

# Adaptacyjna warstwa komunikacji radiowej dla stacjonarnego systemu odczytu informacji z wodomierzy

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono warstwę komunikacji radiowej dopasowaną do potrzeb systemu zdalnego odczytu danych z wodomierzy, bazującego na stacjonarnych czynnikiach zrealizowanych w technice radia zdefiniowanego programowo. Zaprezentowano analizę teoretycznego zasięgu systemu i pojemności w relacji do popularnego standardu Wireless M-Bus.

**Abstract.** The article presents a radio communication layer designed for a remote data reading system from water meters, based on stationary readers utilizing software-defined radio technology. An analysis of the theoretical range of the system and capacity in relation to the popular Wireless M-Bus standard was presented. (*Adaptive radio communication layer for a stationary water meter reading system*).

**Słowa kluczowe:** komunikacja radiowa, algorytm adaptacyjny, zdalny odczyt wodomierzy.

**Keywords:** radio communication, adaptive algorithm, remote reading of the water meters.

## Wstęp

Systemy opomiarowania, w których odczyt informacji o zużyciu wody odbywa się zdalnie stosowane są już od wielu lat. W Europie głównym standardem komunikacyjnym stosowanym w tych aplikacjach jest Wireless M-Bus [1]. Niestety, zasięg odczytu dla wodomierzy pracujących w tym standardzie jest relatywnie niewielki, co powoduje, iż eksploatacja systemu wymaga okresowych wizyt inkasentów. Główną zaletą wykorzystania standardu Wireless M-Bus jest prostota komunikacji oraz niski koszt komponentów potrzebnych do budowy tzw. nakładki radiowej na wodomierz, tj. urządzenia, które odczytuje aktualne wskazanie zużycia wody i przesyła je w regularnych interwałach czasowych drogą radiową do czytnika. Głównymi wadami są natomiast: zasięg i nieefektywna eksploatacja pasma radiowego. Z tego powodu nie rozpowszechniły się systemy, w których odczyt wodomierzy odbywa się bez udziału inkasentów, ale poprzez stacjonarne czytniki zainstalowane w budynkach. Bezpośrednią przyczyną jest wysoki koszt produkcji, instalacji i utrzymania stacjonarnego czytnika Wireless M-Bus w relacji do ilości wodomierzy, które będą przez niego obsługiwane.

Pojawiające się technologie radiowe takie jak LoRa, Sigfox czy NB-IoT rozwiązują w dużym stopniu problem zasięgu odczytu i pojemności kanału, ale ich poziom cenowy pozostaje powyżej kosztów budowy nakładki radiowej kompatybilnej z Wireless M-Bus.

W celu zbadania możliwości realizacji systemu odczytu wodomierzy bazującego całkowicie na stacjonarnych czynnikiach zaproponowano nową warstwę komunikacji radiowej pomiędzy wodomierzami a tzw. stacją bazową – czyli stacjonarnym czytnikiem. Głównymi wymaganiami było utrzymanie kosztu budowy nakładki na bardzo niskim poziomie, uwzględniając możliwość pracy na pojedynczej baterii przez co najmniej 10 lat [5], zapewniając przy tym znaczne zwiększenie zasięgu transmisji i całkowitej pojemności kanału komunikacyjnego, prowadzące do radykalnego zwiększenia ilości obsługiwanych nakładek. W tym celu opracowano adaptacyjny sposób komunikacji radiowej, a stację bazową zrealizowano w technice SDR (ang. Software Defined Radio) [6].

## Koncepcja systemu łączności radiowej

Kluczową cechą radiowego systemu rozproszonego, w którym warunki propagacyjne są niejednorodne i zmienne w czasie jest możliwość automatycznej adaptacyjnej zmiany kluczowych parametrów warstwy fizycznej. Tego typu

podejście jest dziś szeroko rozpowszechnione w standardach takich jak LoRa [2] czy Wi-Fi [3].

W proponowanym systemie wykorzystano dwa nielicencjonowane pasma częstotliwości, dopasowane swoimi cechami do dwóch typów zabudowy. Pasma 868-870 MHz (wykorzystywane również przez Wireless M-Bus) charakteryzuje się możliwością alokacji relatywnie szerokiego kanałów, umożliwiającą transmisję danych z szybkością dziesiątek kb/s, przy niewielkich rozmiarach anten, co umożliwia ich łatwą zabudowę wewnątrz nakładki na wodomierz. Łączność w tym paśmie zapewnia umiarkowanie dobrą penetrację przeszkód przy znacznej pojemności informacyjnej dostępnych kanałów. Nadaje się ono dobrze do gęstej zabudowy miejskiej, w której ilość punktów odczytowych przypadających na pojedynczą stację bazową może dochodzić do kilkuset. Z kolei pasmo 169 MHz oferuje dużo węższe kanały komunikacyjne, rekompensując to jednak znacznie większym zasięgiem i mniejszą wrażliwością na przeszkody czy ukształtowanie terenu na drodze propagacji sygnału radiowego. Pasma to dobrze nadaje się do przestrzeni podmiejskich i mniej gęstej zabudowy jednorodzinnej. W tabeli 1 zebrano parametry wszystkich zdefiniowanych w systemie odczytowym warstw fizycznych (ang. PHY – Physical Layer).

Założono, że stacja bazowa jest w stanie prowadzić równoległe nasłuch radiowy we wszystkich zdefiniowanych warstwach fizycznych i kanałach radiowych w kierunku od nakładki do stacji (N→S) dzięki wykorzystaniu techniki SDR, w której sygnał radiowy jest próbkowany, a za filtrację, demodulację i detekcję odpowiedzialne są algorytmy cyfrowej obróbki sygnałów. Tym samym nakładki odczytowe mogą pracować w trybie wielodostępu oportunistycznego, tj. nadając w dowolnym momencie, wybierając dowolny (tutaj losowy) kanał. Dobór warstwy fizycznej odbywa się niezależnie w każdej nakładce, na bazie informacji zwrotnej (potwierdzenie) odsyłanej w odpowiedzi przez stację bazową. Przyjęto, że każda nakładka jak i stacja bazowa posiada unikalny, 64-bitowy identyfikator – tzw. UID.

## Mechanizm potwierdzeń

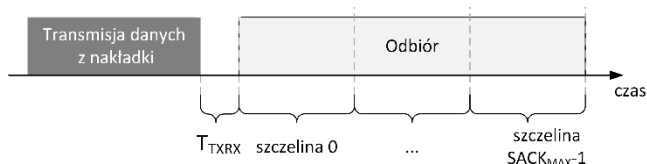
Każdy pakiet danych odebrany z nakładki przez stację bazową jest przez tą stację potwierdzany, przy czym stacji bazowych w zasięgu nakładki może być kilka i żadna nakładka pomiarowa nie jest na stałe przypisana do którejkolwiek stacji bazowej. Należy przyjąć założenie, że nakładka wysyłając pakiet danych nie wie ani które stacje bazowe ten pakiet odbiorą ani ile takich stacji będzie.

Tabela 1. Parametry warstw fizycznych zdefiniowanych w prezentowanym systemie łączności.

Nr PHY / Nr kanału	Kanał częstotliwości [MHz]	Przepływność [kb/s]	Kierunek*	Czułość odbiornika [dBm]	Moc wyjściowa [dBm]	Bilans łącza [dB]
0 / 0	868,000 - 868,200	50	N→S	-106	12	118
0 / 1	868,200 - 868,400	50	N→S	-106	12	118
0 / 2	868,850 - 869,025	50	N→S	-106	12	118
0 / 3	869,025 - 869,200	50	N→S	-106	12	118
1 / 0	868,400 - 868,600	1.2	N→S	-120	12	132
1 / 1	868,700 - 868,850	1.2	N→S	-120	12	132
2 / 0	869,400 - 869,450	19,2	S→N	-108	24	132
2 / 1	869,450 - 869,500	19,2	S→N	-108	24	132
2 / 2	869,550 - 869,600	19,2	S→N	-108	24	132
2 / 3	869,600 - 869,650	19,2	S→N	-108	24	132
3 / 0	869,400 - 869,450	9,6	S→N	-111	24	135
3 / 1	869,450 - 869,500	9,6	S→N	-111	24	135
3 / 2	869,550 - 869,600	9,6	S→N	-111	24	135
3 / 3	869,600 - 869,650	9,6	S→N	-111	24	135
4 / 0	169,400 - 169,425	19,2	N→S	-109	14	123
4 / 1	169,425 - 169,450	19,2	N→S	-109	14	123
5 / 0	169,400 - 169,425	9,6	N→S	-112	14	126
5 / 1	169,425 - 169,450	9,6	N→S	-112	14	126
6 / 0	169,450 - 169,475	0,5	N→S	-126	14	140
7 / 0	169,400 - 169,425	19,2	S→N	-109	24	133
7 / 1	169,425 - 169,450	19,2	S→N	-109	24	133
8 / 0	169,400 - 169,425	9,6	S→N	-112	24	136
8 / 1	169,425 - 169,450	9,6	S→N	-112	24	136
9 / 0	169,450 - 169,475	0,5	S→N	-123	24	147

\* - N→S oznacza transmisję od nakładki do stacji bazowej, a S→N odwrotnie

Znane jest natomiast na etapie instalacji nakładki ograniczenie na maksymalną ilość stacji bazowych, mogących wchodzić w interakcję z pojedynczą nakładką. Zdefiniujemy zatem maksymalną ilość stacji bazowych będących w zasięgu nakładki i mogących wysłać do niej potwierdzenia jako  $SACK_{MAX}$ . Przy tym założeniu zaproponowano schemat działania nakładki, który zaprezentowano na rysunku 1.



Rys.1. Ilustracja działania nakładki, gdzie po transmisji danych występują szczeliny, w których nakładka nasłuchuje potwierdzeń.

Po transmisji danych z nakładki, układ radiowy w czasie  $T_{TXRX}$  przełącza się na odbiór, oczekując na potwierdzenie. Po tym czasie następuje  $SACK_{MAX}$  szczelin czasowych, w których nakładka nasłuchuje potwierdzenia pakietu. W przypadku otrzymania potwierdzenia, w którejkolwiek z szczelin, nakładka kończy odbiór przechodząc w stan uśpienia. Dodatkowo zakłada się, iż na etapie wdrożenia wszystkim stacjom bazowym można przypisać (oprócz UID) numer szczeliny, którą mają się posługiwać przy potwierdzaniu transmisji od nakładek. Mechanizm ten rozwiązuje problem pracy w sąsiedztwie wielu stacji bazowych. Istnieje możliwość dodatkowej poprawy działania tego systemu jeśli założymy, iż stacje bazowe mają dostęp do wspólnej bazy danych informacji o nakładkach i mogą między sobą negocjować obsadzenie szczelin przeznaczonych na potwierdzenie w taki sposób, aby stacja bazowa odbierająca najsilniej sygnał od danej nakładki potwierdzała odebranie w pierwszej szczelinie.

#### Adaptacyjna zmiana warstwy fizycznej

Mechanizm potwierdzania transmisji stanowi podstawę do realizacji algorytmu dynamicznej zmiany warstwy fizycznej - głównie szybkości transmisji w kanale radiowym.

Algorytm działa jedynie po stronie nakładki pomiarowej. Zadaniem algorytmu jest dobór jednej z dostępnych warstw fizycznych w danym paśmie pracy nakładki pomiarowej (868 MHz lub 169 MHz) do aktualnego stanu kanału radiowego, charakteryzowanego przez tłumienie toru i w tym zakresie jest podobny do rozwiązań stosowanych np. w standardzie LoRaWAN [7]. W obu pasmach przewidziano zestawy możliwych warstw fizycznych, różniących się bilansem łącza radiowego. W paśmie 868 MHz nakładka może nadawać:

- a) z przepływnością 50 kb/s (PhyNo=0) – wówczas stacja bazowa odpowiada wykorzystując warstwę 19.2 kb/s (PhyNo=2). Schemat ten oznaczymy jako PhyNo=0/2.
- b) z przepływnością 1.2 kb/s (PhyNo=1) – wówczas stacja bazowa odpowiada wykorzystując warstwę 9.6 kb/s (PhyNo=3). Schemat ten oznaczymy jako PhyNo=1/3. W paśmie 169 MHz nakładka może nadawać:
- c) z przepływnością 19.2 kb/s (PhyNo=4) – wówczas stacja bazowa odpowiada wykorzystując warstwę 19.2 kb/s (PhyNo=7). Schemat ten oznaczymy jako PhyNo=4/7.
- d) z przepływnością 9.6 kb/s (PhyNo=5) – wówczas stacja bazowa odpowiada wykorzystując warstwę 9.6 kb/s (PhyNo=8). Schemat ten oznaczymy jako PhyNo=5/8.
- e) z przepływnością 0.5 kb/s (PhyNo=6) – wówczas stacja bazowa odpowiada wykorzystując warstwę 0.5 kb/s (PhyNo=9). Schemat ten oznaczymy jako PhyNo=6/9.

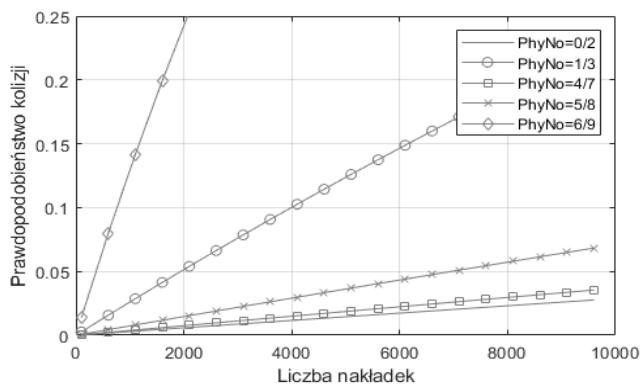
Algorytm zakłada, iż dla udanej transmisji (wysłano pakiet danych i odebrano potwierdzenie) nakładka jest w stanie obliczyć średnie tłumienie trasy L poprzez wyznaczenie różnicy między nominalną mocą nadawczą (dla nakładki to +12 dBm) a mocą odbiorczą mierzoną i zwracaną w odpowiedzi przez stację bazową. Zakłada się dodatkowo, iż nakładka może pamiętać  $T$  ostatnich takich oszacowań i na ich podstawie w sposób nadążny wyznaczać średnie tłumienie trasy. Przy pierwszym uruchomieniu nakładki pomiarowej zakładane jest początkowe tłumienie równe 100 dB dla wszystkich  $T$  ostatnich transmisji. Następnie, przy każdej próbie wysłania pakietu obliczane jest średnie tłumienie trasy L z ostatnich  $T$  transmisji i wybierana jest warstwa fizyczna najlepiej dopasowana do wyznaczonego średniego tłumienia L, tj.

najbardziej korzystna energetycznie (z najwyższą przepływnością) spełniająca warunek jakości transmisji. Jeżeli transmisja zakończy się odebraniem poprawnej odpowiedzi, odesłana wartość mocy odebranej w stacji bazowej wykorzystywana jest do kalkulacji tłumienia trasy, która następnie jest zapisywana w nakładce jako bieżąca, a najstarsza jest usuwana. Jeżeli natomiast transmisja zakończy się brakiem potwierdzenia, uznaje się że tłumienie było o 3 dB niższe niż wymagała tego aktualnie wykorzystana warstwa fizyczna, jeżeli była to pierwsza z kolei nieudana transmisja, o 6 dB niższe niż wymagała tego aktualnie wykorzystana warstwa fizyczna, jeżeli była to druga z kolei nieudana transmisja itd. Tym samym algorytm nadąża za ewentualnymi zmianami w efektywnym tłumieniu trasy z inercją zależną od wartości T.

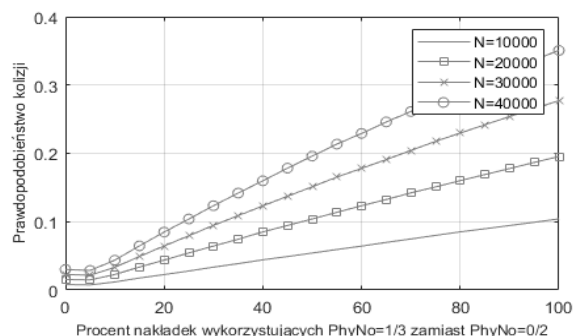
### Analiza pojemności systemu

W celu zbadania pojemności zdefiniowanego systemu wykorzystano symulację w środowisku Matlab. Przyjęto, że każda nakładka przesyła dane 3 razy na dobę w losowych momentach. System skonfigurowany jest do pracy z maksymalnie 3 stacjami bazowymi ( $SACK_{MAX} = 3$ ). Jako kryterium jakości przyjęto, iż prawdopodobieństwo niedostarczenia żadnego pakietu z pojedynczej nakładki w ciągu całej doby z powodu kolizji z innym pakietem musi być mniejsze od 0,001 (0,1%). Tym samym, zakładając niezależność rezultatów poszczególnych transmisji założono, że pojedyncza transmisja (każda z trzech) musi się udać z prawdopodobieństwem 90%. Przyjęto też, że pakiet danych wysyłany z nakładki składa się z 19 bajtów narzutu (w tym m.in. preambuły) oraz 40 bajtów danych aplikacyjnych, a pakiet potwierdzenia ma 20 bajtów. Na rysunku 2 przedstawiono wykres prawdopodobieństwa kolizji pakietów w zależności od ilości nakładek, dla opisanych wyżej schematów.

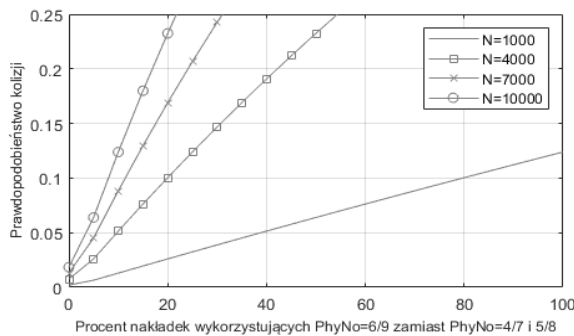
Ze względu na działanie algorytmu adaptacyjnego warstwy fizyczne są jednak dobierane dynamicznie, w zależności od bilansu łącza radiowego. Na rysunku 3 przedstawiono wykres prawdopodobieństwa kolizji dla pasma 868 MHz dla przykładowych ilości nakładek w systemie, w funkcji stosunku ilości wykorzystania warstw „powolnych” do „szybkich”. Przykładowo, wartość 40 na osi x oznacza, iż 40% wszystkich nakładek wykorzystywać będzie schemat  $PhyNo=1/3$  a pozostałe 60% schemat  $PhyNo=0/2$ . Podobnie, na rysunku 4 przedstawiono to samo prawdopodobieństwo dla pasma 169MHz, gdzie relacja dotyczy warstwy  $PhyNo=6/9$  do warstw  $PhyNo=4/7$  i  $5/8$  łącznie. Aby oszacować pojemność systemu konieczna jest jednak znajomość relacji ilości transmisji wykorzystujących warstwy „szybkie” do tych wykorzystujących warstwy „powolne”, a ta zależy od wielu czynników wpływających na propagację fal radiowych.



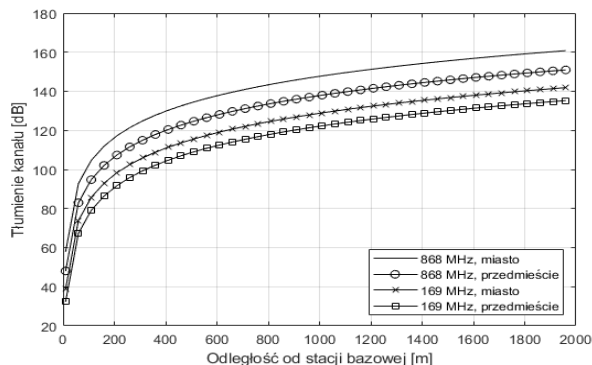
Rys.2. Wykres prawdopodobieństwa kolizji pakietów w zależności od ilości nakładek.



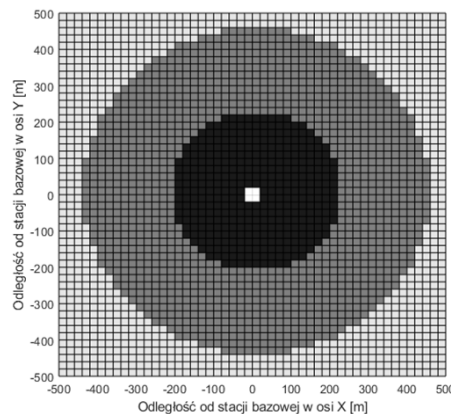
Rys.3. Wykres prawdopodobieństwa kolizji pakietów w zależności od ilości nakładek (N) i sposobu wykorzystania schematów warstw fizycznych w paśmie 868 MHz.



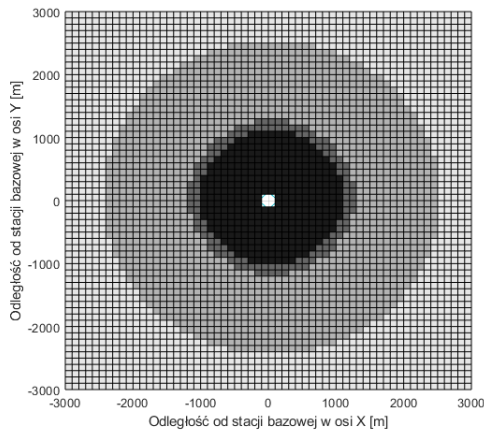
Rys.4. Wykres prawdopodobieństwa kolizji pakietów w zależności od ilości nakładek (N) i sposobu wykorzystania schematów warstw fizycznych w paśmie 169 MHz.



Rys.5. Tłumienie kanału w funkcji odległości nakładki od stacji bazowej dla teoretycznego modelu Okumury-Haty dla obu pasm i różnego typu zabudowy. W modelu przyjęto parametry modelu zgodnie z [3] w celu porównania wyników.



Rys.6. Ilustracja teoretycznego zasięgu poszczególnych warstw fizycznych w paśmie 868 MHz wyznaczonego na bazie modelu Okumury-Haty dla przestrzeni miejskiej. Kolor czarny –  $PhyNo=0/2$ , kolor szary –  $PhyNo=1/3$ .



Rys.7. Ilustracja teoretycznego zasięgu poszczególnych warstw fizycznych w paśmie 169 MHz wyznaczonego na bazie modelu Okumury-Haty dla przestrzeni podmiejskiej. Kolor czarny – PhyNo=4/7, kolor ciemnoszary – PhyNo=5/8, kolor jasnoszary – PhyNo=6/9.

Pewnym oszacowaniem może być jednak wykorzystanie modelu tłumienia kanału Okumury-Haty [4]. Tłumienie sygnału dla dwóch wersji tego modelu opisujących środowisko miejskie i podmiejskie przedstawiono na rysunku 5. Na rysunku 6 pokazano teoretyczny zasięg warstw „szybkich” i „powolnych” dla pasma 868 MHz a na rysunku 7 dla pasma 169 MHz. Granicę pomiędzy obszarami wyznaczono porównując tłumienie kanału wyznaczone z modelu Okumury-Haty z dostępnym dla danej warstwy fizycznej bilansem łącza radiowego.

## Wnioski.

Bazując na przyjętym modelu tłumienia kanału, w tabeli 2 zebrano wyniki teoretycznego zasięgu dla różnych schematów transmisji prezentowanego systemu w porównaniu do standardu Wireless M-Bus, posługując się tymi samymi parametrami modelu [3]. Zakładając równomierne rozmieszczenie nakładek w terenie można wnioskować, że ze względu na pokrycie terenu warstwy „szybkie” będą wykorzystywane 4 razy rzadziej (20% do 80%). Tym samym przyjmując opisane wyżej kryteria jakościowe można oszacować, iż pojemność systemu w paśmie 169MHz wyniesie ok. 4 tys. a w paśmie 869 MHz ponad 40 tys. nakładek (zob. rys. 4 i 5).

Tabela 2. Zestawienie teoretycznego zasięgu prezentowanego systemu odczytowego i systemu opartego o Wireless M-Bus [3].

Schemat transmisji	Pasma [MHz]	Bilans łącza [dB]	Zasięg (miasto) [m]	Zasięg (przedmieście) [m]
PhyNo=0/2	868	118	210	360
PhyNo=1/3	868	132	450	710
PhyNo=4/7	169	123	730	1050
PhyNo=5/8	169	126	870	1230
PhyNo=6/9	169	140	1810	2420
Wireless M-Bus	868	116	200	330
Wireless M-Bus	169	132	1180	1660

## Podsumowanie.

Zaprezentowany sposób łączności radiowej opracowano dla stacjonarnego systemu odczytowego informacji z wodomierzy, znacząco zwiększając zasięg i pojemność systemu w stosunku do standardu Wireless M-Bus. Jednocześnie zastosowany adaptacyjny algorytm umożliwił zastosowanie efektywnych kosztowo komponentów do budowy radiowej nakładki na wodomierz. System jest obecnie wdrażany w instalacji pilotażowej.



Artykuł prezentuje wyniki prac B+R przeprowadzonych w ramach projektu pt. „Opracowanie dwuzakresowej sieci typu LPWAN dedykowanej do pracy w systemach opomiarowania zużycia mediów”, współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach poddziałania 1.2.1 „Projekty badawczo-rozwojowe przedsiębiorstw”, RPO WM na lata 2014-2020.

**Autorzy:** dr inż. Łukasz Krzak, dr hab. inż. Cezary Worek, mgr inż. Grzegorz Gajoch, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Instytut Elektroniki, al. Mickiewicza 30, 30-054 Kraków, E-mail: [lkrzak@agh.edu.pl](mailto:lkrzak@agh.edu.pl), [worek@agh.edu.pl](mailto:worek@agh.edu.pl), [ggajoch@agh.edu.pl](mailto:ggajoch@agh.edu.pl); mgr inż. Janusz Witkowski, Actislink Sp. z o.o., Lubostroń 1, 31-383 Kraków, E-mail: [janusz.witkowski@actislink.pl](mailto:janusz.witkowski@actislink.pl).

## LITERATURA

- [1] Slabicki M., Premsankar G., Di Francesco M., Adaptive configuration of lora networks for dense IoT deployments, *NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, 2018, pp. 1-9, doi: 10.1109/NOMS.2018.8406255 (2018).
- [2] Lacage, M., Manshaei, M.H., Turletti, T. IEEE 802.11 rate adaptation: A practical approach. *Proc of ACM International*

*Symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems (MSWiM'04)*, (2004).

- [3] Spinsante S., Pizzichini M., Mencarelli M., Squartini S., Gambi E., "Evaluation of the Wireless M-Bus standard for future smart water grids" *2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, (2013).
- [4] Hata M., "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services", *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, Vol. 29, no. 3, (1980).
- [5] Squartini S., Gabrielli L., Mencarelli M., Pizzichini M., Spinsante S., Piazza F., "Wireless M-Bus sensor nodes in smart water grids: The energy issue", *2013 Fourth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, (2013)
- [6] Gajoch G., Zapart M., Macheta J., Worek C., Russek P., "Analog to Digital Converter with FPGA Interface and Measurements for Custom Base Station Transceiver," *2018 International Conference on Signals and Electronic Systems (ICSES)*, (2018)
- [7] Li S., Raza U., Khan A., "How Agile is the Adaptive Data Rate Mechanism of LoRaWAN?", *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, (2018)