

WYKORZYSTANIE KOMUNIKACJI BEZPRZEWODOWEJ
W AUTOMATYCZNYM MONITOROWANIU TEMPERATURY
PROFILU GLEBOWEGO

Andrzej Wilczek¹, Wojciech Mazurek¹, Marcin Skierucha²

¹Institut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

²Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Warszawska

ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

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

Streszczenie. Celem pracy jest przedstawianie projektu systemu komunikacji bezprzewodowej w paśmie 433 MHz (pasmo ISM – Industrial, Scientific and Medical) opracowanego na bazie zaawansowanych podzespołów elektronicznych oraz jego implementację w postaci dwupunktowego systemu komunikacji umożliwiającego sterowanie pomiarem i przesyłanie danych o temperaturze w profilu glebowym. Niniejsza praca wykazuje, że dostępność nowoczesnych technologii umożliwia wyposażenie istniejących systemów pomiarowych oraz samych czujników w funkcjonalny i tani system transmisji radiowej do zdalnego sterowania urządzeniami pomiarowymi na odległość do kilkuset metrów.

Słowa kluczowe: monitoring, fizyczne właściwości gleby, komunikacja bezprzewodowa, pasmo ISM

WSTĘP

Automatyzacja pomiaru dotyczy nie tylko procesów przemysłowych, transportu, ale również pomiarów parametrów środowiskowych i rolniczych (temperatura, wilgotność, natlenienie, itp.) oraz życia codziennego. Wynika ona z konieczności obiektywizacji pomiaru, nieingerencji użytkownika w sam proces pomiarowy oraz przyczyn ekonomicznych. Integralnym elementem automatycznego systemu pomiarowego jest akwizycja danych. Realizacja idei automatyzacji pomiaru ściśle związana jest z rozwojem elektroniki i telekomunikacji. Rozwój telefonii komórkowej umożliwił między innymi rozwój systemów bezprzewodowego przesyłania informacji na małe i średnie odległości.

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dn. 6 sierpnia 2002 r. (Dziennik Ustaw Nr 138, Poz. 1162) na terenie Polski dozwolone jest używanie, bez posiadania pozwolenia radiowego, urządzeń radiowych bliskiego zasięgu do przesyłania danych w zakresie częstotliwości i parametrach technicznych określonych w załączonym aneksie. Szczególnie atrakcyjne są częstotliwości z pasm 433 MHz oraz 868 MHz, zwanych pasmami nielicencjonowanymi. Wiele elektronicznych podzespołów radiowych wytworzono dla tych częstotliwości, w szczególności zaś tzw. transceivery będące układami scalonymi zawierającymi nadajnik i odbiornik umieszczone w tym samym układzie. Przykładem takiego rozwiązania są układy scalone nRF401 firmy Nordic [4] oraz CC1000 firmy Chipcon [1], integrujące w jednej strukturze układu scalonego modulator i demodulator sygnału radiowego oraz ograniczające do minimum liczbę dołączonych do układu podzespołów pasywnych. Gotowe moduły radiowe z tymi układami scalonymi są dostępne w formie zmontowanych i przetestowanych płytek drukowanych w cenie około 10 Euro. W efekcie użytkownik otrzymuje tani interfejs radiowy, którego wejściem i wyjściem są sygnały do i z portu szeregowego układu nadzorczego. Zatem aby zastosować komunikację radiową do przesyłania danych z czujników pomiarowych należy skorzystać z gotowych podzespołów radiowych i skoncentrować prace na wyborze odpowiednich czujników wielkości nieelektrycznej i na implementacji odpowiedniego sterowania w postaci mikrokontrolera, przetworników analogowo-cyfrowych oraz oprogramowania, zapewniających dokładność pomiaru i minimalizację błędów transmisji radiowej.

Oferowane komercyjnie scalone oraz hybrydowe układy nadawczo-odbiorcze różnią się sposobem modulacji, mocą wyjściową, selektywnością, ilością kanałów transmisji oraz czułością [1,4]. Proste systemy bezprzewodowej komunikacji działają na zasadzie zastępowania połączenia przewodowego tzw. „kablem radiowym” (*radio wire*). Przy prawdopodobieństwie błędu rzędu 10^{-3} , jakim charakteryzują się dostępne podzespoły radiowe, taki sposób połączenia jest zawodny. Zwiększenie zasięgu komunikacji zwiększa prawdopodobieństwo zmniejszenia jakości tzn. zmniejszenia szybkości oraz zwiększenia ilości błędów transmisji.

Sprzęt i oprogramowanie układów komunikacji bezprzewodowej należy dobierać mając na uwadze przeciwstawne kryteria:

- minimalizację błędów transmisji,
- maksymalizację zasięgu działania łącza,
- minimalizację poboru prądu (przyrządy zasilane bateryjnie).

Błędy w komunikacji mają charakter losowy i spowodowane są zakłóceniami radioelektrycznymi jak również czynnikami środowiskowymi takimi, jak: wilgotność

powietrza, zasięg między nadajnikiem i odbiornikiem (zasięg widzialny) jak również materiał, z którego zbudowane są ściany budynku, w którym komunikują się urządzenia. Zatem istnieje konieczność wprowadzenia kontroli jakości transmisji. Realizuje się to przez stosowanie różnych technik, powodujących przesyłanie danych w sposób nadmiarowy, np. wprowadza się słowa kontrolne lub wielokrotnie przesyła się w obu kierunkach te same porcje danych. Efektem tego jest utrzymywanie nadajnika i odbiornika w gotowości do pracy przez czas dłuższy, niż czas faktycznie potrzebny do przesłania informacji, czego konsekwencją jest szybsze wyczerpywanie się baterii zasilających.

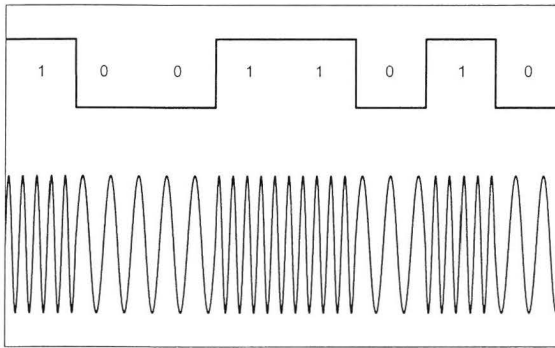
Skrócony opis zastosowanego protokołu komunikacji, będącego zestawem zasad wymiany danych między elementami systemu komunikacyjnego, przedstawiono poniżej.

OPIS PROJEKTU SPRZĘTU I OPROGRAMOWANIA

W celu realizacji dwupunktowego systemu komunikacji umożliwiającego sterowanie pomiarem i przesyłanie danych o temperaturze w profilu głębowym, opracowano protokół komunikacyjny oraz część sprzętu w postaci pary urządzeń MASTER i SLAVE do realizacji połączenia punkt-punkt. Protokół komunikacyjny umożliwiający połączenie pomiędzy urządzeniami został opracowany z myślą o realizacji w przyszłości połączeń punkt-wielopunkt i budowie sieci radiowej urządzeń.

Zaprojektowany system komunikacji radiowej umożliwia połączenie między modułem MASTER i modułem SLAVE, przy użyciu transceiverów komunikacji radiowej w paśmie 433 MHz. Informacja w postaci szeregowej podawana jest na wejście układu radiowego nRF401 [4], który przekształca szeregową informację binarną na radiowy sygnał zmodulowany, zgodnie ze standardem modulacji FSK (Frequency Shift Keying) i emituje go przez dołączoną antenę radiową. Modulacja FSK jest przekształceniem informacji binarnej na sygnał sinusoidalny o dwóch różnych częstotliwościach, zależnych od stanu bitu informacji, który ma zostać wysłany. Gdy wysyłana jest „1” to częstotliwość sygnału jest większa, gdy „0” jest mniejsza (rys. 1).

Częstotliwość pośrednia między częstotliwościami sygnału reprezentującymi stan „0” i „1”, zwana częstotliwością środkową, wynosi dla układu nRF401 433,93 MHz lub 434,33 MHz (dwa kanały transmisji), natomiast dewiacja częstotliwości (różnica częstotliwości w stosunku do częstotliwości środkowej, odpowiadająca wartości binarnej „1” oraz „0”) wynosi ± 15 kHz.



Rys. 1. Modulacja FSK stosowana przy transmisji sygnału radiowego między układami MASTER i SLAVE

Fig. 1. FSK modulation used for signal radio transmission between MASTER and SLAVE devices

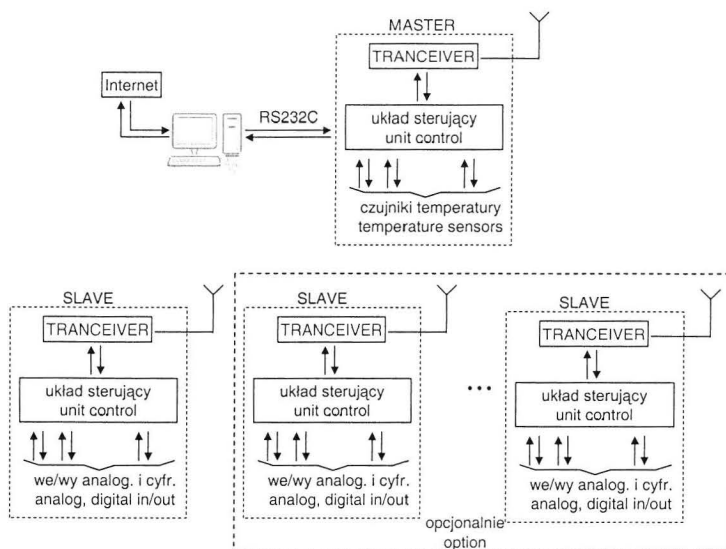
Schemat ideowy opracowanego systemu komunikacji przedstawiono na rysunku 2. Do sterowania układów MASTER i SLAVE korzystano z mikrokontrolera PIC16F876 firmy Microchip [3], bogato wyposażonego w układy wejść-wyjść analogowych i cyfrowych. Komputer PC pracował pod nadzorem aplikacji napisanej w języku Borland C++. Zadaniem tej aplikacji było komunikowanie się z urządzeniem MASTER w celu wysyłania do niego rozkazów, odbierania danych przesyłanych za pośrednictwem urządzenia MASTER przez SLAVE oraz zapisywanie wyników pomiarów w wyjściowym pliku tekstowym.

Moduł MASTER jest nadrzędny w stosunku do modułu SLAVE. Wprowadzenie adresowania modułów SLAVE spowodowało, że opcjonalnie istnieje możliwość współpracy jednego modułu MASTER z wieloma modułami SLAVE. Wewnętrzna budowa obu modułów jest taka sama, różnią się one jedynie algorytmem działania, zapisanym w pamięci zawartego w nich mikrokontrolera oraz wykorzystaniem (lub nie) poszczególnych elementów modułu.

Głównym elementem zarządzającym pracą systemu jest komputer PC, połączony szeregowym sprzężeniem RS232C z układem MASTER. Układy SLAVE wykonują komendy przychodzące łączem radiowym z urządzenia MASTER od komputera stacjonarnego.

W związku z tym, że urządzenie SLAVE jest zasilane bateryjnie, konieczne stało się wprowadzenie funkcji oszczędzania energii. Urządzenie SLAVE pozostaje w stanie uśpienia charakteryzującym się minimalnym poborem prądu z baterii zasilającej, z którego za sprawą zegara wewnętrznego cyklicznie, co 1 s, budzi się przechodząc w stan aktywności na czas 10 ms. Cykliczność działania układów SLAVE zmniejsza stukrotnie ich pobór prądu z baterii. Budzenie wewnętrzne ma na celu sprawdzenie, czy łączem radiowym jest przesłana informacja adresowana do konkretnego SLAVE'a. Po otrzymaniu i rozpoznaniu komendy, wszystkie układy

SLAVE, oprócz zaadresowanego, przechodzą w stan spoczynku charakteryzującego się cyklicznym, 10-cio milisekundowym przełączaniem się na odbiór.



Rys. 2. Schemat funkcjonalny układu interfejsu radiowego między komputerem osobistym PC oddalonymi układami pomiarowymi

Fig. 2. Functional diagram of wireless interface system between a personal computer PC and distant meters

W przypadku zgodności adresu układ SLAVE czeka na skompletowanie całej komendy wysłanej przez moduł MASTER i po sprawdzeniu sumy kontrolnej (dodatkowa informacja przesyłana łączem radiowym w celu sprawdzenia poprawności transmisji) podejmuje akcję zależną od otrzymanej komendy. Po wykonaniu określonej komendy (np. wykonaj pomiar lub przyslij wynik) układ SLAVE przechodzi w stan spoczynku i czeka na nową komendę.

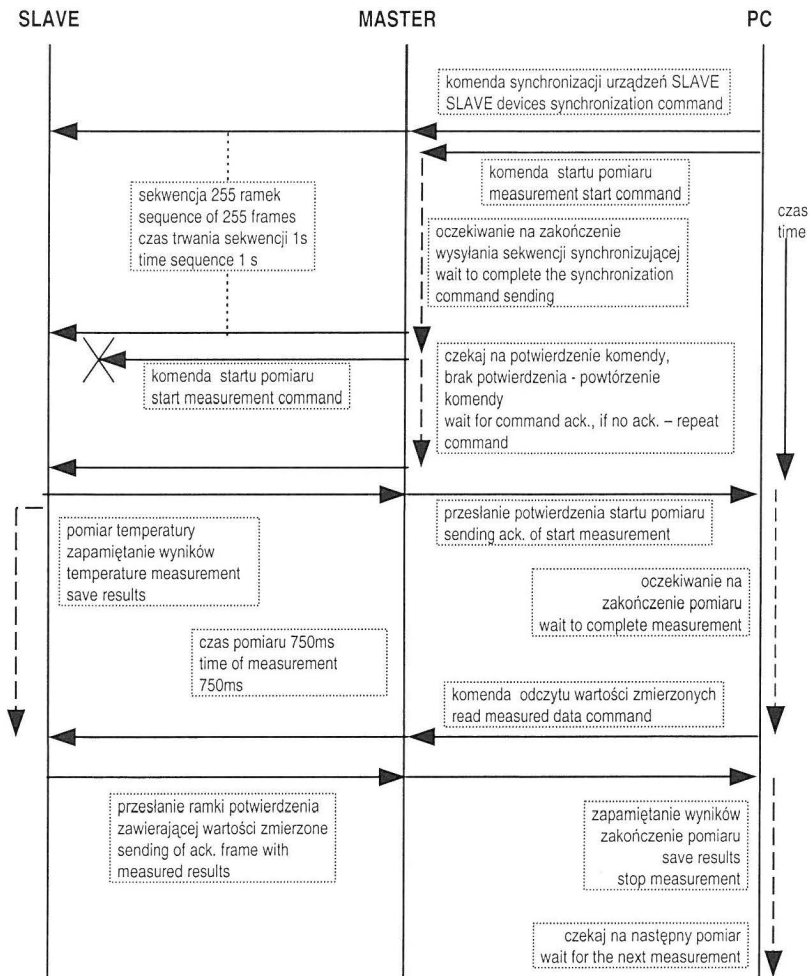
Sekwencję czynności niezbędnych do nawiązania komunikacji między urządzeniem MASTER i jednym lub wieloma urządzeniami SLAVE przedstawiono na rysunku 3. Algorytm ten, zwany protokołem komunikacji, jest zbiorem powiązań i połączeń w sposób jednoznaczny definiujący zależności czasowe między elementami funkcjonalnymi sieci radiowej.

Układ MASTER inicjuje komunikację, emitując przez antenę zmodulowany cyfrowo sygnał o częstotliwości 433,93 MHz. Sygnał ten, trwający jedną sekundę zawiera powtarzającą się sekwencję informacji, której zadaniem jest zsynchronizowanie czasowe wielu urządzeń SLAVE. Po zsynchronizowaniu

sieci urządzeń jest wysyłana komenda mająca na celu wywołanie określonej akcji wśród wybranej grupy urządzeń SLAVE lub w konkretnym urządzeniu SLAVE.

Wyróżnia się następujące rodzaje komend:

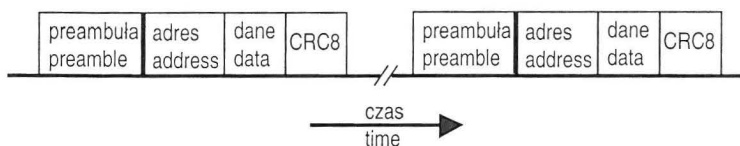
- synchronizacyjne,
- konfiguracyjne,
- sterujące.



Rys. 3. Uproszczony algorytm wymiany informacji pomiędzy komputerem i urządzeniami MASTER i SLAVE dla pojedynczego cyklu pomiarowego

Fig. 3. Simplified algorithm of information exchange between the PC computer and MASTER and SLAVE devices for a single measurement cycle

Wysyłane komendy posiadają strukturę ramki, która składa się z bajtów niosących informacje. W skład ramki wchodzi (rys. 4): adres sieci, adres wywoływanego urządzenia SLAVE, numer komendy (np. komenda rozpoczęcia pomiaru, komenda odczytu), zależnie od rodzaju komendy dane, oraz suma kontrolna CRC8 umożliwiająca sprawdzenie integralności ramki.



Rys. 4. Format ramki danych używanych w zastosowanym protokole komunikacji

Fig. 4. Frame data format used in the implemented communication protocol

Każda ramka poprzedzona jest dwoma bajtami preambuły, której zadaniem jest zsynchronizowanie układu odbiorczego z układem nadawczym oraz dopasowanie układów wzmacniających odbiornika do mocy sygnału odbieranego. W prezentowanej w dalszej części aplikacji preambułę stanowią dwa bajty, z których pierwszy jest ciągiem 01010101, a drugi 11111111.

W skrócie scenariusz pojedynczego pomiaru temperatury profilu glebowego przebiega następująco: komputer PC wysyła, poprzez urządzenie MASTER, do urządzenia SLAVE komendę rozpoczęcia pomiaru poprzedzoną sekwencją synchronizującą. Urządzenie MASTER czeka na otrzymanie potwierdzenia z urządzenia SLAVE i w przypadku jego braku retransmituje maksymalnie do 10 razy ramkę otrzymaną z komputera PC sprawdzając za każdym razem, czy nadeszło potwierdzenie. W przypadku braku potwierdzenia komputer rejestruje wystąpienie takiego zdarzenia jako brak możliwości nawiązania połączenia. Po otrzymaniu potwierdzenia komputer PC oczekuje czas konieczny na wykonanie pomiaru, czyli 750 ms (czas ten związany jest z typem zastosowanego czujnika temperatury). Następnie komputer wysyła komendę odczytu danych pomiarowych. Potwierdzeniem realizacji tej komendy jest ramka z danymi, wysłana przez urządzenie SLAVE, zawierająca wartości zmierzonych temperatur. W przypadku braku potwierdzenia, urządzenie MASTER ponawia wysłanie komendy. Otrzymane dane komputer PC rejestruje w pliku tekstowym, podobnie jak i komunikaty o braku połączenia.

Urządzenie SLAVE po otrzymaniu komendy rozpoczęcia pomiaru wyłącza moduł komunikacji radiowej (w celu ograniczenia poboru prądu) i przechodzi do wykonania komendy. Do pomiaru temperatury wykorzystano czujniki firmy

Dallas DS18B20 [2] ze zintegrowanym przetwornikiem temperatury na wielkość cyfrową i cyfrową komunikacją przy przesyłaniu wyników. Układy te mierzą temperaturę z dokładnością $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ w zakresie od -10°C do $+85^{\circ}\text{C}$. Rozdzielczość pomiarów temperatury wynosi $0,0625^{\circ}\text{C}$. Kalibrując te czujniki indywidualnie można znacząco zwiększyć dokładność pomiaru. Początek pomiaru temperatury wszystkich czujników jest zsynchronizowany w czasie, a odczyt wartości zmierzonych przebiega sekwencyjnie. Wynik pomiaru zapamiętywany jest w pamięci urządzenia SLAVE, po czym przechodzi ono do stanu spoczynku. Blok zapamiętanych danych przesyłany jest z układu SLAVE do układu MASTER po otrzymaniu odpowiedniej komendy.

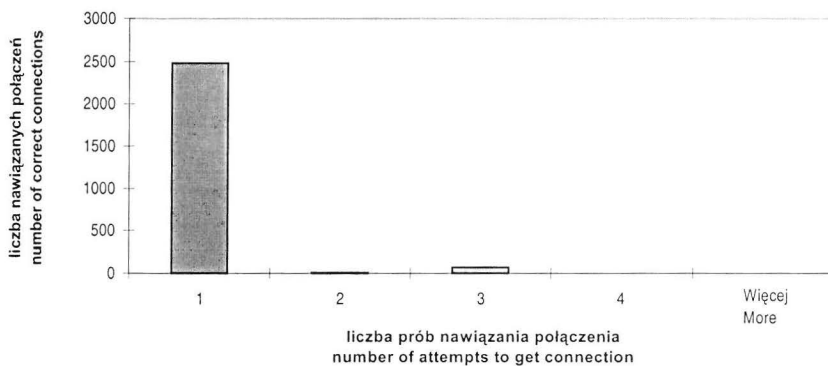
Urządzenia MASTER i SLAVE zasilane są napięciem 3,3 V. W trybie transmisji pobierają ok. 25 mA prądu, w trybie odbioru natomiast ok. 20 mA, przy czym urządzenie SLAVE pracuje ekonomicznie włączając się w tryb odbioru na okres 10 ms co 1 sekundę.

WYNIKI DOŚWIADCZALNE

Przedstawiony system komunikacji bezprzewodowej został poddany weryfikacji przez podłączenie do układu SLAVE siedmiu czujników temperatury, z których jeden mierzył temperaturę otoczenia, natomiast pozostałe zakopano w glebie na głębokościach 5, 10, 15, 20, 30 i 40 cm od powierzchni gleby. Układ SLAVE umieszczono w obudowie chroniącej podzespoły elektroniczne od deszczu na poletku doświadczalnym oddalonym na odległość ok. 70 m od budynku, w którym znajdował się komputer osobisty PC z dołączonym układem MASTER według rysunku 2.

Opisany zestaw do pomiaru temperatury w profilu glebowym pracował kilka dni, rejestrując i przysyłając łączem radiowym wartości zmierzonej temperatury do komputera PC za pośrednictwem urządzenia MASTER. Jakość osiągniętej transmisji przedstawia rysunek 5. Na łączną ilość 2772 odczytów temperatury około 97% zrealizowana była przy pierwszej próbie przesłania danych. Zatem tylko 3% ogólnej liczby odczytów układy MASTER lub SLAVE musiały powtarzać próbę wysłania ramki z danymi, przy czym 11 razy realizowane było powtórzenie 1-krotnie, 74 razy 2-krotnie i 1 raz 3-krotnie. Opracowany protokół transmisji przewiduje 10-krotne powtórzenie próby przesłania ramki z danymi dla wybranego czujnika temperatury. Jeżeli mimo tego pojawiają się błędy w transmisji, komputer PC rejestruje to wypisując odpowiedni komunikat w tekstowym pliku wynikowym, a cały system pomiarowy kontynuuje działanie.

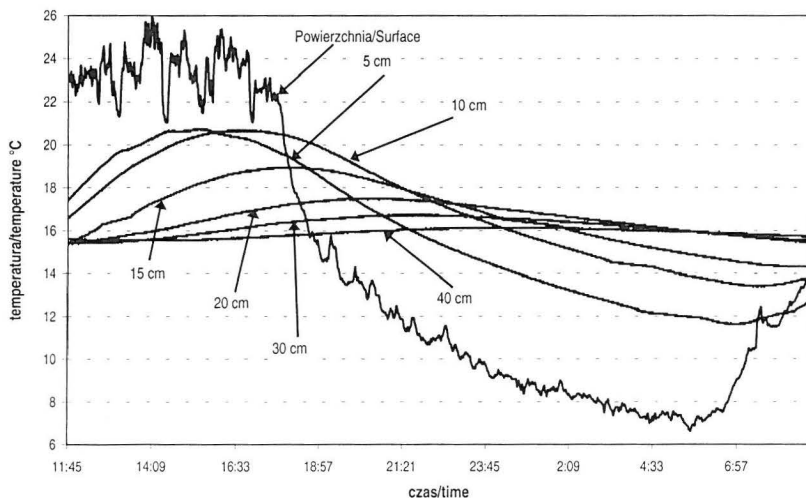
Doświadczalnie stwierdzono, że oddalenie urządzeń SLAVE od MASTER na ok. 500 m nie spowodowało przerwania połączenia radiowego, pod warunkiem, że w linii prostej między antenami obu urządzeń nie występowała przeszkoda w postaci budynku lub drzew. Po ominięciu przeszkody połączenie radiowe automatycznie zostało nawiązywane i komputer PC rejestrował poprawne dane.



Rys. 5. Histogram przedstawiający częstość nawiązania komunikacji między urządzeniem MASTER i SLAVE

Fig. 5. Histogram presenting the frequency of successful data transfer between MASTER and SLAVE devices

Przykładowe odczyty z czujników temperatury umieszczonych na różnych głębokościach w profilu glebowym przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Przykładowe odczyty z czujników temperatury umieszczonych na różnych głębokościach w profilu glebowym

Fig. 6. Example readout of temperature sensors located on different depths of soil profile

Zgodnie z oczekiwaniami czujnik na powierzchni gleby najszybciej reagował na zmiany temperatury otoczenia. Im głębiej umieszczony był kolejny czujnik, tym jego reakcja na zmiany temperatury otoczenia była mniejsza. Dodatkowo, reakcje czujników na zmiany temperatury wykazują przesunięcie w czasie spowodowane skończoną szybkością zmian temperatury w profilu glebowym [5].

PODSUMOWANIE

Wykazano, że istnieją obecnie techniczne środki do zapewnienia ekonomicznie uzasadnionej komunikacji bezprzewodowej w monitorowaniu środowiska. Nieznaczne zwiększenie nakładów związanych z wyposażeniem indywidualnych czujników pomiarowych przetwarzających sygnały nieelektryczne (np. temperatura) w sygnały elektryczne (np. ciąg impulsów elektrycznych) w system dwustronnej komunikacji radiowej zmniejsza zagrożenie ingerencji czynników zewnętrznych w badany obiekt. Zastosowanie odpowiedniego czujnika zintegrowanego z przetwornikiem analogowo-cyfrowym, przetwarzającym temperaturę na ciąg impulsów elektrycznych, upraszcza konstrukcję miernika. Ogranicza jednocześnie możliwość powstania błędów pomiaru, mogących pojawić się przy przesyłaniu kablem sygnału analogowego z czujnika do dalszego przetwarzania.

PIŚMIENNICTWO

1. CC1000 Single Chip Very Low Power RF Transceiver, Chipcon, PRELIMINARY Datasheet (rev. 2.1), 2002-04-19.
2. DS18B20 - Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Dallas Semiconductor Data Sheet, www.maxim-ic.com
3. Microchip PIC16F87X Data Sheet, 28/40-Pin 8-bit CMOS FLASH Microcontrollers, DS30292C, 2001.
4. nRF401-Single Chip RF Transceiver 433MHz, Revision: 1.6, Nordic VLSI ASA, www.nvlsi.no, February 2002.
5. **Walczak R.:** Basic problems of mass and energy transfer in the soil-plant-atmosphere system. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 346, 12-22, 1987.

APPLICATION OF WIRELESS COMMUNICATION IN AUTOMATIC MONITORING OF TEMPERATURE IN SOIL PROFILE

Andrzej Wilczek¹, Wojciech Mazurek¹, Marcin Skierucha²

¹Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

²Faculty of Electronics and Information Technology, Warsaw Technical University
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa
e-mail: awilczek@demeter.ipan.lublin.pl

A b s t r a c t. The purpose of the study is to present the project of wireless communication system in the band 433 MHz (ISN band, Industrial, Scientific, Medical), designed on the base of advanced electronic circuits and the partial implementation of the system in the form of two-point communication system for the soil profile temperature measurement control and data transmission. The study proves that the availability of advanced technology enables to enhance the existing measurement systems and sometimes only the sensors with functional and not expensive radio communication system for the remote control of measurement devices in the distance of several hundred meters.

K e y w o r d s : monitoring, soil physical parameters, wireless communication, ISM band