

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Prototyp akustycznego urządzenia komunikacyjnego do monitorowania sieci wodociągowych

MATEUSZ KOSIOR, PIOTR PRZYSTAŁKA, GRZEGORZ KRONHOF
POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Słowa kluczowe: bezprzewodowa sieć sensoryczna, komunikacja akustyczna, system monitorujący

STRESZCZENIE:

Obecnie istnieje wiele rozwiązań systemów monitorujących różnorodne obiekty techniczne. Część rozwiązań jest projektowana specjalnie z myślą o sieciach wodociągowych. Głównym celem artykułu jest przedstawienie zastosowania modułów do komunikacji akustycznej wewnątrz rurociągu, w którym medium komunikacyjnym jest woda. Przedstawione rozwiązanie stanowi alternatywę dla obecnie wykorzystywanych metod komunikacji w bezprzewodowych sieciach sensorycznych (WSN). We wstępie krótko scharakteryzowano problem badawczy oraz opisano tematykę bezprzewodowych sieci sensorycznych. Kolejne sekcje opisują koncepcję węzła sieci sensorycznej oraz metody modulacji i kodowania sygnałów wykorzystane podczas badań, jak również przedstawiają prototyp węzła sieci. Końcowe akapity poświęcone zostały wynikom wstępnych badań, najważniejszym wnioskom i planowi dalszych badań.

The prototype of an acoustic communication device for monitoring of water distribution networks

Keywords: wireless sensor network, acoustic communication, monitoring system

ABSTRACT:

A plethora of monitoring systems of different technical objects exists nowadays. Some of the solutions are specifically designed for water supply networks. The main objective of the paper is to describe the use of acoustic signal modules for communication in pipeline systems, where water is used as the transmission medium. This idea is proposed as an alternative to methods used in Wireless Sensor Networks (WSNs) nowadays. The paper begins with short introduction to the research problem and WSNs in general. Further sections describe the concept of a node, methods of signal modulation and coding used during the research and a brief description of acoustic node prototype. Results of the preliminary tests together with the major conclusions and future research plans are discussed at the end of the paper.

1. WSTĘP

Istnieje wiele różnych rozwiązań wykorzystywanych do monitorowania stanu oraz warunków pracy różnorodnych obiektów technicznych. Obszar badań opisanych w niniejszym artykule został zawężony do bezprzewodowych sieci sensorycznych używanych do monitorowania sieci wodociągowych (WSN – ang. *Wireless Sensor Network*).

System *SmartFlow* [3] opracowany przez *Future Processing* jest przykładem zastosowania inteligentnej bezprzewodowej sensorycznej sieci monitorującej przeznaczonej dla sieci wodociągowych. Został on wdrożony we Wrocławiu przy współpracy z MPWiK oraz firmą *Microsoft*. *SmartFlow* zbiera i przetwarza dane przesyłane radiowo z węzłów sieci osadzonych we wnętrzu rurociągu. Następnie system analizuje dane i wyświetla statystyki oraz alarmy na interaktywnej mapie miasta. Według *Future Processing* system ten przyczynił się do ograniczenia czasu potrzebnego do wykrycia uszkodzenia rurociągu (np. wycieku) do około 72 h oraz rocznych strat wody o około 500 milionów litrów.

Przykładem urządzenia wykorzystywanego jako węzeł sieci sensorycznej jest uniwersalny moduł telemetryczny wykorzystujący programowalny sterownik logiczny [7]. Moduł taki składa się z PLC małej mocy ze zintegrowaną anteną RF. Sterownik umożliwia podłączenie czujników klasy przemysłowej, takich jak urządzenia mierzące ciśnienie, przepływ czy temperaturę.

Inne rozwiązanie to grupa energooszczędnych, zintegrowanych sterowników mikroprocesorowych z systemami pomiarowymi, przeznaczonych dla sieci wodociągowych [2, 8]. Rozwiązanie to jest mniej uniwersalne niż moduły oparte o PLC, ale zostało zoptymalizowane pod względem niskiego zużycia energii, co przekłada się na dłuższą eksploatację urządzenia.

WaterWiSe@SG to eksperymentalna bezprzewodowa sieć sensoryczna wykorzystana do monitorowania sieci wodociągowej w Singapurze [1]. Sieć ta została zaprojektowana również w celach badawczych. Składa się z 25 węzłów. W skład każdego węzła wchodzi moduł sensorów (przetwornik ciśnienia, przepływomierz oraz hydrofon) zamontowany we wnętrzu rurociągu i połączony przewodowo z modułem komunikacyjnym. Moduł ten umieszczony jest ponad ziemią w pobliżu sensorów i składa się z głównej jednostki oblicze-

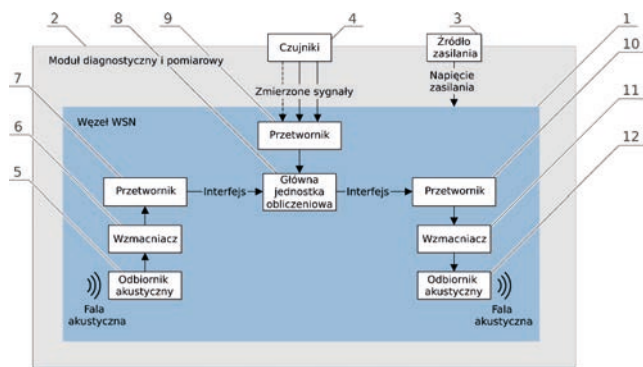
niowej (CPU) z systemem *Linux*, akumulatora oraz panelu słonecznego.

Urządzenie charakteryzuje się zdolnością detekcji i lokalizacji wycieków dzięki wysokoczęstotliwościowemu próbkowaniu ciśnienia (do 2 kHz) oraz szybką transmisją danych (do 7,2 Mb/s) dzięki nadajnikowi wysokiej mocy USB 802.11b (na niewielką odległość) lub energooszczędnemu modemowi 3G. Urządzenie jest także praktycznie bezobsługowe.

Najważniejszym problemem obecnie stosowanych rozwiązań jest przystępność montażu. Większość urządzeń komunikuje się przewodowo bądź bezprzewodowo z użyciem fal elektromagnetycznych (EM). Bezprzewodowa komunikacja na falach EM wymaga roztropnego rozmieszczenia anten, często w miejscach trudno dostępnych. Umieszczenie urządzeń monitorujących we wnętrzu już istniejących podziemnych rurociągów jest skomplikowanym i kosztownym zabiegiem. Fala akustyczna jako medium komunikacyjne jest powszechnie stosowana m.in. w oceanografii oraz do sterowania bezałogowymi podwodnymi platformami mobilnymi typu UUV (ang. *Unmanned Underwater Vehicle*) [4]. Ponieważ system komunikacji wykorzystujący fale akustyczne nie wymaga dodatkowej infrastruktury, jak np. anteny, może okazać się on łatwy w montażu oraz konserwacji, stając się alternatywą dla systemów wykorzystujących fale EM.

2. KONCEPCJA WĘZŁA AKUSTYCZNEJ SIECI SEN-SORYCZNEJ

Węzeł bezprzewodowej akustycznej sieci sensorycznej złożony jest z elementów przedstawionych na Rysunku 1. Węzeł sieci (1) wchodzi w skład modułu diagnostyczno-pomiarowego (2) wraz ze źródłem zasilania (3) i czujnikami (4), jak np. sensory ciśnienia, przepływu czy temperatury. Pojedynczy węzeł składa się z kilku modułów. Głównymi elementami modułu odbiorczego są: przynajmniej jeden odbiornik fal akustycznych (5), wzmacniacz (6) i przetwornik (7). Moduł przetwarzający tworzy główna jednostka obliczeniowa (CPU) oraz przetwornik (9). W skład modułu nadawczego wchodzi zaś: przynajmniej jeden przetwornik (10), wzmacniacz (11) i nadajnik fal akustycznych (12).



Rysunek 1 Koncepcja węzła akustycznej sieci sensorycznej [4]

Za pośrednictwem wody wewnątrz rurociągu węzeł wysyła dane w postaci zmodulowanej fali akustycznej. Odbiornik akustyczny, np. piezoelement, odbiera sygnał w postaci fali mechanicznej o zadanych własnościach. Sygnał jest następnie zamieniany na postać elektryczną, wzmacniany i konwertowany (demodulowany), po czym trafia do CPU. CPU rejestruje także dane z czujników, które są następnie przetwarzane i dodawane do ramki danych odebranych z poprzedniego węzła. Zmodyfikowana ramka danych trafia do przetwornika (modulatora) i dalej do wzmacniacza. Sygnał elektryczny ponownie zamieniany jest na postać mechaniczną (wykorzystując np. odwrotny efekt piezoelektryczny) i wysyłany do medium jako fala akustyczna.

3. MODULACJA I KODOWANIE SYGNAŁU

Podczas badań wykorzystano dwie podstawowe modulacje cyfrowe: kluczowanie amplitudy (ASK – ang. *Amplitude Shift Keying*) i kluczowanie fazy (PSK – ang. *Phase Shift Keying*).

$$\varphi_{ASK} = \begin{cases} 0, X_n = 0 \\ A_0 \cos(\omega_0 t), X_n = 1 \end{cases} \quad (1)$$

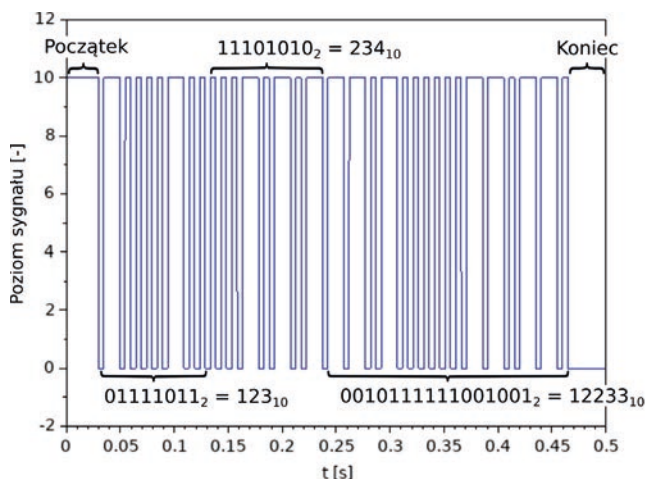
$$\varphi_{PSK} = \begin{cases} A_0 \sin(\omega_0 t), X_n = 0 \\ -A_0 \sin(\omega_0 t), X_n = 1 \end{cases} \quad (2)$$

Modulacja ASK dana jest wzorem (1), gdzie φ_{ASK} oznacza sygnał kluczowany amplitudowo, A_0 to amplituda fali nośnej, ω_0 to częstość [rad], $\omega_0 = 2\pi f_0$, t to czas [s], a X_n jest symbolem informacji w n -tym takcie [6]. Modulację PSK opisuje układ równań (2), gdzie φ_{PSK} jest sygnałem kluczowanym fazowo [6].

Na potrzeby badań zaprojektowano prosty sposób kodowania będący uproszczoną wersją kodu Morse'a. Podstawą kodowania jest czas trwania najkrótszego impulsu w zakodowanej ramce danych.

Logiczna 1 zakodowana jest jako krótki impuls wysoki trwający 1 podstawę czasu. Długi impuls wysoki (3 podstawy czasu) odpowiada zaś logicznemu 0. Rozpoczęcie transmisji (początek ramki) zapisane jest jako impuls wysoki trwający 6 podstaw czasu. Koniec transmisji następuje po wykryciu stanu niskiego utrzymującego się minimum przez 3 podstawy czasu. Dodatkowo pomiędzy każdym impulsem dodawana jest przerwa w postaci impulsu niskiego długości jednej podstawy czasu.

Dane między węzłami wysyłane są w postaci ramek o długości 34 znaków. Pierwszy oznacza początek ramki. Kolejne 8 znaków (bitów) to unikalny 8-bitowy adres węzła. Następne 8 z nich to 8-bitowy adres czujnika lub innego źródła danych w obrębie rozważanego węzła. Dalej znajduje się 16-bitowa wartość odpowiadająca wartości zmierzonej przez sensor bądź innemu wysłanemu parametrowi. Ostatni znak stanowi znacznik końca ramki. Przykład ramki danych pokazano na Rysunku 2.

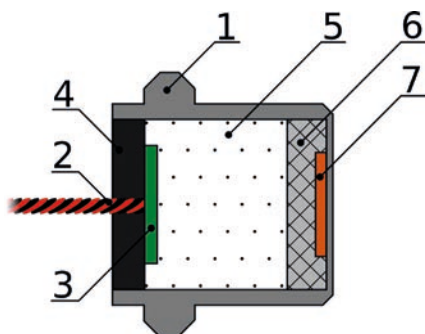


Rysunek 2 Przykład ramki danych [4]

4. KONSTRUKCJA PROTOTYPU

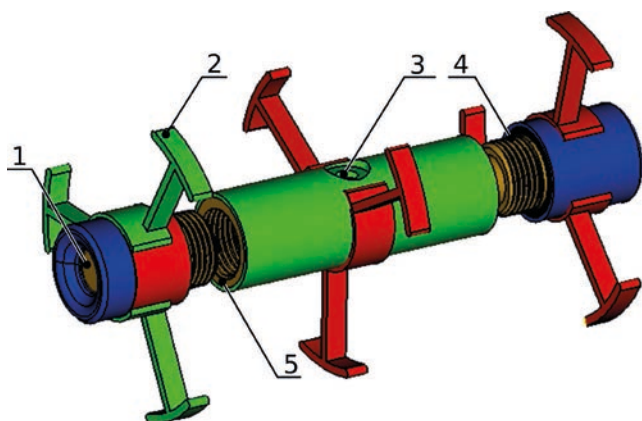
Prototyp jest inspirowany strukturą wodoodpornego przetwornika ultradźwiękowego MCU-SD14A58S9RS-30C przeznaczonego do zastosowania w branży *automotive*, przedstawioną na Rysunku 3. Przetwornik składa się z aluminiowej obudowy (1) z wyprowadzonymi przewodami sy-

gnałowymi (2). Przewody są przylutowane do PCB (3) pozbawionej jakichkolwiek elementów elektronicznych. Całość uszczelniono silikonem (4). Obudowa wypełniona jest elastycznym materiałem (5) oraz watą syntetyczną (6), używanymi do tłumienia fal akustycznych. Na wewnętrznej stronie czoła obudowy zamocowano piezoelektryk (7). Obudowa pełni także rolę katody oraz membrany drgającej przetwornika.



Rysunek 3 Struktura wewnętrzna MCUSD14A58S9RS-30C

Na Rysunku 4 pokazano prototyp modułu komunikacyjnego. Moduł zaprojektowano tak, by zawierał wyłącznie niezbędne elementy, jak nadajnik i odbiornik. Przetwarzanie sygnału zostało zrealizowane poza modułem za pomocą oscyloskopu cyfrowego, generatora funkcyjnego oraz komputera klasy PC. Moduł przetwornika składa się z dwóch jednostek z przetwornikiem (1 i 4), wraz z elementami montażowymi (2) zapewniającymi osiową propagację fal akustycznych, oraz z łącznika (3). Poszczególne jednostki zespolone są rozłącznie za pomocą gwintu (5) zapewniającego łatwość demontażu i szczelność. Korpusy zostały wykonane w technologii druku 3D z ABS-u metodą FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*) / FFF (ang. *Fused Filament Fabrication*). Pozostałe elementy przyklejono do korpusów za pomocą



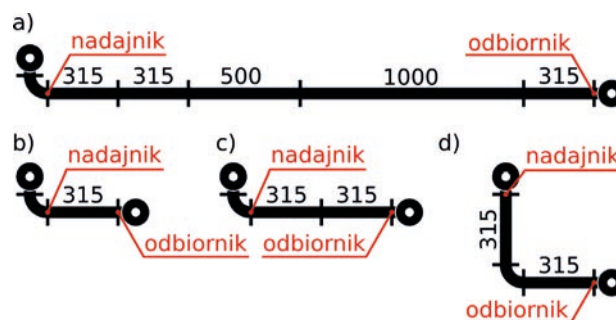
Rysunek 4 Widok złożenia modelu prototypu [4]

acetonu. Wytworzone moduły zostały pozytywnie zweryfikowane pod względem wodoszczelności.

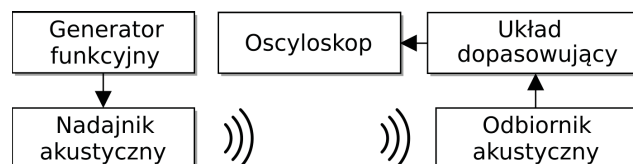
5. BADANIA WERYFIKACYJNE

Wszystkie badania zostały przeprowadzone w laboratorium w stałej temperaturze około 25°C. Badań nie prowadzono w komorze pogłosowej, oczekiwano więc wystąpienia zakłóceń spowodowanych m.in. aparaturą pomiarową. Większość prób wykonano na konfigurowalnym stanowisku laboratoryjnym wykonanym z mocowanych wciśkowo polipropylenowych kształtek hydraulicznych jak na Rysunku 5.

Ogólna postać toru pomiarowego wykorzystywanego w badaniach przedstawiona została na Rysunku 6. Ramka danych przygotowywana jest w trybie *offline* na PC i przesyłana do arbitralnego generatora funkcyjnego. Generator wytwarza falę nośną o amplitudzie $20 V_{pp}$, którą następnie moduluje w takt ramki danych. Wynikowy sygnał jest przesyłany do nadajnika akustycznego, skąd propaguje jako fala akustyczna. Fale akustyczne są rejestrowane przez odbiornik akustyczny w postaci sygnału elektrycznego, po czym są przetwarzane (tj. wzmacniane i filtrowane) oraz zapisywane na oscyloskopie cyfrowym. Dane następnie poddaje się obróbce na PC.



Rysunek 5 Konfiguracje rurociągu wykorzystywane w badaniach



Rysunek 6 Ogólna postać toru pomiarowego

Pierwsze testy przeprowadzono w powietrzu (Rys. 7) celem określenia punktu odniesienia dla dalszych badań prowadzonych w środowisku wodnym. Wykorzystano cztery nadajniki różnego typu: (1) mały głośnik o mocy 0,25 W, (2) głośnik małej mocy z zestawu słuchawkowego, (3) piezoelement o znamionowej częstotliwości rezonansowej 18 kHz oraz (4) piezoelektryczny przetwornik ultradźwiękowy o znamionowej częstotliwości rezonansowej 40 kHz. Każdy z elementów osadzono w wodoszczelnej obudowie wykonanej w technologii druku 3D. Niektóre z nich przedstawiono na Rysunku 4. Jako odbiornik wykorzystano profesjonalny wszechkierunkowy mikrofon wolnego pola (G.R.A.S. SOUND & VIBRATION 40BE).

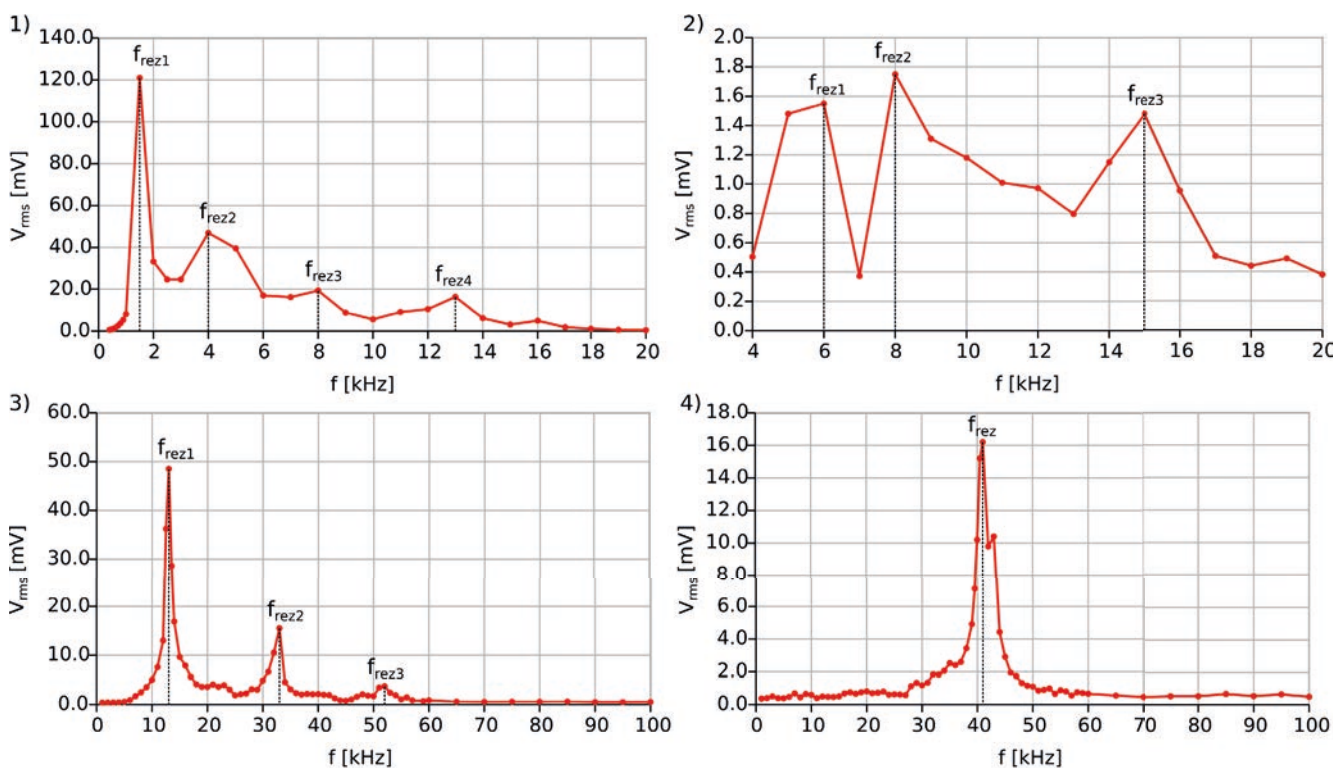
Głośnik 0,25 W (1) ma cztery dominujące częstotliwości: 1,5 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 13 kHz. Charakterystyka głośnika słuchawkowego (2) jest bardziej spłaszczona, z dominującymi częstotliwościami: 6 kHz, 8 kHz i 15 kHz. Zmodyfikowany piezoelement 18 kHz (3) ma 3 częstotliwości charakterystyczne: 13 kHz, 33 kHz i 52 kHz. Przetwornik ultradźwiękowy (4) ma tylko jedną częstotliwość rezonansową – około 41 kHz. Elementy zostały następnie zanurzone pod wodą w szklanym zbiorniku. Rysunek 8 ilustruje wyniki testów, gdzie jako odbiornik wykorzystano hydrofon.

Charakterystyki wszystkich nadajników pracujących w zakresie słyszalnym (1, 2 i 3) uległy zawężeniu i przeniesieniu do niższych częstotliwości. Charakterystyka przetwornika ultradźwiękowego (4) została spłaszczona i rozszerzona w stronę wyższych częstotliwości.

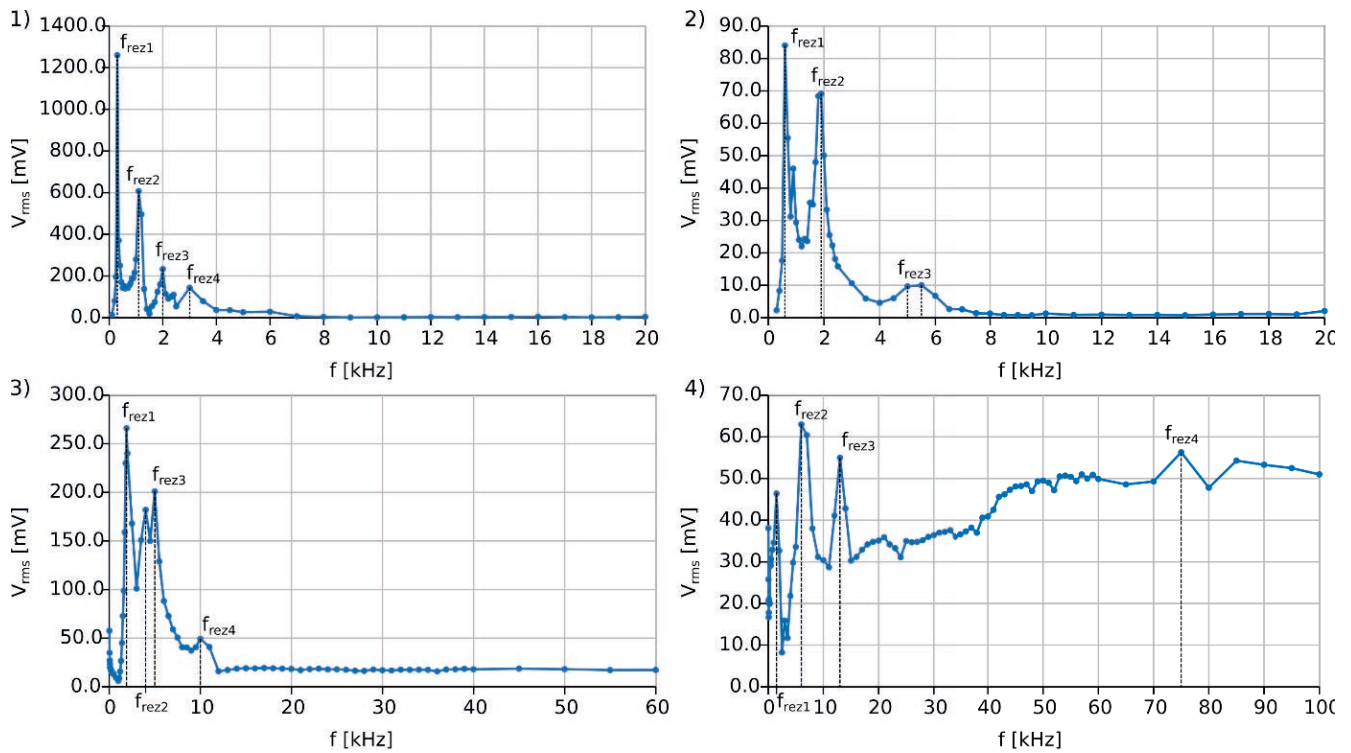
Testy w powietrzu i wodzie przeprowadzono za pomocą różnej aparatury (współczynnik wzmocnienia hydrofonu nie został podany), w związku z czym przeprowadzono dalsze badania porównujące siłę sygnału w obu środowiskach.

Do badań wykorzystano dwie pary piezoelementów o nominalnych częstotliwościach rezonansowych 18 kHz i 40 kHz, zarówno jako nadajnik, jak i odbiornik. Elementy zamocowano wewnątrz fragmentu rurociągu (o średnicy 32 mm i o stałej długości 290 mm, wykonanego z polietylenowych kształtek wciskowych) w celu symulacji cylindrycznej przestrzeni rzeczywistego środowiska pracy urządzenia.

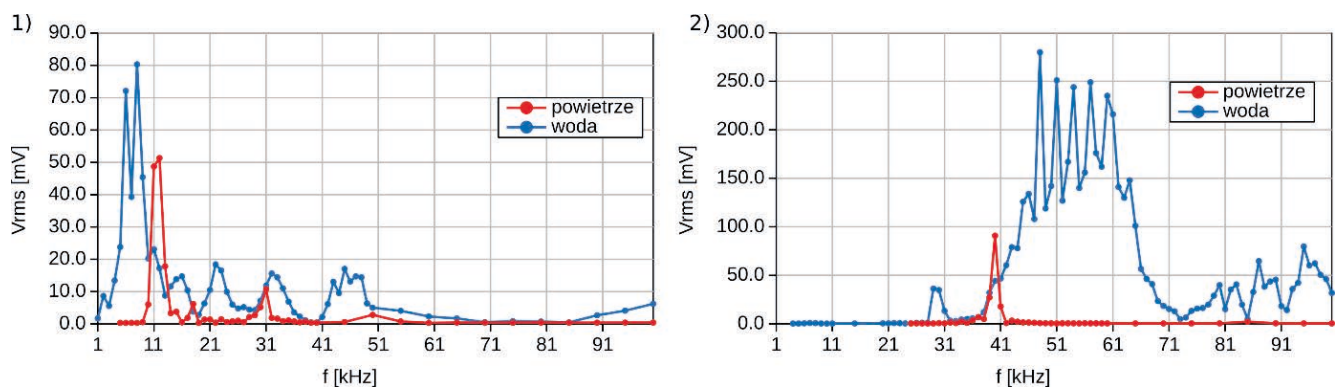
Pierwszą część badań przeprowadzono na pustym rurociągu, natomiast drugą na rurociągu zalanym wodą. Rezultaty dla obu par przedstawiono na Rysunku 9. W obu przypadkach zanurzenie nadajnika i odbiornika w wodzie spowodowało około 1,5-krotny oraz 3-krotny wzrost amplitudy odpowiednio w przypadku elementów 18 kHz (1) i 40 kHz (2). W obu przypadkach wystąpiło



Rysunek 7 Charakterystyki częstotliwościowe zebrane w powietrzu [4]



Rysunek 8 Charakterystyki częstotliwościowe zebrane w wodzie [4]



Rysunek 9 Porównanie charakterystyk częstotliwościowych [4]

zniekształcenie sygnału. Sygnał z piezoelementu 18 kHz (1) został przesunięty ku niższym częstotliwościom, a jego częstotliwości rezonansowe zostały wzmocnione. Częstotliwość rezonansowa elementu 40 kHz (2) została zaś przesunięta w stronę częstotliwości wyższych i z wielokrotność. Uzyskane wyniki są analogiczne jak przedstawione na Rysunku 7 oraz 8.

Dalsze eksperymenty zostały przeprowadzone w rurociągu zalanym wodą. Aby zminimalizować liczbę prób, testy przeprowadzono na dwóch wybranych nadajnikach: głośniku 0,25 W reprezentującym zakres dźwięków słyszalnych oraz przetworniku piezoelektrycznym o nominalnej częstotliwości 40 kHz odpowiadającej ultradźwiękom.

W obu przypadkach w charakterze odbiornika wykorzystano hydrofon.

Celem drugiego eksperymentu było znalezienie zależności między amplitudą odebranego sygnału a względną odległością między nadajnikiem a odbiornikiem. Eksperyment przeprowadzono dla częstotliwości 300 Hz (dominującej częstotliwości rezonansowej głośnika 0,25 W w wodzie) oraz 1,5 kHz (nie będącej częstotliwością rezonansową, jako odniesienie), a także dla częstotliwości ultradźwiękowej 48 kHz (przyjętej jako najbardziej efektywna w przypadku badanego piezoelementu). Rysunek 6a przedstawia złożony rurociąg. Pomiary zebrano przy względnej odległości między nadajnikiem a odbiornikiem zmieniają-

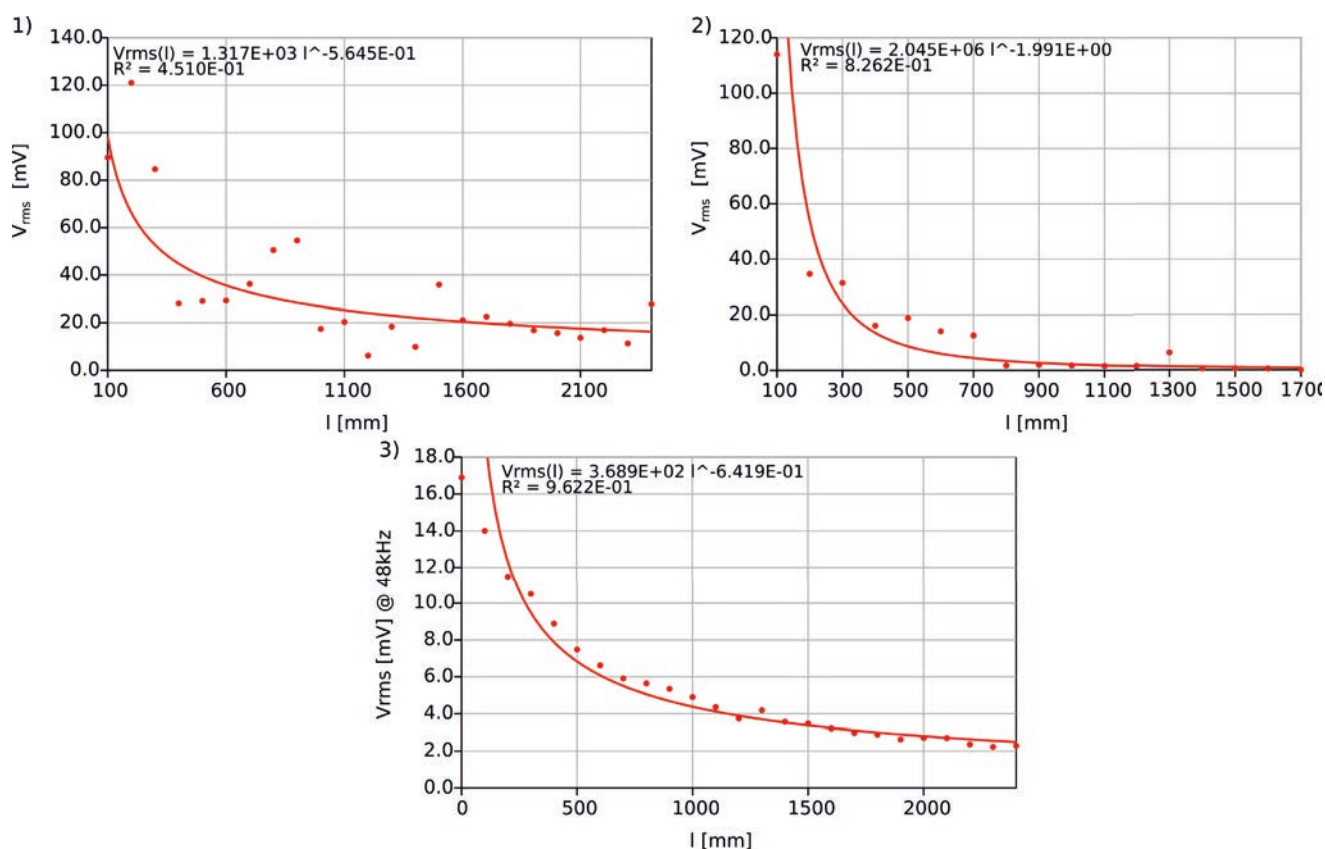
cej się od 0 mm z krokiem co 100 mm ± 20 mm do końca rurociągu lub do momentu utraty sygnału. Rysunek 11 obrazuje wyniki dla częstotliwości 300 Hz (1), 1,5 kHz (2) oraz 48 kHz (3). W przypadku 1,5 kHz (2) utracono sygnał przy odległości równej 1700 mm. Pomiary piezoelementu 48 kHz (3) zebrano z wyłączonym przedwzmacniaczem odbiornika. Przedwzmacniacz, w przeciwieństwie do samego hydrofonu, nie wspierał zakresu ultradźwiękowego. Zaobserwowano zależność wykładniczą. Przy 300 Hz (1) sygnał rzeczywisty (punkty) jest zniekształcony w porównaniu z teoretycznym (linia ciągła). Zakłócenia były słabiej widoczne przy wyższej częstotliwości 1,5 kHz (2) i pomijalne dla częstotliwości 48 kHz (3). Główną przyczyną tego zjawiska są prawdopodobnie zjawiska falowe takie jak interferencja, wzmocnione dodatkowo kształtem rurociągu.

Maksymalny zasięg efektywnej transmisji danych estymowano, wyznaczając współczynniki regresji. Z przekształconego równania regresji (3) wyznaczono następnie odległość.

$$l = \log_x \left(\frac{V_{rms}}{a} \right) \quad (3)$$

Przy założeniu dolnej granicy amplitudy 10 mV w przypadku głośnika 0,25 W i hydrofonu uzyskano odległość 5686 mm. Uwzględniając brak szczegółowego modelu matematycznego i naturę eksperymentu, przyjęto wartość 4 m jako maksymalny skuteczny zasięg komunikacji głośnika 0,25 W wzbudzanego napięciem 20 V_{pp} o częstotliwości 300 Hz.

Analogiczne obliczenia przeprowadzono w przypadku częstotliwości 48 kHz. Ponieważ badania prowadzono przy wyłączonym przedwzmacniaczu, założono dolną granicę amplitudy równą 2 mV. Biorąc pod uwagę wcześniej wspomniane ograniczenia, uzyskana odległość 3388 mm została zaokrąglona w dół do 3 m (przy identycznych parametrach sygnału, wyłączając częstotliwość).

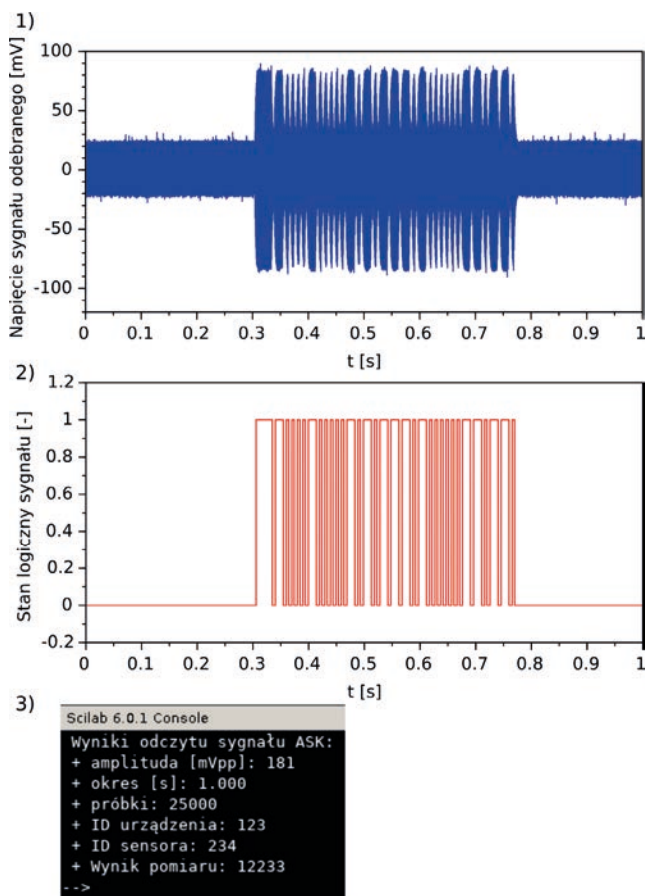


Rysunek 10 Zależność między amplitudą sygnału a odległością [4]

Ostatnią część badań poświęcono komunikacji akustycznej. Testy rozpoczęto od weryfikacji w powietrzu algorytmu obsługi ramek uproszczonego kodu Morse'a (w wariancie ASK i PSK). Tor pomiarowy zestawiono jak na Rysunku 6, przy stałej odległości 10 mm między nadajnikiem (głośnik 0,25 W) a odbiornikiem (wszechkierunkowy głośnik wolnego pola).

W modulacji/demodulacji ASK przyjęto minimalną amplitudę $5 V_{pp}$. Modulację PSK przeprowadzono przy dewiacji fazy 180° (otrzymując modulację BPSK [6]). Dane przesłane kanałem akustycznym stanowiła ramka zaprezentowana na Rysunku 2. Rysunek 11 ilustruje pomyślne odebranie ramki danych (por. Rys. 2).

Ostatnia faza eksperymentu została przeprowadzona w wypełnionym wodą rurociągu jak na Rysunku 5c. Sygnałem wzbudzenia było sinusoidalnie zmienne napięcie o amplitudzie $20 V_{pp}$. W modulacji ASK zredukowano minimalną amplitudę do $0 V_{pp}$, by przeciwdziałać zakłóceniom. Za pomocą głośnika 0,25 W nadano pomyślnie jedynie sygnał ASK. Wynik modulacji PSK był zbyt zniekształcony.



Rysunek 11 Sygnał ASK 300 Hz w powietrzu przed (1) i po demodulacji (2) oraz wynik dekodowania (3) [4]

Badania kontynuowano w najdłuższym dostępnym fragmencie rurociągu (Rys. 5a). Sygnał głośnika 0,25 W okazał się jednak zbyt zniekształcony, by mógł zostać zdekodowany poprawnie. Eksperyment powtórzono z piezoelementem 40 kHz w roli nadajnika oraz hydrofonem z wyłączonym przedwzmacniaczem w roli odbiornika. Wykorzystano częstotliwość fali nośnej 48 kHz. Rysunek 13 obrazuje wyniki komunikacji modulowanej ASK w rurociągu. Sygnał 48 kHz wykazał wyraźnie mniejsze zakłócenia w porównaniu z urządzeniem pracującym w zakresie słyszalnym dla człowieka, pracującym z częstotliwością 300 Hz (Rys. 12).

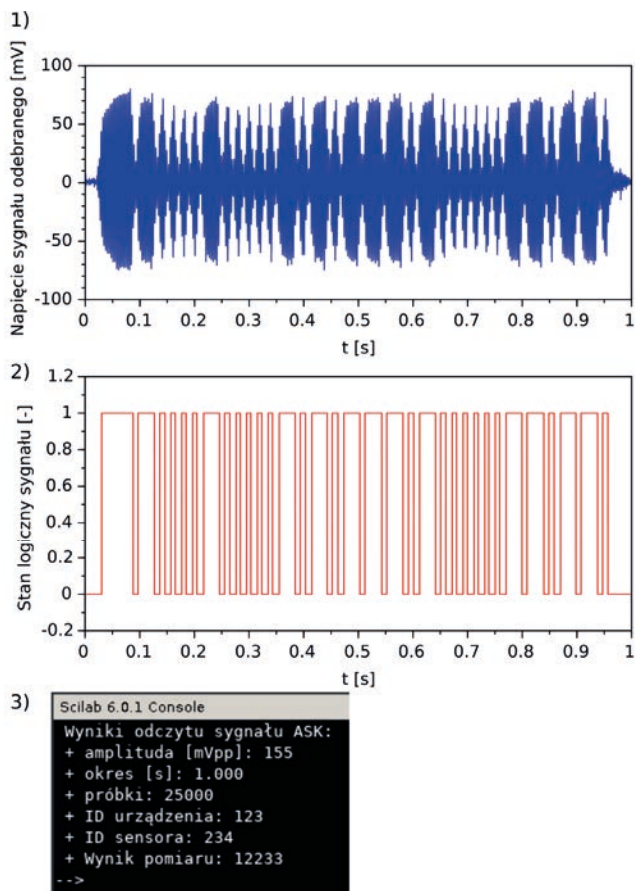
6. WNIOSKI

Przeprowadzone badania pokazały, że krótkodystansowa komunikacja na falach akustycznych rozchodzących się w wodzie jest skutecznym rozwiązaniem w warunkach laboratoryjnych. Zaproponowana metoda kodowania sygnału daje zadawalające rezultaty dla zastosowań poza przemysłem, a najbardziej efektywną metodą modulacji okazała się modulacja ASK. W przypadku komunikacji akustycznej efektywny zasięg komunikacji wzrasta w przypadku niższych częstotliwości. Dlatego zakłada się, że optymalnym rozwiązaniem przy kryterium maksymalnego zasięgu są głośniki niskotonowe. Sygnały wyższych częstotliwości, jak fale ultradźwiękowe, mają krótszy maksymalny zasięg, ale cechują się mniejszym zniekształceniem odbieranego sygnału. Wykorzystanie obu rodzajów przetworników akustycznych w rurociągu pozwala połączyć zasięg fal niskiej częstotliwości w długich i prostych odcinkach rurociągu z niższą podatnością na zakłócenia fal ultradźwiękowych w jego bardziej skomplikowanych fragmentach. Ponadto zasięg może zostać zwiększony poprzez lepsze dopasowanie impedancyjne nadajnika i odbiornika oraz zastosowanie filtracji dopasowanej.

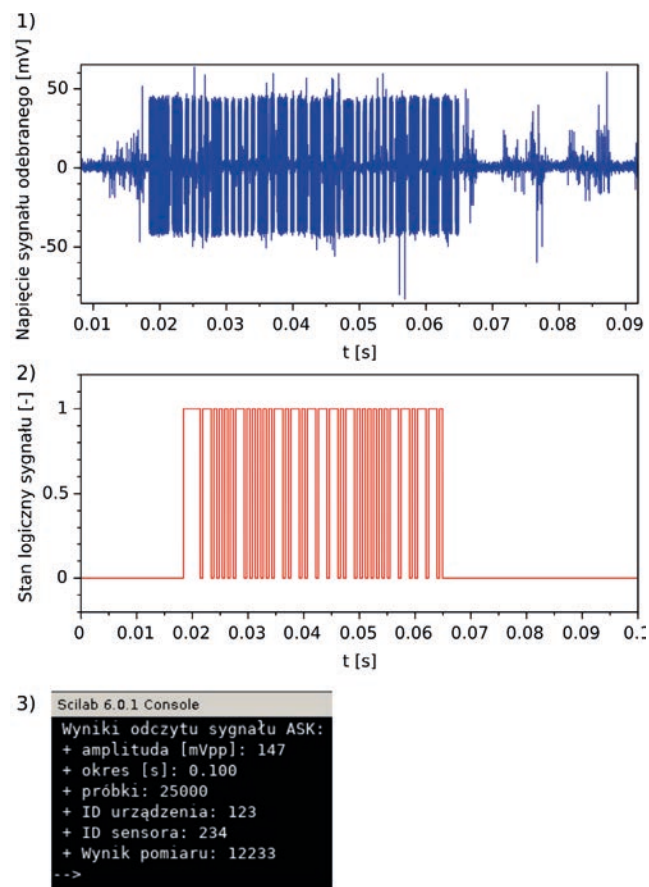
Względnie wysoka wartość napięcia wzbudzenia elementów piezoelektrycznych ogranicza ich wykorzystanie w ostatecznym produkcie. Użycie sparowanych piezoelektryków jako nadajnika i odbiornika zapewnia jednak mechaniczną filtrację częstotliwości spoza pasma rezonansowego. Pozwala to uniknąć stosowania dodatkowych filtrów, zatem upraszcza finalny produkt. Technologia FDM/FFF okazała się efektywną metodą

szybkiego wytwarzania wodoszczelnych obudów na potrzeby badań laboratoryjnych, zwłaszcza w zastosowaniu do tworzyw łatwych do łączenia chemicznego, jak ABS chemicznie „spawany” ace-

tonem. Opisana metoda akustycznej komunikacji za pośrednictwem medium w rurociągu jest także przedmiotem zgłoszenia patentowego [5].



Rysunek 12 Sygnał ASK 300 Hz w wodzie przed (1) i po demodulacji (2) oraz wynik dekodowania (3) [4]



Rysunek 13 Sygnał ASK 48 kHz w wodzie przed (1) i po demodulacji (2) oraz wynik dekodowania (3) [4]

BIBLIOGRAFIA

- [1] Allen M., Iqbal M., Girod L. et al., WaterWiSe@SG: A Testbed for Continuous Monitoring of the Water Distribution System in Singapore, 2011.
- [2] AquaRD: Oficjalna strona internetowa firmy AquaRD. <https://www.aquard.pl> [4.04.2018].
- [3] Future Processing: SmartFlow. Monitor strat wody. <https://www.smart-flow.eu> [3.04.2018].
- [4] Kosior M., Koncepcja układu bezprzewodowej komunikacji systemów monitorowania sieci wodociągowych. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, 2018.
- [5] Kosior M., Moczulski W., Przystałka P., System i sposób komunikacji w bezprzewodowej sieci sensorycznej w rurociągu, zwłaszcza w systemach monitorowania parametrów i stanu sieci wodociągowej. Zgłoszenie patentowe, 2018.

- [6] Papier Z., Podstawy modulacji i detekcji, wol. 1, Skrypty Uczelniane – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica. Wydawnictwa AGH, Kraków, 1992. PL ISSN 0239-6114.
- [7] Sawicki M., Wykorzystanie modułów telemetrycznych firmy InVentia w aplikacjach wodociągowo-kanalizacyjnych. <https://automatykab2b.pl/technika/3385-wykorzystanie-moduow-telemetrycznych-firmy-inventia-w-aplikacjach-wodociagowo-kanalizacyjnych#.WqEslOzwaHs> [3.04.2018].