

dr hab. inż. Tomasz Korbiel, prof. AGH¹⁾
ORCID: 0000-0003-0783-6348

System monitorowania zagrożeń wibroakustycznych w procesach inwestycyjnych

System for monitoring vibroacoustic threats in investment processes

DOI: 10.15199/33.2022.10.18

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję rozproszonego systemu monitorowania poziomu zagrożeń środowiskowych w trakcie prac budowlanych. System ten charakteryzuje się elastycznością oraz dużą gamą mierzonych parametrów. Ważną cechą zaprojektowanego systemu monitorującego jest szybki przepływ informacji, przede wszystkim do obsługi maszyn stwarzających zagrożenie. Rozproszona struktura oraz interdyscyplinarność systemu pozwoliła zintegrować oprócz czynników wpływających na środowisko, takich jak drgania i hałas, również inne zagrożenia, a mianowicie zapylenie, ruchy masy gruntu, poziom wód gruntowych, obciążenie elektroenergetyczne. Opracowany system został zastosowany na placu budowy. Działanie systemu pozwoliło istotnie obniżyć wpływ m.in. drgań parasejsmicznych na budynki mieszkalne
Słowa kluczowe: zagrożenia wibroakustyczne; monitorowanie środowiska; MQTT.

Abstract. The article presents the concept of system for monitoring the level of environmental hazard factors during construction works. This system is characterized by high flexibility and a wide range of measured parameters. An important feature of the designed monitoring system is the rapid distribution of information, in particular for operating hazardous machines. The dispersed structure and interdisciplinary nature of the system allowed to integrate, apart from factors affecting the environment, such as vibrations and noise, other threats such as dust, ground mass movements, groundwater level, power load. The developed system was used on construction site. Operation of the system significantly reduced the impact of, among others, paraseismic vibrations on residential buildings in a short distance from the ongoing construction investment.
Keywords: vibroacoustic threats; environmental monitoring; MQTT.

W realizacji prac ziemnych wykonuje się za bezpieczeństwa wykopu przez różnego rodzaju technologie udarowe. Działania te mają istotne oddziaływanie na środowisko. Ponadto różnego rodzaju prace związane z zagęszczaniem gruntu powodują generację fali parasejsmicznej. W przypadku inwestycji w bezpośrednim sąsiedztwie zabudowy mieszkaniowej tego typu oddziaływania oraz hałas, jak również zanieczyszczenie powietrza i wody, wpływają na komfort mieszkańców, a także mogą powodować zagrożenie dla zdrowia oraz infrastruktury [1]. Czynnikiem zagrażającym infrastrukturze jest wystąpienie drgań wywołanych pracą maszyn budowlanych. Monitorowanie tych zaburzeń oraz okresowe raportowanie może być niewystarczające, ponieważ krótkotrwałe przekroczenie dopuszczalnych poziomów drgań może spowodować nieodwracalne straty. Poziom hałasu oraz zanieczyszczenie powietrza i wody również powinny być sygnalizowane w sposób niezwłoczny w celu ograniczenia tego oddziaływania. W związku z tym powstała potrzeba zbudowania systemu monitorującego zagrożenia środowiskowe, charakteryzującego się specyficznymi parametrami. Monitorowaniem konstrukcji zajmuje się wiele ośrodków naukowych, problem wykrywania ich stanu poruszono w [2].

Głównym założeniem projektowanego systemu jest simultaneous informowanie osób odpowiedzialnych za ciężkie procesy technologiczne o zaistniałych zdarzeniach na-

ruszenia norm, a jednocześnie należy generować raporty dotyczące zaistniałych zdarzeń. Pozostałe założenia systemu monitorującego związane były ze specyfiką terenu budowy i realizowanego obiektu. Komunikacja pomiędzy poszczególnymi autonomicznymi elementami systemu monitorującego powinna być bezprzewodowa, a obsługa niewymagająca specjalistycznej wiedzy. Instalacja oraz deinstalacja systemu musi uwzględniać specyficzne warunki budowy oraz nie może wpływać na przebieg inwestycji.

Projektowana struktura systemu monitorującego pozwoliła na zaproponowanie dodatkowej konsolidacji z innymi systemami, występującymi w procesach inwestycyjnych. Realizacja niektórych prac ziemnych wymaga przeprowadzenia procesu odwadniania gruntów, a następnie monitorowania i utrzymywania odpowiedniego poziomu wód gruntowych. Pewne prace geotechniczne wymagają monitorowania ruchów masowych gruntu. Tak złożony oraz interdyscyplinarny system monitorowania wymaga specyficznego podejścia projektowego.

Koncepcja systemu monitorowania zagrożeń wibroakustycznych

Znane są różne rozwiązania techniczne systemów monitorujących. Zazwyczaj ich działanie realizowane jest przez szeregowy algorytm monitorowania. W dużym uproszczeniu oznacza to, że wykonywany jest pomiar, a następnie analizy uzyskanych danych. Kolejny krok to wnioskowanie oraz raportowanie [3]. Struktury systemów monitorujących w znacznej mierze zależą od monitorowanego obiektu, środowiska

¹⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki; tkorbiel@agh.edu.pl

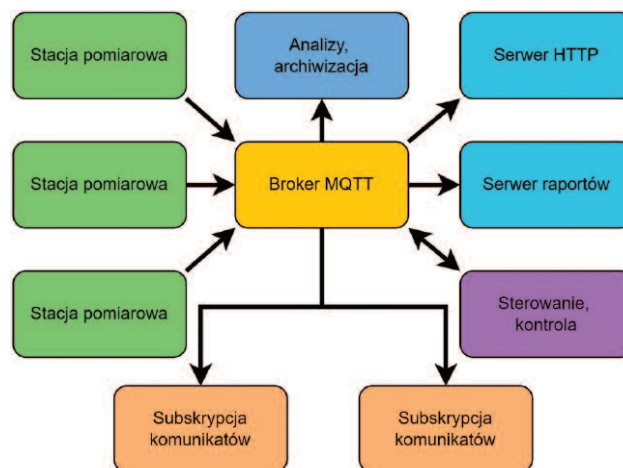
pracy oraz wymagań. Ich zastosowanie we współczesnej technice jest bardzo szerokie [4]. Monitorowanie parametrów dynamicznych w inżynierii mechanicznej kształtuje politykę eksploatacji systemów technicznych [5 – 7], a parametrów środowiskowych – politykę ochrony środowiska, a także pozwala na ocenę zagrożeń środowiskowych dla ludzi oraz obiektów technicznych [7, 8].

Działalność człowieka prowadzi do degradacji środowiska, wprowadza nieodwracalne szkody i w znaczny sposób zaburza równowagę. Prace budowlane wprowadzają do środowiska takie zakłócenia, jak hałas oraz drgania parasejsmiczne, zanieczyszczenie powietrza oraz wody. Tworzone obiekty zaburzają również równowagę środowiskową, ale wliczane jest to w cenę postępu. Dopóki prace budowlane trwają na terenach otwartych, mało osób i instytucji interesuje się monitorowaniem emitowanych zanieczyszczeń. Sytuacja diametralnie się zmienia na zurbanizowanych terenach miejskich, gdzie hałas powoduje obniżenie komfortu mieszkańców, a drgania mogą spowodować uszkodzenie infrastruktury. Ponadto wiele osób interesuje się zanieczyszczeniami emitowanymi do atmosfery. W przypadku prac budowlanych są to zazwyczaj pyły zawieszone w powietrzu. W takiej sytuacji już na etapie pozwoleń formalnoprawnych inwestorom stawia się wymagania monitorowania wpływu inwestycji na środowisko. Odpowiedzialność za szkody wynikłe z prowadzonych prac zależy w dużym stopniu od czasu reakcji na zaistniałe zagrożenia. W przypadku zagrożeń akustycznych dopuszczalna jest reakcja w ciągu 24 h, natomiast na zagrożenia wynikające z drgań mechanicznych reakcja powinna być natychmiastowa.

Biorąc pod uwagę redystrybucję informacji o zagrożeniu, rozległość geometryczną systemu oraz jego cechy użytkowe, w pierwszej kolejności należy dobrać platformę teleinformatyczną. Rozwój technologii IoT (ang. Internet of Things, Internet Rzeczy) oraz nowe trendy w technice [9] do realizacji zadania predysponuje protokół MQTT (ang. *Message Queue Telemetry Transport*). Jest to ekstremalnie prosty, lekki protokół transmisji danych, stosowany w przypadku urządzeń niewymagających dużej przepustowości. Protokół MQTT został stworzony w 1999 r. przez Andy’ego Stanforda-Clarka [10] oraz Arlena Nipperera.

Głównym obiektem w protokole MQTT jest broker. Stanowi on swego rodzaju serwer informacyjny, odpowiedzialny za przyjmowanie komunikatów oraz ich wysyłanie. Urządzenia odpowiedzialne za wysyłanie komunikatów do brokera nazywane są publikatorami, natomiast odbiorcy tych komunikatów to subskrybenci. Zaproponowana struktura systemu monitorującego przedstawiona została na rysunku 1.

W prezentowanej strukturze stacje pomiarowe stanowiące publikatory MQTT zbudowane są z układów pomiarowych oraz układów transmisji danych wraz z niezbędnymi elementami pozwalającymi uzyskać autonomię. Uniwersalna struktura mikroprocesorowego układu stacji pomiarowej pozwala na instalację wielu czujników, a przede wszystkim: mikrofonów i akcelerometrów wykonanych w technologii MEMS; barometrów; inklinometrów; dylatometrów; pochylomierzy; piezometrów; czujników pyłów zawieszonych PM10, PM5, PM2.5; pHmetrów; nefelometrów; czujników temperatury oraz wilgot-



Rys. 1. Struktura systemu monitorującego

Fig. 1. Structure of monitoring system

ności; tensometrów i wielu innych. Transmisja danych może odbywać się z wykorzystaniem struktury przewodowej UTP, struktury telefonii komórkowej LTE, GPRS, Bluetooth, transmisji radiowej w pasmach ISM, WiFi, LoRa. Zastosowane akumulatory zależą od wymaganego czasu autonomicznej pracy. Broker MQTT umiejscowiony w dowolnym miejscu sieci teleinformatycznej przyjmuje komunikaty ze wszystkich stacji pomiarowych, a subskrybenci otrzymują komunikaty w zależności od przydzielanego filtra. Serwer HTTP po otrzymaniu danych aktualizuje stronę www zawierającą aktualne wyniki pomiarów. Może również pobrać dane archiwalne z serwera raportów lub programów archiwizujących dane. W celu zabezpieczenia struktury przed celowym uszkodzeniem, osobno zbudowany jest serwer raportów, który po otrzymaniu komunikatów buduje raporty czasowe (godzinowe, dzienne, dobowe...). Raporty te są dostępne tylko dla uprawnionych użytkowników. W zależności od mocy obliczeniowej serwera, z brokerem MQTT można jednocześnie prowadzić analizę danych w osobnym wątku. Usługę tę można również wyprowadzić do zewnętrznego komputera, co znacznie zwiększa niezawodność całego systemu. Dane agregowane oraz wyniki analiz są publikowane w brokerze MQTT i stanowią kolejną klasę komunikatów. Są to komunikaty wtórne, ale podlegają tym samym regulom co pomiarowe komunikaty pierwotne. Mogą być użyte do monitorowania progów wartości, umieszczane w raportach lub na stronie www i są w pełni archiwizowane.

Do ważnych elementów systemu należą urządzenia do subskrypcji komunikatów. Są to małe urządzenia terminalowe, w które wyposażeni są pracownicy realizujący prace zagrażające środowisku. Uniwersalność protokołu MQTT w roli takiego subskrybenta pozwala wykorzystywać m.in. smartfony. Dla operatorów maszyn budowlanych zbudowano subskrybenta w wersji prototypowej, z wykorzystaniem platformy RBPI3. Subskrybent ten na bieżąco otrzymuje komunikaty zawierające poziom drgań parasejsmicznych, mierzony w obrębie wykonywanych prac. W przypadku przekroczenia progów ostrzegawczych operator jest natychmiast informowany tym urządzeniem o zaistniałej sytuacji i może zapobiec przekroczeniu progów krytycznych. Zadaniem stacji pomiarowej jest realizacja pomiarów, wstępna analiza danych oraz transmisja uzyskanych wyników. Po-

jedynca stacja pomiarowa może być wyposażona w różne układy sensoryczne oraz pełnić rolę subskrybenta. Odbierane komunikaty zawierają dane konfiguracyjne realizowanych pomiarów, m.in. czas obserwacji, czasowe interwały transmisji lub progi wartości pomiarowej powodujące generowanie komunikatów specjalnych. W przypadku pomiarów drgań parasejsmicznych stacja pomiarowa wyposażona jest w czujniki przyspieszenia wykonane w technologii MEMS. Po sesji pomiarowej o zadanym czasie obserwacji procesor przeprowadza filtrację sygnałów wg PN-B-02170 lub PN-B-02171. Następnie uzyskane sygnały są całkowane w celu uzyskania informacji dotyczącej prędkości drgań [11]. Wyniki przeprowadzonych analiz są formatowane do standardu JSON oraz transmitowane do brokera.

Przykładowa aplikacja

Realizacja inwestycji budowlanej wymagała zastosowania grodzic w postaci szczelnej ścianki larsenowej (*larsen tight wall*). Montaż zaplanowano przy użyciu palowania wibracyjnego z zastosowaniem młota wibracyjnego o masie 535 kg, sile odśrodkowej 150 kN oraz częstotliwości pracy 40 – 50 Hz. Rozwiązanie to stwarzało zagrożenie dla istniejącego budynku. Palowanie miało być realizowane w odległości 4 m od istniejącej zabudowy (rysunek 2).

W celu zmniejszenia wpływu drgań na istniejącą zabudowę zastosowano system monitorowania zagrożeń środowiskowych. W podziemnym garażu istniejącego budynku zainstalowano dwie stacje pomiarowe. Czujniki drgań zainstalowano w trzech punktach na wewnętrznej stronie ścian fundamentowych. Jako kryterium odniesienia posłużono się skalami SWD-II. Zastosowano filtr sygnału pomiarowego zgodny z charakterystyką skali SWD. Do transmisji danych wykorzystano transmisję GPRS w sieci telefonii komórkowej. Transmisja danych została zabezpieczona na I poziomie przez ograniczony dostęp do brokera MQTT. Subskrybentem komunikatów był dedykowany program w telefonie komórkowym typu smartfon z systemem operacyjnym Android®. Operator palownicy miał do wyboru dwa tryby pracy: ciągły wskaźnik drgań oraz wskaźnik poziomu ostrzegawczego. Przy wyborze I trybu, subskrybowane były bezpośrednio komunikaty ze stacji pomiarowych, natomiast w przypadku trybu II komunikaty generowane były przez moduł analizy danych. Moduł ten

pracował jako subskrybent oraz publikator na tym samym komputerze co broker MQTT, ale w całkowicie osobnym wątku.

W trakcie realizacji pracy, po zagłębieniu ścianki na głębokość 2 – 3 m, następowało wygenerowanie progów ostrzegawczych. Operator w takiej sytuacji zmieniał parametry pracy młota wibracyjnego. Działania te zmniejszały poziom drgań oddziałujących na sąsiedni budynek. W związku z tym, że emitowane drgania były odczuwalne przez mieszkańców, dane pomiarowe zostały udostępnione w sieci publicznej. Działanie to pokazało pełną kontrolę nad niepokojącymi zjawiskami, co uspokoiło nastroje.

Podsumowanie

System monitorujący był zainstalowany i eksploatowany w warunkach budowy. W realizacji projektu rozwiązano wiele problemów, takich jak zasilanie systemów pomiarowych, łatwa reorganizacja systemu, szybka redystrybucja informacji, elastyczność konfiguracji czujników. Aktywne raportowanie HTTP umożliwiło również zainteresowanym (mieszkańcom) obserwowanie pracy systemu. Wiele elementów systemu można po demontażu wykorzystać w kolejnych projektach. Zastosowanie protokołu MQTT znacznie skróciło czas i koszty budowy systemu, a także zmniejszyło zużycie energii przez urządzenia.

Literatura

- [1] Stypuła K. O zmianach w normie PN-B-02170 dotyczącej oceny wpływu drgań przekazywanych na budynki przez podłoże. *Przegląd Budowlany*. 2017; 10: 125–128; [bwmeta1.element.baztech-1546c3e8-bf7f-4498-b36d-e8f658c73bd5](#).
- [2] Deraemaeker A, Reynders E, De Roeck G, Kullaa J. Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment. *Mech. Syst. Signal Process.* 2008; [https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.07.004](#).
- [3] Fiszler P, Kałkowski Z, Strzałka J. Metodologia opracowywania opinii i ekspertyz w budownictwie dla potrzeb postępowań sądowych: materiały z seminariów. *Małopolska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa (Kraków)*. 2018.
- [4] Cempel C, Haddad SD. *Vibroacoustic condition monitoring*. Ellis Horwood. 1991; [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(94\)90467-7](#).
- [5] Davies A. *Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology*. Springer Science & Business Media. 2012; [https://doi.org/10.1007/978-94-011-4924-2](#).
- [6] Korbziel T. Eksploatacyjne uwarunkowania budowy systemów monitorujących. *Przegląd Mechaniczny*. 2016; 1 (10): 20 – 27.
- [7] Pawlik P. et al. *Vibroacoustic study of powertrains operated in changing conditions by means of order tracking analysis*. *Eksploat. i Niezawodn. - Maint. Reliab.* 2016; [http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.4.16](#).
- [8] Korbziel T, et al. *Recognition of the 24-hour Noise Exposure of a Human*. *Arch. Acoust.* 2017; [http://dx.doi.org/10.1515%2Faoa-2017-0064](#).
- [9] Botto-Tobar M, Pizarro G, Zuñiga-Prieto M, D'Armas M, Zuñiga Sánchez M. *Technology trends: 4th International Conference, CITT 2018, Bahahoyo, Ecuador, August 29-31, 2018, revised selected papers*; [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05532-5](#).
- [10] Hunkeler U, Truong HL, Stanford-Clark A. *MQTT-S – A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks*. 2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08), 2008; [https://doi.org/10.1109/COMSWA.2008.4554519](#).
- [11] Korbziel T, Pawlik P. *Parametryzacja trajektorii fazowych w zastosowaniach diagnostycznych*. *Przegląd Mechaniczny*. 2012; 6: 37–40, [bwmeta1.element.baztech-article-BPB8-0027-0005](#).

Badania oraz publikacja zrealizowane zostały w ramach subwencji badawczej nr 16.16.130.942.

Przyjęto do druku: 12.08.2022 r.



Rys. 2. Poglądowy plan sytuacyjny
Fig. 2. Overview location plan