

MIERNIK TDR WILGOTNOŚCI GLEBY Z WYKORZYSTANIEM EFEKTU STUDNI IMPEDANCJI

J. Kotliński

Instytut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-280 Lublin.

e-mail: jotkot@demeter.ipan.lublin.pl

S t r e s z c z e n i e. Odpowiednio zaprojektowana sonda aparatu TDR, przeznaczonego do pomiaru wilgotności w glebach, pozwala na otrzymanie reflektogramu charakterystycznego dla efektu studni impedancji. Elementy wyróżnione takiego reflektogramu sugerują konstrukcję prostego detektora czasu propagacji impulsu testującego w obszarze czujnikowym sondy. Detektor umożliwia uzyskanie wyniku pomiaru w trybie natychmiastowym i bez obecności układu mikroprocesora. Modyfikacja linii transmisyjnej, polegająca na wprowadzeniu do niej dodatkowej nieciągłości impedancji, umożliwia zastosowanie omawianego detektora do przeprowadzenia procesu kalibracji przyrządu pomiarowego TDR.

S ł o w a k l u c z o w e: wilgotność, TDR, studnia impedancji.

1. WSTĘP

Jednym z elementów, w który wyposażone są aparaty TDR przeznaczone do pomiaru wilgotności gleby, jest sonda pomiarowa. Najczęściej spotykaną formą sondy jest kabel koncentryczny w.cz. zakończony dwoma równoległymi prętami metalowymi, które umieszcza się w glebie i które stanowią element czujnikowy sondy [2]. Dla impulsów testujących, stosowanych w technice TDR, kabel koncentryczny z prętami sondy stanowią linię transmisyjną w.cz. z dwiema nieciągłościami impedancji. Pomiar wilgotności metodą reflektometryczną TDR polega na wprowadzeniu do sondy pomiarowej impulsu testującego o znanej geometrii i zarejestrowaniu tzw. reflektogramu, będącego obrazem złożonym z elementów echa odbiciowego impulsu testującego, które powstały na nieciągłościach impedancji i które są przedstawione w funkcji czasu w obszarze tzw. okna czasowego reflektogramu. Ustalenie położenia elementów echa w reflektogramie jest

równoważne z określeniem momentów przejścia impulsu testującego przez punkty nieciągłości impedancji w sondzie pomiarowej, co umożliwia określenie czasu propagacji impulsu testującego w obszarze prętów sondy. Ponieważ czas propagacji impulsu jest funkcyjnie zależny od stanu nawilgocenia ośrodka, jego wyznaczona z reflektogramu wartość pozwala na obliczenie stanu nawilgocenia gleby [2].

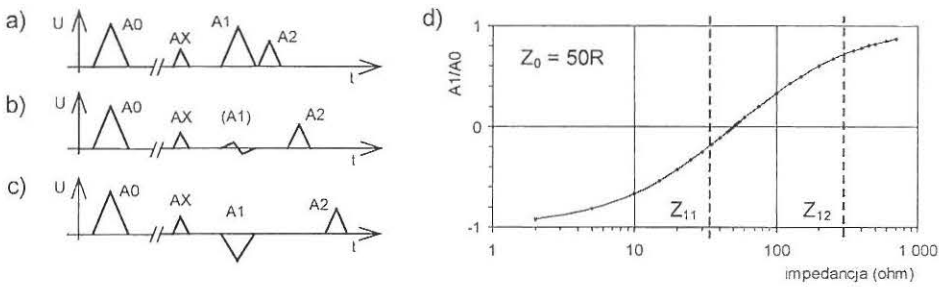
Kształt każdego reflektogramu zawiera również informację pośrednią, związaną z konstrukcją sondy. Wybór takiego lub innego elementu czujnikowego sondy wpływa na kształt reflektogramu i może uczynić go mniej lub bardziej czytelnym. Ma to bardzo duże znaczenie w przypadku zlecenia wykonywania operacji analizy reflektogramu układowi logicznemu aparatu pomiarowego. Dokonanie właściwego wyboru elementu czujnikowego sondy umożliwia redukcję funkcji logicznych aparatu pomiarowego do niezbędnego minimum, co pozwala na duże uproszczenia w konstrukcji aparatu, zmniejszenie jego ceny, zwiększenie niezawodności i zwykle prowadzi do przyspieszenia uzyskania wyniku z pomiaru.

2. STANDARDOWA SONDA PRĘTOWA TDR

Kable koncentryczne używane w sondach pomiarowych TDR są standardowymi kablami w.cz., których impedancja wynosi 50R (omów). Impedancja prętów sondy, mierzona w powietrzu, zawiera się zwykle w granicach 150R ÷ 300R i jest uwarunkowana wieloma czynnikami, takimi jak: liczba prętów, ustawienie prętów sondy względem siebie, średnice prętów itp. Wprowadzenie prętów sondy do gleby, której stała dielektryczna jest zawsze większa od stałej dielektrycznej powietrza i silnie zależy od stanu nawilgocenia gleby, oprócz zwiększenia czasu propagacji impulsu testującego powoduje również zmniejszenie impedancji elementu czujnikowego sondy. Prowadzi to bezpośrednio do zmiany amplitud każdego z elementów odbiciowych echa impulsu testującego od nieciągłości impedancji w linii transmisyjnej, a w szczególności zmiany amplitudy pierwszego odbicia na granicy: kabel koncentryczny – pręty sondy. Zbliżanie się wartości impedancji elementu czujnikowego sondy do wielkości 50R powoduje zanik lub zmianę polaryzacji pierwszego odbicia. Uzyskany w takich warunkach reflektogram jest obrazem na tyle niekompletnym, że w sondach TDR stosuje się dodatkową, wprowadzoną umyślnie nieciągłość impedancji tylko po to, by w reflektogramie powstał nowy punkt odniesienia, niewrażliwy na wpływ wilgotności gleby

na kształt reflektogramu i stanowiący w nim element zastępczy dla echa z pierwszego odbicia.

Na rys.1a, 1b i 1c przedstawiono schematycznie reflektogramy typowej sondy TDR, której pręty są umieszczone w glebie o różnym stopniu nawilgocenia, przy czym A0 jest impulsem testującym, a A1 i A2 są odpowiednio echemi odbiciowymi od połączenia kabel koncentryczny – pręty sondy i od końca prętów sondy. Na rys.1d. pokazano, jak zmienia się amplituda pierwszego odbicia impulsu testującego A1 w stosunku do amplitudy impulsu testującego A0 w funkcji impedancji prętów sondy. Przy założeniu, że impedancja prętów sondy, w powietrzu, wynosi 200R, po zanurzeniu ich w środowisko o 100% wilgotności (do wody), impedancja prętów sondy spadnie do wartości 22R. Zmiana wilgotności gleby może powodować wystąpienie każdej z impedancji z zakresu 200R-22R, co zaznaczono na rys.1d liniami przerywanymi, określając przedział tych impedancji $\langle Z_{11}, Z_{12} \rangle$.



Rys. 1. Schematyczne reflektogramy typowej sondy TDR w funkcji wilgotności: a) – gleba sucha, b) – gleba wilgotna, dla której $Z = 50R$, c) – woda, (d) – wykres względnej amplitudy elementu odbiciowego A1 reflektogramu w funkcji impedancji prętów czujnika

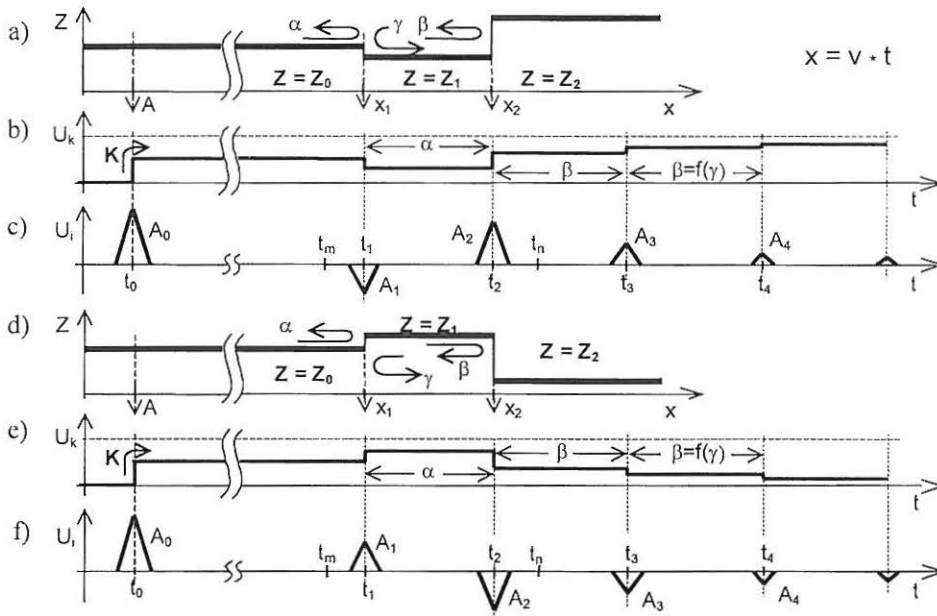
Fig. 1. Schematic reflectograms of a typical TDR probe vs moisture: a) dry soil, b) moist soil with $Z = 50R$, c) – water, d) – a plot of relative amplitude of the A1 reflection element of reflectogram vs impedance of the probe rods.

Z rys.1d widać, że w przedziale $\langle Z_{11}, Z_{12} \rangle$ istnieje punkt, dla którego zanika amplituda A1, w związku z czym odbicie impulsu testującego od pierwszej nieciągłości impedancji nie może być włączone do cechy charakterystycznej reflektogramu, niezbędnej do przeprowadzenia analizy danych w nim zawartych. W rzeczywistości nie tylko ten punkt, ale również jego bliskie otoczenie wykazuje podobną wadę, powodując zanik lub zniekształcenie kształtu elementu A1, co schematycznie zaznaczono na rys.1b. Wprowadzenie dodatkowej nieciągłości

impedancji w linii transmisyjnej sondy pozwala na uzyskanie stałego elementu charakterystycznego reflektogramu, AX, który może być użyty w zastępstwie elementu A1.

3. EFEKT STUDNI IMPEDANCJI

Przeprowadzając analizę rozchodzenia się impulsu fali elektromagnetycznej w ośrodku zbudowanym z linii transmisyjnej w.cz. o impedancji Z_0 i połączonej z odcinkiem linii o impedancji Z_1 , a następnie z odcinkiem linii o impedancji Z_2 , można zauważyć, że przy spełnionym warunku $Z_0 > Z_1$ oraz $Z_1 < Z_2$, kształt reflektogramu, którego obserwacji dokonuje się w punkcie „A”, jest ściśle określony i niezmienny w swoim charakterze, bez względu na to, jak kształtują się wartości Z_0/Z_1 i Z_2/Z_1 .



Rys. 2. Wykresy impedancji połączonych odcinków linii transmisyjnej Z_0 , Z_1 i Z_2 (a) i (d) oraz schematyczne reflektogramy odpowiadające tym układom linii: (b) i (e) - dla impulsu testującego krokowego K , (c) i (f) - dla impulsu testującego szpilkowego A_0 .

Fig. 2. Plots of impedance of connected parts of transmission lines Z_0 , Z_1 , Z_2 (a) and (d). Schematic reflectograms of above system: (b) and (e) – for the step test pulse K , (c) and (f) - for the needle test pulse.

Na rysunku 2 przedstawiono reflektogramy, charakterystyczne dla wyżej zdefiniowanych warunków i wykreślone dla impulsu testującego krokowego (rys.2b) i szpilkowego (rys.2c).

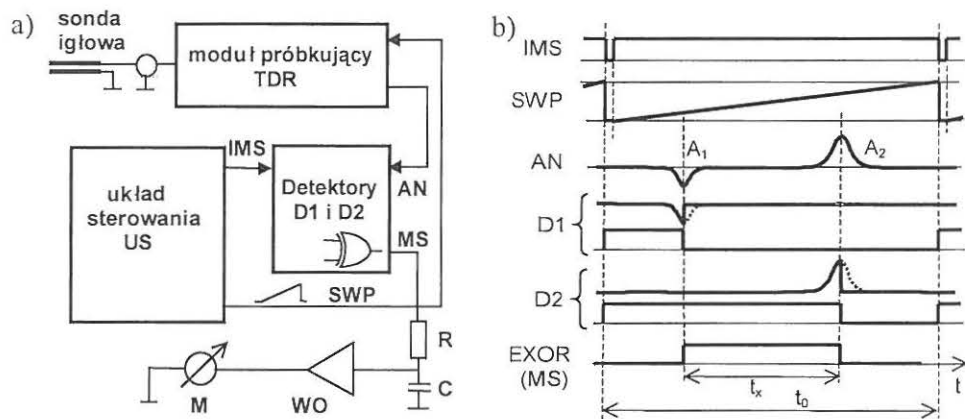
Reflektogramy otrzymane przez penetrację zestawu linii transmisyjnych impulsem krokowym charakteryzują się tym, że pierwszy element echa, α , powoduje zmniejszenie amplitudy sygnału, a pozostałe elementy echa, β , γ , $\beta=f(\gamma)$ itd., powodują wzrost amplitudy aż do stanu nasycenia (rys.2b). Penetracja zestawu linii impulsem szpilkowym powoduje, że pierwszym elementem reflektogramu jest echo A_1 , które zawsze ma polaryzację przeciwną do polaryzacji impulsu penetrującego (rys.2c). Pozostałe elementy reflektogramu wykazują polaryzację zgodną z polaryzacją impulsu testującego, a amplitudy powiązane są zależnością: $A_2>A_3>A_4$ itd. Przy zmienianiu się wartości Z_0/Z_1 , zmieniają się stosunki amplitudowe: $A_1:A_2$ oraz $A_2:A_3:A_4...$, ale nie zmienia się charakter reflektogramu. Z powodu charakterystycznego kształtu wartości impedancji wokół odcinka linii o impedancji Z_1 , gdzie $Z_0>Z_1<Z_2$ (rys.2a) oraz z powodu niezmienności charakteru reflektogramu przy spełnieniu powyższego warunku, zaproponowano nazwanie omawianego przypadku: *efektem studni impedancji* [1].

Podobną do opisanej powyżej sytuację otrzymuje się przy spełnieniu warunku $Z_0<Z_1$ oraz $Z_1>Z_2$ (rys.2d). Kształt reflektogramu, którego obserwacji dokonuje się w punkcie „A”, jest ściśle określony i niezmienny w swoim charakterze, bez względu na to jak kształtują się wartości Z_0/Z_1 i Z_2/Z_1 . Reflektogramy otrzymane przez penetrację zestawu linii transmisyjnych impulsem testującym krokowym charakteryzują się tym, że pierwszy element echa, α , powoduje zwiększenie amplitudy sygnału, a pozostałe elementy echa, β , γ , $\beta=f(\gamma)$ itd., powodują zmniejszanie się wartości amplitudy aż do stanu nasycenia (rys.2e). Penetracja zestawu linii impulsem szpilkowym (rys.2f) powoduje, że pierwszym elementem reflektogramu jest echo A_1 , które zawsze ma polaryzację zgodną z polaryzacją impulsu penetrującego. Pozostałe elementy reflektogramu wykazują polaryzację przeciwną do polaryzacji impulsu testującego przy czym wartości bezwzględne amplitud powiązane są zależnością: $A_2>A_3>A_4$ itd. Przy zmienianiu się wartości Z_0/Z_1 , zmieniają się wartości bezwzględne stosunku amplitud: $A_1:A_2$ oraz $A_2:A_3:A_4...$, ale nie zmienia się charakter reflektogramu. Pomimo analogii do efektu studni impedancji, nie proponuje się nowej nazwy dla opisanego powyżej zjawiska – jest to odmiana efektu studni impedancji.

4. WYKORZYSTANIE EFEKTU STUDNI IMPEDANCJU W APARATACH TDR

Właściwości linii transmisyjnej z efektem studni impedancji mogą być wykorzystane do konstrukcji prostego detektora stanu zawilgocenia gleby, który może wytworzyć sygnał analogowy lub cyfrowy bez użycia skomplikowanego programu numerycznego. Ma to szczególnie duże znaczenie w przypadku konstrukcji sond, będących w całości kompletnymi aparatami TDR, gdzie bardzo ważnym czynnikiem jest miniaturyzacja urządzenia pomiarowego oraz skrócenie czasu, po którym uzyskuje się wynik z pomiaru. Zastosowanie efektu studni potencjału pozwala na uzyskanie wyniku z pomiaru praktycznie natychmiast po rozpoczęciu pomiaru.

Do budowy kompletnego miernika wilgotności TDR można wykorzystać dostępny na rynku moduł próbkujący [7], który wytwarza impulsy testujące, szpilkowe, o szerokości połówkowej 600ps i który przez zmianę napięcia sterującego (SWP na rys.3a) w granicach 0 - 5V, może penetrować odcinek czasu 10ns. Schemat blokowy miernika wraz z kilkoma sygnałami elektrycznymi pokazano na rys.3.



Rys. 3. Schemat blokowy miernika wilgotności TDR, pozwalającego wykorzystać efekt studni impedancji (a) oraz zestaw przebiegów elektrycznych tego przyrządu (b).

Fig. 3. A block scheme of the TDR moisture meter which allows make the most of the impedance well effect (a) and set of electrical plots of this meter (b).

Układ sterowania, US (rys.3a), wytwarza periodycznie powtarzający się ciąg impulsów strobujących IMS i sprzężonego z nimi napięcia piłokształtnego SWP (rys.3b). Odpowiedzią modułu próbkującego TDR na podawane do niego napię-

cie SWP jest periodycznie pojawiający się napięciowy sygnał analogowy AN, który jest reflektogramem badanego ośrodka. Sygnał analogowy AN jest kierowany do dwu, równolegle połączonych detektorów szczytowych D1 i D2, których zadaniem jest wykrycie momentu osiągnięcia przez sygnał AN wartości minimalnej (D1) i maksymalnej (D2). Jest to równoważne zlokalizowaniu położenia elementów A_1 i A_2 w reflektogramie, których amplitudy są dominującymi spośród wszystkich elementów odbiciowych o określonej polaryzacji (rys.2c i 2f). Po zlokalizowaniu położenia czasowego elementów A_1 i A_2 reflektogramu, detektory zmieniają swój stan logiczny, który później jest ponownie odnawiany impulsami IMS. Zastosowanie bramki EXOR na wyjściu detektorów pozwala wyodrębnić przebieg logiczny, którego czas trwania jest równy odstępowi czasowemu występowania elementów A_1 i A_2 w reflektogramie. Układ całkujący RC dołączony do wyjścia bramki EXOR pozwala na uzyskanie wyniku pomiaru w postaci analogowej. Wynik pomiaru otrzymuje się w postaci zależności funkcyjnej:

$$U_{wy} = K \cdot (t_x / t_0) + K_1 ; \quad \text{gdzie: } K \text{ i } K_1 - \text{ stałe aparaturowe.}$$

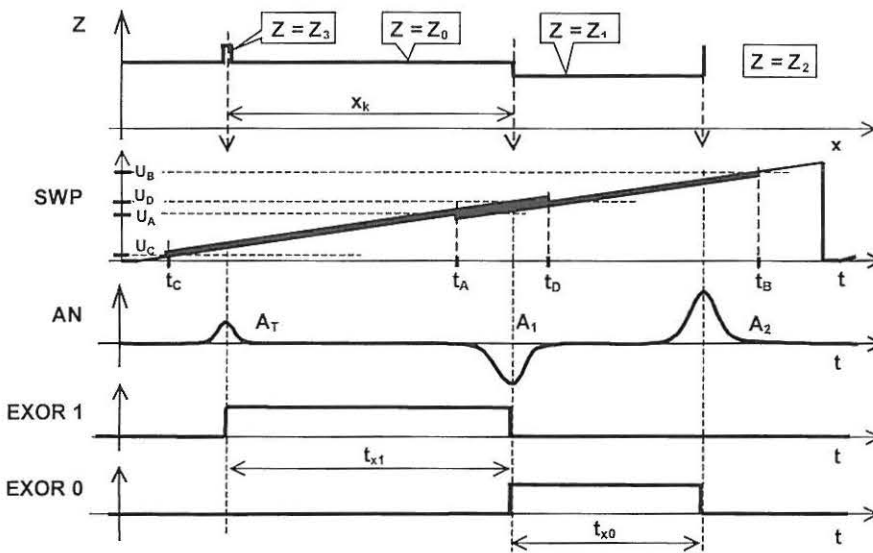
Opisywany układ pozwala na otrzymanie wyniku pomiaru w bardzo krótkim czasie, np. w ciągu 1 sekundy od chwili uruchomienia przyrządu.

5. KALIBRACJA APARATU TDR Z EFEKTEM STUDNI IMPEDANCJU

W aparatach TDR trudno jest utrzymać wysoką i długoczasową stabilność parametrów, w związku z czym, do cyklu pomiarowego przyrządu dołącza się cykle kalibracyjne, które najczęściej wykonuje się na specjalnych liniach transmisyjnych umieszczonych wewnątrz aparatu pomiarowego. Cykl kalibracyjny polega na uzyskaniu reflektogramu z linii specjalnej i na podstawie analizy położenia elementów charakterystycznych w tej linii, wyznacza się parametry wzorca. Naprzemiennie stosowany cykl pomiarowy i kalibracyjny wymaga zwykle przełączania linii transmisyjnych co jest procesem dość trudnym ponieważ przełącznik pracuje z sygnałami zaliczanymi do zakresu mikrofalowego.

Konstrukcja aparatu pomiarowego TDR, przedstawiona w poprzednim rozdziale może być uzupełniona o proces kalibracji przyrządu, który można przeprowadzić tym samym co poprzednio układem detektorów D1 i D2 i bez obecności przełącznika. W tym celu, w odpowiednio dobranej odległości elektrycznej od połączenia linii transmisyjnej z prętami sondy, na linii transmisyjnej wykonuje się zniekształcenie geometryczne, które objawia się jako dodatkowa nieciągłość impedancji, oznaczona na rys.4 symbolem Z_3 . W zależności od sposobu wykona-

nia zniekształcenia, wartość impedancji linii, Z_3 , może być zwiększona lub zmniejszona w stosunku do impedancji linii transmisyjnej Z_0 . Dodatkowo wprowadzona impedancja Z_3 powoduje pojawienie się na reflektogramie dodatkowego echa odbiciowego impulsu testującego A_T . Zniekształcenie zwiększające impedancję kabla do wartości Z_3 stosuje się w przypadku rozwartych zakończeń prętów sondy, a zniekształcenie zmniejszające impedancję kabla do wartości Z_3 stosuje się w przypadku zwartych zakończeń prętów. Zestaw przebiegów elektrycznych takiego przyrządu pokazano na rys.4., a schemat aparatu pomiarowego jest ten sam co poprzednio i pokazany jest na rys.3a.



Rys. 4. Zestaw przebiegów elektrycznych miernika wilgotności TDR pozwalającego wykorzystać efekt studni impedancji w procesie pomiarowym i kalibracji.

Fig. 4. A set of a electrical plots received from the TDR moisture meter which allows make the most of the impedance well effect in measurement and calibration process.

Różnica w pracy przyrządu bez kalibracji i z kalibracją polega na tym, że napięcie piłokształtne, SWP, zawiera się w przedziale wartości (U_A, U_B) w przypadku prowadzenia pomiaru wilgotności gleby i w przedziale (U_C, U_D) , w przypadku prowadzenia pomiaru kalibracyjnego. Wybrane przedziały odpowiadają umieszczeniu okna obserwacji reflektogramu odpowiednio w przedziale czasowym (t_A, t_B) dla pomiaru oraz w przedziale czasowym (t_C, t_D) dla kalibracji. Jak można zauważyć z rys.4, w każdym z dwu przedziałów mieszczą się po dwa elementy od-

biciowe: elementy A_1 i A_2 , w przypadku prowadzenia pomiaru wilgotności oraz elementy A_T i A_1 , w przypadku prowadzenia procesu kalibracji. Z powodu braku wrażliwości detektorów szczytowych D1 i D2 wraz z łączącą ich wyjścia bramką EXOR (rys.3a) na pierwszeństwo pojawienia się w sygnale analogowym AN dodatnio czy też ujemnie spolaryzowanego elementu reflektogramu, z układu detektorów otrzymuje się impulsy prostokątne EXOR0 i EXOR1 o czasach trwania t_{x0} i t_{x1} . Odcinki czasu, t_{x0} i t_{x1} , są proporcjonalne odpowiednio do czasu propagacji impulsu testującego w obszarze prętów sondy pomiarowej i w odcinku linii transmisyjnej o długości elektrycznej x_k . Znajomość czasów propagacji dla obu przypadków jest wystarczająca do podania wyniku pomiaru w jednostkach wzorca.

Zastosowanie powyżej opisanej metody wymaga zawężenia okna czasowego reflektogramu, a tym samym zmniejszenia długości prętów pomiarowych w przypadku stosowania modułu próbkującego opisanego w poprzednim rozdziale. Wymiana modułu na inny, o większej wartości okna czasowego, pozwala na zachowanie dotychczasowych wymiarów geometrycznych sondy pomiarowej [7].

6. PODSUMOWANIE

Odpowiednio zaprojektowana sonda pomiarowa aparatu TDR pozwala na otrzymanie reflektogramu charakterystycznego dla efektu studni impedancji. Cechy charakterystyczne tak otrzymanego reflektogramu umożliwiają jego analizę sprzętową za pomocą prostego i szybko działającego układu detektorów napięć szczytowych. Układ detektorów umożliwia otrzymanie wyniku pomiaru stałej dielektrycznej gleby (wilgotności gleby) w postaci analogowej lub cyfrowej, co pozwala na bezpośrednią prezentację wyniku pomiaru za pomocą miernika wychyłowego. Możliwe jest bezpośrednie dołączenie omawianego układu do mikrokomputera. W omawianym przypadku, w odróżnieniu od standardowo wykonywanych mierników wilgotności TDR, program mikrokomputera zwolniony jest od analizy całości reflektogramu i podejmowania decyzji dotyczących sposobu prowadzenia pomiaru. Wynik pomiaru, bez względu na to, czy w układzie jest używany mikrokomputer czy też nie, otrzymywany jest praktycznie w sposób natychmiastowy.

7. LITERATURA

1. **Kotliński J., Mazurek P.:** Efekt studni impedancji – szybka i tania metoda określania wilgotności gleb metodą TDR, Ogólnopolska Konferencja Naukowa PTA, str. 48-51, Lublin 1999.
2. **Malicki M.A., Skierucha W.M.:** A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300ps rise-time needle pulse. *Irrigation Science*, 10, 153-163, 1989.
3. **Malicki M.A.:** Metodyczne zagadnienia monitoringu statusu wody w wybranych materiałach biologicznych, *Acta Agrophysica*, nr 19, Lublin 1999r;
4. **Malicki M.A.:** Wpływ fizycznych właściwości gleby na elektryczne parametry układu elektrodygleba w aspekcie pomiaru jej wilgotności i zasolenia, *Acta Agrophysica*, Lublin 1993r;
5. **Praca zbiorowa:** Radioelektronika, WKiŁ, Warszawa 1971;
6. **Rusek A.:** Półprzewodnikowe generatory impulsów nanosekundowych, WNT, Warszawa 1981;
7. **TDR_MICRO**, moduł próbkujący TDR, typ: FT110/50C - produkt i materiały katalogowe firmy FORTEST, <http://www.fortest.lublin.pl/>

THE TDR METER OF MOISTURE IN SOILS WITH UTILIZATION OF EFFECT OF THE IMPEDANCE WELL

Institute of Agrophysics PAS, ul. Doświadczalna 4, 20-280 Lublin
e-mail: jotkot@demeter.ipan.lublin.pl

S u m m a r y. Properly projected probe of the TDR apparatus, destined to measurement of moisture in soils, allows to receiving of reflectogram characteristic for effect of the impedance well. A characteristic features of the received reflectogram suggest a construction of the simple detector which estimate propagation time of the testing pulse in area of the probe. The detector makes possible to receive a result of measurement in instantaneous mode without a microprocessor. The modification of the transmission line, relying on introducing of additional nonlinearly of impedance allows to apply of this same detector for calibration process of the TDR apparatus.

K e y w o r d s: moisture, TDR, well of impedance.