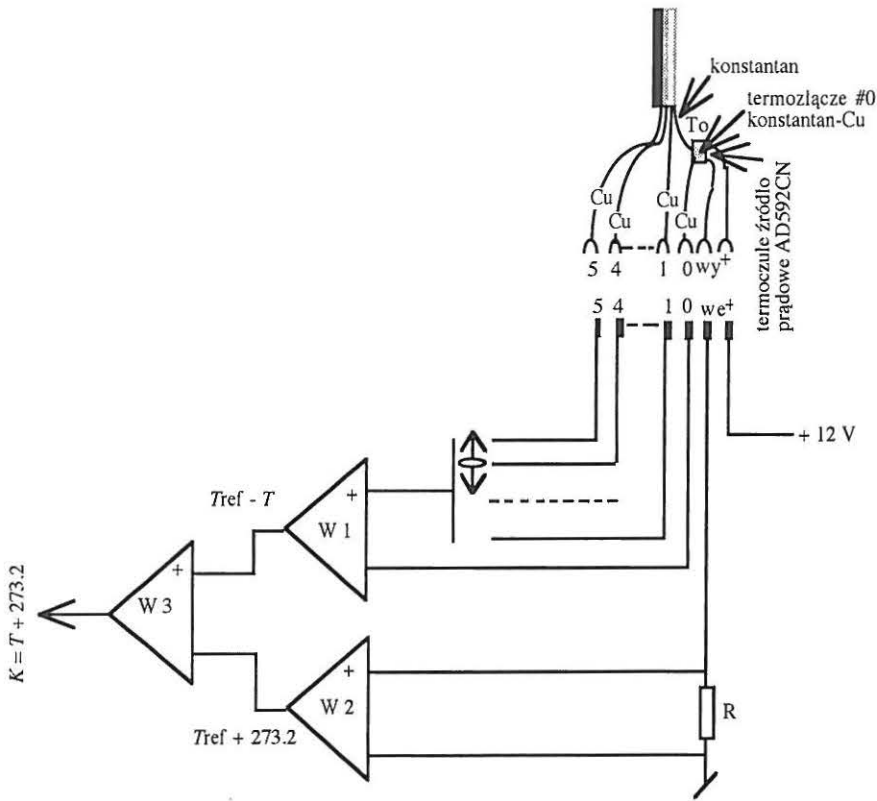


Rys. 21. Zasada konstrukcji i działania wieloczujnikowego termometru termoelektrycznego.
Fig. 21. Principle of design and operation of the multisensort thermocouple thermometer.

gleby. Termozłącze porównawcze jest przyklejone do termometru półprzewodnikowego, którym jest termoczułe źródło prądowe AD592CN firmy Analog Devices. Znając temperaturę termozłącza porównawczego, T_0 , oraz napięcie różnicowe, U , wybranej termopary, można określić temperaturę wybranego termozłącza, T :

$$T = 0.0243 U + T_0 \quad (40)$$

Rysunek 22 ilustruje zasadę działania odczytnika. Napięcie różnicowe termopary, U , jest podane na jedno z dwu wejść wzmacniacza instrumentalnego W1, W2, W3. Na drugie wejście podane jest napięcie z opornika R, proporcjonalne do prądu źródła AD592CN. Napięcie wyjściowe wzmacniacza jest miarą temperatury w skali bezwzględnej.

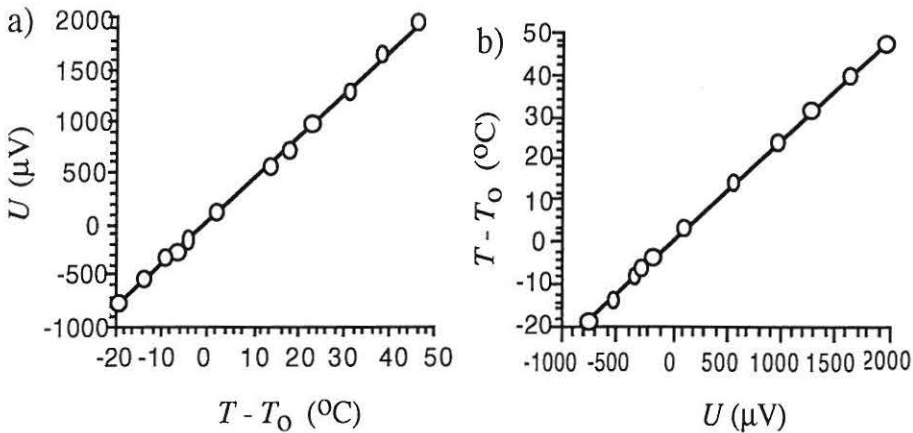


Rys. 22. Zasada działania czytnika wieloczułnikowego termometru termoelektrycznego do rejestracji chwilowych profili temperatury w glebie.

Fig. 22. Principle of operation of the multisensor thermoelectrical thermometer readout.

6.3. Weryfikacja wieloczułnikowego termometru termoelektrycznego do rejestracji chwilowych profili temperatury gleby

Zależność napięcia różnicowego, U , od różnicy temperatur złącza aktywnego i porównawczego może być w omawianym przypadku aproksymowana linią prostą, ponieważ rozpiętość temperatury gleby jest, w większości warunków praktycznych, względnie mała: $-10 \div +40$ °C, więc jej nieliniowość jest pomijalna. Rys. 23 ilustruje charakterystykę zastosowanej termopary konstantan-miedź w zakresie $-20 \div 50$ °C.

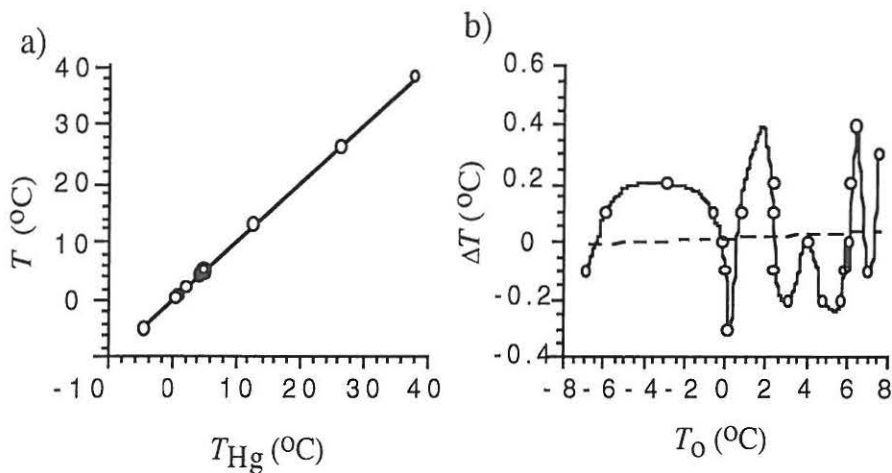


Rys. 23. Charakterystyka zastosowanej termopary miedź-konstantan. a) zależność napięcia, U , termopary od różnicy temperatur złącza aktywnego i porównawczego, $T - T_0$, b) różnica temperatur złącza aktywnego i porównawczego, $T - T_0$, w funkcji mierzonego napięcia różnicowego

Fig. 23. Characteristics of the copper-constantan thermocouple applied. a) output voltage, U , versus differential temperature, $T - T_0$, of the active and reference junction, b) the differential temperature, $T - T_0$, as related to the measured output voltage, U .

$$U = -0.0003 + 41.105T - T_0, R^2 = 0.9995, T - T_0 = 0.004 + 0.0243U, R^2 = 0.9998.$$

Rysunek 24 ilustruje wyniki weryfikacji omawianego termometru termoelektrycznego, gdzie a) jest porównaniem jego wskazań ze wskazaniami termometru rtęciowego zaś b) ilustruje błędy wskazań zarejestrowanych przy różnych temperaturach złącza porównawczego, gdzie brak znaczącej korelacji wskazuje na skuteczność zastosowanego sposobu uwzględniania temperatury złącza porównawczego.



Rys. 24. a) porównanie wskazań glebowego termometru termoelektrycznego, T , ze wskazaniami termometru rtęciowego, T_{Hg} , b) błędy wskazań, ΔT , zarejestrowanych przy różnych temperaturach złącza porównawczego, T_O .

Fig. 24. a) readings taken with the discussed soil thermometer, T , as compared to these taken from the mercury reference one, T_{Hg} , b) error ΔT as related to temperature of the reference junction, T_O .

$$T = 0.033 + 0.996T_{Hg}, R^2 = 0.9997, SD = 0.180, \text{---} \Delta T = 0.0025 + 0.0027T_O, R^2 = 0.0037$$

Wstępne badania glebowego termometru termoelektrycznego wykazały poprawność jego funkcjonowania. Minimalna przewodność cieplna jego korpusu czyni go szczególnie przydatnym w badaniach cieplnych właściwości gleb, gdzie instalacja pionowych elementów stwarza ryzyko zniekształcenia

poła mierzonej temperatury gleby, powodowanego ich względnie dużą przewodnością cieplną.

7. PODSUMOWANIE

Opisane metody pomiarowe na których oparte są dyskutowane czujniki wielkości agrofizycznych różnią się stopniem zaawansowania. Metodą, która praktycznie sprawdziła się w zastosowaniu do pomiaru wilgotności gleby jest reflektometria, TDR (patrz 2.3.), stosowana od 1975 [12].

Od roku 1990 [38] rośnie zainteresowanie reflektometrycznym pomiarem elektrycznej konduktywności gleby w stanie ustalonym (patrz 2.3.), której znajomość, wraz ze znajomością wilgotności (a zatem i stałej dielektrycznej) gleby pozwala oszacować jej zasolenie [63].

Elektryczny pomiar potencjału wody z zastosowaniem sondy elektropojemnościowej oraz sondy TDR (patrz 4.1.2 i 4.1.3) nie wymaga obsługi czujników, jak ma to miejsce w przypadku tensjometrów wodnych. Ich niedogodnością jest występowanie histerezy kalibracji.

Metody elektrycznego wyznaczenie natlenienia, (patrz 5) mimo wieloletniego stosowania i ciągłego rozwoju [5, 52] są trudne w stosowaniu ze względu na małą powtarzalność wyników, jak też na niską wytrzymałość mechaniczną platynowej katody. Są one również trudne w interpretacji, ponieważ podczas instalowania katody gęstość gleby wokół niej rośnie, co z kolei zaburza dyfuzję i migrację reagentów. Dane uzyskane tymi metodami należy traktować jako wskaźnik raczej niż miarę.

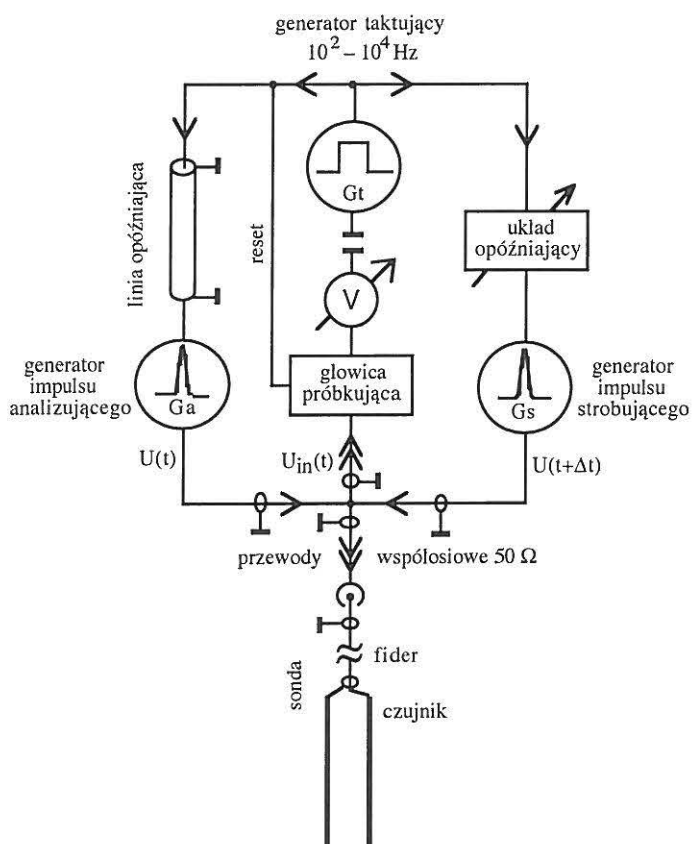
Elektryczny pomiar temperatury jest zadaniem łatwym od strony technicznej. W zastosowaniu do gleby (patrz 6) problemem natury rzeczowej jest taka budowa korpusu termometru, by jego obecność w glebie nie zaburzała naturalnego pola temperatury.

Zaletą wspólną dla dyskutowanych metod jest dostarczanie danych w postaci sygnału elektrycznego, warunkowanego (w kategoriach praktycznych) selektywnie.

8. PRZYKŁADY REALIZACJI INSTRUMENTALNYCH

8.1. Zasada działania miernika TDR

Zasadę działania miernika ilustruje Rysunek 25. Impulsy z generatora taktującego, G_t , o częstotliwości około 1 kHz, synchronizują działanie głowicy



Rys. 25. Zasada działania reflektometrycznego miernika wilgotności gleby.
Fig. 25. Principle of operation of the TDR soil moisture meter.

próbkującej oraz dwu identycznych generatorów impulsu, analizującego, Ga, oraz strobującego, Gs. Generują one impulsy szpilkowe o czasie narastania, jak też szerokości połówkowej, rzędu 100 ps, których przebieg (kształt) jest dla $0 < t < 300$ ps zbliżony do funkcji $\sin^2 t$.

Tak krótkotrwałe impulsy elektryczne (w czasie 100 ps światło przebywa w próżni drogę 3 cm) nie mogą być przetwarzane w czasie realnym, ponieważ obecnie nie istnieją jeszcze odpowiednie, dostatecznie szybkie, aktywne urządzenia elektroniczne. Z tej przyczyny techniczne rozwiązanie miernika oparto o zasadę stroboskopu, stosowaną w oscyloskopach próbkujących do obserwacji skrajnie szybkich i krótkich, periodycznych impulsów elektrycznych. Polega ona na pobieraniu i zapamiętywaniu próbek napięcia badanego przebiegu w różnych jego fazach, przy czym ten sam przebieg jest powtarzany tyle razy, ile ma być pobranych próbek. Próbki te, odtwarzane w tym samym następstwie w jakim zostały pobrane, ale już w odpowiednio dłuższym czasie (rozciągnięte w czasie), odwzorowują przebieg pojedynczego impulsu.

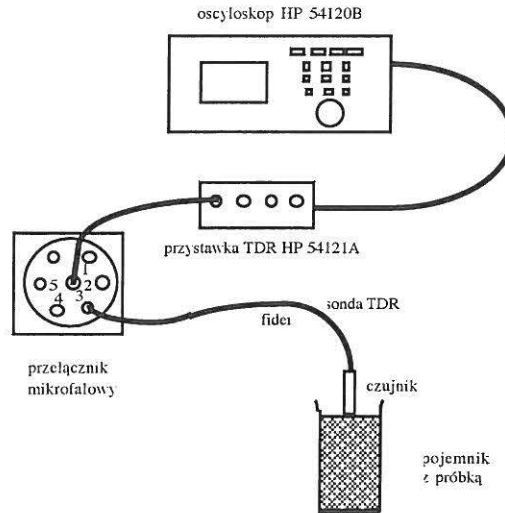
Impuls z generatora taktującego kasuje pamięć głowicy próbkującej i wyzwala obydwa generatory impulsów szpilkowych, przy czym wyzwalenie generatora impulsu strobującego może być, w stosunku do analizującego, w sposób kontrolowany opóźniane przy pomocy układu opóźniającego. Obydwa impulsy napięcia elektrycznego zasilają sondę. Każdy z nich, niezależnie jeden od drugiego, powoduje rozwinięcie się w fiderze impulsu elektromagnetycznego, które to impulsy biegną ku końcowi czujnika (falowodu) i ulegają kolejnym odbiciom, jak wyjaśniono wcześniej.

Zarówno impulsy inicjalne jak i odbite występują na wejściu głowicy próbkującej. Głowica ta nie reaguje na napięcia mniejsze od szczytowej wartości napięcia impulsu strobującego. Impuls strobujący (próbkujący) jest, w stosunku do analizującego, stopniowo przesuwany w czasie (w fazie) za pośrednictwem układu opóźniającego. Jego opóźnienie, Δt , jest sterowane napięciem elektrycznym, które może być regulowane ręcznie lub automatycznie [58, 59, 61] przez sterownik mikroprocesorowy. Kiedy impuls

strobujący i którekolwiek z odbić impulsu analizującego zbiegają się w czasie (nakładają się na siebie) próbka impulsu analizującego zostaje pobrana, ponieważ wypadkowe napięcie na wejściu głowicy próbkującej przekracza wtedy szczytową wartość impulsu strobującego. Wyjściowe napięcie głowicy próbkującej, równe napięciu tej próbki, jest podtrzymywane na niezmiennym poziomie (pamiętane) aż do kolejnego skasowania, otwierającego nowy cykl próbkowania. Wychylenie wskazówki woltomierza, V , dołączonego do wyjścia tej głowicy, jest proporcjonalne do wartości pobranej próbki i jest największe, gdy maksimum impulsu strobującego zbiega się w czasie z maksimum odbitego impulsu analizującego. Pomiar czasu podróży impulsu analizującego w głębie na drodze równej podwójnej długości czujnika (tzn. czasu $t = t_2 - t_1$ dzielącego momenty odbić impulsu analizującego od początku i od końca czujnika) sprowadza się zatem do odczytania napięć sterujących układem opóźniającym w momentach zgodności fazy impulsu strobującego z fazą odbitego od początku oraz od końca czujnika impulsu analizującego, które to momenty są sygnalizowane przez woltomierz, V , maksymalnym wychyleniem wskazówki. Ponieważ opóźnienie impulsu strobującego jest proporcjonalne do wartości tego napięcia, poszukiwany czas podróży impulsu może być odczytywany wprost z odpowiednio wykalibrowanej podziałki ręcznego regulatora napięcia, sterującego opóźnieniem albo przeliczany przez integralny komputer na wartości przenikalności elektrycznej gleby, ϵ , a następnie wilgotności objętościowej gleby, θ .

8.2. Laboratoryjny zestaw TDR do wyznaczania przenikalności dielektrycznej oraz konduktywności elektrycznej materiałów porowatych

Zestaw oparto o układ oscyloskop-komputer, ponieważ takie rozwiązanie pozwala na sterowanie pracą oscyloskopu (pomiarom) z poziomu klawiatury komputera oraz zapewnia łatwą archiwizację danych. W zestawie zastosowano oscyloskop cyfrowy Hewlett-Packard HP54120B z głowicą TDR HP54121A o szerokości pasma 20GHz, która zawiera generator impulsu krokowego o czasie narastania 45 ps i amplitudzie 100 mV. Konstrukcję zestawu



Rys. 26. Laboratoryjny zestaw TDR do pomiaru przenikalności dielektrycznej oraz konduktywności elektrycznej materiałów porowatych.

Fig. 26. A laboratory TDR setup for the determination of dielectric permittivity and electric conductivity of porous materials.

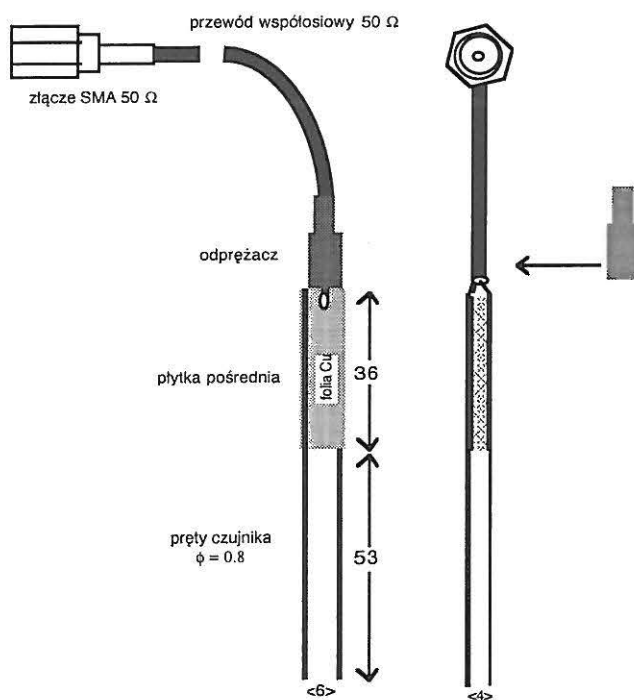
ilustruje Rys. 26. Oscyloskop połączono z komputerem IBM PC-286 za pośrednictwem interfejsu sprzętowego HP82355 pracującego w trybie GPIB. Komunikację pomiędzy komputerem a oscyloskopem zrealizowano za pomocą programu HP.EXE, opracowanego i wykonanego we własnym zakresie. Zestaw umożliwia realizację automatycznych pomiarów TDR równoległe z kilku sond. Elementem sprzętowym, jest współosiowy przełącznik mikrofalowy, zwany dalej multiplekserem, który jest sterowany za pośrednictwem portu równoległego komputera.

Omawiany zestaw wyposażono w następujące sondy reflektometryczne:

- sonda do pomiaru wilgotności i zasolenia gleby,
- sonda do pomiaru wilgotności drewna,
- sonda do pomiaru wilgotności ziarna.

8.2.1. Sonda TDR do pomiaru wilgotności i zasolenia gleby

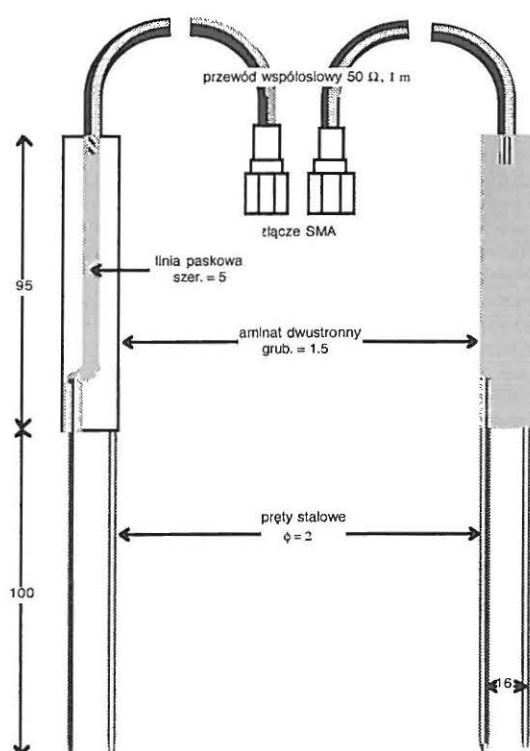
Konstrukcję sondy TDR do pomiaru przenikalności dielektrycznej (wilgotności) oraz elektrycznej konduktywności gleby ilustruje Rys. 27. Czujnikiem sondy są dwa pręty z nierdzewnej stali o wymiarach jak na rysunku. Płytką pośrednią stanowi paskową linię transmisyjną o impedancji 50Ω , równej impedancji fidera. Jej rolą jest sztywne, mechaniczne połączenie prętów czujnika z przewodem fidera, oraz dopasowanie impedancji fidera do impedancji płytki.



Rys .27. Konstrukcja sondy TDR do pomiaru wilgotności i zasolenia gleby.
Fig. 27. Design of the TDR soil moisture and salinity probe.

8.2.2. Sonda TDR do pomiaru wilgotności drewna

Konstrukcję sondy TDR do pomiaru przenikalności dielektrycznej (wilgotności) drewna ilustruje Rys. 28. Czujnikiem sondy są dwa pręty z nierdzewnej stali o wymiarach jak na rysunku. Płytką pośrednią stanowi paskową linię transmisyjną o impedancji 50Ω , równej impedancji fidera. Jej rolą jest sztywne, mechaniczne połączenie prętów czujnika z przewodem fidera, oraz dopasowanie impedancji fidera do impedancji płytki.

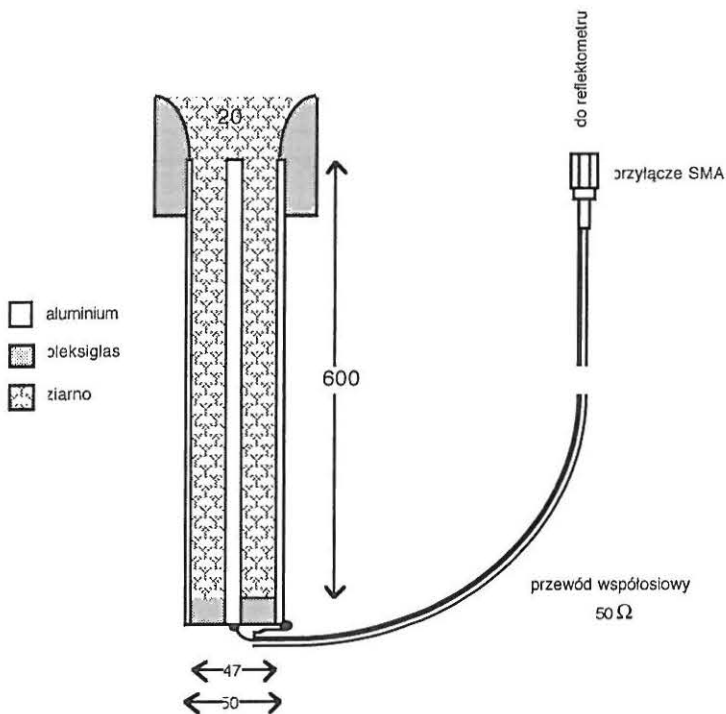


Rys.28. Konstrukcja reflektometrycznej sondy do pomiaru wilgotności drewna. Wymiary w mm.

Fig. 28. Design of the TDR moisture probe for wood. Dimensions in mm.

8.2.3. Sonda TDR do pomiaru wilgotności ziarna

Konstrukcję sondy TDR do pomiaru przenikalności dielektrycznej (wilgotności) ziarna ilustruje Rys. 29. Czujnikiem sondy jest odcinek linii współosiowej o wymiarach jak na rysunku. Dielektrykiem wypełniającym przestrzeń pomiędzy wewnętrznym i zewnętrznym przewodem linii jest ziarno, wypełniające czujnik.

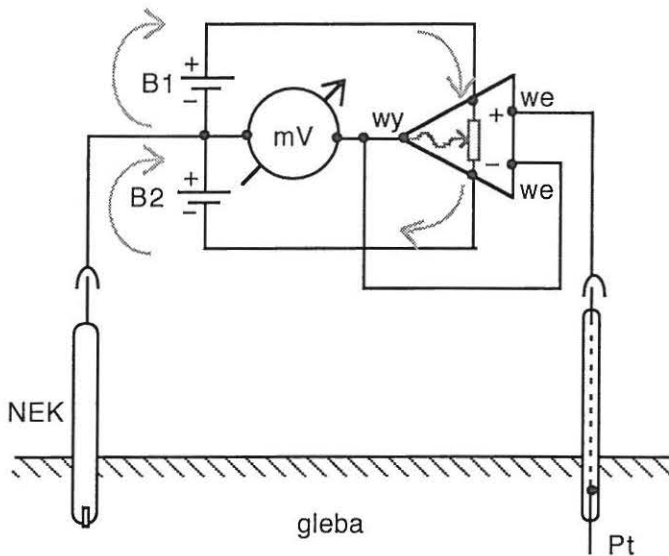


Rys. 29. Konstrukcja reflektometrycznej sondy do pomiaru wilgotności ziarna. Wymiary w mm.

Fig. 29. Design of the TDR moisture probe for cereal grain. Dimensions in mm.

8.3. Zasada działania miernika potencjału redoks

Rysunek 30 ilustruje zasadę działania miernika potencjału redoks. Wzmacniacz operacyjny o oporności wejściowej rzędu $10^{12} \Omega$ pracuje w trybie wtórnika napięciowego. Dzięki ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu (połączeniu wyjścia, wy, wzmacniacza z jego odwracającym wejściem, -we), układ dąży do wyrównania



Rys. 30. Zasada działania miernika potencjału redoks: wzmacniacz operacyjny o oporności wejściowej rzędu $10^{12} \Omega$ pracuje jako bufor, zapobiegający obciążeniu elektrody wskaźnikowej Pt obwodem pomiarowym mV - NEK.

Fig. 30. Principle of operation of the redox potential meter: the operational amplifier with input resistance of order of $10^{12} \Omega$ is a buffer which prevents the indicator electrode Pt against the load of the measuring circuit mV - NEK.

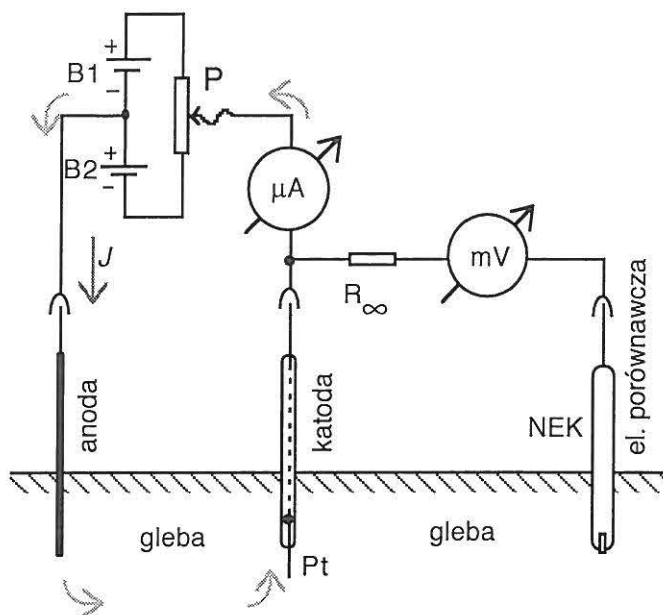
potencjałów obydwu wejść, -we, +we, poprzez samoregulację napięcia wyjściowego (symbolizowaną wpisanym przerywaną linią w kontur wzmacniacza potencjometrem) aż do wyzerowania ich różnicy. Z powyższego wynika, że w stanie równowagi potencjał elektrody występujący na dodatnim wejściu, +we, wzmacniacza jest powtórzony na jego wyjściu, wy, i może być zmierzony jako napięcie odniesione względem zera zasilania (masy układu). Ze względu na wspomnianą wysoką oporność wejściową wzmacniacza układ w stanie równowagi nie pobiera znaczącego prądu z ogniwa redoks. Zaden znaczący prąd nie płynie w tych warunkach przez glebę, zaś proporcjonalny do mierzonego potencjału prąd, który napędza miliwoltomierz, mV, jest wtedy dostarczany przez jedną z baterii zasilacza, B₁ albo B₂ i płynie przez ten woltomierz w jednym z dwu możliwych kierunków, jak sugerują na Rys. 30 strzałki.

8.4. Trójelektrodowy pomiar *ODR*

Niedostatkim układu do pomiaru *ODR* według Lemona i Ericksona [37] jest jego znacząca oporność wewnętrzna, na którą składają się (patrz Rys. 18) oporność mikroamperomierza, μA , oraz oporność porównawczej nasyconej elektrody kalomelowej, NEK. Skutkiem wstępowania oporności wewnętrznej układu pomiarowego jest, proporcjonalny do jej wartości, niekontrolowany spadek napięcia, zmniejszający potencjał polaryzacji katody. Dla kompensacji uchybów potencjału katody stosuje się układ trójelektrodowy [60, 62].

8.4.1. Zasada trójelektrodowego pomiaru *ODR*

Zasadę pomiaru trójelektrodowego ilustruje Rys. 31. Wartość potencjału katody jest wskazywana miliwoltomierzem, mV, o oporności wewnętrznej



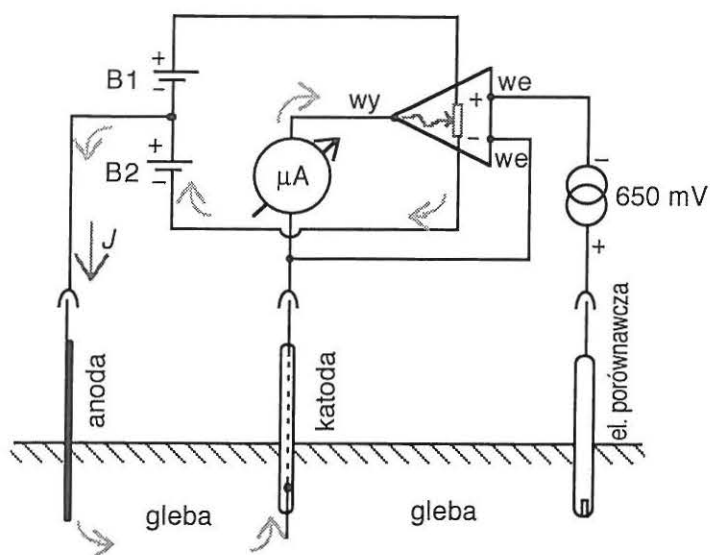
Rys. 31 Zasada trójelektrodowego pomiaru *ODR*. Wskazania miliwoltomierza, są korygowana regulatorem P do wartości -650 mV.

Fig. 31 Principle of the 3-electrode measurement of *ODR*. Readings of the millivoltmeter are adjusted to -650 mV prior to recording the oxygen reduction current, J .

rzędu $10^{12}\Omega$ i korygowana regulatorem P. Prąd redukcji, J , odczytuje się z mikroamperomierza μA , gdy milwoltomierz wskazuje -650 mV.

8.4.2. Zasada działania trójelektrodowego miernika *ODR*

Rysunek 32 ilustruje zasadę działania trójelektrodowego miernika pomiaru *ODR*. Miernik jest w swej istocie potencjostatem, który utrzymuje potencjał elektrody pomiarowej na ustalonym poziomie, niezależnie od elektrycznych warunków występujących w systemie i jednocześnie umożliwia pomiar natężenia prądu reakcji włączonym szeregowo w obwód tej elektrody amperomierzem.



Rys. 32. Zasada działania trójelektrodowego miernika *ODR*: miernik jest potencjostatem umożliwiającym pomiar prądu redukcji tlenu przy stabilizowanym potencjale katody -400 mV względem gleby.

Fig. 32. Principle of the 3-electrode meter function for the *ODR* measurements: the meter is a potentiostat measuring the current of oxygen reduction under the cathode potential stabilized at the level of -400 mV as referred to the soil.

Wzmacniacz operacyjny pracuje w trybie wtórnika napięciowego, jak opisano wyżej. Pomędzy dodatnie wejście, $+we$, wzmacniacza a NEK włączone jest szeregowo źródło napięcia wzorcowego 650 mV, ujemnym biegunem ku wejściu wzmacniacza. Dzięki ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu zachodzi samoregulacja napięcia wyjściowego wzmacniacza (symbolizowana wpisanym w kontur wzmacniacza potencjometrem) prowadząca do wyrównania potencjałów obydwu jego wejść, $+we$ i $-we$. Ponieważ katoda jest dołączona do $-we$, jej napięcie względem gleby musi być w każdych warunkach równe sumie napięcia wzorcowego i napięcia NEK, jak wspomniano wcześniej. Kierunek przepływu prądu redukcji tlenu, J , jest zaznaczony strzałkami. W obwodzie kontroli potencjału katody nie płynie żaden znaczący prąd.

8.5. Systemy monitoringu statusu wody w glebie IA PAN

Omówione niżej przykłady systemów monitoringu wilgotności, temperatury, potencjału wody i zasolenia gleby zostały opracowane w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie i są od 1989 roku produkowane przez firmę Easy Test, Ltd [18] na licencji Instytutu.

8.5.1. Zasada działania wielokanałowego monitora statusu wody w glebie

Generalnie, zadaniem monitora jest sekwencyjny odczyt (skanning) oraz rejestracja danych charakteryzujących monitorowany proces. Współczesne systemy monitoringu umożliwiają dołączenie wielu analogowych, jak też cyfrowych, czujników różnych wielkości fizycznych oraz fizykochemicznych jednocześnie. Czujniki te są skanowane w przestrzeni i w czasie w określonych przez użytkownika odstępach.

Rysunek 33 ilustruje zasadę działania monitora dla przypadku dwupoziomowego przełączania (multipleksowania) 45-u czujników różnych zmiennych, zainstalowanych na trzech poziomach doświadczalnych.

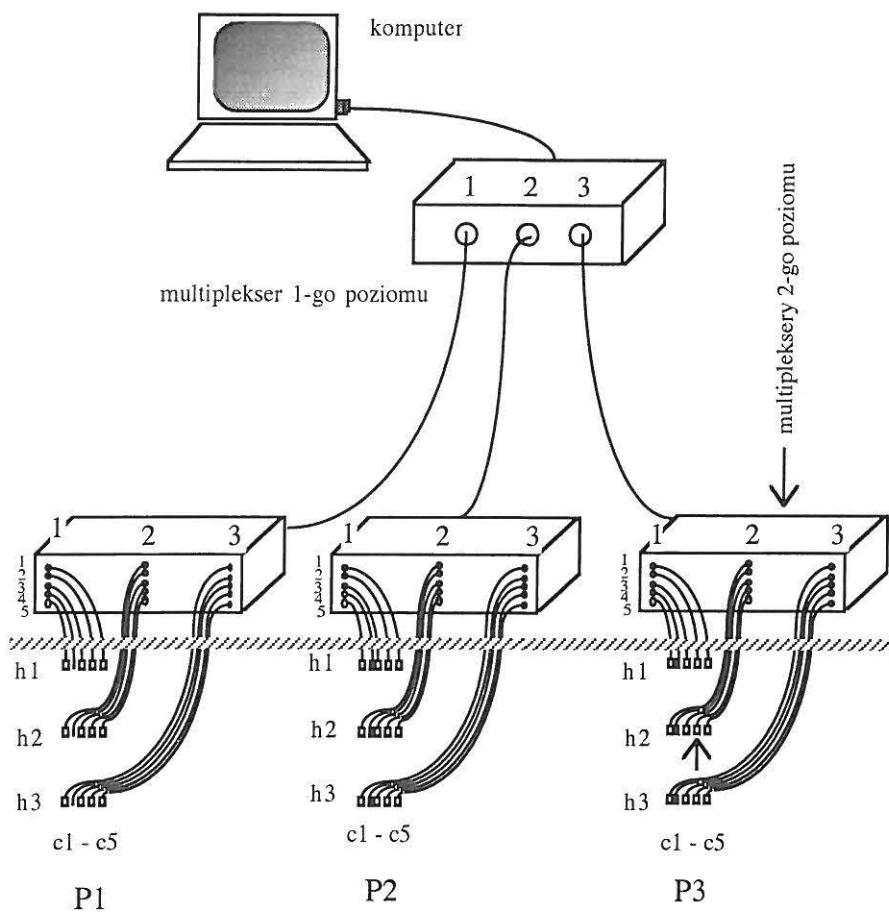
Czujniki instaluje się w profilu gleby tak, by na wybranej głębokości znalazło się nie mniej niż po jednym dla każdej z monitorowanych zmiennych.

Multiplexer 1-go poziomu umożliwia adresowanie (wybieranie) poziomu (profilu) nr 1, 2 albo 3, a multiplexer 2-go poziomu wybiera czujnik, $c_1 \div c_5$ określonej zmiennej, zainstalowany na określonej głębokości $h_1 \div h_3$. Na przykład: adres 324 dekoduje profil P3, głębokość instalacji h_2 , czujnik nr 4.

Maksymalna ilość czujników w układzie wynosi:

$$P \times h \times c \quad (41)$$

gdzie P jest ilością monitorowanych profili, h jest ilością poziomów w profilu zaś c jest ilością czujników w poziomie.



Rys. 33. Zasada monitorowania statusu wody w trzech profilach gleby, P1, P2, P3, dla przypadku dwupoziomowego przełączania (multipleksowania) zastosowanych czujników. Kod adresu czujnika tworzy się z numeru profilu, P, (albo kanału multiplexera 1-go poziomu) oraz numeru kolumny i wiersza w multiplexerze 2-go poziomu. Na przykład, by połączyć rejestrator z czujnikiem wyróżnionym strzałką należy użyć adresu 324.

Fig. 33. Principle of monitoring of water status for three soil profiles, P1, P2, P3, with two-level multiplexing applied. The addressing code is composed of nr of the site and nr of the column and nr of the row in the 2-nd level multiplexer. For instance, in order to read the sensor pointed with arrow, the 324 number has to be used as the addressing code.

8.5.2. LOM/mpts

Rysunek 34 ilustruje system do badań w laboratorium typu LOM/mpts (Laboratory Operated Meter for moisture, potential, temperature and salinity) opracowany i wykonany w oparciu o technologię TDR, który jest szczególnie przydatny do długoterminowych eksperymentów w kolumnach glebowych jak również w lizymetrach. System umożliwia przestrzenno-czasową rejestrację chwilowych profili wilgotności, potencjału wody, temperatury i zasolenia w dowolnych odstępach czasu. Komputer biurkowy steruje pracą urządzenia jak również gromadzi wyniki pomiarów. Przełącznik mikrofalowy umożliwia akwizycję danych z wielu czujników jednocześnie (do 240 czujników każdego rodzaju).

LOM jest wyposażony w mikrofalowy przełącznik sond LP/ms oraz przełącznik sond LP/p i LP/t (patrz niżej), które stanowią multiplekser 1-go poziomu, oraz w specjalny sprzęg (interfejs) do sterowania pozostałych, identycznych przełączników, stanowiących multipleksery 2-go poziomu. Wspomniane multipleksery umożliwiają przełączanie do 240 sond LP/ms, 240 sond LP/p oraz 240 sond LP/t.

Centymetrowe rozmiary czujników pozwalają na ich instalację w typowych pierścieniach probierczych.

8.5.2.1. Parametry LOM/mpts

Impuls: impuls szpilkowy \sin^2 o czasie narastania 250 ps.

Dynamika pomiaru:

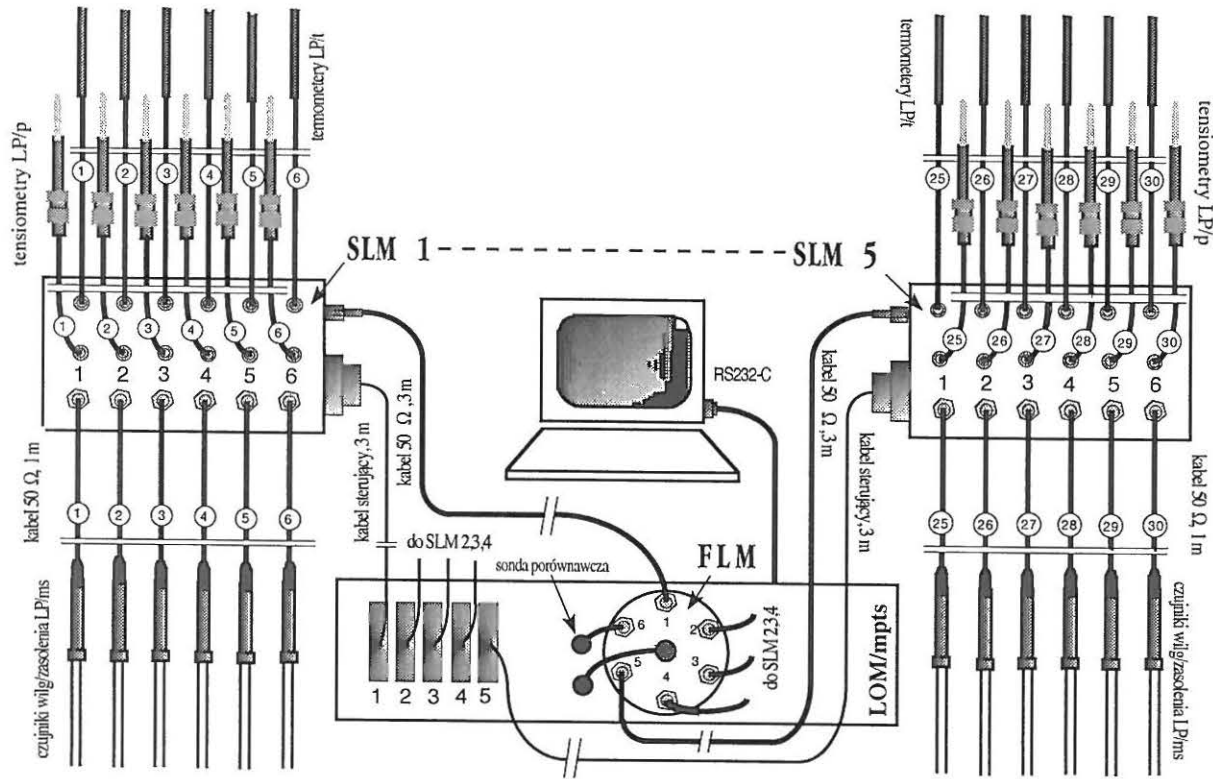
stała dielektryczna, ε : $2 \leq \varepsilon < 90$,

wilgotność objętościowa, θ : $0 \leq \theta \leq 100 \%$,

potencjał, ψ : $0 \leq \psi \leq 950$ mbar,

temperatura, T : $-20 \leq T \leq +60^\circ\text{C}$,

konduktywność elektryczna, σ : $0.000 \leq \sigma \leq 1\text{S m}^{-1}$.



Rys. 34. Przykładowy zestaw sterowanego komputerem rejestratora chwilowych profili wilgotności, konduktywności elektrycznej, potencjału matrycowego wody oraz temperatury gleby LOM/mppts. FLM, SLM - multiplexery 1-go oraz 2-go poziomu.
 Fig. 34. Example setup of a computer-controlled recorder of instantaneous profiles of moisture, matrix potential and temperature of soil LOM/mppts. FLM, SLM are 1-st, 2-nd level multiplexers respectively.

Dokładność:

stała dielektryczna, ϵ , błąd bezwzględny: wartość odczytana ± 1 ,

dla $2 \leq \theta < 6$ oraz ± 2 dla $\theta > 6$,

wilgotność, θ , błąd bezwzględny: wartość odczytana $\pm 2\%$,

konduktywność elektryczna, σ , błąd względny: $\pm 5\%$ odczytanej wartości,

potencjał, ψ , błąd bezwzględny: ± 3 mbar,

temperatura, T , błąd bezwzględny: $\pm 0.8^\circ\text{C}$.

Rozdzielczość:

stała dielektryczna, ϵ : 0.1,

wilgotność objętościowa, θ : 0.1%,

konduktywność elektryczna, σ : 0.001 S m^{-1} ,

potencjał, ψ : 1 mbar,

temperatura, T : 0.1°C .

Czasochłonność pomiaru:

wilgotność: 6 s pierwszy odczyt, następne po 3 s każdy,

konduktywność elektryczna: 8 s każdy pojedynczy odczyt,

potencjał: 3 s każdy pojedynczy odczyt,

temperatura: 3 s każdy pojedynczy odczyt,

Dynamika skanowania:

maksymalna ilość multiplekserów 2-go poziomu: 15,

maksymalna ilość sond LP/ms: 240,

maksymalna ilość sond LP/p: 240,

maksymalna ilość sond LP/t: 240,

Sondy:

LP/ms do pomiaru wilgotności oraz konduktywności elektrycznej,

LP/p do pomiaru potencjału (ciśnienia kapilarnego) wody,

LP/t do pomiaru temperatury.

Temperatura otoczenia, t_a : $15^\circ\text{C} \leq t_a \leq 25^\circ\text{C}$.

Zasilanie: $\sim 220\text{V}$, 10 W.

Wymiary szer/głęb/wys:

LOM: 475/285/110 mm,

MUX: 205/185/110 mm.

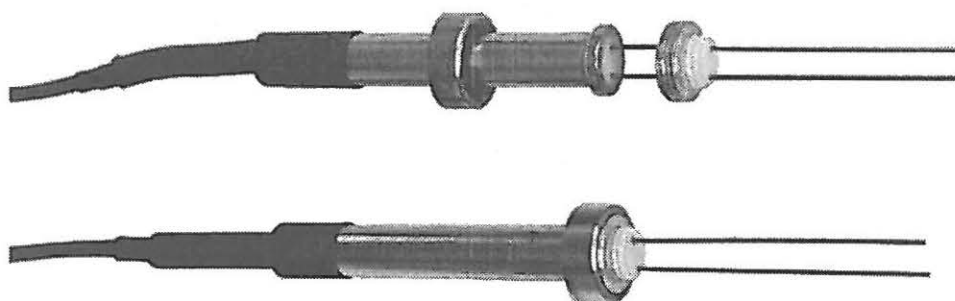
Masa:

LOM: 7 kg,

MUX: 2 kg,

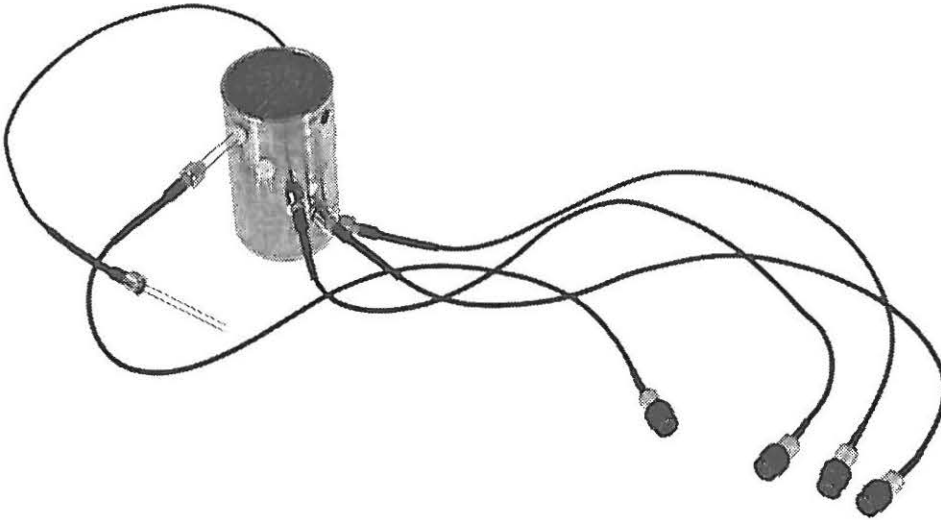
8.5.2.2. Sondy współpracujące z LOM/mpts

Rysunki 35, 37 i 38 ilustrują stosowane sondy oraz sposób ich instalacji w typowym probierczym pierścieniu stalowym, służącym do pobierania próbek gleby o zachowanej strukturze.

8.5.2.2.1. Sonda LP/ms

Rys. 35. Czujnik sondy wilgotności i zasolenia gleby IA PAN typu LP/ms. Długość prętów 5 mm, średnica 0.8 mm. Plastikowy przewodnik przeciwdziała niszczeniu struktury gleby podczas instalacji czujnika.

Fig. 35. LP/ms moisture/salinity probe of IA PAS. Rods length 5 mm, diameter 0.8 mm. The plastic guide prevents destruction of the soil sample during the probe installation.



Rys. 35. Sondy LP/ms wprowadzone do nienaruszonej próbki gleby poprzez stalową ściankę typowego pierścienia probierczego (wysokość 100 mm, średnica 55 mm, grubość ścianki 2.75 mm). W pierścieniu probierczym wykonano pięć gwintowanych otworów, co, po zainstalowaniu sond, pozwala monitorować pięć warstw próbki (20 mm miąższości każda) niezależnie. Sondy rozmieszczono na ścianie pierścienia spiralnie, by uniknąć wzajemnego przesłaniania ich prętów w pionie.

Fig. 36. A set of five LP/ms soil salinity/moisture miniprobes installed through 2.75 mm thick wall of a steel sampling cylinder having height of 100 mm and 55 mm inner diameter. The wall of the cylinder is provided with five tapped holes equally distributed along the cylinder height to monitor five independent layers of the soil, each 20 mm thick. The holes are spirally aligned to minimize mutual shadowing in the vertical.

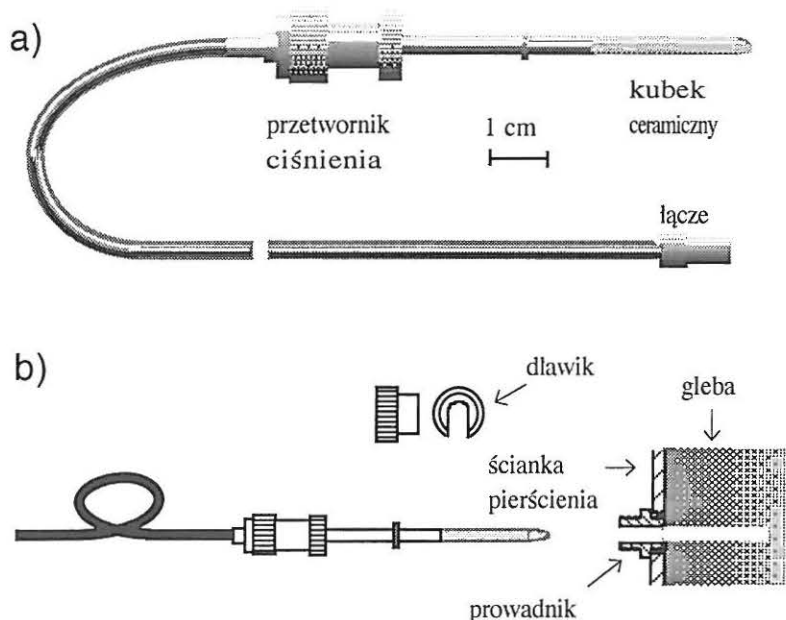
8.5.2.2.1.1. Parametry sondy LP/ms

czujnik: odcinek linii przesyłowej utworzony przez dwa pręty ze stali nierdzewnej o średnicy 0.8 mm, długości 53 mm, odległych od siebie o 5 mm,
przewody: LOM–MUX: 3 m, MUX–czujnik: 1 m,
strefa czułości: cylinder opisany na prętach o średnicy około 7 mm oraz wysokości około 60 mm,
otwór instalacyjny: gwint M8 na długości 3.3 mm.

8.5.2.2.2. Sonda LP/p

LP/p jest tensjometrem do pomiaru tzw. “siły ssącej gleby” (kapilarnego ciśnienia wody w glebie), dalej zwanej “potencjałem matrycowym”. Ze względu na małe wymiary, minitensjometr LP/p jest szczególnie wygodny w zastosowaniu do rejestracji chwilowych profili potencjału w próbkach gleby o nienaruszonej strukturze, przechowywanych w typowych probierczych pierścieniach stalowych, którymi zostały pobrane.

Ścianka cylindra probierczego posiada gwintowane otwory (M8) równomiernie rozmieszczone po spirali. W otwór wkręca się przewodnik



Rys. 37. a) sonda potencjału matrycowego wody w glebie IA PAN typu LP/p, oraz b) sposób jej instalowania w pierścieniu probierczym z glebą.

Fig. 37. a) LP/p probe of IA PAS for the soil water maric potential and b) the way of its installation in a sampling cylinder.

a następnie montuje się w nim sondę LP/p. Prowadnik pozwala uniknąć szczeliny pomiędzy porowatym kubkiem sondy a otaczającą go glebą, która mogła by się wytworzyć skutkiem jego wprowadzania do gleby.

Po wprowadzeniu kubka LP/p do próbki (kolumny) glebowej sondę mocuje się nakrętką zaciskową (dławikiem). Kilka zamontowanych w ten sposób sond LP/p umożliwia rejestrację chwilowych profili matrycowego potencjału wody w glebie.

LP/p w połączeniu z podobnie zainstalowanymi sondami LP/ms, równoległe skanującymi wilgotność, umożliwiają tworzenie zbiorów opisujących ruch wody w procesie nawilżania lub osuszania, zawierających zsynchronizowane i skoordynowane wilgotność oraz potencjał [66, 96]. Takie dane umożliwiają łatwe wyznaczenie (dotąd najtrudniejszych) charakterystyk przepływu wody w strefie nienasyconej, jak: krzywa retencji (tzw. krzywa pF), różniczkowa pojemność wodna w funkcji wilgotności lub potencjału, przewodnictwo wodne w strefie nienasyconej w funkcji wilgotności lub potencjału oraz dyfuzyjność wody w strefie nienasyconej w funkcji wilgotności lub potencjału.

8.5.2.2.2.1. Parametry sondy LP/p

Czujnik:

przegroda porowata: kubek ceramiczny o średnicy 3 mm i wysokości do 50 mm,

przetwornik ciśnienia: scalony, termicznie skompensowany mostek Wheatstonea z 4-ma elementami piezorezystywnymi wdyfundowanymi w membranę krzemową,

ciśnienie przedmuchu (air entry): 900 ÷ 960 mbar ,

Dryf długoterminowy: ± 8 mbar/miesiąc,

Dokładność: ± 3 mbar,

Czas reakcji: ok. 120 s od 0 do 800 mbar oraz ok. 3 s od 800 do 0 mbar,

Długość przewodu łączącego: do 20 m,

Otwór instalacyjny: M8 na długości 3.3 mm.

8.5.2.2.3. Sonda LP/t

LP/t (Laboratory Probe for temperature) jest sondą do pomiaru temperatury w eksperymentach z kolumnami glebowymi. Cienkościenny polietylenowy korpus sondy (Rys. 38) ma znikomą przewodność cieplną, co pozwala zminimalizować fałszujący odczyty efekt "mostka cieplnego".

Kilka sond LP/t wprowadzonych do próbki gleby poprzez ściankę pierścienia probierczego albo ściankę kolumny glebowej umożliwia rejestrację chwilowych profili temperatury. Tak zainstalowane LP/t razem z podobnie zainstalowanymi LP/ms oraz LP/p umożliwiają tworzenie zbiorów opisujących ruch wody w procesie zwilżania lub osuszania w warunkach nieizotermicznych, zawierających zsynchronizowane i skoordynowane wilgotność, temperaturę oraz potencjał wody w glebie. Dane te umożliwiają łatwe wyznaczenie (dotąd najtrudniejszych) charakterystyk przepływu wody w strefie nienasyconej w warunkach nieizotermicznych, jak: krzywa retencji wody w glebie o określonej temperaturze (tzw. krzywa pF), różniczkowa pojemność wodna w funkcji wilgotności gleby o określonej temperaturze, współczynnik przewodnictwa wodnego w strefie nienasyconej w funkcji temperatury, wilgotności lub potencjału oraz nienasycona dyfuzyjność wodna w funkcji temperatury oraz wilgotności lub potencjału.

Jeśli w kolumnie z glebą jest zainstalowany miernik strumienia ciepła, wtedy wspomniane dane pozwalają również wyznaczyć podstawowe parametry przepływu ciepła w glebie przy różnych wilgotnościach gleby, jak: przewodnictwo cieplne, przewodnictwo temperaturowe oraz ciepło właściwe.

W ściance kolumny (albo pierścienia probierczego) znajdują się gwintowane otwory (M8) w które, przed instalacją LP/t, wkręca się prowadniki. Prowadniki te pozwalają uniknąć zniszczenia struktury gleby w otoczeniu czujnika podczas jego instalacji. Specjalna nakrętka (dławik) przeciwdziała przypadkowemu wysunięciu się czujnika sondy z próbki.

8.5.2.2.3.1. Parametry sondy LP/t

Czujnik: źródło prądowe sterowane temperaturą,

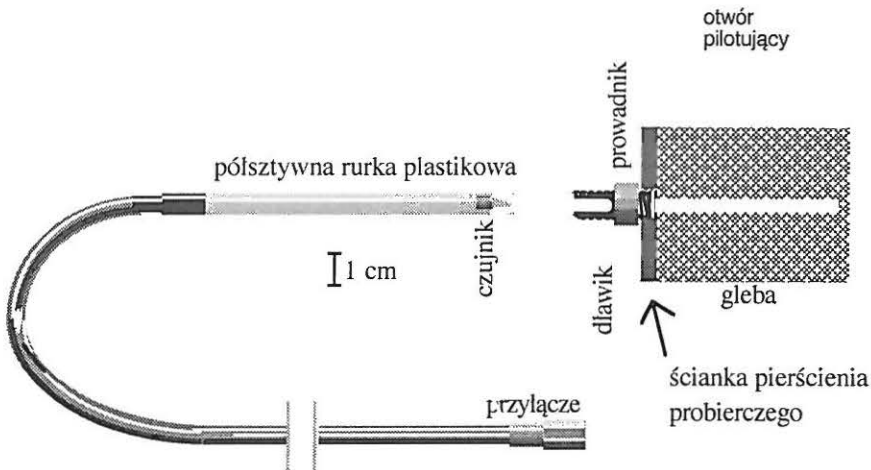
Zakres pomiaru: $-20 \div 60$ °C,

Rozdzielczość: 0.1 °C,

Błąd bezwzględny: poniżej ± 1 °C,

Długość przewodu łączącego: do 1000 m,

Otwór instalacyjny: M8 na długości 3.3 mm.



Rys. 38. Sonda temperatury gleby IA PAN typu LP/t oraz sposób jej instalowania w pierścieniu probierczym z glebą.

Fig. 38. LP/t temperature probe of IA PAS and the way of its installation in a sampling cylinder with the soil inside.

8.5.3. D-LOG/mts

D-LOG/mts (Data Logger for moisture, temperature and salinity) jest automatycznym rejestratorem "chwilowych profili" wilgotności, temperatury oraz elektrycznej konduktywności gleby w dowolnie wybranych porach doby, przeznaczonym do długoterminowych obserwacji terenowych na poletkach i w lizymetrach, gdzie potrzebny jest monitoring wilgotności, zasolenia oraz temperatury gleby.

Pomiar wilgotności gleby z zastosowaniem D-LOG/mts jest oparty o metodę reflektometryczną, TDR, gdzie czujnik osadzonej w glebie sondy jest pobudzany szpilkowym impulsem napięcia elektrycznego [59].

D-LOG pracuje pod kontrolą dwu komputerów: niezależnego, IBM-kompatybilnego, komputera zewnętrznego (jak palmtop HP200LX) oraz trwale wbudowanego w D-LOG, wyposażonego w port szeregowy RS232C, komputera wewnętrznego. Z nadejściem pory kolejnego cyklu pomiarów (skanu) komputer zewnętrzny "budzi" komputer wewnętrzny, który:

- wyzwala generator impulsu,
- zapisuje reflektogram (tzn. zmiany w czasie napięcia elektrycznego w wybranym punkcie sondy),
- wylicza prędkość propagacji oraz tłumienie impulsu elektromagnetycznego w glebie,
- wylicza stałą dielektryczną, wilgotność, temperaturę oraz elektryczną konduktywność gleby,
- przesyła wyniki do komputera zewnętrznego, gdzie są one zapisywane na dysku.

D-LOG/mts współpracuje z sondami wilgotności, temperatury i zasolenia typu FP/mts (patrz niżej). Do uaktywniania (wyboru) określonej sondy służy wewnętrzny przełącznik mikrofalowy pierwszego poziomu (D-MUX/mts), trwale wbudowany w D-LOG, współpracujący z osobnym przełącznikiem drugiego poziomu o podobnej konstrukcji i właściwościach.

8.5.3.1. Parametry D-LOG/mts

Impuls: impuls szpilkowy \sin^2 o czasie narastania 250 ps,

Dynamika pomiaru:

stała dielektryczna, ϵ : $2 \leq \epsilon < 90$,

wilgotność objętościowa, θ : $0 \leq \theta \leq 100 \%$,

temperatura, T : $-20 \leq T \leq +60^\circ\text{C}$,

konduktywność elektryczna, σ : $0.000 \leq \sigma \leq 1\text{S m}^{-1}$.

Dokładność:

stała dielektryczna, ϵ , błąd bezwzględny: wartość odczytana ± 1 dla $2 \leq \epsilon < 6$ oraz ± 2 dla $\epsilon > 6$,

wilgotność, θ , błąd bezwzględny: wartość odczytana $\pm 2\%$,

konduktywność elektryczna, σ , błąd względny: $\pm 5\%$ odczytanej wartości,

temperatura, T , błąd bezwzględny: $\pm 0.8^\circ\text{C}$.

Rozdzielczość:

stała dielektryczna, ϵ : 0.1,

wilgotność objętościowa, θ : 0.1%,

konduktywność elektryczna, σ : 0.001 S m^{-1} ,

temperatura, T : 0.1°C .

Czasochłonność pomiaru:

wilgotność: 6 s pierwszy odczyt, każde powtórzenie po 3 s,

konduktywność elektryczna: 8 s każdy pojedynczy odczyt,

temperatura: 3 s każdy pojedynczy odczyt.

Dynamika skanowania:

maksymalna ilość współpracujących multiplekserów 2go poziomu: 15,

maksymalna ilość sond: 240.

Zasilanie:

przetwornik $\sim 220\text{ V}/=12\text{ V}$ albo akumulator 12 V,

prąd spoczynkowy: około 1 mA,

prąd pracy: około 600 mA.

Wymiary wys/szer/głęb:

D-LOG: 60/40/20 cm,

D-MUX: 30/20/16 cm.

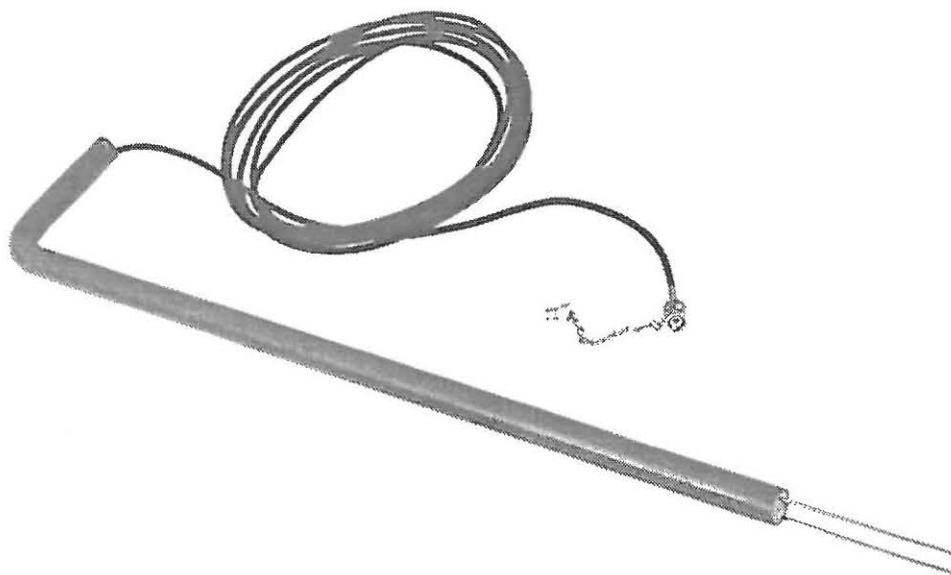
Masa:

D-LOG: 23 kg,

D-MUX: 5 kg.

8.5.3.2. Sondy współpracujące z D-LOG/mts, sonda FP/m oraz FP/mts

FP/m (Field Probe for moisture) jak również FP/mts (Field Probe for moisture, temperature and salinity) jest reflektometryczną sondą do trwałego instalowania w polu. Obie sondy są przeznaczone do stosowania w rejestracji



Rys. 39. Sonda IA PAN typu FP/m do pomiaru wilgotności oraz typu FP/mts do pomiaru wilgotności, temperatury i zasolenia.

Fig. 39. FP/m and FP/mts probes of IA PAN for moisture and moisture, temperature and salinity respectively.

chwilowych profili wilgotności albo wilgotności, temperatury i zasolenia (konduktywności elektrycznej).

W rejestracji temperatury gleby (której znajomość jest niezbędna również do przeliczania mierzonej konduktywności do poziomu właściwego dla określonej temperatury odniesienia), u nasady prętów zamocowano elektryczny czujnik temperatury. Czujnikiem jest źródło prądowe, którego prąd jest liniowo zależny od temperatury.

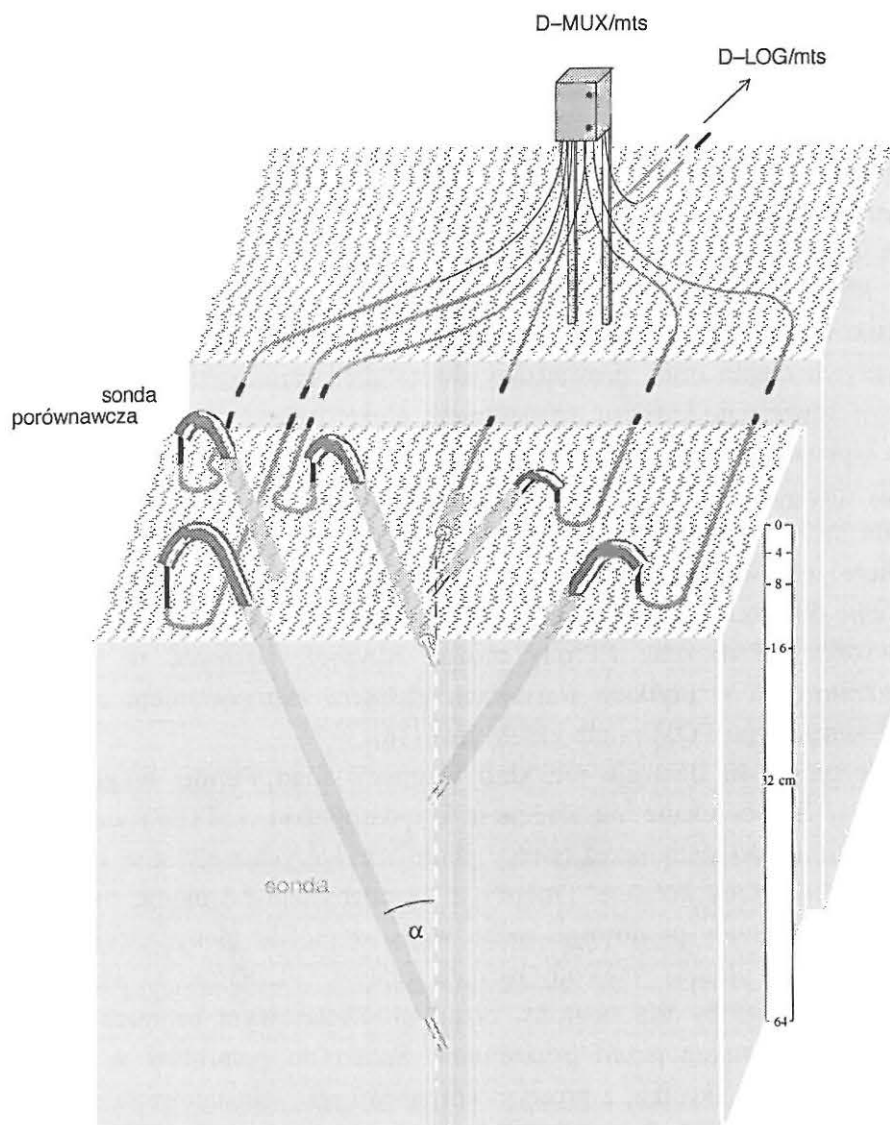
Mała przewodność cieplna wykonanego z cienkościennej rury plastikowej (PCW) korpusu sondy pozwala zminimalizować zaburzenia przepływu ciepła oraz, prowadzący do zafałszowania rozkładu wilgotności w sąsiedztwie tego korpusu, pasożytniczy efekt "mostka cieplnego".

Uprzednio wywiercony otwór pilotujący pozwala wprowadzić czujnik sondy (pręty) na dowolną głębokość profilu gleby, nie niszcząc jej struktury. Sonda może być wetknięta poziomo, poprzez boczną ścianę odkrywki albo ukośnie, z powierzchni gleby. Raz zainstalowana sonda może pozostawać w glebie dowolnie długo a po zakończeniu monitoringu, odzyskana.

Sondę FP/m oraz FP/mts można również stosować w badaniach marszrutowych w płytkich warstwach gleby, z zastosowaniem odczytnika przenośnego typu FOM/m albo FOM/mts [18].

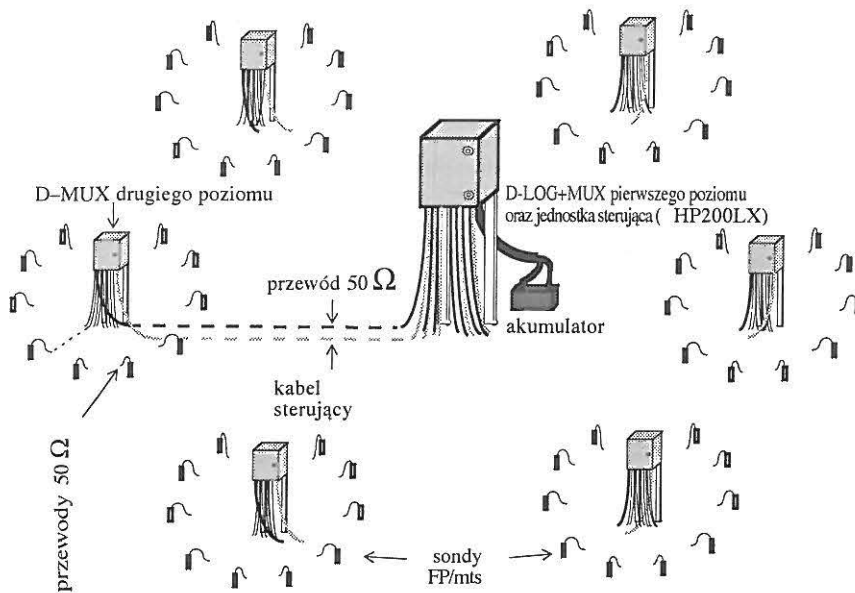
Rysunek 40 ilustruje przykład instalacji sond FP/mts w glebie (nie w skali). Zamocowane na końcach korpusów (rur z PCW) czujniki są wprowadzane do gleby przez otwory pilotujące, których wejścia są ułożone na powierzchni gleby kuliście. Otwory te są odchylone od pionu, by korpusy sond nie zaburzały pionowego ruchu wody w profilu gleby. Czujniki sond zbiegają się w pionie. Przewody łączące sondy z D-LOG/mts są ułożone pod powierzchnią gleby dla ochrony przed ultrafioletowym promieniowaniem słońca, jak również przed gryzoniami. Sonda do pomiarów w warstwie powierzchniowej (krótka, z prostym korpusem) jest zainstalowana w bocznej ścianie płytkiej miniodkrywki. Sonda porównawcza (bez prętów) może być zainstalowana razem z pozostałymi albo położona gdziekolwiek obok.

Rysunek 41 ilustruje przykład systemu D-LOG/mts IA PAN do rejestracji chwilowych profili wilgotności, temperatury i zasolenia gleby.



Rys. 40. Przykład instalacji sond FP/mts w glebie.

Fig. 40. Example of installation of the FP/mts probes in soil.



Rys. 41. Przykład systemu D-LOG/mts IA PAN do rejestracji chwilowych profili wilgotności, temperatury i zasolenia gleby. Wszystkie przewody są ułożone pod powierzchnią gleby dla osłony przed elektrycznością statyczną, niszczącym działaniem słońca jak również gryzoni.
Fig. 41. Example of the D-LOG/mts system of IA PAS for recording instantaneous profiles of moisture, temperature and salinity of soil. All cables are laid under the soil surface in order to protect them against UV radiation and rodents as well.

Najmniejsza długość korpusu sondy wynosi 15 cm. Jej czujnik można umieszczać na głębokości 5÷20 cm, zależnie od nachylenia korpusu. Największa praktyczna długość korpusu sondy wynosi 400 cm.

Otwór pilotujący, w który wprowadza się sondę z powierzchni pola, powinien być nachylony pod wybranym kątem, np. 30 deg. Długość sondy, L , oraz głębokość umieszczenia jej czujnika, D , są wzajemnie zależne:

$$L = D / \cos(\alpha) - 5 \quad (42)$$

gdzie α jest odchyleniem korpusu od pionu. L i D są wyrażone w cm.

Typowy zestaw zawiera 6 różniących się długościami korpusów sond, których czujniki sięgają typowych głębokości w profilu gleby:

- 3 sondy o korpusach 15 cm,
- 1 sonda o korpusie 30 cm,
- 1 sonda o korpusie 65 cm,
- 1 sonda o korpusie 145 cm.

Powyższe długości korpusów są wyliczone tak, by przy nachyleniu $\alpha = 30$ deg czujniki sond sięgały głębokości odpowiednio: 5 cm, 10 cm, 15 cm, 30 cm, 60 cm i 120 cm.

8.5.3.2.1. Parametry sond FP/m, FP/mts

Czujnik:

odcinek linii przesyłowej utworzony przez dwa pręty ze stali nierdzewnej o średnicy 2 mm, długości 100 mm, odległych od siebie o 16 mm.

Korpus:

rura PCW o średnicy zewnętrznej 2 cm i długości 15 cm ÷ 400 cm.

Długość przewodu:

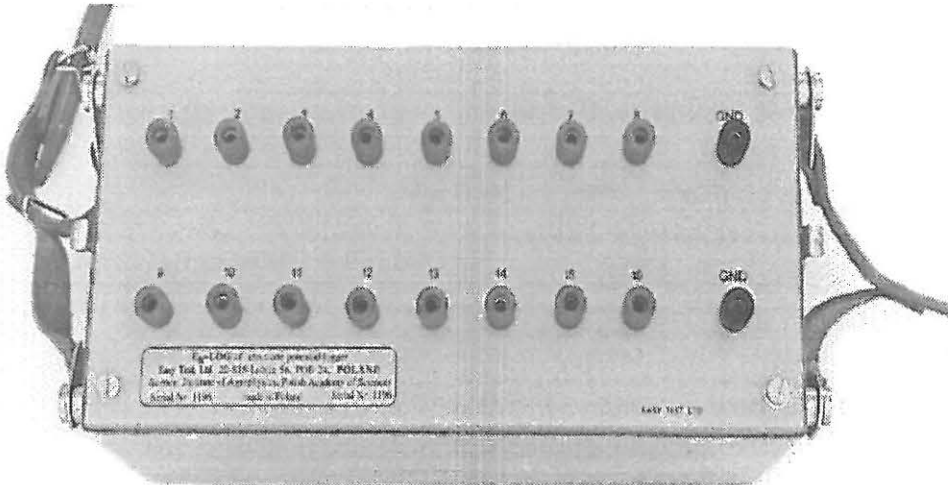
do 10 m.

Strefa czułości:

cyylinder opisany na prętach o średnicy około 50 mm i wysokości około 110 mm.

8.5.4. E_h-LOG/16

E_h-LOG jest zasilany bateryjnie, sterowany mikroprocesorem urządzeniem przeznaczonym do rejestracji siły elektromotorycznej ogniw elektrochemicznych, a zwłaszcza potencjału redoks, którego znajomość pozwala ocenić intensywność i kierunek procesów redukcji-oksydacji (redoks) w glebie (i/albo w innych ciałach porowatych) które bywają okresowo niedotlenione (np. zalane wodą).



Rys. 42. E_h -LOG/16, 16-to kanałowy rejestrator potencjału elektrodowego.

Fig. 42. E_h -LOG/16, the 16-channel electrode potential recorder.

Potencjał redoks, RX , jest w swej istocie napięciem pomiędzy elektrodą wskaźnikową (zwykle platynową - Pt) i porównawczą (zwykle nasyconą elektrodą kalomelową - NEK) osadzonymi w glebie (i/albo w innych ciałach porowatych).

E_h -LOG jest dostosowany do wielokrotnych pomiarów dokonywanych o dowolnych porach doby, wybieranych z godziną rozdzielczością.

Przy zastosowaniu ośmiu par elektrod Pt-NEK, E_h -LOG może jednocześnie monitorować proces redoks w ośmiu niezależnych stanowiskach eksperymentalnych. Przy zastosowaniu pojedynczej NEK jako elektrody porównawczej wspólnej dla grupy elektrod wskaźnikowych Pt, można rejestrować chwilowe profile RX w glebie na podstawie jego pomiarów z piętnastu (maksymalnie) wybranych głębokości.

Programowanie grafiku pomiarów, jak również uzyskiwanie zebranych danych realizuje się przy pomocy komputera klasy IBM poprzez typowe łącze szeregowe.

8.5.4.1. Parametry E_H-LOG/16

Woltomierz:

- oporność wejściowa:** $10^{12} \Omega$,
- rozdzielczość:** 1 mV,
- Zakres pomiaru:** -2000 ÷ +2000 mV,
- błąd bezwzględny:** ± 3 mV,
- błąd względny:** ± 5%,
- temperatura otoczenia:** -3 ÷ +50 °C.

Pamięć:

- nośnik:** pamięć nieulotna EPROM 64 KB,
- pojemność:** 2000 odczytów 5-o znakowych na kanał.

Dynamika skanowania: 16 elektrod.

Elektrody:

- elektroda wskaźnikowa:** typowa elektroda platynowa,
- elektroda porównawcza:** typowa nasycona elektroda kalomelowa.

Komunikacja:

- łącze szeregowo RS232C.**

Sprzęt:

- rozmiary szer/głęb/wys:** 26/18/13 cm,
- masa:** 2.75 kg z baterią,
- zasilanie:** 10 x ogniwo R20 + 4 x ogniwo R14,
- żywotność baterii:** około 1-go roku ciągłej pracy.

9. PIŚMIENNICTWO

1. **Ansoult M., De Backer L.W., Declercq M.:** Statistical relationship between apparent dielectric constant and water content in porous media. *Soil Science Society of America Journal* 49, 47-50, 1985.
2. **Arble W.C., Shaw M.D.:** Bibliography on the methods for determining soil moisture. *Eng. Res. Bull. B-78, Coll. of Eng. End. Arch., Univ. Park, Penn., 1959.*
3. **Arulanandan K., Mitchell J.K.:** Low frequency dielectric dispersion of clay-water electrolyte systems. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 16, 337-351, 1968.
4. **Bard A.J.:** *Encyclopedia of electrochemistry of the elements*, vol.II, Marcell Dekker, Inc., 1974.
5. **Bieganowski A.:** "Ocena mikrodyfuzji tlenu w glebie na podstawie krzywej voltamperometrycznej redukcji tlenu. Praca doktorska, IA PAN, Lublin 1997.
6. **Campbell G.S., Gee G.W.:** *Water potential miscellaneous methods*. Agronomy 9, Part 1, 2-nd Ed, 619-633, 1986.
7. **Chełkowski A.:** *Fizyka dielektryków*. PIW, Warszawa, 1972.
8. **Chernyak G.Ya.:** *Dielectric methods for investing moist soils*. Israel Program for Scientific Translations Ltd. IPST Cat. No. 1831, Jerusalem. Available from the U.S. Dept. of Commerce, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, Springfield, Va. 22151, 1967.
9. **Conway B.E.:** *Theory and principles of electrode processes*. The Ronald Press Comp., New York, 1965.
10. **Dalton F.N., Helkerath 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* 224, 989-990, 1984.
11. **Dasberg S., Dalton F.N.:** Time Domain Reflectometry field measurements of soil water content and electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 49, 293-297, 1985.
12. **Davis J.L., Chudobiak W.J.:** In situ meter for measuring relative permittivity of soils. Geological Survey of Canada. Energy, Mines and Resources of Canada, Ottawa, Paper 75-1A, 75-79, 1975.
13. **Dean T.J., Bell J.P., Baty A.J.B.:** Soil moisture measurement by an improved capacitance technique: I. Sensor design and performance. *Journal of Hydrology*, 93: 67-78, 1987.
14. **Deighton T.:** The effect of the movement of soil salts on standarization values of electrodes used in moisture determinations. *J. Agric. Sci.*, 13, 1923.
15. **Dobrzański B., Malicki M.:** A conductometric method for the control of the moisture dynamics of mineral soils. *Polish Journal of Soil Science*, vol. XII, nr 2, 1979.
16. **Dobrzański B., Gliński J., Malicki M.:** Electrical resistance method for measuring moisture dynamics in sandy soils. *Roczniki Gleboznawcze, dodatek do t. XIV:* 15-21, 1964.
17. **Domżał H., Malicki M.:** Stacjonarna elektroda-sonda do pomiarów wilgotności gleb wytworzonych z piasku. *Roczniki Gleboznawcze, dodatek do t. XV:* 193-197, 1965.

18. **Easy Test:** Soil water status monitoring devices: 20–815 Lublin 56, PO. Box 24, Solarza 8b, Brochure 1997.
19. **Fellner-Feldegg, H.:** The measurement of dielectrics in the time domain. *J. of Phys. Chem.*, Vol.73, No. 3, 616-623, 1969.
20. **Gawlik J., Malicki M., Stepniewski W.:** The problem of effective voltage control in measurement of ODR in soil. *Polish Journal of Soil Science*, Vol. X, No.1:9–14, 1977.
21. **Gardner C.M.K., Bell J.P., Cooper J.D., Dean T.J., Hodnett M.G.:** Soil water content. In: *Soil Analysis: Physical Methods* (eds C.E. Mullins & K.A. Smith), pp. 1-73. Marcel Dekker, New York, 1991.
22. **Gliński J., Duliban J.:** Potencjał oksydoredukcyjny w glebach. *Problemy Agrofizyki*, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, 1972.
23. **Gliński J., Stepniewski W.:** Soil aeration and its role for plants. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, International standard book nr 0-8493-5250-9, 1985.
24. **Gliński J.:** Agrophysics in modern agriculture. *International Agrophysics*, vol. 6, nr 1/2, 1-7, 1992.
25. **Gupta S.C., Hanks R.J.:** Influence of water content in electrical conductivity of the soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 36, 855-857, 1972.
26. **Hasted J.B.:** Aqueous dielectrics. Chapman and Hall, London, 1973.
27. **Hayhoe H.N., Bailey W.G.:** Monitoring changes in total and unfrozen water content in seasonally frozen soil using Time-Domain Reflectometry and neutron moderation techniques. *Water Resources Research* 21, 8, 1985.
28. **Hewlett Packard:** TDR fundamentals for use with HP 54120T digitizing oscilloscope and TDR, Application note 62, 1988.
29. **Hoekstra P., Delaney A.:** Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 79: 1699-1708, 1974.
30. **Hilhorst M.A., Groenewold J., de Groot J.F.:** Water content measurements in soil and rockwool substrates: dielectric sensors for automatic in situ measurements. *Sensors in horticulture, Acta Horti. Cult.*, Vol. 304, 209-218, 1992.
31. **James D.W., Hanks R.J., Jurinak J.J.:** *Modern Irrigated Soils*. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., 140-149, 1982.
32. **Kawalerow G.I., Mandelsztam S.M.:** Wprowadzenie do teorii pomiarów. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 15-15, Warszawa 1983.
33. **Kirkschether E.J.:** Ground dielectric constant measurement using a section of balanced two wire transmission line. *Institution of Radio Engineers, Transactions on Antennas and Propagation*, AP-8, 307-312, 1960.
34. **Kiselev N.F.:** Dielectric characteristics of certain soils over the frequency range 0.1-250 MHz. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 29, 1/2, 19-22, 1974.
35. **Kolev N.V., Penev K., Kirkova Y., Krstanov B., Malicki M.:** Electrical probes of soil moisture and their applicability in irrigation control. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 346: 49-53, 1987.

36. **Kowalik P.:** Zarys fizyki gruntów. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1973.
37. **Lemon E.R., Erickson A.E.:** The measurement of oxygen diffusion in the soil with a platinum microelectrode. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Vol. 16:160-163, 1952.
38. **Loon W.K.P. van, Perfect E., Groenevelt P.H., Kay B.D.:** A new method to measure bulk electrical conductivity in soils with Time Domain Reflectometry. *Canadian Journal of Soil Science* 70, 403-410, 1990.
39. **Loon W.K.P. van, Perfect E., Groenevelt P.H., Kay B.D.:** Application of dispersion theory to Time Domain Reflectometry in soils. *Transport in Porous Media* 6, 391-406, 1991.
40. **Lytch A.M., Lis L.S.:** Electrophysical properties of peat soils and their practical applications. Academy of Sciences of Bielorussian SSR, The Peat Institute, Nauka i Technika, 116-119, 1980.
41. **Malicki M.:** Kontrola dynamiki wilgotności gleb w oparciu o ich właściwości elektrofizyczne. Praca doktorska, Akademia Rolnicza w Lublinie, 1978.
42. **Malicki M.:** Elektroda platynowa do pomiaru natlenienia i potencjału redoks, zwłaszcza w glebie. UP PRL, Patent nr 29289, Warszawa, 1978.
43. **Malicki M.A.:** Zagadnienie oraz technika pomiaru wilgotności gleb i potencjału wody glebowej, w: *Fizykochemiczne metody badań materiału glebowego*, Polska Akademia Nauk, Zakład Agrofizyki w Lublinie, 37-74, 1979.
44. **Malicki M.A.:** Przegląd metod pomiaru wilgotności gleb i ocena ich przydatności w badaniach polowych. *Problemy Agrofizyki*, Polska Akademia Nauk, Zakład Agrofizyki, Ossolineum, 31, 1980.
45. **Malicki M.:** An electro-capacitance capillary hygrometric sensor. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 281, 135-138, Warszawa, 1982.
46. **Malicki M.:** A capacity meter for the investigation of soil moisture dynamics. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, z. 220, 201-214, 1983.
47. **Malicki M.:** Kapilarny czujnik hygrometryczny. Pat. Nr 122306, UP PRL, Warszawa, 1985.
48. **Malicki M.:** A reflectometric (TDR) meter of moisture content in soils and other capillary-porous materials. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, z. 388, 107-114, 1990.
49. **Malicki M.:** Measurements of redox potential and Oxygen Diffusion Rate (ODR) in the soils. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 388, 115-127, 1990.
50. **Malicki M. A.:** Wpływ fizycznych właściwości gleby na elektryczne parametry układu elektrodygleba w aspekcie pomiaru jej wilgotności i zasolenia (in Polish). *Acta Agrophysica*, IA PAN, 1993.
51. **Malicki M.A.:** Elektryczny pomiar wilgotności i zasolenia gleby z zastosowaniem techniki reflektometrycznej (TDR). *ZPPNR*, z. 429, 215-221, 1996.
52. **Malicki M. A., Bieganowski A.:** Chronovoltammetric determination of oxygen flux density in the soil. *International Agrophysics*, Vol. 13 nr 3, 1999 (w druku).
53. **Malicki M., Hanks R.J.:** Interfacial contribution to two-electrode soil moisture sensor readings. *Irrigation Science*, 10:41-54, 1989.

54. **Malicki M. A., Kotliński J.:** Dielectric determination of moisture of cereals grain using time domain reflectometry. *International Agrophysics*, Vol. 12, Nr. 3, 209-215, 1998.
55. **Malicki M. A., Kotliński J.:** Dielectric determination of moisture of wood using time domain reflectometry. *International Agrophysics*, Vol. 12, Nr. 3, 217-220, 1998.
56. **Malicki M., Mazurek W.:** Thermoelectrical thermometer for remote recording of the temperature in the soil profile. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 281, 139-145, Warszawa, 1982.
57. **Malicki M., Mazurek W.:** Stacjonarny termometr termoelektryczny do kontroli rozkładu temperatury, zwłaszcza w glebie. Pat. Nr 34412, UP PRL, Warszawa, 1982.
58. **Malicki M., Skierucha W.:** A manually controlled soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse. *Proceedings of the International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status*, Logan, Utah, USA, Vol. 1, 103-109, July 6-10, 1987.
59. **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.
60. **Malicki M., Walczak R.:** A gauge of the redox potential and the oxygen diffusion rate in the soil with an automatic regulation of cathode potential. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 220: 447-451, 1983.
61. **Malicki M.A., Skierucha W.M, patenty:**
 Reflektometryczny miernik wilgotności ciał kapilarno-porowatych – zwłaszcza gleby. Pat. Nr. 154440, UP PRL, Warszawa 1987.
 WieloczuJNIKOWY próbnik do reflektometrycznego pomiaru wilgotności, zwłaszcza gleby. Pat. Nr. 266616, UP PRL, Warszawa, 1987.
 Impulśnyj reflektometryczeskij izmieritel wlaźnosti kapillarno-poristich tiel. Gosudarstwiennyj Rejester Izobrietienij, Nr. 1835069, 1988.
 Reflektometrischer Feuchtigkeitsmesser für kapillar-porose Körper, insbesondere für den Boden. Pat. DD 271 380 A5, Ausschliessungspaten DDR, 1988.
 Reflectometric moisture meter for capillary-porous materials, especially for the soil. Pat. Nr. 4,918,375, USA, 1990.
 Reflektometryckij meric vlhkosti pro kapilarné porezni materialy, zejména pro zeminu. Federalni Urad Pro Vynalezky, Ceska a Slovenska Federativni Republika. Pat. Nr. PV 4552-88.X, 1991.
 Reflectometric moisture meter for capillary-porous materials, especially for the soil. European Patent Office, Pat. Nr. 88110563.9-2204 0297604, Germany, 1992.
 Reflectometric moisture meter for capillary-porous materials, especially for the soil. Israel Patent Office, Pat. Nr. 86743, Israel, 1992.
62. **Malicki M., Walczak R.:** Układ do pomiaru wydatku dyfuzji tlenu i potencjału redukcji-oksydacyjnego w ośrodku porowatym. U.P. PRL, Patent nr 125419, Warszawa, 1985.
63. **Malicki M.A., Walczak R.T.:** Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. *E.J. of S.S.*, v 50 no 3, 1999 (w druku).

64. **Malicki M. A., Kokot J., Skierucha W. M.:** Determining bulk electrical conductivity of soil from attenuation of electromagnetic pulse. *International Agrophysics*, Vol. 12, Nr. 3, 181-183, 1998.
65. **Malicki M.A., Plagge R., Roth C.H.:** Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. *European Journal of Soil Science*, 47, 357-366, 1996.
66. **Malicki M. A., Plagge R., Renger M., Walczak R.T.:** Application of Time-Domain Reflectometry (TDR) soil moisture miniprobe for the determination of unsaturated soil water characteristics from undisturbed soil cores. *Irrigation Science* 13, 65-72, 1992.
67. **Malicki, M.A., Walczak R.T., Koch S., Flühler H.:** Determining soil salinity from simultaneous readings of its dielectric constant and electrical conductivity using TDR. *Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications Proceedings*. September 7 - 9, 328-336, Evanston, IL, USA, 1994.
68. **Matsui S., Shirai K.:** Electrode interfacial impedance during the measurement of conductive and dielectric properties of soil. *Bulletin of the Faculty of Agriculture, Mie University*, No. 44, 225-240, 1972.
69. **McIntyre D.S.:** The platinum microelectrode method for soil aeration measurement. *Advances in Agronomy*, Vol. 22:235-283, 1970.
70. **Mehran M., Arulanandan K.:** Low frequency conductivity dispersion in clay-water-electrolyte systems. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 25, 39-48, 1977.
71. **Mullins C.E.:** Matric Potential. In *Soil Analysis: Physical Methods* (eds C.E. Mullins & K.A. Smith): 75-109, Marcel Dekker, New York, 1991.
72. **Nadler A., Frenkel H.:** Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by the four-electrode method. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, 1216-1221, 1980.
73. **Nahman N.S.:** Picosecond-domain waveform Measurements. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 66, No. 4, 441-454, 1978.
74. **Oliver B.M., Cage J.M.:** Electronic measurements and instrumentation. *Inter-university Electronics Series*, Vol. 12. McGraw-Hill Book Company, USA, 61-64, 1971.
75. **PWN.:** *Słownik wyrazów obcych*, 488-488, Warszawa 1980.
76. **Reeve M.J., Carter A.D.:** Water release characteristic. In: *Soil Analysis: Physical Methods* (eds C.E. Mullins & K.A. Smith), pp. 111-160. Marcel Dekker, New York, 1991.
77. **Rhoades J.D., Schilfgaarde J.:** An electrical conductivity probe for determining soil salinity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 40, 647-651, 1976.
78. **Rhoades J.D., Manteghi N.A., Shouse P.J., Alves W.J.:** Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal* 53, 433-439, 1989.

79. **Rickman R.W.:** Effects of salts on oxygen diffusion rate measurements in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Vol. 32:618-622, 1968.
80. **Roth K., Schulin R., Flühler H., Attinger W.:** Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resource Research* Vol 26, No 10, 2267-2273, 1990.
81. **Ryden B.E.:** Agriculture and the hydrosphere. Winter monitoring of soil moisture in cultivated clay, applying the Time Domain Reflectometry technique. The Symposium on "Agriculture Production in Relation to Water Sources", Czechoslovak Scientific and Technical Soc., Nov.27-29, 1984.
82. **Ryden B.E.:** Winter soil moisture regime monitored by the Time-Domain Reflectometry technique (TDR). *Geografiska Annalen*, vol. 68, ser. A, 3, 1986.
83. **Skierucha W.:** Zależność propagacji impulsu elektromagnetycznego w glebie od jej wybranych właściwości. Praca doktorska, IA PAN, Lublin 1996.
84. **Steru M.:** Le controle électrique de l'humidité des matériaux. *Mesures et Contrôle Industriel*, nov. et dec. 1958-janv. et fev. 1959.
85. **Stępniewski W.S.:** The usefulness of the tip-point micro electrode in the measurement of ODR in soil. *Roczniki Gleboznawcze*, Vol. XXX, nr 3:15-23, 1979.
86. **Strickland J.A.:** Time-Domain Reflectometry measurements. Tektronix Inc. Beaverton, Oregon 97005, 1970.
87. **Sydenham P.H.:** Podręcznik Metrologii, podstawy teoretyczne. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 22-22, Warszawa 1988.
88. **Thomas A.M.:** In situ measurement of moisture in soil and similar substances by fringe capacitance. *Journal of Scientific Instrumentation*, 43: 21-27, 1966.
89. **Tomaszewski A.:** Podstawy nowoczesnej metrologii. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 5-5, Warszawa 1978.
90. **Topp G.C., Davis J.L.:** Measurement of soil water content using Time-Domain Reflectometry (TDR): a field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 4 :19 - 24, 1985.
91. **Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.:** Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 3, 574-582, 1980.
92. **Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.:** Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 46, No. 4, 672-678, 1982 a.
93. **Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.:** Electromagnetic determination of soil water content using TDR: II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.46, No. 4, 678-684, 1982 b.
94. **Topp G.C., Yanuka M., Zebchuk W.D., Zegelin S.:** Determination of electrical conductivity using Time Domain Reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resources Research* 24, 945-952, 1988.
95. **Troickij N.B.:** Frequency-moisture dependence of electrical parameters of the soil. *Doklady WASCHNIL*, No. 3, 43-45, 1973.

96. **Walczak R.T., Sławiński C., Malicki M., Sobczuk H.:** Measurement of water characteristics in soil using TDR technique: Water characteristics of loess soil under different treatment. *International Agrophysics*, 175-182, 1993.
97. **Whitney M., Gardner F., Briggs L. J.:** An electrical method of determining the moisture content of arable soils. *U.S. Dept. Agr., Div. Soils, Bull. 6*, 1897.

METHODICAL QUESTIONS OF MONITORING OF WATER STATUS IN SELECTED BIOLOGICAL MATERIALS

SUMMARY

Methodical questions of monitoring of water status in soil, cereals grain and wood are discussed (where monitoring is understood as registration of time and spatial variability of selected properties).

Amount of variables which is necessary in order to determine water status depends on the complexion of the considered phenomena and is, so far, the matter of arbitrary choice. In most practical cases the water status is expressed only by moisture of the considered material (like the building timber). In practical terms, two variables suffice to express water status in cereal grain: moisture and temperature. To describe water status in the soil not less than five variables are needed: amount of water (the soil moisture), soil water potential, salinity, oxygenation and temperature.

The only sensors that can be integrated in modern data acquisition systems must be read electrically. Therefore electroresistance and electrocapacitance methods were considered. Dielectric sensors were recognized as the proper choice.

Soil is a complex material having instable characteristics. For this reason it is the most difficult task to monitor soil water status, particularly to determine the soil moisture. Therefore it has been assumed that measuring methods verified for the soil will be also suitable for other, less complex materials. Thus, monitoring of soil water status was mainly discussed.

Special attention was focused to the time domain reflectometry, TDR, as the semiselective method for the soil moisture and salinity determination.

Keywords: TDR, soil water, wood moisture, grain moisture, soil salinity, ODR.