

Wstępny projekt systemu wspomagającego wykonywanie pomiarów emisji hałasu

Preliminary design of system supporting the measurements of noise emission

GRZEGORZ SZCZEPAŃSKI
LESZEK MORZYŃSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.138>

W artykule zaprezentowano wstępny projekt systemu przeznaczonego do realizacji pomiarów akustycznych w sposób automatyczny. Przedstawiono przyjęte założenia, konstrukcję mechaniczną i elektryczną systemu oraz wyniki badania numerycznego.

SŁOWA KLUCZOWE: platformy mobilne, manipulator, pomiary emisji hałasu

The article presents the preliminary design of system intended to perform acoustic measurements in an automatic manner. Assumptions of the system were presented, the mechanical and electrical structure of the system were discussed. Result of simulation of motion study was also presented.

KEYWORDS: mobile platform, manipulator, measurement of noise emission

Badania emisji hałasu maszyn i urządzeń są realizowane metodami, które są technicznie trudne do wykonania [1]. W tego typu badaniach należy zapewnić powtarzalność pomiarów źródła hałasu – wykonywanych często w dynamicznych warunkach pracy – oraz (w przypadku pomiarów *in situ*) hałasu tła panującego w zakładach przemysłowych. Na dokładność pomiaru ma wpływ pozycjonowanie mikrofonu. Zasadniczo podczas wykonywania pomiarów mocy akustycznej kierunek odniesienia mikrofonu (oś podłużna przedwzmacniacza mikrofonowego połączonego z mikrofonem) powinien być usytuowany równolegle do normalnej do hipotetycznej powierzchni pomiarowej. W niektórych przypadkach do prawidłowego wyznaczenia wielkości związanych z emisją hałasu potrzebne jest przeprowadzenie pomiarów nawet w 20 ściśle określonych punktach na powierzchni pomiarowej [2].

Dzięki zautomatyzowaniu pomiarów akustycznych można zwiększyć dokładność i powtarzalność wyników, a także znacznie skrócić czas realizacji pomiarów [1]. Biorąc pod uwagę zapotrzebowanie na nowoczesne rozwiązania techniczne umożliwiające obserwacje zjawisk oraz na systemy pomiarowe zapewniające coraz lepszą dokładność, w ramach zadania badawczego realizowanego w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym zostanie opracowany system wspomagający wykonywanie pomiarów związanych z wyznaczaniem oraz oceną emisji hałasu pochodzącego

od maszyn i urządzeń. Będzie się on składał z mobilnej platformy, manipulatora, miernika poziomu dźwięku oraz zestawu czujników.

Założenia projektu

System wspomagający pomiary akustyczne będzie przeznaczony przede wszystkim do badania emisji hałasu maszyn i urządzeń, obejmującego określenie: poziomu mocy akustycznej, skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A, oraz poziomu ciśnienia akustycznego emisji, skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A, na stanowisku pracy lub w innych określonych miejscach [4]. Podstawowe uregulowania prawne dotyczące określania emisji hałasu maszyn i urządzeń są zawarte w dyrektywie Unii Europejskiej 2006/42/WE [5] wprowadzonej do krajowego prawodawstwa przez rozporządzenie Ministra Gospodarki z 21 października 2008 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn [6]. Wspomniana dyrektywa obowiązuje projektantów i konstruktorów do podania poziomu emitowanego ciśnienia akustycznego, skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A, na stanowisku pracy – jeżeli wartość tego ciśnienia przekracza 70 dB. Jeżeli natomiast poziom emitowanego ciśnienia akustycznego, skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A, na stanowisku pracy przekracza wartość 80 dB, instrukcja maszyny musi zawierać informację na temat poziomu jej mocy akustycznej.

Rozwiązanie techniczne przystosowane do wykonywania pomiarów emisji w sposób automatyczny może zatem znaleźć szerokie grono odbiorców. To rozwiązanie będzie dostosowane do systemów pomiarowych i mierników o niewielkich wymiarach, pozwalających na zdalne uruchamianie pomiaru i mających zasilanie akumulatorowe. System sprawdzi się również w pomiarach w środowisku zewnętrznym (w sprzyjających warunkach pogodowych, tzn. przy braku opadów atmosferycznych i w temperaturze powietrza zapewniającej prawidłową pracę wszystkich komponentów systemu wspomagającego – zgodnie z deklaracjami producentów). Należy jednak pamiętać, że warunki meteorologiczne (np. temperatura i wilgotność powietrza, opady atmosferyczne) mają wpływ na propagację dźwięku i – podobnie jak w przypadku klasycznych metod pomiaru – stanowią pewne ograniczenie.

Platforma mobilna będzie dostosowana do poruszania się po suchych i utwardzonych podłożach oraz do pokonywania niewielkich wzniesień terenu, natomiast nie poradzi sobie ze skokowymi różnicami poziomu podłoża (ze

* Mgr inż. Grzegorz Szczepański (grszc@ciop.pl), dr inż. Leszek Morzyński (lmorzyns@ciop.pl) – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

stopniami) lub z grząskim terenem. Elementem manipulowanym będzie mikrofon z przedwzmacniaczem o masie nieprzekraczającej 0,1 kg. Maksymalny zasięg manipulatora zdecyduje o użyteczności systemu, dlatego jednym z założeń projektu było opracowanie takiego rozwiązania, które umożliwi umieszczenie mikrofonu na wysokości nie mniejszej niż 2 m względem podłoża.

Konstrukcja systemu

Bazą opracowywanego rozwiązania będzie platforma mobilna, na której zostanie zainstalowany manipulator zapewniający odpowiednie ustawienie mikrofonu w określonych punktach przestrzeni, znajdujących się na płaszczyźnie pomiarowej. Układ sterujący systemu (po wprowadzeniu do niego danych dotyczących powierzchni pomiarowej) automatycznie wyliczy współrzędne punktów.

Do zaprojektowania konstrukcji i przeprowadzenia analizy ruchu wykorzystano oprogramowanie SolidWorks w wersji 2018. System będzie się składał z pięciu grup elementów:

- elementów konstrukcyjnych mechanicznych (m.in. płyty podwozia platformy mobilnej, elementów obudowy, elementów mocujących do układów pomiarowych i ramion manipulatora);
- napędów elektrycznych;
- źródeł zasilania (dwóch akumulatorów 12 V 9 Ah typu Li-Ion);
- komponentów elektronicznych (m.in. przetwornic i stabilizatorów napięcia, czujnika odległościowego wysokiej precyzji, skanerów laserowych 2D typu LiDAR, żyroskopów, akcelerometrów);
- kontrolerów sterujących (w tym sterowników silników platformy mobilnej oraz siłowników manipulatora, a także minikomputera sterującego).

Zasadniczym elementem platformy mobilnej (rys. 1) jest aluminiowa płyta podwozia (wykonana ze stopu PA38) o grubości 4 mm i wymiarach 900 mm × 700 mm, ze wspornikami w postaci profili aluminiowych. Na niej zostaną zamocowane silniki platformy mobilnej.

Na płycie wierzchniej platformy mobilnej będą się znajdowały dwa przyciski bezpieczeństwa:

- przycisk bezpiecznego zatrzymania maszyny – przerywający wszelkie procedury zadane w sposób automatyczny lub ręczny;
- przycisk awaryjnego zatrzymania maszyny – odłączający obwód zasilania na jednym biegunie.

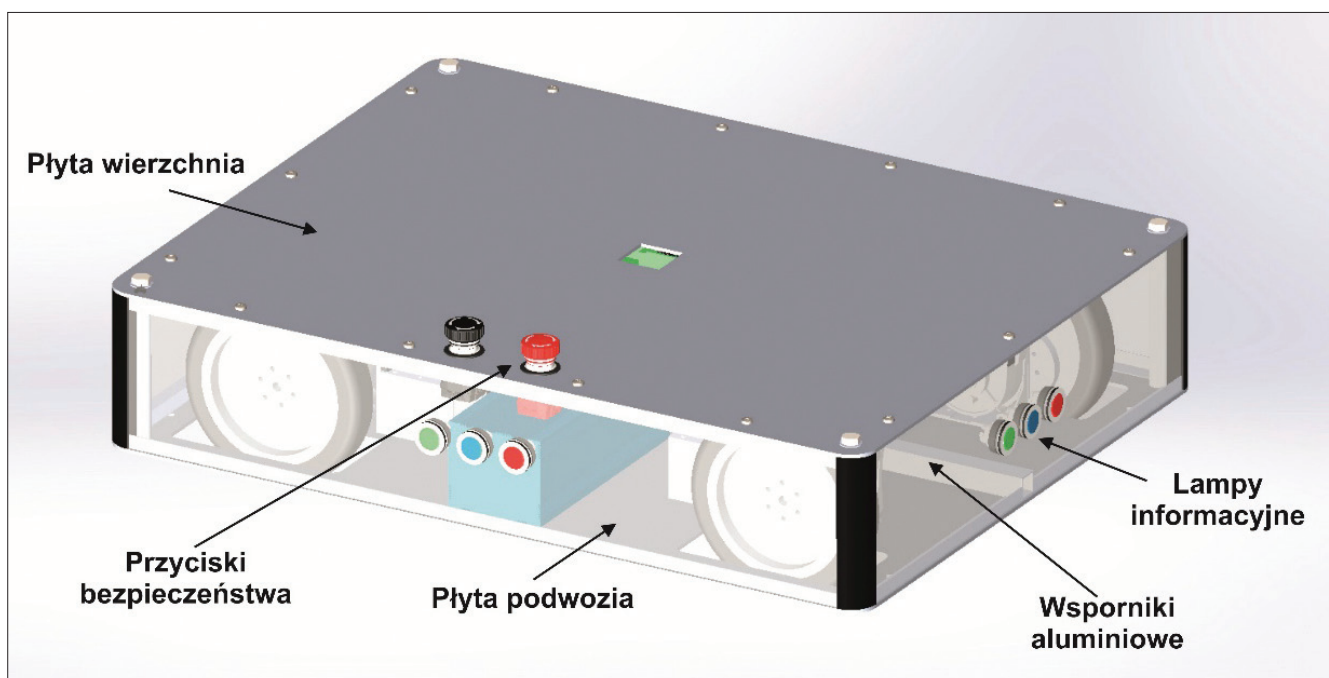
System wspomagający wykonywanie pomiarów emisji hałasu zostanie wyposażony w trzy lampy informacyjne, wskazujące na stan pracy:

- zieloną – informującą, że system jest zasilany i układy działają prawidłowo, system czeka na instrukcję/wykonuje działania wprowadzane w sposób manualny;
- niebieską – informującą, że system wykonuje zadanie pomiarowe w sposób automatyczny;
- czerwoną – informującą, że system wspomagający wykrył awarię/brak możliwości do wykonania ruchu zgodnego z procedurą pomiarową.

W celu wyeliminowania drążka układu kierowniczego przyjęto, że każde z kół będzie wyposażone w silnik elektryczny, sterowany samodzielnie za pomocą dedykowanego sterownika. To pozwoli na skręcanie pojazdu wokół własnej osi bez potrzeby komplikowania układu sterowania.

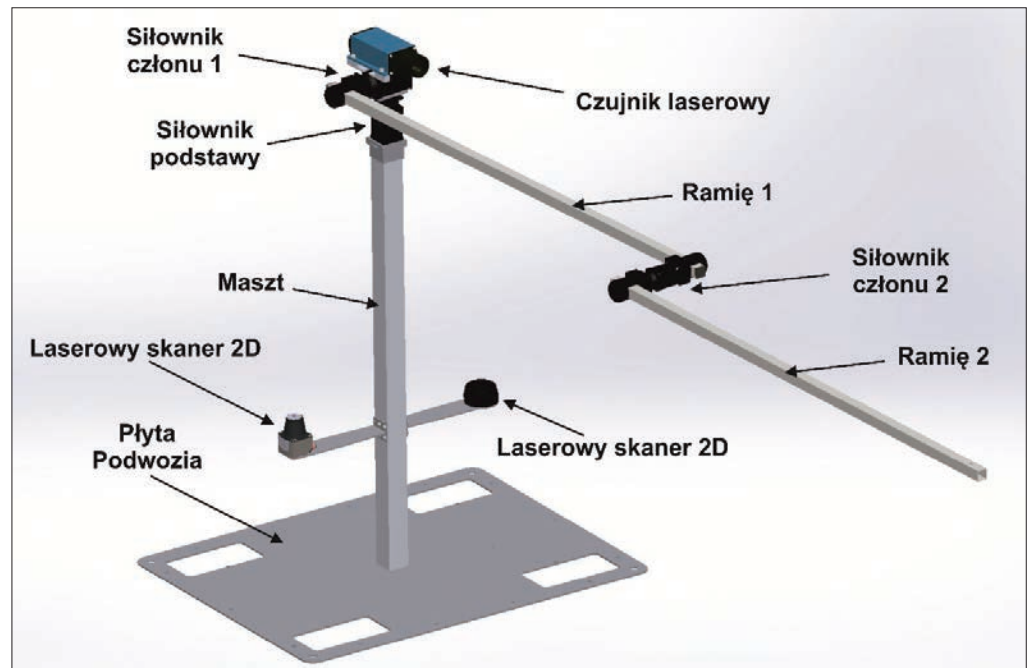
Zdecydowano się na przetestowanie dwóch rodzajów kół: konwencjonalnych kół z bieżnią gumową oraz kół mecanum – pozwalających na ruch pojazdu w dowolnym kierunku bez potrzeby obrotu platformy mobilnej. Zastosowanie tego typu rozwiązania uczyni z platformy układ nieholonomiczny, o większych możliwościach manewrowania – również w pomieszczeniach z bardzo wąskimi korytarzami lub miejscach z licznymi przeszkodami (tj. obiektami wystającymi ponad poziom płaskiej powierzchni).

Jako jednostki napędowe platformy mobilnej najlepiej się sprawdzą silniki bezszczotkowe BLDC (*brushless DC motor*), które w porównaniu z silnikami szczotkowymi cechują się większą sprawnością i mniejszą masą, umożliwiają sterowanie w szerokim zakresie prędkości, a przede wszystkim są zdecydowanie cichsze



Rys. 1. Platforma mobilna

Rys. 2. Manipulator oraz czujniki pomiarowe



i mają dłuższą żywotność. Wybrano silniki bezszczotkowe prądu stałego (BLDC) o napięciu zasilania 24 V, momencie nominalnym 0,5 Nm z regulowaną prędkością obrotową w zakresie 200÷3000 obr/min i z enkoderem 1000 imp/obr. Do silników dobrano przekładnię ślimakową ze ślimacznicą z kompozytu i wałem drążonym $\varnothing 12$ mm, o przełożeniu 60:1 i sprawności 60%.

Ponadto konstrukcja manipulatora będzie się składać z kilku elementów mocujących, siłowników oraz ramion manipulatora. Elementy mocujące łączące ramiona robota z siłownikami zostały zaprojektowane do wykonania w technologii FFF (*fused filament fabrication*) na drukarce 3D.

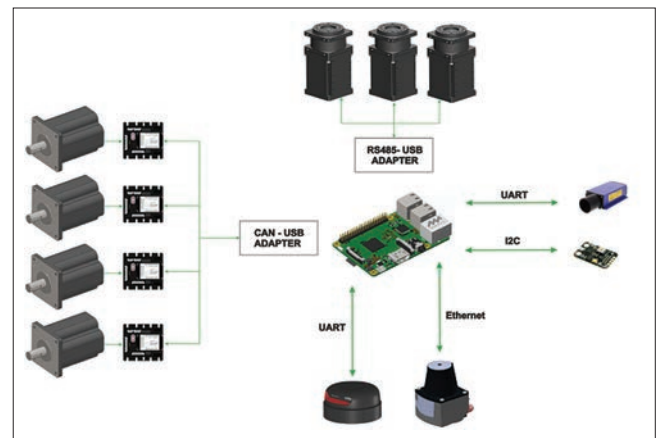
Wydruki zostaną wykonane z materiału ABS o podwyższonych właściwościach mechanicznych. Do budowy manipulatora wytypowano silniki, które są zintegrowane z systemem redukcji biegów, enkoderem i sterownikiem. Ich budowa opiera się na przekładni cykloidalnej, która charakteryzuje się wysoką odpornością na wibracje oraz uderzenia.

Sterowanie może się odbywać za pomocą sterownika bazującego na jednym z wybranych standardów transmisji: RS485, CAN, TTL lub Ethercat.

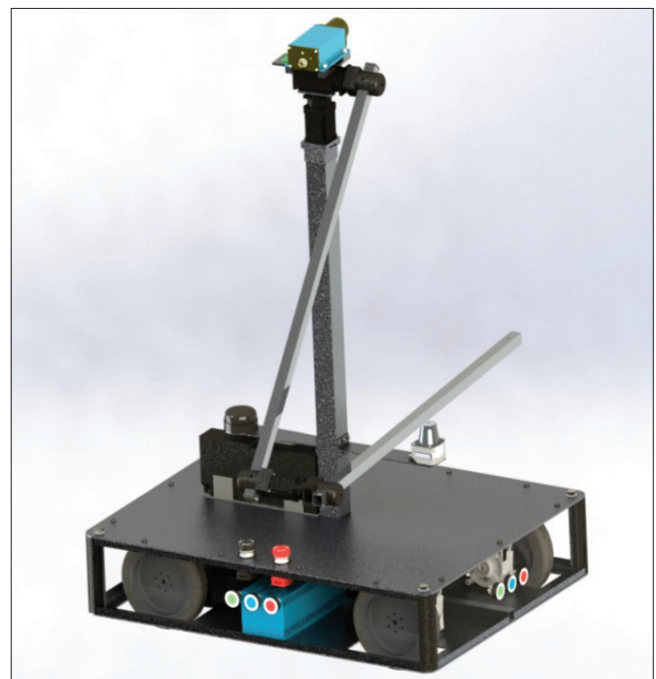
Z uwagi na fakt, że manipulowany element (mikrofon) jest bardzo lekki, zdecydowano się na wykonanie obu ramion manipulatora z profili aluminiowych o przekroju kwadratowym 25 mm × 25 mm i o grubości 2 mm, przy czym długości członów wynosiłyby 1,3 m i 0,7 m.

Manipulator ma być umieszczony na maszcie, którego wysokość wstępnie określono na 1 m. Na maszcie zostaną również zamocowane czujniki odległościowe, w tym skanery laserowe LiDAR. Do zainstalowania systemów pomiarowych posłużą mocowania znajdujące się na płycie wierzchniej platformy mobilnej. Elementy zainstalowane na płycie podwozia zostaną obudowane płytami ze szkła akrylowego o grubości 3 mm. Konstrukcję manipulatora oraz lokalizację czujników pomiarowych przedstawiono na rys. 2.

Ze względu na różne napięcia zasilania poszczególnych komponentów system wspomagający będzie wyposażony w przetwornice i stabilizatory napięć, przetwarzające napięcie prądu stałego 12 V na napięcia stałe 5 V i 24 V.



Rys. 3. Uproszczony schemat połączeń komunikacyjnych komponentów systemu



Rys. 4. Wizualizacja modelu systemu wspomagającego wykonywanie pomiarów emisji hałasu

W skład zestawu czujników wchodzi:

- czujniki pomiaru odległości związane z lokalizacją systemu wspomagającego względem badanego obiektu, w tym m.in. laserowe skanery 2D typu LiDAR i wysokiej precyzji czujnik laserowy odległościowy;
- czujniki orientacji manipulatora, w tym przede wszystkim akcelerometry, żyroskopy oraz inklinometry.

Podstawowy schemat połączeń komponentów elektrycznych wraz z opisem magistrali komunikacyjnych przedstawiono na rys. 3.

Układ sterujący manipulatora i platformy mobilnej musi spełniać szereg wymagań. Przede wszystkim powinien zapewniać jednoczesną kontrolę wszystkich działających silników i odbierać sygnały ze wszystkich czujników pomiarowych.

W tym celu planuje się wykorzystanie czterordzeniowego minikomputera Raspberry Pi 3 model B. Architektura oprogramowania systemów zautomatyzowanych może mieć różne schematy [7]. Sterowanie mobilnym systemem o dużej liczbie czujników jest zagadnieniem bardzo złożonym, a zarazem kluczowym z punktu widzenia prawidłowego pozycjonowania systemu wspomagającego – zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak trudnych warunkach przemysłowych. Odpowiednia struktura oprogramowania pozwoli na szybką adaptację systemu wspomagającego do nowych celów i ewentualnie do innych platform sprzętowych.

Zdecydowano, że do sterowania systemem wspomagającym zostanie wykorzystany system operacyjny ROS.

Według szacunków masa systemu z kołami typu mecatanum powinna wynosić ok. 44 kg. Jego model przedstawiono na rys. 4.

Badania symulacyjne

Celem badań symulacyjnych było wyznaczenie przebiegu czasowego momentu obrotowego kół przednich i tylnych. Symulacje numeryczne przeprowadzono w oprogramowaniu SolidWorks 2018 (w module motion), z wykorzystaniem uproszczonych modeli geometrycznych, które jednak zawierały kluczowe parametry ostatecznego modelu systemu wspomagającego.

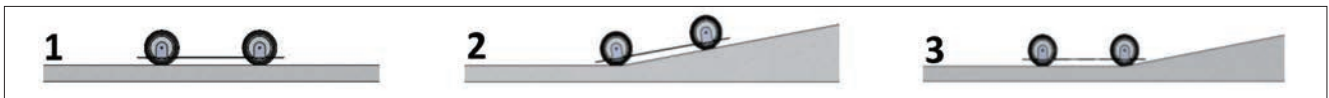
W modelach uproszczonych zastosowano zmodyfikowane właściwości związane z masą modelu i położeniem środka masy oraz wymiary charakterystyczne, zgodne ze szczegółowym modelem. Środek masy modelu systemu wspomagającego znalazł się w punkcie bliskim punktowi położenia środka symetrii. W badaniach wykorzystano koła klasyczne o średnicy 8 cali. Badania symulacyjne ruchu platformy mobilnej wykonano dla powierzchni złożonej (rys. 5), tj. powierzchni płaskiej oraz powierzchni o nachyleniu 10° . Zastosowano następujące współczynniki kontaktu kół z podłożem [8]:

- współczynnik tarcia kinetycznego (współczynnik przyczepności poślizgowej) $\mu_k = 0,76$;
- współczynnik tarcia statycznego $\mu_s = 1,0$.

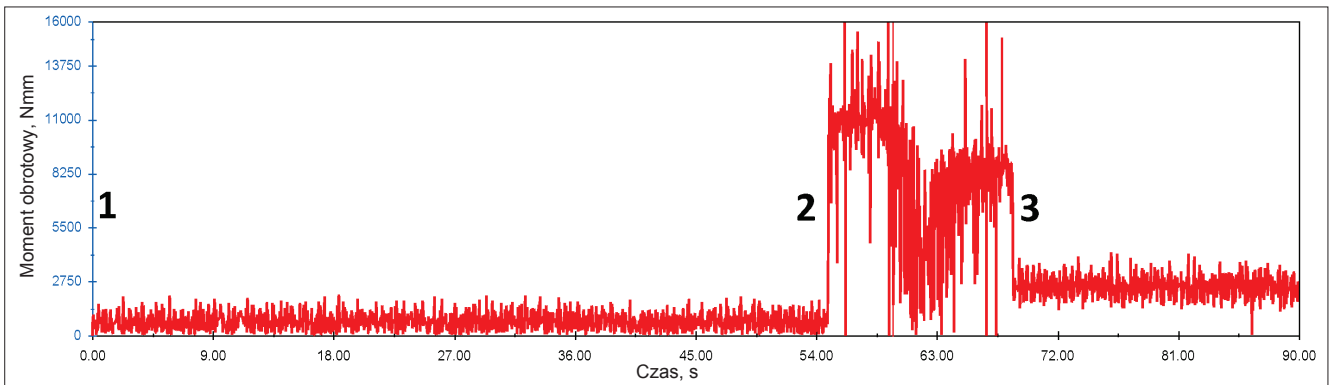
Podczas symulacji analizowano trzy charakterystyczne fazy ruchu (rys. 5):

- ruch platformy mobilnej po płaskim podłożu,
- najazd na wzniesienie o nachyleniu 10° ,
- jazda po wzniesieniu, przy czym podwozie jest usytuowane równoległe do wzniesienia.

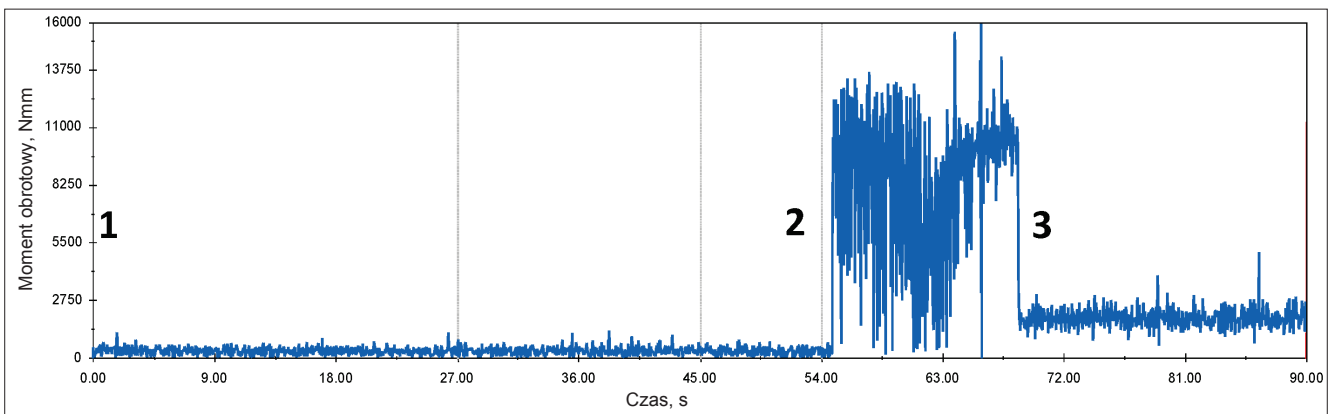
Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 6 i 7.



Rys. 5. Pozycje charakterystyczne badania numerycznego



Rys. 6. Wykres momentu obrotowego koła tylnego



Rys. 7. Wykres momentu obrotowego koła przedniego

Chwilowy moment obrotowy, występujący podczas podjazdu pod wzniesienie, wynosił ok. 12 Nm dla koła tylnego i ok. 11 Nm dla koła przedniego. Ciągły moment obrotowy podczas jazdy po powierzchni płaskiej wyniósł średnio 0,5 Nm, a w chwili podjazdu pod wzniesienie – ok. 2,7 Nm dla koła tylnego i ok. 1,9 Nm dla koła tylnego.

Wyniki otrzymane na drodze badań numerycznych były zbliżone do wyników analitycznych, uzyskanych zgodnie z tokiem postępowania odpowiednim dla platform mobilnych inspekcyjnych, przedstawionych w artykule [9]. Te wyniki zostały wykorzystane do doboru napędów dla platformy mobilnej.

Podsumowanie

Przedstawiony system wspomagający wykonywanie pomiarów emisji hałasu zostanie wykorzystany nie tylko w badaniach związanych z wyznaczaniem emisji hałasu maszyn i urządzeń, lecz także w realizacji szeregu badań o ukierunkowaniu podstawowym, diagnostycznym oraz weryfikacyjnym. Opracowane rozwiązanie znajdzie zastosowanie w pomiarach parametrów charakteryzujących hałas dużych obiektów w warunkach *in situ*, jak również pozwoli na zautomatyzowanie pomiarów dotyczących wyznaczania mocy akustycznej i promieniowania dźwięku, w tym w eksperymentach prowadzonych w komorze do badań akustycznych wchodzących w skład laboratoriów Tech-Safe-Bio Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego. W ramach dalszych prac zaplanowano budowę modelu laboratoryjnego oraz badania weryfikacyjne opracowanego rozwiązania w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych.

Opracowano na podstawie badań zrealizowanych w latach 2017–2018 w ramach działalności statutowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego, sfinansowanych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

1. Engel Z., Piechowicz J., Pleban D., Stryczniewicz L. „*Hałas przemysłowe, maszyny i urządzenia – wybrane problemy wibroakustyczne*”. Warszawa: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, 2009.
2. PN-EN ISO 3744:2011 Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego – Metody techniczne stosowane w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk.
3. Felis J., Flach A., Kamisiński T. “Testing of a device for positioning measuring microphones in anechoic and reverberation chambers”. *Archives of Acoustics*. 37, 2 (2012): s. 245–250.
4. PN-EN ISO 11202:2012 Akustyka – Hałas emitowany przez maszyny i urządzenia – Wyznaczanie poziomów ciśnienia akustycznego emisji na stanowisku pracy i w innych określonych miejscach z zastosowaniem przybliżonych poprawek środowiskowych.
5. Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on machinery, and amending Directive 95/16/EC (recast) (Text with EEA relevance) OJ L 157, 9.6.2006.
6. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 21 października 2008 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn (Dz.U. z 2008 r. nr 199, poz. 1228 ze zm.).
7. Fraser G., Steinbauer G., Weber J., Wotawa F. “*Robust Intelligent Control of Mobile Robots, Mobile Computing: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*”. IGI Global, 2008, s. 597–617.
8. Wong J.Y. “*Theory of Ground Vehicles*”. 3rd edition. Wiley-Interscience, 2001.
9. Kasprzyczak L., Dzikowski A., Nowak D. „Wyznaczanie parametrów elektromechanicznych głównych napędów Mobilnej Platformy Inspekcyjnej”. *Mechanika i Automatyka Górnictwa*. 7 (2013): s. 30–36. ■