



RAFAŁ BURDZIK¹⁾
IRENEUSZ CELIŃSKI²⁾

ESTIMATION OF TRAFFIC FLOW USING MEASUREMENTS OF ROAD SURFACE VIBRATIONS

SZACOWANIE NATĘŻENIA STRUMIENIA RUCHU Z WYKORZYSTANIEM POMIARU DRGAŃ POWIERZCHNI JEZDNI

STRESZCZENIE. Pomiar parametrów ruchu drogowego w wybranym przekroju drogi zrealizowany może być z wykorzystaniem różnych technik. Pomiar może być wykonany w pasmie fal widzialnych, pasmie akustycznym lub z wykorzystaniem drgań. Większość drgań w pasie drogowym wywołują pojazdy poruszające się w strumieniu ruchu. W artykule przedstawiono sposób uproszczonego pomiaru natężenia strumienia ruchu z wykorzystaniem analizy drgań powierzchni jezdni wywołanych przez pojazdy. Drgania pochodzące od poszczególnych pojazdów zależą od ich parametrów technicznych i stanu technicznego, jak również od rodzaju nawierzchni, klasy technicznej i stanu drogi. W artykule przedstawiono także próbę parametryzacji strumienia ruchu drogowego w wybranym przekroju drogi z wykorzystaniem metody analizy drgań nawierzchni. W tym celu użyto prototyp układu pomiarowego wyposażonego w akcelerometr ADLX335. Uzyskane w ten sposób wyniki pomiarów drgań nawierzchni zestawiono z danymi pomiarowymi z ręcznego rejestratora ruchu. Na podstawie otrzymanych wyników wykazano, że prezentowana metoda pozwala na szacowanie natężenia strumienia ruchu drogowego.

SŁOWA KLUCZOWE: droga, MEMS, natężenie ruchu, wibroakustyka.

ABSTRACT. Road traffic parameters in a selected road cross-section can be measured using various techniques. Such measurements can be made in the visible wave band, the audible frequency band or they can be based on vibrations. Most vibrations in the roadway are generated by vehicles moving in a traffic flow. This paper presents a simplified way of traffic flow measurement based on an analysis of road surface vibrations generated by vehicles. The vibrations originating from individual vehicles depend on the latter's specifications and technical condition, as well as on the road's pavement type, design class and condition. As part of this research an attempt at the parametrization of the traffic flow in a selected road cross-section was made using a road surface vibration analysis method. For this purpose a prototype measuring system equipped with an ADLX335 accelerometer was built. Road pavement vibration measurements acquired in this way were collated with measurement data obtained from a manual traffic recorder. The results show that the presented method is suitable for road traffic flow estimation.

KEYWORDS: MEMS, road, traffic flow, vibroacoustics.

DOI: 10.7409/rabdim.022.009

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice; rafal.burdzik@polsl.pl

²⁾ Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice; ireneusz.celinski@polsl.pl

1. WSTĘP

Punktowy pomiar drgań powierzchni jezdni w określonym przekroju sieci drogowej informuje o zmierzonej w tym punkcie wartości amplitudy przyspieszenia. To przyspieszenie pochodzi w głównej mierze od przejeżdżających pojazdów (stojące pojazdy z uruchomionym silnikiem również wywołują drgania). Drgania rejestrowane na powierzchni gruntów lub budynków są pochodną wielu wymuszeń sztucznych i naturalnych – sejsmicznych. W badaniu przyjęto, że dla określonych pasm częstotliwości rejestrowane drgania generowane są przez ruch pojazdów. Mimo że z takiego pomiaru trudno jest odczytać jednoznaczne informacje o parametrach ruchu drogowego, jest to zdaniem autorów jednak możliwe w pewnym ograniczonym zakresie. Trudność jednoznacznego odczytu danych wynika z faktu nakładania się na siebie drgań pochodzących od różnych pojazdów przejeżdżających przez dany przekrój pomiarowy, zarówno w tym samym jak i w przeciwnym kierunku ruchu. Nakładanie drgań ma w tych kontekstach różny charakter, zależy od kierunku ruchu i odległości od rejestratora poszczególnych obiektów generujących drgania. Sytuacja komplikuje się jeszcze bardziej przy jezdniach wielopasowych i/lub jezdniach z torowiskiem. Jeszcze trudniejsza sytuacja w tym aspekcie zachodzi w przypadku prowadzenia pod drogą (przekrojem pomiarowym) linii metra. Różne źródła drgań w pasie drogowym zilustrowano na Rys. 1.

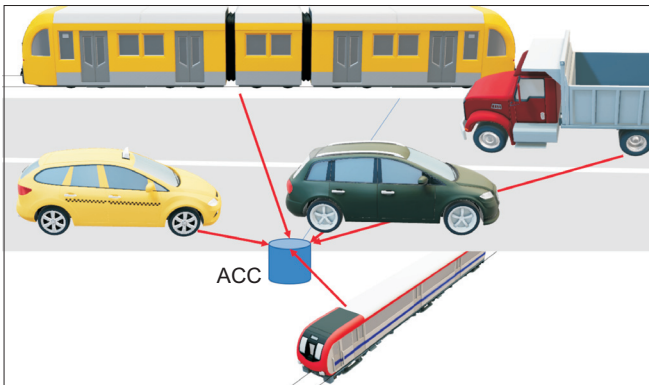


Fig. 1. Various sources of vibrations in the measurement cross-section, ACC – linear accelerometer

Rys. 1. Różne źródła drgań w przekroju pomiarowym, ACC – rejestrator przyspieszeń liniowych

Na Rys. 1 akronimem ACC oznaczono rejestrator przyspieszeń liniowych. Taki rejestrator odczytuje wszystkie drgania dochodzące do punktu, w którym został zainstalowany. Odpowiednio zamontowany układ pomiarowy rejestruje jednak głównie drgania pochodzące z jednego pasa ruchu (zastosowano autorski system mocowania akcelerometru na jezdni).

Prezentowane w artykule próby szacowania natężenia strumienia ruchu drogowego podjęto głównie w celu zbadania

1. INTRODUCTION

A spot measurement of carriageway surface vibrations in a particular section of the road network supplies information about the acceleration amplitude value in this spot. The acceleration originates mainly from the passing vehicles (stationary vehicles with their engine running also generate vibrations). The vibrations registered on the surface of the ground or a building are the resultant of many artificial and natural seismic excitations. In this study it was assumed that the vibrations registered in the particular frequency bands are generated by vehicular traffic. Even though it is difficult to obtain unequivocal information about the road traffic parameters from such a measurement, it is nevertheless, in the authors' opinion, possible to a certain limited degree. The difficulty in obtaining unequivocal data in this way is due to the superimposition of vibrations originating from different vehicles passing, in both the same and opposite traffic direction, through the given measurement cross-section. This superimposition of vibrations depends on the direction of traffic and the distance of the accelerometer from the particular objects generating the vibrations. The situation becomes even more complicated in the case of multi-lane carriageways and/or carriageways with a trackway. A still more difficult situation in this regard occurs when an underground line passes under the road (the measurement cross-section). The various sources of vibrations in a roadway are shown in Fig. 1.

In Fig. 1 the abbreviation ACC represents a linear accelerometer. Such a device registers all the vibrations reaching the spot in which it has been installed. However, when appropriately mounted (using a special system designed by the authors), the measuring system registers mainly vibrations originating from a single traffic lane.

The attempts at estimating road traffic flow presented in this paper were undertaken mainly to test the feasibility of using this measuring technique to measure traffic flow. In the authors' opinion, the results of this pilot study indicate that such measurements can be helpful in acquiring basic road traffic data.

2. REVIEW OF LITERATURE

Studies of road traffic are conducted first to parametrize it and then to identify its character and possible changes. Road traffic research can be dated back to the beginning of the 20th century. Pigou's and Knight's studies of respectively 1920 and 1924 belong to this research [1]. The aim of longer-term traffic research is to build a mathematical theory of road traffic. Examples here are Wardrop's paper of 1952 [2] and Samuelson's paper of 1952 [3]. Since that

możliwości wykorzystania takiej techniki pomiarowej w badaniach natężenia ruchu. Zdaniem autorów uzyskane z pilotażowych badań wyniki wskazują, iż pomiar taki może być pomocny w odczycie podstawowych danych na temat ruchu drogowego.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Badania ruchu drogowego mają na celu jego bieżącą parametryzację, a w dłuższej perspektywie rozpoznanie jego charakteru oraz ewentualnych zmian. Współczesne badania ruchu drogowego można datować od początku XX wieku. Do tych badań należą prace Pigou i Knighta odpowiednio z 1920 i 1924 roku [1]. Badania ruchu w dłuższej perspektywie służą budowie matematycznej teorii ruchu drogowego. Przykładem takich prac są badania Wardropa z 1952 roku [2]. Kolejne prace na tym polu to badania Samuelsona (1952) [3]. Od tego czasu teoria ruchu drogowego była aktualizowana systematycznie, równoległe ze wzrostem obserwowanych wolumenów ruchu (wzrost wskaźnika motoryzacji) i obserwacją nowych zjawisk w ruchu drogowym [4, 5]. W ostatnich trzech dekadach uwagę badaczy zwróciły warunki ruchu pojazdów w zatorach drogowych, na tym polu swoje prace realizują współcześnie Treiber i Kerner [6, 7]. Formułowanie zasadnych modeli ruchu wymaga dobrego rozeznania wartości jego parametrów. Sprzyja temu wdrażanie w ostatnim półwieczu coraz skuteczniejszych metod pomiaru ruchu drogowego. Obecnie do popularnych technik pomiarowych należy zastosowanie: urządzeń pneumatycznych, sensorów piezoelektrycznych i pętli indukcyjnych [8]. Coraz popularniejsze stają się urządzenia pomiarowe wykorzystujące technikę radarową [9]. W ostatnich latach dominująca pozycję zaczynają przejmować w tym zakresie techniki wizyjne, które wydają się najbardziej uniwersalną metodą pomiaru parametrów ruchu drogowego [10]. Inne rozwiązania w tym zakresie oferują urządzenia do detekcji ruchu drogowego opierające się na pomiarze dźwięku w pasie drogowym [11].

Opisane wyżej techniki pomiarowe dotyczą pomiaru parametrów ruchu z zewnątrz strumienia. Taki pomiar jest już obecnie dostępny również z wykorzystaniem danych gromadzonych przez komputery pokładowe najnowocześniejszych pojazdów. W najbliższych dwóch dekadach w związku z rozwojem systemów ITS (ang. *intelligent transportation system*) w tym technologii V2V (ang. *vehicle to vehicle*) i V2I (ang. *vehicle to infrastructure*) parametryzacja ruchu drogowego będzie możliwa z wykorzystaniem danych pochodzących z wnętrza strumienia ruchu – z pojazdów [12-14].

Czujniki przyspieszeń i żyroskopy znajdują szerokie zastosowanie w badaniach pojazdów, ich ruchu oraz okoliczności, w jakich odbywa się ruch. Dotyczy to nie tylko pojazdów dro-

time as traffic volumes kept increasing and new phenomena were observed in road traffic, the theory of road traffic has been systematically updated [4, 5]. In the last three decades vehicular traffic conditions in traffic holdups attracted the attention of researchers. Currently, Treiber and Kerner [6, 7] conduct research in this field. In order to formulate valid traffic models one must accurately identify its parameters. In the last half century the implementation of increasingly more effective methods of measuring road traffic has been helpful in this respect. Currently the most popular measuring techniques use pneumatic devices, piezoelectric sensors and inductive loops [8]. Measuring devices using the radar technique become increasingly popular [9]. In recent years video techniques, which seem to be the most universal method of measuring road traffic parameters, have begun to gain a dominant position [10]. Other solutions in this field are offered by road traffic detection devices based on the measurement of sound in a roadway [11].

The above-mentioned techniques measure traffic parameters from the outside of the traffic flow. This kind of measurement now can also be performed using the data collected by the onboard computers of the most modern vehicles. In the nearest two decades, as intelligent transportation systems (ITS), including the vehicle to vehicle (V2V) technology and the vehicle to infrastructure (V2I) technology, develop, road traffic parameterization based on data coming from the inside of the traffic flow (from vehicles) will become possible [12-14].

Acceleration sensors and gyroscopes are widely used to study vehicles, vehicular traffic and the circumstances in which the traffic takes place. This applies not only to road vehicles, but also to railway vehicles. Currently major research is concerned with the use of measuring systems which enable the acquisition and recording of vehicular traffic parameters [15]. The vehicular impact outside the roadway is also examined using smartphone accelerometers and other devices [16-19]. In this case, the impact of vibrations originating from a traffic lane on buildings is studied. Moreover, research directly concerning road traffic measurements based on data derived from linear accelerations [20-22], but using a more advanced method than the one proposed in the present paper (also with the measuring instrumentation founded in the ground) [20, 23], is conducted. As demonstrated in the present paper, the

gowych, ale i kolejowych. Obecnie najczęściej spotykaną grupą prac badawczych jest zastosowanie układów pomiarowych umożliwiających zbieranie oraz zapis parametrów ruchu pojazdów [15]. Oddziaływanie pojazdów na zewnątrz pasa drogowego jest również badane z zastosowaniem popularnych smartfonów (akcelerometry układowe tych urządzeń) i innych urządzeń [16-19]. W tym wypadku badane jest oddziaływanie drgań pochodzących z pasa ruchu na budynki. Prowadzone są również prace badawcze bezpośrednio w odniesieniu do pomiarów ruchu drogowego na podstawie odczytu danych z przyspieszeń liniowych [20-22], w tym przypadku z użyciem bardziej zaawansowanej metody niż proponowana w tym artykule, również z posadowieniem aparatury badawczej w gruncie [20, 23]. Pomiar parametrów ruchu pojazdów na podstawie drgań nawierzchni jest interesującym rozwiązaniem zwłaszcza w przypadku braku konieczności zabudowy tego typu urządzeń pomiarowych w gruncie i przy zastosowaniu tanich, popularnych akcelerometrów, co pokazano w tym artykule.

Tego typu badania mogą mieć zastosowanie w aspekcie podejmowania zasadnych decyzji w zakresie inwestowania w elementy infrastruktury sieci drogowej. W tym podejściu pomiar drgań wiązany jest ze zużyciem drogi. Tego typu informacje mogą potencjalnie wpływać na plany inwestycyjne [24, 25]. Bezpośrednio z tym obszarem zastosowań może być powiązane identyfikowanie miejsc niebezpiecznych w obrębie sieci drogowej [26, 27].

3. APARATURA BADAWCZA

W celu realizacji założonego badania zbudowano układ pomiarowy na bazie popularnego 8-bitowego mikrokontrolera RISC (ang. *reduced instruction set computer*). W ramach tego układu zabudowano jeden czujnik ADXL335. Jest to trzyosiowy akcelerometr analogowy z zakresem pomiarowym $\pm 3g$. Zaletą tego konkretnego czujnika jest wyprowadzenie przyspieszeń liniowych w poszczególnych osiach na pojedyncze piny czujnika. Prototyp układu pomiarowego zaprezentowano na Rys. 2.

W badaniu wykorzystano prototyp wyposażony w zintegrowany w mikrokontrolerze ręczny rejestrator ruchu pojazdów (tzw. licznik pojazdów). Sterowanie rejestratorami licznika pojazdów odbywa się w zakresie podczerwieni z wykorzystaniem urządzenia popularnie określanego jako „pilot IR”. Osoba mierząca ruch odczytuje wzrokowo fakt przekraczania przez pojazdy przekroju pomiarowego i naciska przycisk na pilocie. Osoba rejestrująca ruch przyciska na pilocie przyciski odpowiadające typom pojazdów zdefiniowanych w strukturze rodzajowej. Liczone są równocześnie przejazdy pojazdów w obu kierunkach ruchu w celu identyfikacji wpływu tych kierunków ruchu na rejestrowane parametry. Inny widok modułu

measurement of vehicular traffic on the basis of road pavement vibrations is an interesting solution, particularly when the measuring devices need not to be installed in the ground and when inexpensive popular accelerometers can be used.

Research of this kind can provide a basis for taking informed decisions on investing in road network infrastructure elements. In this case, vibration measurements are correlated with road wear. Such information can have a bearing on investment plans [24, 25]. Moreover, the identification of danger points on the road network can be directly connected with this field of applications [26, 27].

3. MEASURING INSTRUMENTATION

For the purpose of this study a measuring system based on an 8-bit reduced instruction set computer (RISC) microcontroller was built. An ADXL335W sensor was incorporated into this system. The sensor is a triaxial analog accelerometer with a measuring range of $\pm 3g$. The advantage of this particular sensor is that the linear accelerations in the particular axes are led out to the sensor's individual pins. A prototype of the measuring system is shown in Fig. 2.

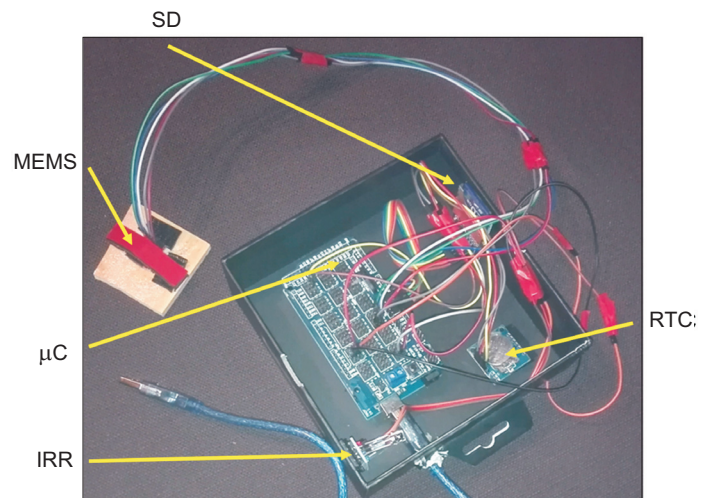


Fig. 2. Measuring system, modules (SD - secure digital card, RTC - real-time clock, IRR - infrared receiver, μC - microcontroller)
Rys. 2. Układ pomiarowy, moduły (SD - karta pamięci, RTC - zegar podstawy czasu, IRR - odbiornik podczerwieni, μC - mikrokontroler)

The prototype system used in the investigations was equipped with a manual vehicular traffic recorder (the so-called vehicle counter) integrated into the microcontroller. The vehicle counter's registers are infrared controlled using an IR remote control. The person measuring traffic reads off the fact of vehicles entering the measurement cross-section and presses a button on the remote control.

prototypu przedstawiono na Rys. 3. Na tym rysunku oznaczono pozostałe elementy układu pomiarowego.

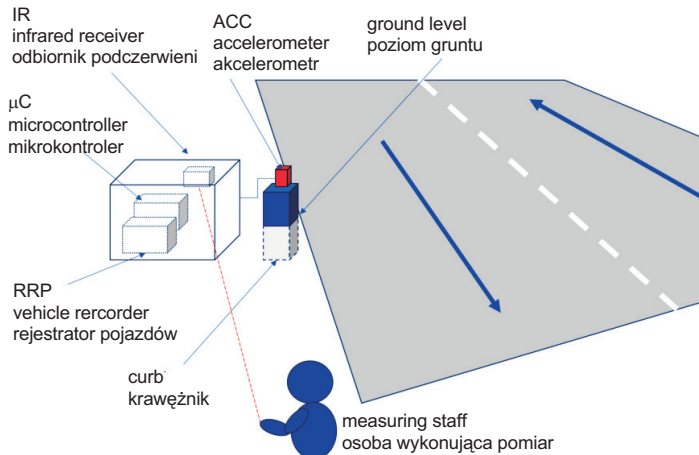


Fig. 3. Measurement diagram
Rys. 3. Schemat pomiarowy

Zintegrowanie rejestratora pojazdów (licznika pojazdów) z modułem pomiarowym znacząco podnosi efektywność pomiaru, pozwalając uniknąć problemu synchronizacji danych z różnych modułów projektu. Wszystkie moduły pracują w oparciu o wspólną podstawę czasu, pobieraną z zegara zestawu komputerowego podłączonego do układu (w tym wypadku laptopa). W wersji prototypowej korzystano również z zegara typu DCF77 (sygnał radiowy czasu) o podobnych parametrach. W odróżnieniu od innych tego typu badań, odczyt nie następuje z urządzeń posadowionych głęboko w gruncie i z zastosowaniem zaawansowanej aparatury badawczej, ale bezpośrednio z powierzchni jezdni. Zastosowano w tym celu autorski układ rezonatora przenoszącego na akcelerometr drgania nawierzchni.

4. METODA BADANIA

Badanie przeprowadzono na odcinku drogi powiatowej nr S5308 zlokalizowanym w województwie śląskim. Schemat układu pomiarowego na tle przekroju zilustrowano na Rys. 3.

W trakcie pomiaru osoba rejestrująca ruch z wykorzystaniem ręcznego licznika pojazdów, obserwująca przekrój z miejsca znacznie oddalonego od układu rejestrującego drgania, zlicza grupy pojazdów: SO (osobowych), SDO (dostawczych), SC (ciężarowych), SCP (ciężarowych z przyczepami), A (autobusów), AP (autobusów przegubowych), M/R (motocykli i rowerów) i inne (każdej odpowiada osobny przycisk na pilocie rejestratora). Układ rejestrujący zlokalizowany jest w miejscu, które minimalizuje drgania od innych obiektów niż pojazdy poruszające się w przekroju pomiarowym. Ręczna rejestracja

The person recording the traffic presses remote control buttons corresponding to the types of vehicles defined in the breakdown of traffic by vehicle type. Vehicle passages in both traffic directions are counted simultaneously to identify the effect of the traffic directions on the recorded parameters. Another view of the prototype module is shown in Fig. 3. The other measuring system components are marked in this figure.

Thanks to the integration of the vehicle recorder (counter) with the measuring module measurement efficiency significantly improves and data synchronization between the different project modules is avoided. All the modules operate on a common time base derived from the clock of the computer (laptop) connected to the measuring system. In the prototype version also a (radio time signal) DCF77 clock with similar parameters was used. Unlike in other such investigations, readings are not taken from devices founded deep in the ground, using advanced instrumentation, but directly from the roadway surface. For this purpose an in-house developed resonator system transferring road pavement vibrations onto an accelerometer was used.

4. METHOD OF INVESTIGATION

The investigation was carried out on a section of sub-regional road no. S5308, located in the Silesian Voivodeship. A diagram of the measuring system against the background of the measurement cross-section is shown in Fig. 3.

During the measurement the person recording the traffic by means of the manual vehicle counter, observing the measurement cross-section from a spot located at a considerable distance from the vibration registering system, counts the following groups of vehicles: PV (passenger vehicles), delivery vans (DV), lorries (L), heavy vehicles with a trailer (HVT), buses (B), accordion buses (AB), motorcycles and bicycles (M/B) and other (for each of the groups there is a separate button on the recorder's remote control). The recording system is located in a place which minimizes vibrations from other objects than the vehicles moving in the measurement cross-section. The manual recording of vehicles passing through the measurement cross-section is conducted in both traffic directions simultaneously using the traffic direction selection button on the remote control. Data from the remote control to the measuring system are transmitted using the NEC infrared transmission protocol. Vehicles N are recorded in the measuring system's memory via the infrared receiver (IR) with a time accuracy dependent on the instant at which the remote control button representing a given vehicle type group is pressed:

pojazdów przekraczających przekrój pomiarowy odbywa się w obu kierunkach ruchu jednocześnie, z wykorzystaniem na pilocie klawisza wyboru kierunku ruchu. Transmisja danych od pilota do układu pomiarowego realizowana jest w standardzie NEC (ang. *NEC Infrared Transmission Protocol*). W układzie pomiarowym za pośrednictwem odbiornika podczerwieni (IR) rejestrowane są w pamięci pojazdy N z dokładnością czasu zależną od chwili naciśnięcia klawisza pilota reprezentującego daną grupę rodzajową:

$$N = \{k, T, t \pm t_r\}, \quad (1)$$

gdzie:

- k – kierunek ruchu,
- T – grupa rodzajowa pojazdu,
- t – czas rejestracji,
- t_r – czas reakcji osoby rejestrującej pomiar ręcznie.

Na podstawie badań populacyjnych czasu reakcji można przyjąć, że moment przekroczenia przekroju pomiarowego przez poszczególne pojazdy zapisywany jest z dokładnością $\pm 0,5$ s. W ten sposób tworzony jest obraz rzeczywistego strumienia ruchu w przekroju pomiarowym, z oznaczeniem typu poszczególnych pojazdów wg struktury rodzajowej. Z wykorzystaniem tej samej podstawy czasu rejestrowane są drgania w przekroju pomiarowym pochodzące od przejeżdżających pojazdów. Drgania mogą pochodzić od m.in.:

- dowolnych pojazdów ruchomych na drodze, jak również stojących w pasie drogowym z uruchomionym silnikiem,
- pieszych uczestników ruchu (osoba mierząca stoi w znacznej odległości), pieszych brak,
- robót drogowych/budowlanych,
- tramwaju (jeśli w pobliżu przebiega trasa),
- metra (jw.).

W przedmiotowym badaniu akcelerometr ADXL335 umieszczono na krawężniku drogi, traktując go jako element układu rezonatora drgań. W odróżnieniu od nawierzchni drogi krawężnik jest obiektem posadowionym pionowo i może lepiej przenosić drgania w tej płaszczyźnie (zależy to od konstrukcji jezdnii i drogi, zastosowanych materiałów i sposobu posadowienia tego elementu, jak również od lokalnych stosunków wodno-gruntowych). Lepszym obiektem dla celów odwzorowania drgań z uwagi na odległość bodźca od urządzenia pomiarowego jest sama jezdnia lub pokrywa studzienki kanalizacyjnej (studzienek nie było jednak w przekroju pomiarowym).

W celu realizacji przedmiotowych badań można tymczasowo lokalizować w danym przekroju również listwę pomiarową zbudowaną na bazie dowolnego płaskownika w kształcie elastycznego proggu (podobnie jak w licznikach pneumatycz-

$$N = \{k, T, t \pm t_r\}, \quad (1)$$

where:

- k – a traffic direction,
- T – a vehicle type group,
- t – the time of recording,
- t_r – the reaction time of the person manually recording the measurement.

On the basis of population studies of reaction time one can assume that the instant at which individual vehicles enter the measurement cross-section is recorded with an accuracy of ± 0.5 sec. In this way a picture of the actual traffic flow in the measurement cross-section, with types of the particular vehicles indicated in accordance with the breakdown of traffic by vehicle types, is created. Using the same time base the vibrations originating from vehicles passing through the measurement cross-section are recorded. The vibrations can originate from (among other things):

- any vehicles moving on the road and vehicles standing on the roadway with their motor running,
- pedestrian road users (the measuring person stands at a considerable distance),
- roadworks/construction work,
- a tram (if there is a tramline nearby),
- the underground (as above).

In the particular investigations the ADXL335 accelerometer was placed on the road's kerb which was treated as an element of the vibration resonator system. Unlike the road pavement, the kerb is a vertically founded object and it can better transmit vibrations in this plane (this depends on the carriageway and road structure, the materials used and the way of founding this element, as well as on the local soil-water system). A better object for vibration mapping, considering the distance between the stimulus and the measuring device, is the roadway itself or a manhole cover (however, there were no manholes in the measurement cross-section).

Temporarily one can use for this purpose a flexible transverse strip (similar to the one used in pneumatic counters) made of a flat bar. The orientation of the acceleration sensor relative to the road, with marked axes along which the particular linear accelerations are recorded, is shown in Fig. 4.

When driving through the measurement cross-section vehicles generate vibrations in the road pavement and foundation. The vibrations can be registered by the proposed

nych). Orientacja czujnika przyspieszeń w stosunku do drogi wraz z oznaczeniem osi, w których rejestrowane są poszczególne przyspieszenia liniowe, została przedstawiona na Rys. 4.

Przejeżdżając przez przekrój pomiarowy, pojazdy generują drgania powierzchni jezdni i podbudowy drogi, które mogą być rejestrowane w prezentowanym układzie pomiarowym. W zależności od sztywności podbudowy i typu nawierzchni drgania te zanikają w miarę wzrostu odległości od osi pasa ruchu. Czujnik należy umieścić możliwie jak najbliżej przekroju pomiarowego dla pasa ruchu, na którym ruch jest mierzony. Pozyskanie danych pomiarowych z licznika ręcznego na temat rzeczywistego natężenia strumienia ruchu (w tym struktury rodzajowej) pozwala te dane skorelować ze zmierzonymi drganiami jezdni.

5. WYNIKI BADAŃ

Poniżej przedstawiono dane dotyczące natężenia ruchu drogowego zarejestrowanego w obu kierunkach przemieszczania pojazdów (z dokładnością do jednej sekundy). W trakcie pomiaru nie stwierdzono silnych opadów, a stan jezdni w przekroju pomiarowym był idealny. W tym pomiarze błąd średni oscyluje wokół średniego czasu reakcji osoby zliczającej pojazdy, który można przyjąć jako $\pm 0,5$ s.

W prezentowanych na Rys. 5 i 6 próbkach natężenia strumienia ruchu (kierunki: lewo i prawo) zanotowano jeden autobus i trzy pojazdy dostawcze. Pojazdy typu innego niż SO i SDO maskowane są z wartością na osi rzędnych większą niż 1. Pozostałe pojazdy stanowią samochody osobowe – wartość na osi rzędnych dla tych pojazdów wynosi 1. W przedmiotowym badaniu chodzi przede wszystkim o możliwość powiązania obserwowanych wartości drgań nawierzchni (przyspieszeń liniowych w poszczególnych osiach) nie tylko z faktem przejeżdżania przez przekrój drogi pojazdu, ale również, w miarę możliwości, z jego typem. Drganie otrzymane w rejestratorze przyspieszeń liniowych powinno uwzględniać przedstawione we wzorze (2) parametry wpływające na rejestrowane drgania:

$$acc = \{C, n, v, q_s, pc, pt, rt, t, wa, (C), (S), \beta, \}, \quad (2)$$

gdzie:

- C – ciężar właściwy pojazdu,
- n – liczba osi,
- v – prędkość ruchu, ew. przyspieszenie,
- q_s – parametr określający sprawność zawieszenia,
- pc – stan nawierzchni,
- pt – typ nawierzchni,
- rt – rodzaj drogi,
- t – czas,

measuring system. Depending on the type of road pavement and foundation, the vibrations fade away as the distance from the traffic lane increases. The sensor should be placed as close as possible to the measurement cross-section's traffic lane on which traffic is measured. Thanks to the acquisition of measurement data on the actual traffic flow (including the traffic composition) by means of the manual counter the data can be correlated with the measured vibrations of the carriageway.

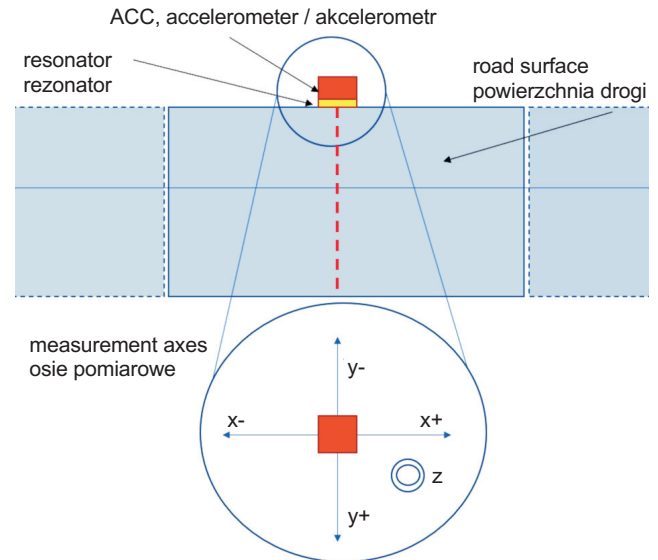


Fig. 4. Orientation of motion sensor in relation to road axis
Rys. 4. Orientacja czujnika ruchu w stosunku do osi drogi

5. RESULTS OF INVESTIGATION

The data on the traffic flow recorded in both directions (with an accuracy of up to 1 sec.) are presented below. No heavy precipitation occurred during the measurement and the carriageway condition in the measurement cross-section was ideal. The mean error in this measurement fluctuates around the average reaction time of the person counting vehicles, which can be assumed to amount to ± 0.5 s.

One bus and three delivery vans were noted in the traffic flow samples (in directions: left and right) presented in Figs 5 and 6. Vehicles of type other than PV and DV are masked upwards of the value of 1 on the y -axis. The other vehicles are passenger vehicles – the y -axis value for these vehicles amounts to 1. The principal aim of this investigation is to link the observed values of pavement vibrations (linear accelerations along the particular axes) not only with the fact of vehicle passing through the measurement cross-section, but also possibly with the type of vehicle. The vibration acquired by the linear accelerometer should

- wa – warunki atmosferyczne,
 (C) – zbiór innych pojazdów oddziałujących na przekrój drogi,
 (S) – losowe zdarzenia generujące drgania niezwiązane z ruchem pojazdów,
 β – szum w układzie (rodzaj stosowanych podzespołów elektronicznych).

Wzór (2) można przedstawić dla poszczególnych osi pomiarowych akcelrometru z uwzględnieniem specyficznych parametrów silniej oddziałujących w poszczególnych osiach pomiarowych.

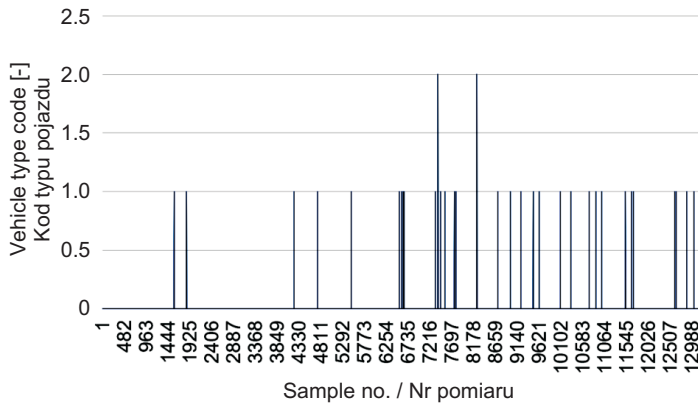


Fig. 5. Traffic flow, left direction

Rys. 5. Natężenie ruchu, kierunek przejazdu – w lewo

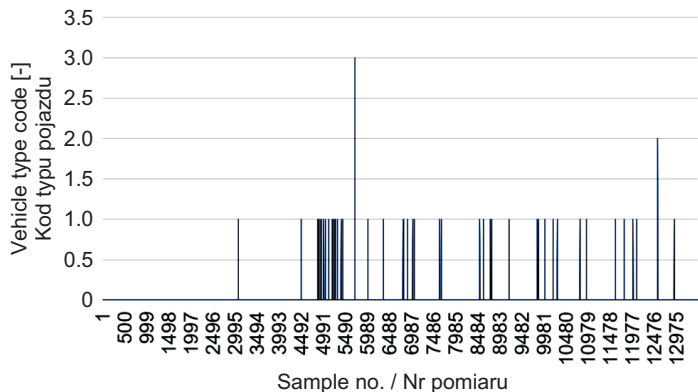


Fig. 6. Traffic flow, right direction

Rys. 6. Natężenie ruchu, kierunek przejazdu – w prawo

Na Rys. 7 zaprezentowano drgania zmierzone w przekroju pomiarowym generowane na skutek ruchu zarejestrowanych na Rys. 5 i 6 pojazdów. Drgania rejestrowane są w zakresie $3g$ (g to przyspieszenie ziemskie) w skali od 0 do 1024 (liczby od 0 do 210 reprezentują poziomy napięcia na wyjściach układu ADLX335). Większość zarejestrowanych obserwacji mieściła się w zakresie od 390 do 520 [-].

take into account the parameters having a bearing on the registered vibration, shown in the formula:

$$acc = \{C, n, v, q_s, pc, pt, rt, t, wa, (C), (S), \beta, \}, \quad (2)$$

where:

- C – the specific weight of the vehicle,
 n – the number of axles,
 v – the motion velocity/acceleration,
 q_s – a parameter specifying the efficiency of the suspension,
 pc – the condition of the surface,
 pt – the type of road surface,
 rt – the kind of road,
 t – time,
 wa – the weather conditions,
 (C) – the set of other vehicles impacting the road's cross-section,
 (S) – random events generating vibrations unconnected with vehicular traffic,
 β – noise in the system (the kind of electronic components used).

Formula (2) can be presented for the individual measurement axes of the accelerometer, taking into account the parameters whose effect is stronger for the particular axes.

Fig. 7 shows the vibrations induced in the measurement cross-section by the motion of the vehicles recorded in Figs 5 and 6. The vibrations were registered in the range of $3g$ (g – gravitational acceleration) on the scale of 0 to 1024 (the numbers from 0 to 210 represent the voltage levels at the ADLX335 circuit outputs). Most of the recorded observations fell within the range of 390-520 [-].

An analysis of the diagrams shown in Figs 7 and 8 indicates that the distribution of vibrations over the observation time is not uniform along any of the axes. The vibrations along each of the axes change by 5 measurement units (the scale of 0 to 1024). The question arises: to what extent are these vibrations connected with the measuring system's properties (noise – signals undesirable in electronic circuits, disturbing the useful signal) and to what extent are they connected with the vehicles recorded in the measurement cross-section? If the vibrations are correlated with the vehicles driving through the measurement cross-section (successive vehicles – successive vibrations in the particular samples), then it is possible to parametrize the traffic flow on the basis of these data.

Analiza wykresów z Rys. 7 i 8 pozwala stwierdzić, że rozkład drgań w czasie obserwacji nie jest jednorodny w żadnej z osi. Drgania zmieniają się w każdej z osi o 5 jednostek pomiarowych (skala od 0 do 1024). Nasuwa się natomiast pytanie, na ile są to drgania związane z właściwościami układu pomiarowego (szum, jako sygnały niepożądane w układach elektronicznych, zakłócające sygnały użyteczne), na ile zaś z rejestrowanymi w przekroju pomiarowym pojazdami. Jeśli drgania te są skorelowane z pojazdami przejeżdżającymi w przekroju drogi (kolejne pojazdy – kolejne drgania w poszczególnych próbkach) to istnieje możliwość parametryzacji strumienia ruchu z wykorzystaniem tych danych.

Na Rys. 9 przedstawiono w powiększeniu nałożone na siebie wykresy drgań nawierzchni drogi i próbki z rejestratora pojazdów, w których pojazdy przejeżdżały przez przekrój drogi (kolory pionowych linii odniesienia reprezentują różne typy pojazdów). Korelacja drgań generowanych przez pojazd z chwilą mijania przekroju pomiarowego jest natychmiast widoczna dla pojazdów innych niż osobowe (są to znacznie wyższe amplitudy niż dla pojazdów osobowych). Taki przypadek demonstruje druga żółta linia pionowa na Rys. 9, licząc od lewej jego strony. Nieznaczące przesunięcie wynika z czasu reakcji osoby obsługującej licznik pomiarowy. Linia ta reprezentuje przejazd autobusu przez przekrój pomiarowy. Widać wyraźnie generację silnych drgań i ich dalszą propagację oraz zanik amplitudy po przejeździe autobusu (wymuszenie > 8 ton). Drgania te wraz z zanikiem amplitudy przedstawiono w powiększeniu na Rys. 10. Nasuwa się oczywisty wniosek, że można przedmiotową technikę stosować do detekcji pojazdów ciężkich. Do zbadania pozostaje zatem kwestia, czy można również odczytywać z tych danych przejazdy pojazdów lekkich.

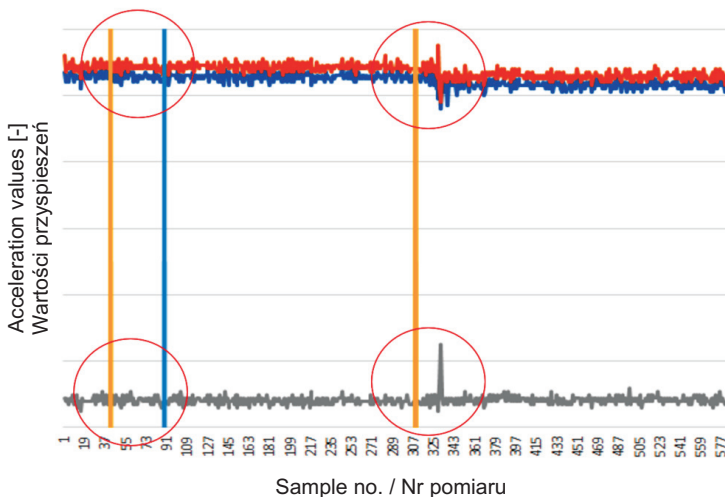


Fig. 9. Data correlation for selected time interval (range of samples)
Rys. 9. Korelacja danych dla wybranego przedziału czasu (zakresu próbek)

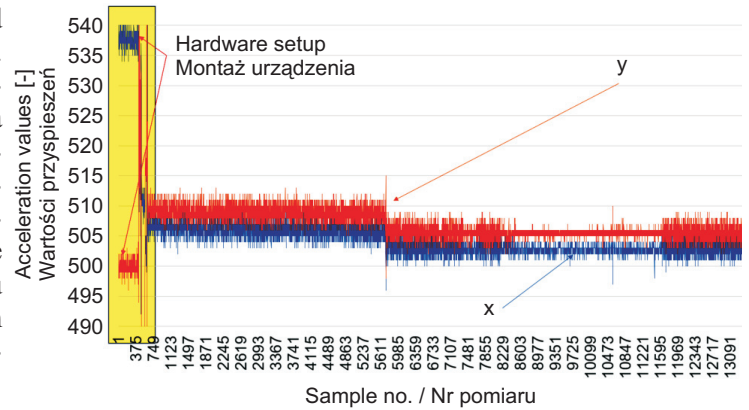


Fig. 7. Vibrations registered in road cross-section, x and y axis
Rys. 7. Zarejestrowane w przekroju drogi drgania, oś x i y

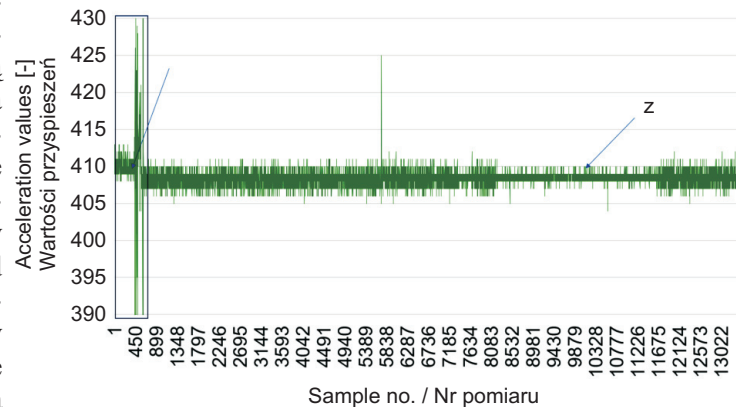


Fig. 8. Vibrations registered in road cross-section, z axis
Rys. 8. Zarejestrowane w przekroju drogi drgania, oś z

Fig. 9 shows a close-up of superimposed on each other road pavement vibration and vehicle recorder sample diagrams for vehicles passing through the measurement cross-section (the colours of the vertical reference lines represent different vehicle types). A correlation with vehicle-induced vibrations is immediately apparent when a vehicle other than a passenger vehicle passes through the measurement cross-section (the amplitude is then much higher than for a passenger vehicle). The second (from the left) yellow vertical line in Fig. 9 represents such a case. The slight shift is due to the reaction time of the person operating the measuring counter. This line represents the passage of a bus through the measurement cross-section. Strong vibration generation and propagation and an amplitude fade-out after the passage of the bus (the excitation > 8 tons) are clearly visible. A close-up of the vibrations together with the amplitude fade-out is shown in Fig. 10. The obvious conclusion is that this technique can be used to detect heavy vehicles. It remains to be tested whether passages of light vehicles can be read from the data.

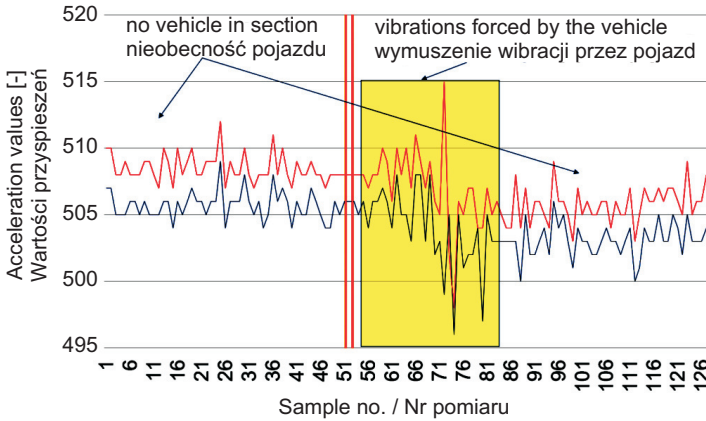


Fig. 10. Data correlation for bus passing through measurement cross-section, axes: x, y
Rys. 10. Korelacja danych dla przejazdu autobusu przez przekrój pomiarowy, osie: x, y

W przypadku braku obecności pojazdu w przekroju pomiarowym drogi w układzie rejestrowany jest pewien poziom szumu w postaci nieznacznych wahań przyspieszeń liniowych w poszczególnych osiach (wynika m. in. ze stosowanych w stabilizacji układu pomiarowego podzespołów elektronicznych oraz, w mniejszym zakresie, naturalnych ruchów gruntu). Zjawisko to można wyeliminować lub zmniejszyć przez zastosowanie układu lepszego jakościowo mikrokontrolera (lepsza stabilizacja napięciowa) lub odpowiednią filtrację szumu.

Wymuszenie pochodzące od autobusu obejmuje około 16 kolejnych pomiarów, co odpowiada około 1 s pomiaru. Problem w tym, że prezentowane na Rys. 10 i 11 zdarzenie dotyczy przejazdu przez przekrój pomiarowy drogi pojazdu o masie przekraczającej 8 ton. Na sieci drogowej występują również autobusy i pojazdy ciężarowe o masie znacznie przekraczającej 8 ton (nawet do 18 ton w przypadku autobusów). W związku z tym nasuwa się pytanie, jak identyfikować w opisany powyżej sposób pojazdy, których masa oscyluje w okolicach jednej-dwóch ton (a więc jest cztero-pięciokrotnie mniejsza). Na Rys. 10 i 11 widać ponadto, że wymuszenie w osi z przebiega w inny sposób i jest większe niż w pozostałych osiach (wartości międzyszczytowe). Mimo że w tej osi wymuszenie jest znacznie większe niż w pozostałych, równocześnie zanika ono znacznie szybciej. W osi pionowej to wymuszenie jest nie tylko dwukrotnie silniejsze, ale również odznacza się istotną asymetrią. Te różnice pozwalają badać ruch pojazdów ciężkich w przekroju pomiarowym.

W trakcie pomiaru wykonywanego bez obecności pojazdów w przekroju obserwowana jest pewna stała dla średniej wartości przyspieszeń liniowych:

$$\overline{acc} = const = \sum (acc_x + acc_y + acc_z) / 3, \quad (3)$$

When no vehicle is present in the road measurement cross-section, a certain level of noise in the form of slight linear accelerations along the individual axes (due to, i.a., the use of electronic components for measuring system stabilization and to less extent, to natural movements of the ground) is registered in the system. This phenomenon can be eliminated or reduced through the use of a higher quality microcontroller circuit (better voltage stabilization) or appropriate noise filtration.

The excitation originating from the bus covers about 16 consecutive measurements, which corresponds to about 1 sec. of measurement. The problem is that the event presented in Figs 10 and 11 concerns a vehicle heavier than 8 tons passing through the measurement cross-section. On the road network there also occur buses and heavy commercial vehicles whose weight considerably exceeds 8 tons (reaching 18 tons in the case of buses). Therefore the questions arises: how to identify (in the way described above) vehicles whose weight amounts to about 1-2 tons (and so it is 4-5 times lighter). Figs 10 and 11 also show that the excitation along the z-axis has a different shape and is considerably greater than along the other axes, but it fades much quicker. Along the vertical axis this excitation is not only twice as strong, but is characterized by a significant asymmetry. Thanks to these differences it is possible to investigate heavy vehicles traffic in the measurement cross-section.

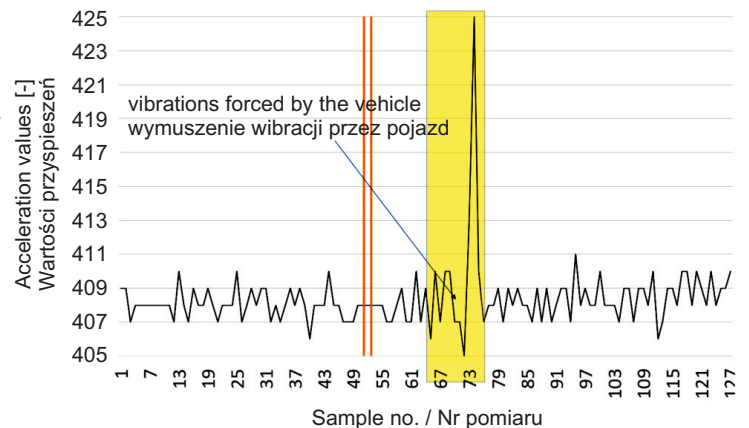


Fig. 11. Data correlation for bus passing through measurement cross-section, z axis
Rys. 11. Korelacja danych dla przejazdu autobusu przez przekrój pomiarowy, oś z

During the measurement performed with no vehicles present in the cross-section a certain constant is observed for the mean linear acceleration value:

$$\overline{acc} = const = \sum (acc_x + acc_y + acc_z) / 3, \quad (3)$$

gdzie:

acc_i – średnie przyspieszenie w poszczególnych i -tych osiach akcelerometru.

Pojawienie się w przekroju pomiarowym pojazdu powoduje wygenerowanie impulsu istotnie zwiększającego średnie wartości amplitud przyspieszeń liniowych (Rys. 8, żółty prostokąt), przy czym w przedziale odpowiadającym wymuszeniu występuje silna zmienność wartości przyspieszeń liniowych w poszczególnych osiach:

$$\Delta acc = |\overline{acc}_{const} - \overline{acc}_{var}|, \quad (4)$$

gdzie:

acc – średnie przyspieszenie w poszczególnych osiach,

\overline{acc}_{const} – średnie przyspieszenia bez wymuszenia,

\overline{acc}_{var} – średnie przyspieszenia przy wymuszeniu.

W celu stwierdzenia przejazdu pojazdu przez przekrój pomiarowy należy zbadać wartość wyrażoną równaniem (4) jako średni przyrost przyspieszeń liniowych w poszczególnych osiach w czasie (oś z może charakteryzować się ewentualnie większą wagą). Wartości przekraczające określony poziom implikują identyfikację przejazdu pojazdu przez przekrój pomiarowy drogi:

$$b < \Delta acc \rightarrow CI, \quad (5)$$

gdzie:

b – stała ograniczająca poziom tolerancji dla szumu,

CI – zdarzenie identyfikacji pojazdu.

Odpowiednie analizy dla pojazdu osobowego przedstawiono poniżej.

Rys. 12 prezentuje przejazd dwóch pojazdów osobowych w przekroju pomiarowym. Tym razem nie odnotowano znacznej zmiany amplitudy przyspieszeń liniowych, aczkolwiek w pewnym stopniu jest ona obserwowana (3-4 krotnie mniejsza niż w przypadku przejazdu autobusu). Widoczna jest natomiast pewna zmiana częstotliwości drgań. Z rysunku tego wynika pewien niedostatek metody, w której koreluje się pomiar wykonany z wykorzystaniem akcelerometru mierzącego przyspieszenia z określoną dokładnością w interwale zbliżonym do 50 ms (20 impulsów na sekundę) z pomiarem ręcznym natężenia ruchu, którego dokładność ograniczona jest czasem reakcji osoby rejestrującej pomiar, przy błędzie pomiarowym mogącym wynosić od 0,25 s do nawet 0,9 s i więcej. Z tego powodu obszary zaznaczone na Rys. 12 jako skorelowane z przejazdem pojazdu mogą być korygowane o kilka/kilkanaście próbek do przodu lub do tyłu. Przejazd pojazdu osobowego znajduje odzwierciedlenie w:

– zmianie amplitudy przyspieszeń (nieznaczna),

where:

acc_i – the mean acceleration along the particular i -th axes of the accelerometer.

When a vehicle appears in the measurement cross section, a pulse is generated which significantly increases the mean values of linear accelerations amplitudes (Fig. 8, the yellow rectangle), and a strong variation in linear acceleration values along the particular axes occurs in the interval corresponding to the excitation.

$$\Delta acc = |\overline{acc}_{const} - \overline{acc}_{var}|, \quad (4)$$

where:

acc – the mean acceleration along the particular axes,

\overline{acc}_{const} – the mean accelerations without excitation,

\overline{acc}_{var} – the mean accelerations at excitation.

In order to ascertain a vehicle passage through the measurement cross-section one should test the value expressed by eq. (4), as a mean increment in linear accelerations along the particular axes over time (the z -axis may be characterized by a greater weight). The values exceeding the specified level imply identifications of a vehicle passage through the measurement cross-section:

$$b < \Delta acc \rightarrow CI, \quad (5)$$

where:

b – a constant limiting the noise tolerance level,

CI – a vehicle identification event.

Relevant analyses for a passenger vehicle are presented below.

Fig. 12 shows the passage of two passenger vehicles through the measurement cross-section. This time no significant change in the amplitude of the linear accelerations was registered, albeit to a certain degree it is still observed (3-4 times lower than for the bus passage). However, a certain change in vibration frequency is visible. The figure indicates a certain deficiency of the method in which a measurement taken using an accelerometer measuring accelerations with a specified accuracy within an interval of nearly 50 ms (20 pulses per second) is correlated with a manual traffic flow measurement the accuracy of which is limited by the reaction time of the person recording the measurement with a measurement error which can range from 0.25 second to as much as 0.9 second and more. For this reason, the areas marked in Fig. 12 as correlated with a vehicle passage can be corrected by a few/10-20 samples forwards or backwards. A passenger vehicle passage is reflected in:

– a (slight) change in acceleration amplitude,

– zmianie częstotliwości drgań rezonatora.

Na Rys. 13 zaprezentowano te same charakterystyki dla przyspieszenia liniowego zarejestrowanego na osi z.

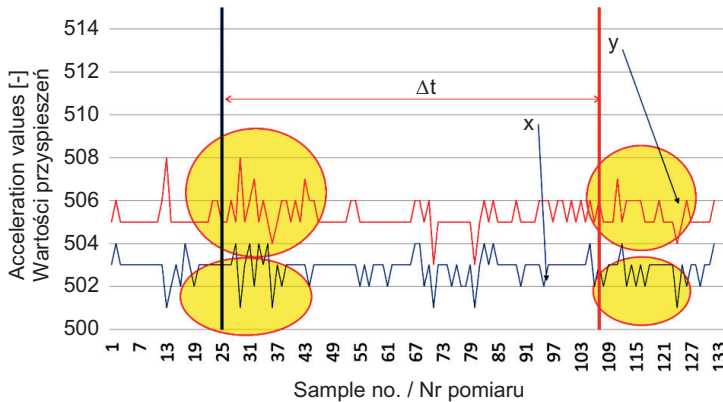


Fig. 12. Passage of passenger vehicle, characteristics of resonator linear acceleration, axes: x, y

Rys. 12. Przejazd pojazdu osobowego, charakterystyki przyspieszeń liniowych rezonatora, osie: x, y

Przejazd pojazdu osobowego na osi z może być obserwowany co najwyżej na podstawie zmiany częstotliwości. Te zmiany zaznaczono owalami na Rys. 13 – należy mieć na uwadze, że dane z licznika ręcznego pojazdów mogą być przesunięte o $\pm 0,5$ s. Przedstawiona metodyka pomiarowa umożliwia odczytywanie parametrów strumienia ruchu takich jak natężenie ruchu. Ewentualne zastosowanie układu dwóch czujników spiętych w sieci typu mesh (ang. mesh topology) umożliwiłoby również odczytywanie innych parametrów ruchu, np. prędkości pojazdów.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Artykuł prezentuje metodykę pomiaru natężenia strumienia ruchu z wykorzystaniem akcelerometrów. Zademonstrowano wybrane obszary badań pilotażowych w celu pokazania możliwości identyfikacji pojazdów i ich typu w przekrojach pomiarowych. Wskazano na istniejące w tym zakresie ograniczenia.

Na podstawie zrealizowanych badań można sformułować następujące wnioski:

- obecność pojazdu w przekroju pomiarowym można obserwować z wykorzystaniem nieskomplikowanych i tanich akcelerometrów,
- obecność pojazdu można obserwować poprzez zmiany amplitudy i częstotliwości rejestrowanych przyspieszeń liniowych,
- zmiany te są różne dla różnych typów pojazdów.

W artykule wskazano kolejne pola badawcze, których analiza przyczyni się do rozwoju metody. Rozwiązania wymagają następującej kwestii:

– a change in resonator vibration frequency.

Fig. 13 shows the same characteristics for a linear acceleration registered along axis z.

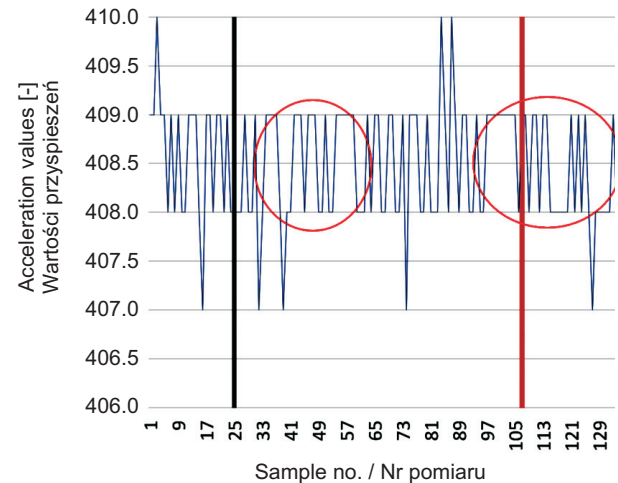


Fig. 13. Passage of passenger vehicle, characteristics of linear accelerations of resonator on kerb, z axis

Rys. 13. Przejazd pojazdu osobowego, charakterystyki przyspieszeń liniowych rezonatora na krawężniku, oś z

Along axis z a passenger vehicle passage can be observed solely on the basis of changes in frequency. In Fig. 13 the changes are marked with ovals (one should bear in mind that the data obtained from the manual vehicle counter can be shifted by ± 0.5 s). Using the proposed methodology one can read traffic flow parameters such as traffic volume. The use of a system of two sensors hooked up in a mesh topology network would make it possible to read other traffic parameters, e.g. vehicle speed.

6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

This paper presents a methodology for measuring traffic flow volumes by means of accelerometers. Selected aspects of the pilot study have been demonstrated in order to show the potential for identifying vehicles and their types in measurement cross-sections. The limitations in this regard have been indicated.

On the basis of this study one can formulate the following conclusions:

- the presence of a vehicle in the measurement cross-section can be observed using uncomplicated and inexpensive accelerometers,
- the presence of a vehicle can be observed through changes in the amplitude and frequency of the linear accelerations being registered,
- the changes are different for different vehicle types.

- sposób dokładnej identyfikacji typu pojazdu (amplituda vs. częstotliwość przyspieszeń liniowych),
- sposób izolowania nakładających się sygnałów od pojazdów jadących w tym samym i przeciwnym kierunku ruchu, zwłaszcza w warunkach kongestii ruchu,
- dobór przekrojów pomiarowych (alternatywnie można montować takie układy na wysokości progów ograniczających prędkość ruchu).

Ponadto w odniesieniu do zrealizowanych badań autorzy dokonali kilku interesujących spostrzeżeń:

- można konstruować progi zwalniające, które zwiększą amplitudę wymuszeń generowanych przez pojazdy, czujnik montowany jest wtedy bezpośrednio za progiem, zwiększającym amplitudę,
- można z wykorzystaniem tego typu badania szacować obciążanie jezdni, być może również naciski na oś,
- można badać w ten sposób stan nawierzchni, zakładając, że jego pogorszenie zwiększa wymuszania w układzie pomiarowym,
- w osiach x , y jak i z dla pojazdów ciężkich rejestrowane są znaczne wymuszenia w przypadku przejazdu przez przekrój takich pojazdów. Być może istnieje możliwość pomiaru rodzaju nie tylko typu pojazdu, ale i jego wagi. Technicznie rzecz biorąc, czujnik można zamontować bezpośrednio w osi pasa ruchu, zwiększając dokładność pomiaru. Nie jest wykluczone, że informacja o wadze pojazdu ma również odzwierciedlenie w obserwowanych zmianach częstotliwości rezonansowej. Gdyby tak było, to przy bardzo małych nakładach finansowych uzyskano by możliwość monitoringu całej sieci drogowej w zakresie dopuszczalnych ciężarów całkowitych pojazdów.

Autorzy planują wykorzystanie w przedmiotowym badaniu głowicy sejsmicznej posadowionej w gruncie w przekroju pomiarowym. Pozwoli to zbadać, na ile generowane przez pojazdy wymuszenia propagują w głąb podbudowy drogi. Dodatkowo zastosowane zostaną zaawansowane czujniki drgań o dużej czułości i paśmie przenoszenia, a także w pełni synchroniczny układ rejestracji sygnałów drganiowych i rejestracji poruszających się pojazdów z układem klasyfikacji rodzajowej pojazdów.

Zaletą prezentowanego rozwiązania jest przede wszystkim prostota i cena. Układ jest nieskomplikowany i złożony z kilku podstawowych modułów w cenie finalnej ok. 100-130 PLN, bez wliczania w tę kwotę układu transmisji radiowej (np. LoRa, WiFi, BT, RF433/868/2400 MHz). Należy zauważyć, że z uwagi na parametry strumienia ruchu czujniki tego typu będą musiały pracować w układzie szeregowym, co wymusi ponoszenie dalszych kosztów na realizację toru komunikacyjnego. Do rozpoznania pozostaje również sposób szacowania

This paper has indicated further research fields the analysis of which will contribute to the development of the method. The following issues need to be solved:

- how to more accurately identify the type of vehicle (amplitude vs. linear acceleration frequency),
- how to isolate the superimposing on one another signals from vehicles driving in the same direction and in the opposite direction, especially in traffic congestion conditions,
- the choice of measurement cross-sections (alternatively such systems can be mounted at speed humps).

Moreover, the authors have made several interesting observations concerning the investigations:

- speed humps increasing the amplitude of the excitations generated by vehicles can be constructed; the sensor would be then installed immediately after the amplitude increasing hump,
- using this kind of investigations one can estimate the carriageway load, perhaps also the axle loads,
- in this way one can investigate the road pavement condition, assuming that its deterioration increases excitations in the measuring system,
- along axes x , y and z considerable excitations are registered for heavy vehicles when such vehicles pass through the measurement cross-section. Maybe not only the type of a vehicle, but also its weight could be measured. Technically, the sensor can be installed directly on the traffic lane axis to increase measurement accuracy. One cannot rule out that the information about vehicle weight is also reflected in the observed changes in resonance frequency. If this were the case, then at very small expenditures the whole road network could be monitored with regard to the maximum authorized total vehicle weights.

In further investigations the authors plan to use a seismic probe founded in the ground in the measurement cross-section. Consequently, it will be possible to determine how deep the excitations generated by vehicles propagate into the road foundation. Moreover, advanced high-sensitivity, broadband vibration sensors and a fully synchronous vibration signal and moving vehicle recording system with a breakdown of traffic by vehicle type will be used.

The advantages of the proposed solution are simplicity and price. The system is uncomplicated and consists of a few basic modules available at a final price of about 100-130 PLN, with no radio transmission system (e.g. LoRa, WiFi, BT, RF433/868/2400 MHz) included in this price. One should note that considering traffic flow

typu pojazdów i wielkość błędu pomiarowego wynikającego z przyjętej metodyki pomiarowej. Umożliwią to przygotowywane badania z wykorzystaniem czujników typu LIDAR.

Analizy wymaga również problematyka związana z charakterystykami trakcyjnymi pojazdów elektrycznych, które charakteryzują się różnicami w zakresie generowanych wibracji i hałasów [28, 29]. Rozwiązanie tej kwestii może jednak stanowić badanie sygnatur akustycznych poszczególnych typów pojazdów w celu ich jednoznacznej identyfikacji [30]. Jednak w tym zakresie badań należy poczekać na proponowane dla pojazdów elektrycznych rozwiązania polegające na celowym ich nagłaśnianiu z uwagi na kwestie związane z bezpieczeństwem ruchu drogowego [31].

W trakcie dotychczasowych badań testowych nie zrealizowano stabilizacji układów i podzespołów elektronicznych (mikrokontrolera i układu akcelerometru ADXL 335). W dalszych pracach planuje się, poza stabilizacją napięciową całego układu np. z wykorzystaniem stabilizatora LM7805 (rozwiązanie budżetowe), wykorzystać filtrację sygnału z poszczególnych osi. Tego typu i jeszcze prostsze rozwiązania mające na celu uzyskanie dokładniejszych danych dla ADXL335 dyskutowane są na serwerach projektu Arduino [32]. Opcjonalnie, zwiększając budżet pojedynczego układu, można zastosować droższe i stabilniejsze układy inercyjne z integracją wielu wyjść typu MPU9020 lub LSM9DS1.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Nagurney A.*: Traffic Network Equilibrium, in: Network Economics. Springer, Dordrecht, 1993, 137-165, DOI: 10.1007/978-94-011-2178-1_4
- [2] *Wardrop J.G.*: Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, **1**, 3, 1952, 325-362, DOI: 10.1680/ipeds.1952.11259
- [3] *Samuelson P.A.*: Spatial price equilibrium and linear programming. American Economic review, **42**, 3, 1952, 283-303, <http://www.jstor.org/stable/181038> (20.05.2022)
- [4] *May A.*: Traffic Flow Fundamentals. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990
- [5] *Taylor N.B.*: The CONTRAM dynamic traffic assignment model TRL. Networks and Spatial Economics, **3**, 2003, 297-322, DOI: 10.1023/A:1025394201651
- [6] *Kerner B.S.*: The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory. Springer, Berlin/Heidelberg, 2004, DOI: 10.1007/978-3-540-40986-1
- [7] *Treiber M., Kesting A.*: Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation. Springer Berlin/Heidelberg, 2013, DOI: 10.1007/978-3-642-32460-4
- [8] *Wang H., Ouyang M., Meng Q., Kong Q.*: A traffic data collection and analysis method based on wireless sensor network. Journal on Wireless Communications and Networking, **2020**, 2, 2020, DOI: 10.1186/s13638-019-1628-5
- [9] *Colonna P., Guaragnella C., Ranieri V., Fonzone A.*: Use of Radar device in road traffic surveys. 4th International SIIV Congress – Advances in Transport Infrastructures and Stakeholders Expectations, Palermo, 2007
- [10] *Llorca D.F., Salinas C., Jimenez M., Parra I., Morcillo A.G., Izquierdo R., Lorenzo J., Sotelo M.A.*: Two-camera based accurate vehicle speed measurement using average speed at a fixed point. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Rio de Janeiro, 2016, 2533-2538, DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795963
- [11] *Radam I., Heriyatna E.*: A Correlation Analysis of Noise Level and Traffic Flow: Case of One Way Road in Banjarmasin. Asian Journal of Applied Sciences, **6**, 2, 2018, 1-64, online, <https://www.ajournalonline.com/index.php/AJAS/article/view/5264> (20.05.2022)

parameters, sensors of this type will have to operate in a series arrangement, whereby further expenses will be incurred for a communication circuit. Also ways of identifying vehicle types and estimating the measurement error stemming from the adopted measurement methodology remain to be explored. For this purpose investigations with the use of LIDAR sensors are under preparation.

Also the issues connected with the traction characteristics of electric vehicles, which differ in their generation of vibrations and noise, need to be examined [28, 29]. A solution to this problem can be to study the acoustic signatures of the particular types of vehicles for their unequivocal identification [30]. However, in this regard one should wait for solutions proposed for electric vehicles in the context of road traffic safety [31].

So far no electronic circuits and components (of the microcontroller and the ADXL 335 accelerometer) have been stabilized under the pilot study. As part of further research work, besides the voltage stabilization of the whole system by means of, e.g., an LM7805 stabilizer (a budget solution), the filtration of the signal from the particular axes is to be implemented. Such (and even simpler) solutions aimed at obtaining more accurate data for ADXL335 are discussed on the Arduino project servers [32]. Optionally, increasing the budget for a single system one can use more expensive and more stable MPU9020 or LSM9DS1 inertial systems with the integration of multiple outputs.

- [12] *Daniel C.S.*: Vehicle to vehicle communications: Readiness for application. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 2018
- [13] *Bazzi A., Masini B.M.L.*: Taking advantage of V2V communications for traffic management. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Baden-Baden, 2011, 504-509, DOI: 10.1109/IVS.2011.5940511
- [14] *Outay F., Kamoun F., Kaisser F., Alterri D.*: V2V and V2I Communications for Traffic Safety and CO₂ Emission Reduction: A Performance Evaluation. *Procedia Computer Science*, **151**, 2019, 353-360, DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.049
- [15] *Grabiński J., Waluś K.*: The system of acquisition and archiving of motion parameters of mobile systems – an overview of measuring sensors. *AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, **20**, 1-2, 2019, 234-240, DOI: 10.24136/atest.2019.042
- [16] *Shiferaw H.M.*: Measuring traffic induced ground vibration using smartphone sensors for a first hand structural health monitoring, *Scientific African*, **11**, 2021, e00703, online, DOI: 10.1016/j.sciaf.2021.e00703
- [17] *Jakubczyk-Gałczyńska A., Jankowski R.*: Traffic-induced vibrations. The impact on buildings and people. The 9th International Conference “Environmental engineering”, Vilnius, 2014, DOI: 10.3846/enviro.2014.028
- [18] *Kouroussis G., Connolly D.P., Verlinden O.*: Railway-induced ground vibrations – a review of vehicle effects. *International International Journal of Rail Transportation*, **2**, 2, 2014, 69-110, DOI: 10.1080/23248378.2014.897791
- [19] *Hajek J.J., Blaney Ch.T., Hein D.K.*: Mitigation of highway traffic-induced vibration. Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Charlottetown, 2006
- [20] *Hostettler R.*: Traffic counting using measurements of road surface vibrations. Master’s thesis 2009:080, Luleå University of Technology, 2009, <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-45113> (20.05.2022)
- [21] *Isaksson M.*: Vehicle detection using anisotropic magnetoresistors. Master’s thesis EX034/2008, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2007, <https://hdl.handle.net/20.500.12380/70865> (20.05.2022)
- [22] *Ye Z., Wang L., Xu W., Gao Z., Yan G.*: Monitoring Traffic Information with a Developed Acceleration Sensing Node. *Sensors*, **17**, 12, 2017, 2817, DOI: 10.3390/s17122817
- [23] *Kleyko D., Hostettler R., Lyamin N., Birk W., Wiklund U., Osipov E.*: Vehicle Classification using Road Side Sensors and Feature-free Data Smashing Approach. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Rio de Janeiro, 2016, 1988-1993, DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795877
- [24] *Kruszyna M., Suchy G.*: A proposal for method to assess alternatives of proposed road investment in a planning phase. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 2, 2018, 159-176, DOI:10.7409/rabdim.018.010
- [25] *Jażdżik-Osmólska A., Smółka L.*: Analysis of expenditure on district roads in the years 2006-2010 on the example of Małopolska province. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **15**, 3, 2016, 179-189, DOI:10.7409/rabdim.016.011
- [26] *Heller S., Mechowski T., Harasim P.*: Wykorzystanie badań diagnostycznych stanu nawierzchni do rozpoznania miejsc niebezpiecznych dla użytkowników drogi. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **9**, 1, 2010, 57-75
- [27] *Nagórski R., Błażejowski K., Nagórska M.*: Comparative analysis of deflections and strains of two road pavements with high traffic load. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **14**, 1, 2015, 31-46, DOI:10.7409/rabdim.015.003
- [28] *Hua X., Gandee E.*: Vibration and dynamics analysis of electric vehicle drivetrains. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **40**, 3, 2021, 1241-1251, DOI: 10.1177/1461348420979204
- [29] *Shin E.G., Ahlswede M., Muenzberg C., Suh I., Engel F.*: Noise and Vibration Phenomena of On-Line Electric Vehicle. SAE 2011 Noise and Vibration Conference and Exhibition, Grand Rapids, USA, 2011, DOI: 10.4271/2011-01-1726
- [30] *Uttarakumari M., Koushik A.S., Raghavendra A.S., Adiga A.R., Harshita P.*: Vehicle detection using acoustic signatures. 2017 International Conference on Computing, Communication and Automation, Greater Noida, India, 2017, 1173-1177, DOI: 10.1109/CCA.2017.8229975
- [31] *Genuit K.*: The new sounds of electric vehicles-Quieter but really better? *The Journal of the Acoustical Society of America*, **141**, 5, 2017, 3876, DOI: 10.1121/1.4988671
- [32] Forum Arduino „Stabilizing Accelerometer (ADXL335) to measure displacement?”, <https://forum.arduino.cc/t/stabilizing-accelerometer-adxl335-to-measure-displacement/569416> (23.04.2022)