

Koncepcja i implementacja systemu pomiarowego do zdalnego monitorowania stanu wału przeciwpowodziowego nad Odrą

Streszczenie. W pracy przedstawiono architekturę zaproponowanego i wdrożonego systemu pomiarowego do gromadzenia i prezentacji bieżących informacji na temat stanu wału przeciwpowodziowego. System cyklicznie gromadzi dane z czujników podłączonych do rejestratora danych, które ostatecznie są przesyłane do serwera. Na podstawie analizy zgromadzonych wyników pomiarów można dokonywać oceny stanu wału przeciwpowodziowego, a w razie wystąpienia nieprawidłowości system może generować odpowiednie alarmy.

Abstract. The article presents the architecture of proposed and implemented measurement system for collecting and presenting current information on the flood embankment condition. The system periodically collects data from sensors connected to the data logger, which are finally sent to the server. Based on the analysis of collected measurements, the condition of the flood embankment can be assessed, and in the case of any irregularities, the system can generate appropriate alarms. (Concept and implementation of the measurement system for the Odra river flood embankment remote state monitoring).

Słowa kluczowe: system pomiarowy, rejestracja danych, zdalne monitorowanie, wał przeciwpowodziowy.

Keywords: measurement system, data recording, remote monitoring, flood embankment.

Wprowadzenie

Monitoring środowiska przyrodniczego jest zadaniem skomplikowanym. Z jednej strony monitoringu wymaga każdy komponent środowiska charakteryzujący się odmiennymi właściwościami (powietrze, woda, gleba itd.). Z drugiej strony należy uwzględnić możliwe do zmierzenia parametry oraz częstotliwość ich pomiaru. Jest to istotne z punktu widzenia dalszego prognozowania zmian zachodzących w środowisku [1].

W Polsce państwowy monitoring środowiska (PMŚ) realizowany jest na mocy ustawy z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska [2]. Obejmuje on system pomiarów, ocen i prognoz stanu środowiska oraz gromadzenia, przetwarzania i rozpowszechniania informacji o środowisku. Cele PMŚ osiągnąć są poprzez realizację następujących zadań cząstkowych:

- wykonywanie badań wskaźników charakteryzujących poszczególne elementy środowiska,
- prowadzenie obserwacji elementów przyrodniczych,
- gromadzenie i analizę wyników badań i obserwacji,
- ocenę stanu i trendów zmian jakości poszczególnych elementów środowiska w oparciu o ustalone kryteria,
- identyfikację obszarów przekroczeń standardów jakości środowiska,
- analizy przyczynowo-skutkowe,
- opracowywanie zestawień, raportów, komunikatów i ich udostępnianie w formie drukowanej lub zapisu elektronicznego, w tym za pomocą Internetu.

Pomimo narzuconej ogólnie roli Inspekcji Ochrony Środowiska coraz częściej pojawiają się jednostki, które prowadzą monitoring środowiska (po uzyskaniu stosownych zgód) we własnym zakresie. Zdobyte w ten sposób dane są następnie przetwarzane i mogą być udostępniane w sposób bezpłatny lub na zasadach komercyjnych. Zdalny monitoring parametrów środowiskowych zaczął odgrywać w ostatnich latach coraz większą rolę m.in. w rolnictwie precyzyjnym [3], kontroli zagrożeń przeciwpowodziowych [4] i innych elementów środowiska [5].

Standardowe badanie próbek środowiskowych wymaga ich manualnego poboru przez wykwalifikowaną osobę oraz uzupełniających badań wybranych parametrów w miejscu pobrania lub w laboratorium. Jednakże w wielu przypadkach możliwe jest zautomatyzowanie przynajmniej

części pomiarów, zwłaszcza tych, które mogą być wykonane *in situ*. Pomiarów te można wykonać przy wykorzystaniu zdalnego monitoringu, którego uzupełnieniem będą okresowe, rozszerzone badania laboratoryjne. W tym celu można zastosować wybrane sensory podłączone do rejestratora danych. Zasilany bateryjnie rejestrator może okresowo wysyłać wyniki pomiarów do serwera, gdzie będą one gromadzone i udostępniane zainteresowanym podmiotom przez Internet.

Celem pracy jest omówienie elementów składowych i koncepcji systemu zdalnego monitorowania stanu wału przeciwpowodziowego na rzece Odrze, w okolicach Miłska (woj. lubuskie). W artykule zostaną opisane cechy wybranych urządzeń tworzących system, składający się z rejestratora danych z modemem GSM/GPRS, czujnika ciśnienia hydrostatycznego z możliwością pomiaru temperatury i przewodności wody w piezometrze, czujnika ciśnienia porowego wody, a także sensorów wilgotności i temperatury gleby. Zostaną omówione również wyniki dotychczasowych testów.

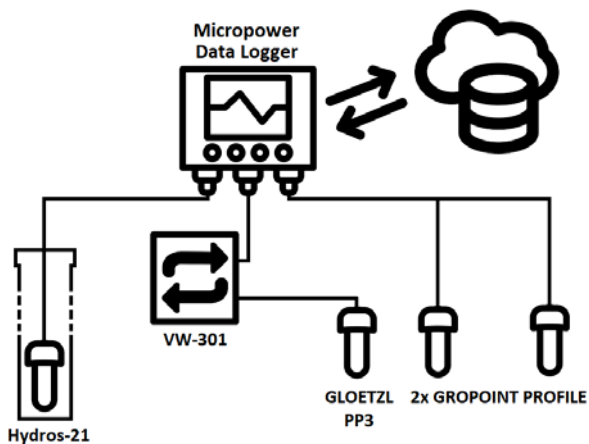
System pomiarowy zdalnego monitorowania

W celu monitorowania stanu wału przeciwpowodziowego, konieczne jest rejestrowanie szeregu różnych wielkości. Autorzy, po konsultacjach z ekspertami i przeglądzie literatury związanej z tematyką badań [6, 7], wybrali następujące wielkości:

- poziom lustra, temperaturę i konduktywność wody w piezometrze otwartym,
- ciśnienie porowe wody w glebie,
- wilgotność i temperaturę gleby w dwóch punktach, położonych w różnych odległościach od wału.

Wymienione wielkości uznano za minimum potrzebne do wyciągnięcia wniosków na temat stanu wału przeciwpowodziowego oraz jakości wody gruntowej (wyrażonej przez konduktywność). Dokładniejszych danych na temat parametrów wody dostarczyłyby dodatkowe urządzenia, w postaci na przykład miernika pH wody znajdującej się w piezometrze otwartym. Prezentowany system w pierwszej kolejności ma jednak służyć ocenie stanu samego wału, stąd przedstawiony powyżej, ograniczony spis monitorowanych wielkości.

Architektura proponowanego systemu pomiarowego, umożliwiającego zdalną rejestrację wybranych parametrów, przedstawiona została na rysunku 1.



Rys.1. Architektura systemu monitorowania stanu wału przeciwpowodziowego

Centralnym elementem systemu pomiarowego jest rejestrator danych Micropower polskiej firmy PM Ecology [8]. Zawarto w nim interfejs SDI-12, konfigurowalne wejścia do obsługi sygnałów analogowych (0 – 10 V), (4 – 20 mA) oraz licznik impulsów. Poprzez cyfrowy interfejs SDI-12 podłączone są do niego następujące urządzenia:

- Meter Group – czujnik przewodności/temperatury/głębokości – Hydros 21 (CTD-10),
- GLÖTZL – czujnik ciśnienia porowego wody z wibrującą struną – PP3 RS VW (nr 69.20.04),
- Keynes Controls Instrumentation – przetwornik/interfejs VW – SDI-12 – VibWire-301,
- Dwa czujniki do pomiaru wilgotności i temperatury gleby – GroPoint Profile.

Analiza wyników cyklicznych pomiarów realizowanych przez te urządzenia umożliwia ustalenie bieżącego stanu wału przeciwpowodziowego. Wszystkie zastosowane czujniki podłączone są do rejestratora danych z wykorzystaniem cyfrowego interfejsu SDI-12, umożliwiającego podłączenie wielu różnych sensorów do jednej szyny. Zebrane przez rejestrator danych wyniki są przesyłane do serwera z wykorzystaniem bezprzewodowej technologii GPRS. Użytkownik ma możliwość ich podglądu w przystępnej formie (skalowalne wykresy) po zalogowaniu się na stronie WWW. Istnieje również możliwość zdefiniowania warunków wyzwania alarmów, które mogą dotyczyć zarówno nieautoryzowanego dostępu do urządzenia oraz przekroczenia przez wielkości mierzone ustalonych wartości progowych.

Proponowany sensor grupy Meter umożliwia pomiar przewodności elektrycznej, temperatury oraz poziomu cieczy. Jest zanurzany w piezometrze i mierzy między innymi ciśnienie wywierane na niego przez słup wody znajdującej się nad nim.

Najważniejsze cechy sensora [9]:

- o Pomiar głębokości:
 - zakres pomiaru: 0 – 10 000 mm,
 - rozdzielczość: 1 mm,
 - największy dopuszczalny błąd pomiaru: $\pm 0,5\%$ zakresu przy 20 °C.
- o Pomiar temperatury:
 - zakres: od -11 do 49 °C,
 - rozdzielczość: 0,1 °C,
 - największy dopuszczalny błąd pomiaru: ± 1 °C.
- o Pomiar przewodności:

- zakres: 0 – 120 dS/m,
- rozdzielczość: 0,001 dS/m,
- największy dopuszczalny błąd pomiaru: $\pm 0,01$ dS/m lub $\pm 10\%$, większa z wartości.

Zasada działania czujnika firmy GLÖTZL oparta jest na wibrującej strunie (ang. *vibrating wire*, VW) i umożliwia pomiar ciśnienia porowego wody oraz temperatury. Nie jest on jednak wyposażony w interfejs cyfrowy, a proponowany rejestrator nie jest kompatybilny z tego rodzaju czujnikami. Stąd konieczność użycia dodatkowego przetwornika pomiarowego z interfejsem SDI-12 oraz wejściem na czujnik strunowy. By umożliwić odczyt wartości z czujnika, wybrano interfejs (konwerter) VW-301 firmy Keynes Controls Instrumentation.

Najważniejsze cechy sensora [5]:

- o Pomiar ciśnienia porowego:
 - zakres pomiaru: -0,5 – 0,7 bara (jest to wybrany zakres, jeden z wielu dostępnych),
 - rozdzielczość: $\pm 0,02$ zakresu,
 - błąd liniowości z uwzględnieniem histerezy: $\pm 0,5\%$ zakresu,
 - częstotliwość pracy: 2 – 3,3 kHz.
- o Pomiar temperatury:
 - zakres: -20 – 80 °C.

Wybrany sensor VW posiada możliwość pomiaru ujemnych wartości ciśnienia porowego, zatem jest w stanie dostarczać wiarygodne wyniki także w sytuacji, gdy poziom wody gruntowej będzie się znajdował poniżej czujnika. Jest to jeden z nielicznych dostępnych na rynku sensorów z takim zakresem pomiarowym, bardzo przydatnym w przypadku zamontowania w bliskim sąsiedztwie stopy wału. W warunkach normalnych nie jest przewidywane gromadzenie się wody w takim miejscu, z czego wynika wymóg odpowiedniego zakresu.

Czujnik firmy GroPoint o nazwie Profile to sonda do pomiaru wilgotności gleby, która umożliwia pomiar objętościowej zawartości wody i temperatury na wielu głębokościach, za pomocą jednego urządzenia [6]. W sposób ciągły mierzy wilgotność gleby na całej długości sondy, uśredniając objętościową zawartość wody w każdym segmencie o długości 15 cm. GroPoint Profile jest przeznaczony do montażu pionowego w celu wykonywania pomiarów w wielu warstwach gleby. Jest przeważnie stosowany w rolnictwie precyzyjnym, w którym wiedza o rozkładzie wilgotności ziemi ma bardzo duże znaczenie.

Testy laboratoryjne

Wstępnie skonfigurowany system pomiarowy został w pierwszej kolejności sprawdzony pod kątem funkcjonalności w warunkach laboratoryjnych (rys. 2).



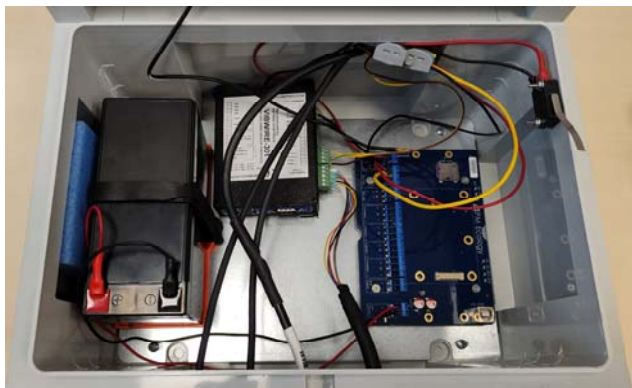
Rys.2. System pomiarowy w warunkach laboratoryjnych

Na rysunku 2 widoczny jest znajdujący się w części centralnej rejestrator danych z wyprowadzoną anteną GSM,

zaś po prawej stronie akumulator żelowy (12 V) zasilający system. W tyle widoczne są niebieskie obudowy obu sensorów GroPoint. Po lewej stronie znajdują się czujniki hydrostatyczny oraz VW, a także interfejs VibWire-301.

Wspomniana wstępna konfiguracja dotyczyła głównie nadania unikalnych adresów wszystkim urządzeniom używającym interfejsu SDI-12. Dzięki uprzejmości producenta, zakupiony konwerter VW – SDI-12 zawierał już zaprogramowane, na podstawie świadectwa kalibracji, dołączonego do sensora VW, poprawki. Zweryfikowano poprawność współpracy wszystkich czujników z rejestratorem danych, a także sprawdzono komunikację z serwerem oraz sposób prezentacji wyników. Na tym etapie nie napotkano żadnych problemów.

Na rysunku 3 widoczna jest docelowa obudowa z tworzywa ABS z czujnikiem otwarcia drzwiczek (w postaci mikrostryku normalnie-zamkniętego), przystosowana do umieszczenia w niej rejestratora danych, akumulatora oraz interfejsu. Elementy mechaniczne, które umożliwiłyby odpowiedni montaż podzespołów systemu zostały specjalnie w tym celu zaprojektowane i wydrukowane w technologii 3D. Za pomocą odpowiednio długich przewodów, poprzez hermetyczne przepusty kablowe, została wyprowadzona antena oraz dołączone wszystkie sensory.



Rys.3. Docelowa obudowa zawierająca rejestrator, akumulator oraz interfejs VW – SDI-12

W laboratorium możliwe było umieszczanie czujników w znanych, celowo dobieranych warunkach, jak na przykład różne głębokości zanurzenia czujnika hydrostatycznego i ciśnienia porowego. Przeprowadzone testy wykazały, że wartości mierzone przez sensory odzwierciedlały rzeczywiste warunki, w których zostały umieszczone, a błędy pomiaru w każdym przypadku mieściły się w granicach podanych przez producentów. Rejestrator z zaprogramowaną częstotliwością komunikuje się z serwerem i przesyła zebrane dane. Wyniki pomiarów są w czytelny sposób prezentowane w internetowym portalu użytkownika, utrzymywanym przez producenta rejestratora. Mają one postać skalowalnych wykresów z możliwością agregacji danych oraz ich eksportu do plików z rozszerzeniem csv. Sam portal jest dobrze zaprojektowany i wykorzystuje technologie umożliwiające skalowanie oraz zmianę sposobu prezentowania treści, w zależności od rozdzielczości i rozmiaru ekranu urządzenia, na którym jest wyświetlany. Inaczej zatem wygląda na przykład układ wykresów na komputerze PC, niż na urządzeniach typu smartfon lub tablet.

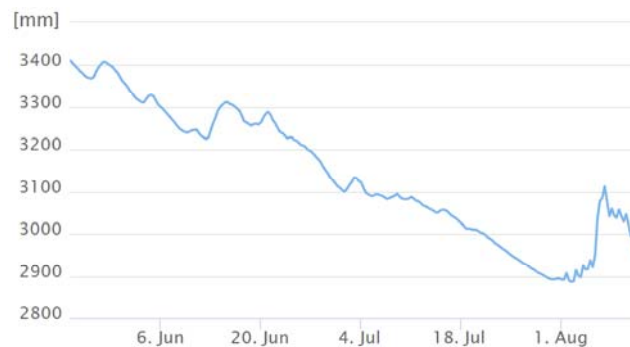
Sprawdzono także działanie alarmów. Wybrany rejestrator danych ma możliwość informowania użytkownika o wynikach pomiarów wykraczających poza założone wartości progowe. Częstotliwość wykonywania pomiarów z użyciem podłączonych sensorów oraz komunikacji z

serwerem może być wówczas zwiększona, w celu dokładniejszej analizy sytuacji. Rejestrator jest w stanie także odnotowywać otwarcie obudowy urządzenia, co jest bardzo istotne w przypadku umieszczenia systemu w miejscu docelowym, które wyklucza całonocowy nadzór nad nim. Informacje o wyzwoleniu alarmu wysyłane są za pośrednictwem wiadomości SMS lub e-mail. Testy informowania przez system zarówno o przekroczeniu dozwolonych wartości mierzonych, jak i otwarcia obudowy, zakończyły się powodzeniem.

Wyniki pomiarów i dyskusja

Wszystkie elementy systemu pomiarowego, poza czujnikiem VW, zostały ułożone w miejscu docelowym na początku lutego 2022 roku. Obudowa z rejestratorem danych znajduje się na poziomie gruntu. O tej porze roku drzewa liściaste, znajdujące się na linii system pomiarowy – stacja bazowa telefonii komórkowej, nie stanowiły istotnej przeszkody dla sygnału GSM. Komunikacja z serwerem danych za pomocą protokołu GPRS odbywała się w niezakłócony sposób, a siła sygnału przy każdej próbie nawiązania połączenia była wystarczająca. Sytuacja zmieniła się znacząco wraz z nastaniem kolejnej pory roku oraz pojawieniem się liści na drzewach. Utrudniło to każdą próbę nawiązania połączenia oraz z biegiem czasu uniemożliwiało coraz większą liczbę prób. Wynikało to z niewystarczającej siły sygnału GSM. Przy okazji montażu czujnika ciśnienia porowego VW w maju tego samego roku, zmieniono ułożenie anteny GSM, co rozwiązało problem z nawiązywaniem łączności. Napotkane problemy stanowią bardzo ważny czynnik, jaki należy rozpatrywać w trakcie planowania zarówno umiejscowienia rejestratora danych z anteną oraz samego typu anteny. W przypadku urządzeń, które są pozostawione w terenie bez nadzoru, istotna jest próba zniwelowania do absolutnego minimum cech, które mogłyby przykuwać uwagę postronnych osób. Stąd umiejscowienie większej, a co za tym idzie o większym zysku anteny, w wyższym punkcie, niesie ze sobą zarówno korzyści jak i wady. Do tych drugich zaliczyć należy także zwiększone ryzyko indukcji w jej przewodzie niszczącego prądu w przypadku bliskiego wyładowania atmosferycznego.

Wyniki pomiarów poziomu wody w piezometrze otwartym wykonywane przy użyciu czujnika hydrostatycznego, były co najmniej raz w miesiącu weryfikowane z wynikami manualnych pomiarów poziomu lustra wody, dokonywanych w tym samym miejscu. Rozbieżności między wartościami w żadnym przypadku nie przekraczały 3 cm, co jest wartością dużo mniejszą od błęd pomiaru podawanego przez producenta, grupę Meter. Przykładowy wykres (widoczny po zalogowaniu się do portalu) przedstawiający wysokość słupa wody w funkcji czasu (24.05.2022 – 11.08.2022) przedstawiono na rysunku 4.



Rys.4. Poziom wody w piezometrze otwartym zarejestrowany w okresie od 24 maja do 11 sierpnia 2022 roku

Na rysunku 4 widoczne są stosunkowo wolne zmiany poziomu wody, który w ukazanym okresie przyjmował wartości od 2,88 do 3,4 m. Przy czym sam piezometr sięga głębokości 10 m poniżej poziomu gruntu. Omawianie zaobserwowanych w czasie testów zjawisk oraz ich przyczyni leży poza zakresem niniejszej pracy. Stąd ograniczono się do ukazania jedynie wyników pomiarów, bez ich opisów z punktu widzenia hydrologicznego lub środowiskowego.

Na rysunku 5 pokazano zarejestrowaną konduktancję wody w piezometrze w tym samym okresie czasu. Zmierzone wartości w tym przypadku zawierają się w przedziale 670 – 713 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Rys.5. Konduktancja wody w piezometrze otwartym zarejestrowana w okresie od 24 maja do 11 sierpnia 2022 roku

Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na to, że szybkie i niewielkie fluktuacje wartości wielkości mierzonej wynikają z jednej strony z błędów pomiaru, z drugiej zaś ze stosunkowo częstej rejestracji danych (co godzinę). Tak częste wyzwalanie pomiarów w trakcie docelowego działania systemu nie będzie konieczne, ponieważ rejestrowane zmiany mają powolny charakter. Zdaniem ekspertów wykonywanie pomiarów raz lub dwa w ciągu doby powinno być wystarczające. Gęsta akwizycja danych miała na celu zweryfikowanie wstępnych obliczeń czasu pracy systemu zasilanego akumulatorem. Uzyskany wynik ponad 180 dni na akumulatorze o stosunkowo niewielkiej pojemności 7,2 Ah, okazał się być zgodny z oczekiwaniami i potwierdził wysoką energooszczędność systemu pomiarowego.

Podsumowanie

Przedstawiony system monitorowania stanu wału przeciwpowodziowego był w trakcie pisania artykułu wciąż na etapie testów środowiskowych w miejscu docelowym. Dane pochodzące z systemu zawierają aktualne wielkości hydrologiczne w pobliżu istniejącego wału w okolicach Miłska (woj. lubuskie) i dostarczają bieżących informacji ekspertom. Porównali oni wartości zwrócone między innymi przez czujnik hydrostatyczny z wynikami pomiarów wykonanych metodą manualną. Zestawienie tych wyników wykazało pełną zgodność, co świadczy o poprawności działania systemu pomiarowego.

Podziękowanie

Praca była częściowo finansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu BB-PL INTERREG V A 2014-2020 „Redukcja barier – wykorzystanie wspólnych mocnych stron”, projekt SmartRiver, grant nr 85029892 oraz z projektu Unii Europejskiej e-równowaga-plus w ramach programu H2020, numer grantu 864283. Instytucje finansujące nie brały udziału w projektowaniu badania, gromadzeniu, analizie lub interpretacji danych, w pisaniu manuskryptu ani w podejmowaniu decyzji o publikacji wyników.

Autorzy: mgr inż. Łukasz Macioszek, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: L.Macioszek@imei.uz.zgora.pl; mgr inż. Norbert Łukaniszyn, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: N.Lukaniszyn@imei.uz.zgora.pl; dr inż. Jakub Kostecki, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Środowiska, ul. prof. Z. Szafrana 15, 65-516 Zielona Góra, E-mail: J.Kostecki@iis.uz.zgora.pl; prof. dr hab. inż. Ryszard Rybski, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: R.Rybski@imei.uz.zgora.pl; dr hab. inż. Urszula Kołodziejczyk, prof. UZ, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Środowiska, ul. prof. Z. Szafrana 15, 65-516 Zielona Góra, E-mail: U.Kolodziejczyk@iis.uz.zgora.pl

LITERATURA

- [1] Kumar A., Kim H., Hancke G.P., Environmental Monitoring Systems: A Review, *IEEE Sensors Journal*, vol. 13 (2013), no. 4, 1329-1339, doi:10.1109/JSEN.2012.2233469
- [2] Dz.U. 2021 poz. 1070 t.j. Ustawa z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska
- [3] Jawad H.M., Rodiadee N., Gharghan S.K., Jawad A.M., Ismail M., Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review, *Sensors*, 17 (2017), 1781, doi:10.3390/s17081781
- [4] Lo S.W., Wu J.H.; Lin F.P., Hsu, C.H., Visual Sensing for Urban Flood Monitoring. *Sensors*, 15 (2015), 20006-20029, doi:10.3390/s150820006
- [5] Lovett, G.M., Burns, D.A., Driscoll, C.T., Jenkins, J.C., Mitchell, M.J., Rustad, L., Shanley, J.B., Likens, G.E., Haeuber, R., Who needs environmental monitoring?. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5 (2007), 253-260, doi:10.1890/1540-9295(2007)5[253:WNEM]2.0.CO;2
- [6] Inaudi D., Cottone I., Figini A., Monitoring Dams and Levees with Distributed Fiber Optic Sensing, *The 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Hong Kong*, 9-11 December 2013
- [7] Liakath A., An Integrated Approach for the Improvement of Flood Control and Drainage Schemes in the Coastal Belt of Bangladesh, *Wageningen University*, The Netherlands, 2002
- [8] Nota katalogowa rejestratora danych Micropower, www.pmecology.com/wp-content/uploads/2021/10/PM-Ecology_Micropower_Karta-katalogowa-PL.pdf, dostęp 13.04.2022
- [9] Nota katalogowa czujnika Hydros-21 (CDT-10) firmy Meter, www.metergroup.com/environment/products/hydros-21-water-level-monitoring/, dostęp 11.04.2022
- [10] Nota katalogowa czujnika ciśnienia porowego VW firmy Gloetzl, www.gloetzl.de/fileadmin/produkte/1%20Messwertaufnehmer/1%20Druck%20und%20Spannung/Englisch/U_69.00_Druckaufnehmer_Porenwasser_Gas_Fluessigkeit_A4_en.pdf, dostęp 5.04.2022
- [11] Nota katalogowa sondy firmy Gropoint, www.gropoint.com/s/GroPoint-Profile-Datasheet.pdf, dostęp 30.03.2022