miesięcznik naukowo-techniczny stowarzyszenia inżynierów i techników komunikacji RP

przegląd komunikacyjny

9
2020
rocznik LXXV
cena 25,00 zł
w tym 8% VAT

UKAZUJE SIĘ OD 1945 ROKU

Badania obiektu gruntowo-powłokowego

eISSN
2544-6037

ISSN
0033-22-32

Rozszerzone badania odbiorcze drogowego obiektu gruntowo-powłokowego z zastosowaniem obciążenia ruchomego. Symulacje MES propagacji fali akustycznej w otoczeniu konstrukcji nawierzchni szynowej. Drony w diagnostyce wizyjnej uszkodzeń szyn kolejowych

Podstawowe informacje dla Autorów artykułów

„Przegląd Komunikacyjny" publikuje artykuły związane z szeroko rozumianym transportem oraz infrastrukturą transportu. Obejmuje to zagadnienia techniczne, ekonomiczne i prawne. Akceptowane są także materiały związane z geografią, historią i socjologią transportu.

Artykuły publikowane w „Przeglądzie Komunikacyjnym" dzieli się na: „wnoszące wkład naukowy w dziedzinę transportu i infrastruktury transportu" oraz „pozostałe". Prosimy Autorów o deklarację (w zgłoszeniu), do której grupy zaliczyć ich prace.

Materiały do publikacji: zgłoszenie, artykuł oraz oświadczenie Autora, należy przesyłać w formie elektronicznej na adres redakcji:

artykuly@przeglad.komunikacyjny.pwr.wroc.pl

W zgłoszeniu należy podać: imię i nazwisko autora, adres mailowy oraz adres do tradycyjnej korespondencji, miejsce zatrudnienia, zdjęcie, tytuł artykułu oraz streszczenie (po polsku i po angielsku) i słowa kluczowe (po polsku i po angielsku). Szczegóły przygotowania materiałów oraz wzory załączników dostępne są ma stronie:

www.transportation.overview.pwr.edu.pl

W celu usprawnienia i przyspieszenia procesu publikacji prosimy o zastosowanie się do poniższych wymagań dotyczących nadsyłanego materiału:

1. Tekst artykułu powinien być napisany w jednym z ogólnodostępnych programów (np. Microsoft Word). Wzory i opisy wzorów powinny być wkomponowane w tekst. Tabele należy zestawić po zakończeniu tekstu. Ilustracje (rysunki, fotografie, wykresy) najlepiej dołączyć jako oddzielne pliki. Można je także wstawić do pliku z tekstem po zakończeniu tekstu. Możliwe jest oznaczenie miejsc w tekście, w których autor sugeruje wstawienie stosownej ilustracji lub tabeli. Obowiązuje odrębna numeracja ilustracji (bez rozróżniania na rysunki, fotografie itp.) oraz tabel.
2. Całość materiału nie powinna przekraczać 12 stron w formacie Word (zalecane jest 8 stron). Do limitu stron wlicza się ilustracje załączane w odrębnych plikach (przy założeniu że 1 ilustracja = ½ strony).
3. Format tekstu powinien być jak najprostszy (nie stosować zróżnicowanych styli, wcięć, podwójnych i wielokrotnych spacji itp.). Dopuszczalne jest pogrubienie, podkreślenie i oznaczenie kursywą istotnych części tekstu, a także indeksy górne i dolne. **Nie stosować przypisów.**
4. Nawiązania do pozycji zewnętrznych - cytaty (dotyczy również podpisów ilustracji i tabel) oznacza się numeracją w nawiasach kwadratowych [...]. Numerację należy zestawić na końcu artykułu (jako „Materiały źródłowe"). Zestawienie powinno być ułożone alfabetycznie.
5. Jeżeli Autor wykorzystuje materiały objęte nie swoim prawem autorskim, powinien uzyskać pisemną zgodę właściciela tych praw do publikacji (niezależnie od podania źródła). Kopie takiej zgody należy przesłać Redakcji.

Artykuły wnoszące wkład naukowy w dyscyplinę inżynieria lądowa i transport podlegają procedurom recenzji merytorycznych zgodnie z wytycznymi MNiSW, co pozwala zaliczyć je, po opublikowaniu, do dorobku naukowego oraz uwzględnić w ewaluacji jakości działalności naukowej (Dz.U. 2019 poz. 392). Liczba uwzględnianych punktów w ewaluacji osiągnięć naukowych wynosi 5.

Do oceny każdej publikacji powołuje się co najmniej dwóch niezależnych recenzentów spoza jednostki. Zasady kwalifikowania lub odrzucenia publikacji i ewentualny formularz recenzencki są podane do publicznej wiadomości na stronie internetowej czasopisma lub w każdym numerze czasopisma. Nazwiska recenzentów poszczególnych publikacji/numerów nie są ujawniane; raz w roku (w ostatnim numerze oraz na stronie internetowej) czasopismo podaje do publicznej wiadomości listę recenzentów współpracujących.

Przygotowany materiał powinien obrazować własny wkład badawczy autora. Redakcja wdrożyła procedurę zapobiegania zjawisku Ghostwriting (z „ghostwriting" mamy do czynienia wówczas, gdy ktoś wniósł istotny wkład w powstanie publikacji, bez ujawnienia swojego udziału jako jeden z autorów lub bez wymienienia jego roli w podziękowaniach zamieszczonych w publikacji). Tekst i ilustracje muszą być oryginalne i niepublikowane w innych miejscach (w tym w internecie). Możliwe jest zamieszczanie artykułów, które ukazały się w materiałach konferencyjnych i podobnych (na prawach rękopisu) z zaznaczeniem tego faktu i po przystosowaniu do wymogów publikacyjnych „Przeglądu Komunikacyjnego".

Redakcja pisma oferuje objęcie patronatem medialnym konferencji, debat, seminariów itp.
Ceny są negocjowane indywidualnie w zależności od zakresu zlecenia. Możliwe są atrakcyjne upusty. Patronat obejmuje:

- ogłaszanie przedmiotowych inicjatyw na łamach pisma,
- zamieszczanie wybranych referatów / wystąpień po dostosowaniu ich do wymogów redakcyjnych,
- publikację informacji końcowych (podsumowania, apele, wnioski),
- kolportaż powyższych informacji do wskazanych adresatów.

www.transportation.overview.pwr.edu.pl

Ramowa oferta dla „Sponsora strategicznego" czasopisma Przegląd Komunikacyjny

Sponsor strategiczny zawiera umowę z wydawcą czasopisma na okres roku kalendarzowego z możliwością przedłużenia na kolejne lata. Uprawnienia wydawcy do zawierania umów posiada Zarząd Krajowy SITK w Warszawie.

Przegląd Komunikacyjny oferuje dla sponsora strategicznego następujące świadczenia:

- **zamieszczenie logo sponsora w każdym numerze,**
- **zamieszczenie reklamy sponsora w jednym, kilku lub we wszystkich numerach,**
- **publikacja jednego lub kilku artykułów sponsorowanych,**
- **publikacja innych materiałów dotyczących sponsora,**
- **zniżki przy zamówieniu prenumeraty czasopisma.**

Możliwe jest także zamieszczenie materiałów od sponsora na stronie internetowej czasopisma.
Przegląd Komunikacyjny ukazuje się jako miesięcznik.
Szczegółowy zakres świadczeń oraz detale techniczne (formaty, sposób i terminy przekazania) są uzgadniane indywidualnie.

Osoba kontaktowa w tej sprawie:
Hanna Szary
hanna.szary@sitkrp.org.pl
ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa, tel.: (22) 827 02 58, 506 116 966

Cena za świadczenia na rzecz sponsora uzależniana jest od uzgodnionych szczegółów współpracy. Zapłata może być dokonana jednorazowo lub w kilku ratach (na przykład kwartalnych). Część zapłaty może być w formie zamówienia określonej liczby prenumerat czasopisma.

grow REKMA GM ROADS ViaCon

Na okładce: *Konstrukcja gruntowo-powłokowa, Źródło: Czesław Machelski*

przegląd komunikacyjny 9/2020 rocznik LXXV

Drodzy Czytelnicy!

Numer wrześniowy otwieramy artykułem opisującym rozszerzone badania odbiorcze drogowego obiektu gruntowo-powłokowego z zastosowaniem obciążenia ruchomego. Celem pracy jest wskazanie na specyficzne zachowanie się takich konstrukcji w odniesieniu do klasycznych mostów o kształcie łukowym. Standardowe badania rozszerzono o analizę skuteczności obciążeń zmieniających położenie, czyli ruchomych ale w układzie quasi statycznym. Podano przykład powstawania „pętli histerezy" w przypadku stosowania cyklu obciążenia ruchomego, w którym realizuje się przejazd pierwotny po obiekcie z nawrotem po tym samym torze ruchu.

Druga pozycja dotyczy symulacji MES propagacji fali akustycznej w otoczeniu konstrukcji nawierzchni szynowej. W przypadku hałasu emitowanego przez kolej, jego poziom emisji zależy od liczby, rodzaju i prędkości pociągów, struktury ruchu z podziałem na porę dzienną i nocną, a także od rodzaju torowiska i jego przebiegu. Hałas kolejowy powstaje głownie na styku koła i szyny. W artykule przedstawiono sformułowanie sprzężonego zagadnienia mechaniczno-akustycznego, którego rozwiązanie, przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych, pozwala na symulacyjne określenie poziomu ciśnienia akustycznego w dowolnym punkcie otoczenia konstrukcji nawierzchni szynowej.

Ostatni artykuł przedstawia rolę dronów w diagnostyce wizyjnej uszkodzeń szyn kolejowych. Pokazano przykłady badań rozległych wad w główce szyny, wraz z metodą przetwarzania i analizy obrazów. Wymieniono zalety i wady takich badań. Wśród propozycji kierunków wdrażania dronów przez PKP PLK S.A. wymieniono: inspekcję stanu technicznego konstrukcji stalowych trakcji elektrycznej, uszkodzenia wiaduktów i mostów kolejowych, inwentaryzację i akwizycję stanu technicznego toru kolejowego, osuwające się skarpy i nasypy, stacje perony, urządzenia sterowania ruchem kolejowym.

Na zakończenie zamieszczamy wspomnienie o Profesorze Krzysztofie Stypule oraz o Inżynierze Grzegorzu Manetce. Cześć Ich pamięci!

W numerze

Rozszerzone badania odbiorcze drogowego obiektu gruntowo-powłokowego z zastosowaniem obciążenia ruchomego
Czesław Machelski, Piotr Tomala 2

Symulacje MES propagacji fali akustycznej w otoczeniu konstrukcji nawierzchni szynowej
Artur Zbiciak, Kazimierz Józefiak, Radosław Czubacki, Patrycja Chacińska 8

Drony w diagnostyce wizyjnej uszkodzeń szyn kolejowych
Piotr Lesiak 15

Wspomnienie o Prof. dr hab. inż. Krzysztofie Stypule, Wspomnienie o inż. Grzegorzu Małetce 21

Życzę zajmującej lektury:
Maciej Kruszyna

Wydawca:
Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej
00-043 Warszawa, ul. Czackiego 3/5
www.sitkrp.org.pl

Redaktor Naczelny:
Antoni Szydło

Redakcja:
Krzysztof Gasz, Igor Gisterek, Bartłomiej Krawczyk, Maciej Kruszyna (Z-ca Redaktora Naczelnego), Agnieszka Kuniczuk - Trzcinowicz (Redaktor językowy), Piotr Mackiewicz (Sekretarz), Wojciech Puła (Redaktor statystyczny), Wiesław Spuziak, Robert Wardęga, Czesław Wolek

Adres redakcji do korespondencji:
Poczta elektroniczna:
redakcja@przeglad.komunikacyjny.pwr.wroc.pl

Poczta „tradycyjna":
Piotr Mackiewicz, Maciej Kruszyna
Politechnika Wrocławska,
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
Faks: 71 320 45 39

Rada naukowa:
Marek Ciesielski (Poznań), Antanas Klibavičius (Wilno), Jozef Komačka (Žilina), Elżbieta Marciszewska (Warszawa), Andrzej S. Nowak (Auburn University), Tomasz Nowakowski (Wrocław), Victor V. Rybkin (Dniepropietrovsk), Marek Sitarz (Katowice), Wiesław Starowicz (Kraków), Hans-Christoph Thiel (Cottbus), Tomasz Siwowski (Rzeszów), Jiri Strasky (Brno), Andrea Zuzulova (Bratysława)

Rada programowa:
Mirosław Antonowicz, Dominik Borowski, Leszek Krawczyk, Marek Krużyński, Leszek W. Mindur, Andrzej Żurkowski

Deklaracja o wersji pierwotnej czasopisma
Główną wersją czasopisma jest wersja elektroniczna. Na stronie internetowej czasopisma dostępne są pełne wersje artykułów oraz streszczenia w języku polskim (od 2010) i angielskim (od 2016).

Redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania zmian w materiałach nie podlegających recenzji.

Artykuły opublikowane w „Przeglądzie Komunikacyjnym" są dostępne w bazach danych 20 bibliotek technicznych oraz są indeksowane w bazach:

BAZTECH: **http://baztech.icm.edu.pl**
Index Copernicus: **http://indexcopernicus.com**

Prenumerata:
Szczegóły i formularz zamówienia na stronie:

http://www.transportation.overview.pwr.edu.pl

Obecna Redakcja dysponuje numerami archiwalnymi począwszy od 4/2010.

Numery archiwalne z lat 2004-2009 można zamawiać w Oddziale krakowskim SITK, ul. Siostrzana 11, 30-804 Kraków, tel./faks 12 658 93 74, **mrowinska@sitk.org.pl**

Druk:
HARDY Design, 52-131 Wrocław, ul. Buforowa 34a
Przemysław Wołczuk, **przemo@dodo.pl**

Reklama:
Dział Marketingu: **sitk.baza@gmail.com**

Nakład: 800 egz.

Rozszerzone badania odbiorcze drogowego obiektu gruntowo-powłokowego z zastosowaniem obciążenia ruchomego

Expanded range of testing of soil-steel bridge with use moving loads

Czesław Machelski

Prof. dr hab. inż.

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; Katedra Mostów i Kolei

czeslaw.machelski@pwr.edu.pl

Piotr Tomala

Mgr inż.

ViaCon Polska Sp. z o.o.

piotr.tomala@viacon.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań odbiorczych drogowego obiektu o konstrukcji gruntowo-powłokowej. Powłokę obiektu zaprojektowano z blachy o obecnie najwyższym profilu UltraCor. Parametry analizowanego obiektu odniesiono do obecnie rekordowych konstrukcji. Standardowe badania rozszerzono o analizę skuteczności obciążeń zmieniających położenie, czyli ruchomych ale w układzie quasi statycznym. Bazą pomiarową była górna część pasma obwodowego powłoki z czujnikami indukcyjnymi i zegarowymi do wyznaczania ugięcia w regularnych odstępach. W pracy podano kolejny przykład powstawania „pętli histerezy" w przypadku stosowania cyklu obciążenia ruchomego, w którym realizuje się przejazd pierwotny po obiekcie z nawrotem po tym samym torze ruchu. W przypadku gęstej siatki punktów pomiarowych możliwe jest stosowanie algorytmu różnicowego do szacowania momentów zginających w blasze falistej. W przykładzie wskazano na wielokrotnie mniejsze siły wewnętrzne i przemieszczenia w przypadku obciążeń ruchomych niż w powstałych podczas budowy obiektu. Celem pracy jest wskazanie na specyficzne zachowanie się konstrukcji gruntowo-powłokowych w odniesieniu do klasycznych mostów o kształcie łukowym.

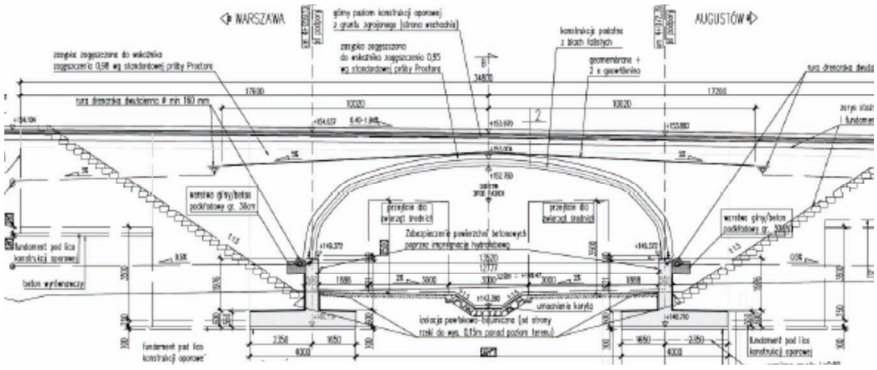
Słowa kluczowe: *Konstrukcje gruntowo-powłokowe, Badania; Ugięcia; Momenty zginające*

Abstract: In this paper the results of the live load tests of soil steel bridge are presented. The structure was designed with use of the largest possible corrugation type UltraCor. Parameters of analysed structure were referred to the current record structures in the term of span. Standard test procedure have been expended to check the efficiency of the position-changing loads i.e live loads but in a quasi-static approach. The measuring base was the upper part of the shell periphery equipped with inductive and dial gauges to determine deflections at regular layout. Paper presents another example of the formation of "hysteresis loop" where the live load is passing back and forth along the same path. In the case of a dense layout of measuring points it is possible to use a differential algorithm to estimate the bending moments in corrugated steel plates. Analysed case shows that the internal forces and displacements due to the live loads are much smaller than during construction. The purpose of the paper is to indicate the specific behaviour of soil-steel structures in relation to classical Arch bridges.

Keywords: *Live load; Soil-steel bridges; Investigation; Displacements; Bending moments*

Sztywności powłok z blach falistych

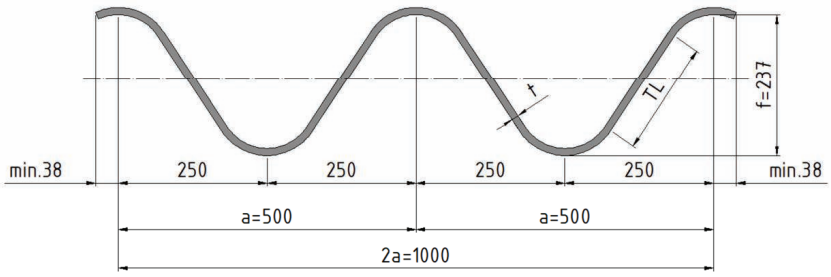
W artykule przedstawiono metodologię i wyniki badania typowego mostowego obiektu gruntowo-powłokowego z blachy falistej, jak na rys. **1**. Charakterystyczną cechą konstrukcji tych obiektów jest powstawanie w trakcie ich budowy wielokrotnie większych sił wewnętrznych i przemieszczeń niż podczas użytkowania jako mostów drogowych i kolejowych [1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 12, 13]. Po zmontowaniu powłoka z blachy falistej jest bardzo wiotka. Podlega ona znacznej deformacji podczas układania zasypki gruntowej [13]. Z tych powodów obiekty o dużych rozpiętościach monitoruje się w fazie ich budowy, z zastosowaniem technik geodezyjnych [1, 3, 12, 13]. Dopiero podczas



1. *Przekrój poprzeczny analizowanego obiektu w obwodnicy Szczuczyna*

Tab. 1. *Parametry geometryczne analizowanych powłok*

Obiekt	Wymiary powłoki [m]			Rodzaj blachy *a*×*f*×*t*	*EI*/*a* MNm2/m	k_m kN/m
	L	*H*	*R*			
Szczuczyn	13,276	3,630	14,376	UC 500×237×5	5,704	32.4
Ostróda	25,724	9,110	16,632	UC 500×237×9,65	19,89	27.8
Dubaj	32,660	9,570	29,680	UC 500×237×12	22,80	21.7



2*. Geometria blachy falistej UC 500×237×8 [mm]*

użytkowania powłoka z blachy falistej jako konstrukcja zanurzona w ośrodku gruntowym, w gotowym obiekcie, charakteryzuje się dużą sztywnością [11, 14]. Charakterystyczną cechą konstrukcji gruntowo-powłokowych w odróżnieniu od klasycznych mostów o kształcie łukowym, jest duży wpływ zasypki gruntowej i nawierzchni jezdni na nośność obiektu [14, 15].

Na analizowanym obiekcie zrealizowano jako uzupełnienie klasycznych badań odbiorczych konstrukcji mostowych pomiary ugięć pod obciążeniem zmieniającym położenie. Z uwagi na małe wartości przemieszczeń pod obciążeniami użytkowymi konieczne jest stosowanie czujników indukcyjnych lub zegarowych o dokładności pomiaru do 0.01 mm. Z takich wyników można oceniać również momenty zginające jak w algorytmie podanym w pracy. Oczywiście znacznie skuteczniejsze są pomiary z użyciem tensometrów naklejanych na blachę falistą [2, 3, 5, 9]. Wiąże się to jednak z użyciem specjalistycznego sprzętu pomiarowego i przygotowania bazy pomiarowej. Z tego powodu taką metodykę badań stosuje się obiektów o największych rozpiętościach [5, 7, 9] jak w powłokach o parametrach geometrycznych zestawionych w tab. **1**.

Przykłady obiektów zestawionych w tab. **1** są o podobnym kształcie i zbliżonych proporcjach wymiarów o komunikacyjnym przeznaczeniu jako obiekty drogowe. Konstrukcję największą w świecie rozpiętości wybudowano w Ras Al Khajmah koło Dubaju w United Arab Emirates [1]. Obiekt w Ostródzie jest drugim co do rozpiętości w świecie, wybudowanym w Polsce [1]. Trzeci analizowany w pracy obiekt wybudowano w ciągu obwodnicy Szczuczyna. Charakteryzuje się on znacznie mniejszą rozpiętością od rekordowych wykonanych z blachy o tym samym profilu - UltraCor. Cechą szczególną jest mała grubość naziomu z podbudową i nawierzchnią wynosząca 1,03 m.

Charakterystycznymi parametrami geometrycznymi powłok jest ich rozpiętość *L*, wysokość *H* oraz promień krzywizny górnej części powłoki *R*, zestawione w tab. **1**. Na rys. **2** przedstawiono geometrię blachy falistej, zastosowanej w obiektach, z charakterystycznymi wymiarami UC *a*×*f*×*t*, jak w tab. **1**. Wartość *EI* jest sztywnością na zginanie powłoki zwykle odnoszoną do długości fali *a*.

W wytycznych projektowania i zaleceniach technicznych określa się minimalne sztywności montażowe powłok, w postaci parametru, jak we wzorze

$$k_m = \frac{EI}{a \cdot L^2} \qquad (1)$$

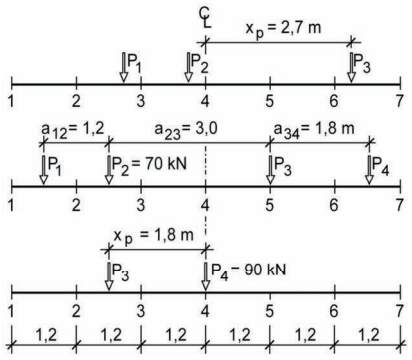
Wartości uzyskane w analizowanych powłokach zestawiono w ostatniej kolumnie tab. **1**. W przypadku powłok o niższym profilu stosuje się mniejsze wartości k_m. Przykładowo gdy powłoka jest wykonana z blachy MP 200×55×8 [mm] przy rozpiętości L = 11 m uzyskuje się ze wzoru (1) wartość k_m = 6.25 kN/m. Podobny parametr do k_m stosuje się w przypadku wybudowanych obiektów – przyjmuje on wielokrotnie większe wartości [11, 14].

Ugięcia powłoki podczas przejazdu samochodu

W badaniach obiektów mostowych o kształcie łukowym pod obciążeniem ruchomym wykorzystuje się ich specyficzną charakterystykę - minimalne efekty dynamiczne. Dzięki temu w mostach sklepionych możliwa jest analiza przemieszczeń w ujęciu quasi statycznym również przy przejazdach eksploatacyjnych pociągów towarowych gdy prędkości osiągają wartość v = 20 m/sek. W przypadku obiektów gruntowo-powłokowych efekty dynamiczne są również małe ale większe niż w poprzednich [15]. Z tego powodu w przedstawionych badaniach stosowano prędkości przejazdu samochodu na poziomie kilku m/sek.

W badaniach podanych w pracy wykorzystuje się samochód o naciskach na osie przednie $P_1 = P_2$ = 70 kN i tylne $P_3 = P_4$ = 90 kN. Geometria pojazdu to rozstawy osi: a_{12} =1,2 m a_{23} = 3,0 m oraz a_{34} = 1,8 m. Linia pomiarowa to układ punktów regularnie rozmieszczonych na paśmie obwodowym powłoki o rozstawie c = 1,2 m. Schemat układu pomiarowego i położeń osi samochodu przedstawiono na rys. **3**.

Przejazdy samochodu odbywały się od strony W (Warszawa) do A (Augustów) z jazdą do przodu a w przypadku A – W do tyłu po tej samej linii ruchu. Zatem w dowolnym położeniu pojazdu określonym przez współrzędną x_p ustawienie pojazdu jest identyczne, bez względu na kierunek jazdy



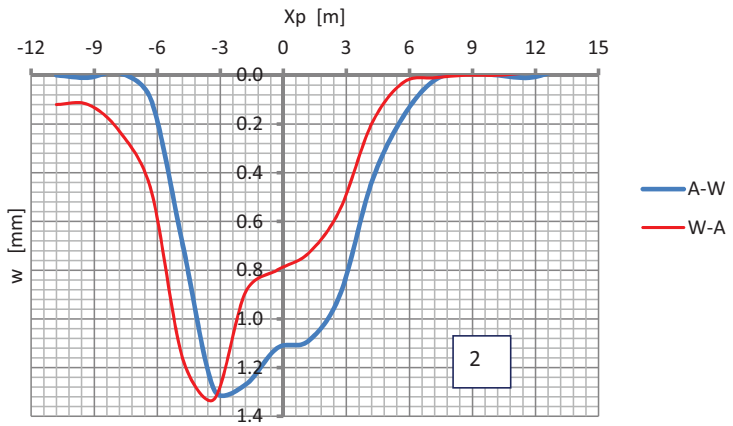
***3**. Schemat układu pomiarowego i obciążeń*

A - W czy W - A. Na rys. **4** przedstawiono wyniki pomiaru ugięć trzech, wybranych punktów 2, 4 (klucz powłoki), 6. Współrzędna x_p określa położenie osi nr 3 od klucza powłoki (oś 3 jest najbliższa środka ciężkości pojazdu: 1,07 m). W badaniach odcinkowego przejazdu samochodu był on zatrzymywany co Δx_p =1,5 m na realizację odczytów z urządzeń pomiarowych. Rozpoczęcie przejazdu odbywało się przy jego położeniu x_p =-10,8 m a nawrót gdy x_p = 14,7 m.

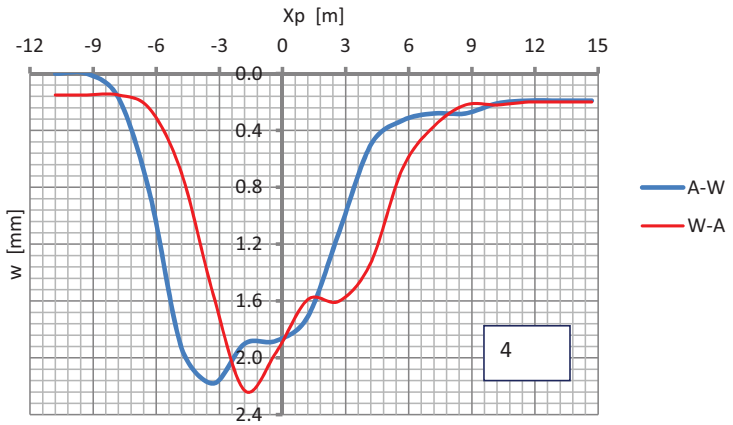
Podczas przejazdu w obydwie strony powstają dwie linie ugięć z punktem wspólnym w miejscu zakończenia jazdy pierwotnej i rozpoczęcia nawrotu. Charakterystycznym wynikiem tej metodyki badań jest powstawanie wyprzedzenia na wykresie ugięć widoczne z porównania wyników dla symetrycznie położonych punktów 2 i 6. Zależy ono od kierunku jazdy samochodu! Zjawisko to jest obserwowane od dawna [9] – jest ono specyficzną cechą obiektów gruntowo-powłokowych. Tego efektu nie można rejestrować podczas przejazdu ciągłego przedstawionego na rys. **5**. Po pełnym cyklu obciążenia – dwukrotnym przejeździe nad powłoką pozostaję relatywnie małe przemieszczenia resztkowe. W przejeździe z przerwami odcinkowymi w okresie pomiaru 27 minut wykonano 35 odczytów pomiarowych.

Na rys. **5** przedstawiono przebiegi zmiany ugięcia ale podczas ciągłej, nieprzerywanej jazdy samochodu a nie w ujęciu skokowym, jak wcześniej. Zatem na osi poziomej jako pomiar występuje funkcja czasu a nie położenie pojazdu, jak na rys. 4. W przedziale czasu 0,28 – 0.45 min. Odbywał się przejazd pierwotny nad powłoką. W czasie następnych 16 sekund był krótki postój samochodu po drugiej stronie obiektu. Następnie realizowano przejazd wtórny, powrotny nad powłoką w przedziale czasu 1.02 – 1.17 min. W tym przypadku zwiększono prędkości z 1,5 m/sek gdy podczas jazy pierwotnej wynosiła ona 1 m/sek. Prędkości oszacowano na podstawie charakterystycznych zmian przemieszczeń podanych na rysunkach **4** i **5**. Z porównania tych wykresów widoczne jest ich duże podobieństwo. Jednak obydwa wyniki uzyskano w kolejnym cyklu pomiarowym. Przejazdy nad powłoką odbywały się z różnymi prędkościami.

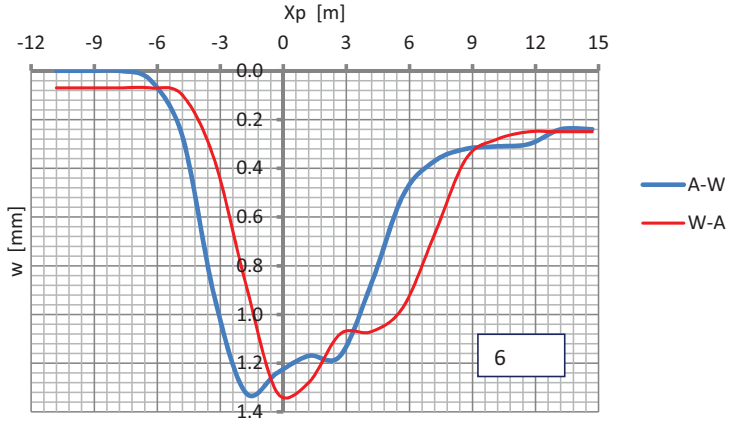
a) punkt 2 z rys. 3



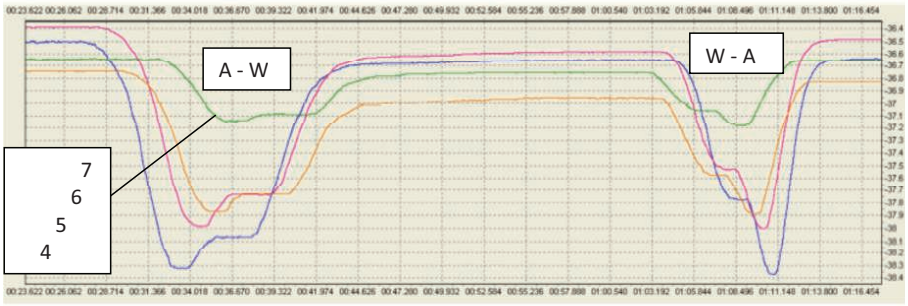
b) punkt 4 (klucz) z rys. 3



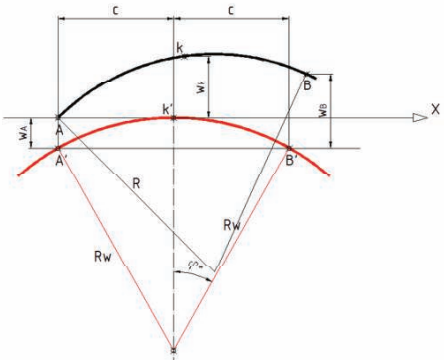
c) punkt 6 z rys. 3



***4**. Zmiany ugięć punktów pomiarowych powłoki podczas przerywanego przejazdu samochodu*



***5**. Zmiany ugięć punktów pomiarowych powłoki podczas ciągłego przejazdu samochodu*



***6**. Zmiany geometrii wycinka obwodowego powłoki w obszarze klucza*

W wykresach podanych na rys. **5** widoczny jest przemieszczenie startowe, w części środkowej postojowe a ostatnie kończące cykl obciążenia. Zatem faktyczne przemieszczenia wynikające z deformacji powłoki powinny być skorygowane (zerowane). Dwukrotny przejazd nad powłoką trwał niecałą minutę.

Zmiany krzywizny pasma obwodowego powłoki

Na podstawie deformacji powłoki przedstawionej na rys, **6** można obliczać zmianę krzywizny pasma obwodowego powłoki np. przy zastosowaniu ujęcia metody różnic skończonych MRS [10]. Wyznaczana jest ona w punkcie środkowym K na podstawie przemieszczeń o kierunku radialnym r punktów sąsiednich A i B z ogólnej zależności [10]

$$\kappa_K = \frac{1}{s^2}\left\{r_A - \left[2 - \left(\frac{s}{R}\right)^2\right] r_K + r_B\right\} \qquad (2)$$

We wzorze (2) wartości *s* jest odległością pomiędzy punktem K a punktami A lub B. Zatem w tym przypadku *s* jest długością wycinka koła o promieniu R_w, jak we wzorze

$$s = \varphi_w \cdot R_w \qquad (3)$$

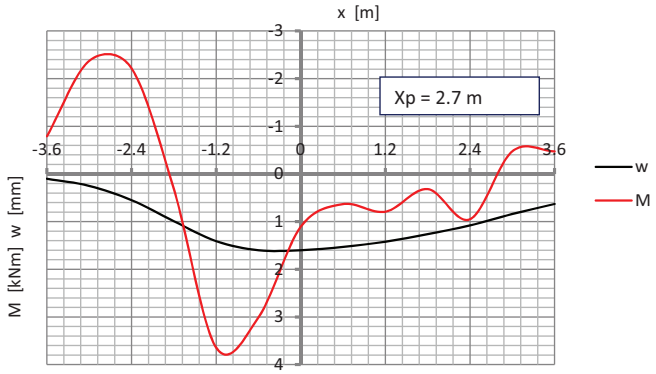
Promień krzywizny pasma obwodowego powłoki R_w wynika z jej deformacji gdy *r* są przemieszczeniami w kierunku zgodnym z tym promieniem [6, 10].

W przypadku gdy promień krzywizny R_w jest bardzo duży w odniesieniu do *s* we wzorze (2) można zastosować uproszczenia do postaci

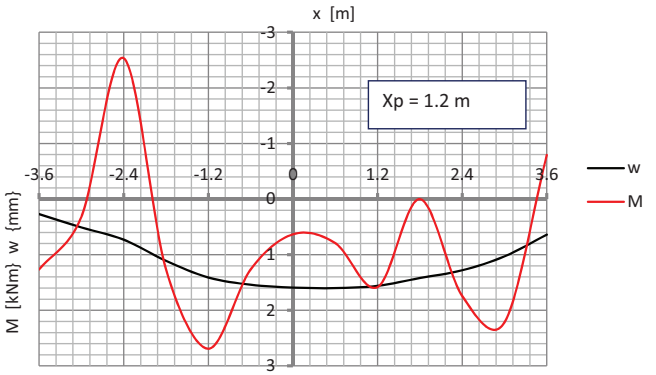
$$\kappa_K = \frac{1}{c^2}\{w_A - 2 \cdot w_K + w_B\} \qquad (4)$$

Wynika to z wartości proporcji, jak w analizowanym przypadku

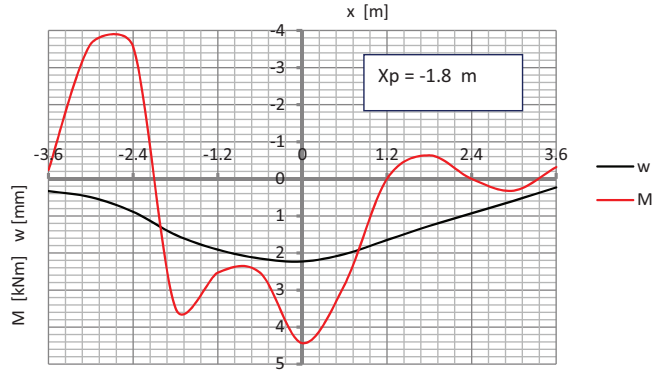
a) $x_p = 2.7$ m



b) $x_p = 1.2$ m



c) $x_p = -1.8$ m



***7**. Wykresy momentów zginających w paśmie obwodowym obszaru klucza*

Tab. 2. *Zestawienie wyników obliczeń dla analizowanych obiektów*

Obiekt	w [mm]	κ_ε *10-3 [1/m]	R_w [m]	M [kNm]
Szczuczyn	82	9.71	12.119	46.3
Ostróda	211	7.04	14.889	70.0
Dubaj	92	5.36	25.604	61.1

$$\left(\frac{s}{R}\right)^2=\left(\frac{1{,}212}{14{,}376}\right)^2=0{,}007 \qquad (5)$$

Ponadto we wzorze (4) przyjmuje się, że $s \approx c$ oraz $w \approx r$. Zatem w (4) występuje ujęcie równania stosowanego w metodzie różnic skończonych jak w przypadku pręta prostego [10].

Zależność momentu zginającego od zmiany krzywizny

Zmiana krzywizny określana wcześniej jako przekształcony wynik pomiarów ugięcia jest związana ze sztywnością na zginanie blachy falistej EI (por. tab. **1**) w równaniu momentów zginających, jak we wzorze

$$M = EI \cdot \kappa \qquad (6)$$

Zmiany krzywizny κ obliczone są ze wzoru (4) na podstawie deformacji górnego wycinka pasma obwodowego powłoki. Na podstawie zmian krzywizny κ można również określić naprężenia normalne pochodzące od zginania, ze wzoru

$$\sigma(M)=\frac{f+t}{2}E\cdot\kappa \qquad (7)$$

Przy stałej wartości E = 205 000 MPa widoczna jest bezpośrednia zależność od geometrii blachy falistej a×f×t, jak na rys. **2** i tab. **1**.

Na rys. **7** przedstawiono wykresy momentów zginających na długości analizowanego odcinka pasma obwodowego. Przyjęto trzy ustawienia samochodu podczas jego przejazdu w kierunku naturalnym (do przodu) czyli W-A. Na jednym rysunku podano dwa wykresy $M(x, x_p)$ i $w(x, x_p)$. W tym przypadku należy podkreślić, że funkcja momentów zginających M bardzo mocno zależy od kształtu funkcji w. Z tego powodu w obliczeniach zastosowano proces wygładzania $w(x)$ z przyjęciem dodatkowego punktu pośredniego pomiędzy punktami pomiarowymi.

W tab. **2** zestawiono wartości charakterystyczne dla analizowanych obiektów z tab. **1** uzyskane z fazy ich budowy. Obliczono je dla szczególnej sytuacji budowlanej gdy poziom zasypki osiągał klucza, czyli gdy $z_g = H$. Momenty zginające uzyskano ze wzoru (6). Wartości momentów pochodzących od zginania są we wszystkich powłokach w miarę wyrównane. Nie jest widoczna zależność zmiany krzywizny κ i momentów M od wypiętrzenia w. Z pozostałych danych wynika, że geometria powłoki podczas budowy podlega znacznie większej deformacji niż pod obciążeniem ruchomym.

Podsumowanie

Deformacja powłoki podczas układania zasypki w obiekcie gruntowo-powłokowym z blachy falistej jest znaczna i może być kontrolowana z użyciem technik geodezyjnych. W przypadku obciążeń użytkowych przemieszczenia i siły wewnętrzne są zdecydowanie mniejsze. Z tego powodu użyteczne są pomiary tensometryczne, z których określa się bezpośrednio siły wewnętrzne ale również przemieszczenia [2]. W pracy podano przykład wykorzystania pomiaru przemieszczeń do określania momentów zginających. W tym przypadku konieczne jest stosowanie czujników indukcyjnych lub zegarowych o dokładności pomiaru do 0.01 mm. W sytuacji gdy występuje mała grubość naziomu z podbudową i nawierzchnią wynoszącej 1,03 m, jak w analizowanym obiekcie konieczna jest gęsta siatka punktów pomiarowych. Pozwala to na odwzorowanie złożonej postaci funkcji momentu zginającego.

W pracy podano kolejny przykład powstawania „pętli histerezy" w przypadku stosowania cyklu obciążenia ruchomego, w którym realizuje się przejazd pierwotny po obiekcie z nawrotem po tym samym torze ruchu. Przedstawiona metodyka analizy służy również do określania sztywności obiektów mostowych [11, 14]. Z dotychczasowych badań wynika, że analizowane obiekty pod względem użytkowym są analogiczne do drogowych i kolejowych mostów betonowych i stalowych. Przy tym charakteryzują się bardzo małym wzbudzeniem dynamicznym [15]. ◀

Materiały źródłowe

[1] Machelski C., Mońka M, Tomala P.: Monitoring of soil-steel structures during construction. Journal of Current Construction Issues. 2019 p. 159-168.

[2] Machelski C.: Soil-steel shell structure displacements functions based on tensometric measurements. Studia Geotechnica et Mechanica Vol. 42 2018 p. 55-57.

[3] Korusiewicz L.: Verification of the method of estimating bending moments in soil-steel structures on the basis of shell deformation. Roads and Bridges 15 (2016) p. 221-230.

[4] Machelski C., Janusz L., Czerepak A.: Estimation of Stress level in the Corrugated Soil-Steel Structures Based on Deformations in the Crown. Journal of Traffic and Transportation Engineering 4(2016) p. 186-193.

[5] Asp O., Laaksonen A.: Instrumentation and monitoring of large-span culvert built under railway in Finland. Archives of Institute of Civil Engineering, 23 2017 p. 53-60.

[6] White K, Sargand S, Massada T.: Evaluation of load rating procedu-

re for metal culverts under shallow soil covers. Archives of Institute of Civil Engineering 23 2017 pp. 311-323.
[7] Moor J., Brachman R.: Research advancing the design of large span deep corrugated metal culverts. Archives of Institute of Civil Engineering 12 2012 pp. 9-19.
[8] Machelski C., Janusz L.: Application of Results of Test in Developing 2D Model for Soil-Steel Railway Bridges. Journal of Transportation Research Board. Vol. 2656:53-6 January 2017.
[9] Machelski C., Tomala P.: Investigation of displacements functions in soil-steel bridge structure based on tensometric measurements. 9th Symp. Steel Bridges, Praga, 10-11 September 2018, p. 18-
[10] Machelski C.: The use of the collocation algorithm for estimating the deformations of soil-shell objects made of corrugated sheets. Studia Geotechnica et Mechanica Vol. 46 2019.
[11] Machelski C.: Stiffness of railway soil-steel structures. Studia Geotechnika et Mechanica. No. 4/2015 p. 29-36.
[12] Machelski C.: Klasyfikacja obiektów gruntowo-powłokowych z uwagi na zmiany deformacji powłoki podczas budowy. Przegląd Komunikacyjny 9/2016 s. 5-10.
[13] Machelski C.: Budowlane obciążenia podatnych obiektów inżynierskich. Przegląd Komunikacyjny 10 (2018) s. 30-35.
[14] Machelski C.: Sztywność obiektu mostowego jako parametru użytkowego konstrukcji inżynieryjnych. Przegląd Komunikacyjny 2/2016 s. 27-32
[15] Machelski C.: Oddziaływania pojazdu na powłokę w obiektach gruntowo-powłokowych. Przegląd Komunikacyjny 9/2017 s. 5-10.

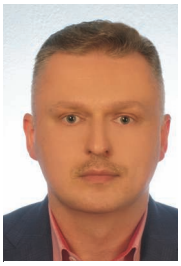
REKLAMA

- Konstrukcje ze stalowych blach falistych
- Konstrukcje inżynierskie z żelbetowych elementów prefabrykowanych
- Rury stalowe spiralnie karbowane
- Rury przepustowe z PP i HDPE
- System kanalizacji deszczowej i sanitarnej
- Ściany oporowe z gruntu zbrojonego
- Zbiorniki retencyjne
- Geosyntetyki
- Mosty kratowe
- Gabiony
- Płotki ochronno-naprowadzające dla płazów

ViaCon Polska Sp. z o.o., ul. Przemysłowa 6, 64-130 Rydzyna, tel.: +48 65 525 45 45 • office@viacon.pl • www.viacon.pl

Symulacje MES propagacji fali akustycznej w otoczeniu konstrukcji nawierzchni szynowej

FEM simulations of acoustic wave propagation in the vicinity of the railroad structure



Artur Zbiciak

Prof. dr hab. inż.

Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Warszawska

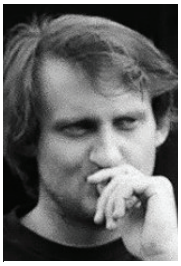
A.Zbiciak@il.pw.edu.pl

Kazimierz Józefiak

mgr inż. , asystent

Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Warszawska

k.jozefiak@il.pw.edu.pl



Radosław Czubacki

dr inż., adiunkt

Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Warszawska

r.czubacki@il.pw.edu.pl

Patrycja Chacińska

mgr inż.

Instytut Ochrony Środowiska
Państwowego Instytutu Badań,
Warszawa

Streszczenie: Hałas jest jednym z podstawowych problemów środowiskowych. Występuje głównie w obrębie dużych aglomeracji miejskich, negatywnie wpływając na samopoczucie, a przy długotrwałej ekspozycji – będąc szkodliwym dla zdrowia. Obszary, na których przebywają ludzie, w szczególności tereny związane z budownictwem mieszkaniowym, podlegają ochronie przed hałasem. Obowiązują tam określone dopuszczalne wartości poziomu dźwięku. Podobne regulacje dotyczą również cennych, naturalnych obszarów środowiskowych. Działania ochronne zmierzające do ograniczenia hałasu powinny dotyczyć przede wszystkim jego źródła. Jest to zadanie dla producentów maszyn, urządzeń i środków transportu, ale również dla projektantów konstrukcji stosujących odpowiednie zabezpieczenia akustyczne w obiektach budowlanych i inżynierskich. W przypadku hałasu emitowanego przez kolej, jego poziom emisji zależy od liczby, rodzaju i prędkości pociągów, struktury ruchu z podziałem na porę dzienną i nocną, a także od rodzaju torowiska i jego przebiegu (np. na nasypie, w wykopie, na wiadukcie albo na moście). Hałas kolejowy powstaje głównie na styku koła i szyny; zależy od chropowatości obu tych elementów, prędkości toczenia oraz charakterystyki dynamicznej toru. W pracy przedstawiono sformułowanie sprzężonego zagadnienia mechaniczno-akustycznego, którego rozwiązanie – przy wykorzystaniu metody elementów skończonych (MES) – pozwala na symulacyjne określenie poziomu ciśnienia akustycznego w dowolnym punkcie otoczenia konstrukcji nawierzchni szynowej. W celu symulacji zjawiska propagacji fali akustycznej wywołanej przejazdem koła pociągu zbudowano model numeryczny konstrukcji kolejowej nawierzchni podsypkowej. W obliczeniach wykorzystano program MES Abaqus. Przeprowadzono analizę harmoniczną w dziedzinie częstotliwości. W wybranych punktach modelu numerycznego badano zależność amplitudy ciśnienia akustycznego od częstotliwości wymuszenia. Następnie, wyniki przedstawiono w pasmach tercjowych. W artykule została omówiona metodyka przybliżonej oceny hałasu od ruchu kolejowego na podstawie analizy numerycznej. Przygotowany model zostanie w dalszych pracach zweryfikowany na podstawie pomiarów hałasu oraz – po ewentualnych modyfikacjach – zastosowany do oceny rozwiązań technologicznych mających na celu redukcję hałasu kolejowego (tłumiki torowe i tłumiki przyszynowe).

Słowa kluczowe: *Metoda elementów skończonych; Akustyka; Hałas kolejowy*

Abstract: Noise is one of the major environmental concerns nowadays. The problem is especially significant around large urban agglomerations where high levels of noise can have a negative impact on physical or psychological well-being of citizens while a long-term exposure can be harmful to health. Residential areas are protected by the introduction of maximum allowable sound pressure levels according to appropriate norms. There are also similar regulations concerning natural areas under environmental protection. Different measures used in order to reduce levels of noise should be applied primarily to the source of the sound. This is the task mainly for the manufacturers of all kinds of machines as well as means of transport. However, noise levels can be also controlled by the introduction of appropriately designed or chosen elements or materials in civil engineering structures. The noise levels emitted by the rail traffic depend on the number, kind and speed of trains, night and day traffic organization as well as on the type of the railroad structure and its location (e.g. on an embankment, on a bridge or flyover). Railway noise mainly develops between wheels and rails and depends on the roughness of both these elements, rolling speed and dynamic characteristics of the railroad. The paper presents the mathematical formulation of a coupled acoustic-structure problem. Solving the problem with finite element method gives the possibility to predict sound pressure levels in the vicinity of a railway structure. A numerical model of a certain type of a railroad structure was built in order to simulate the acoustic wave propagation caused by a wheel-rail interaction. The harmonic analysis was carried out using the Abaqus software. The acoustic pressure obtained based on the harmonic analysis was evaluated in certain points of the acoustic medium for various excitation frequencies. The final results were presented in the form of one-third octave bands. In the article, a possible methodology for estimating noise levels from railway structures based on a numerical analysis was shown. In the future works, the numerical model will be validated by field test data and applied to evaluate different types of technological solutions (silencers) used to reduce railway noise levels.

Keywords: *Finite Element Method; Acoustics; Railway Noise*

Wstęp

Hałas jest jednym z podstawowych problemów środowiskowych [11]. Jednym z głównych źródeł hałasu komunikacyjnego jest hałas pochodzący od linii kolejowych (oprócz hałasu drogowego i lotniczego). Z uwagi na jego szkodliwość, określone zostały dopuszczalne poziomy hałasu. Są one zróżnicowane w zależności od źródła hałasu i czasu odniesienia (np. pora dnia, nocy) jak również rodzaju przeznaczenia danego terenu, na którym jest on określany.

Ze względu na charakter zjawiska, jakim jest hałas działania ochronne w pierwszej kolejności powinny polegać na ograniczeniu jego źródła. Jest to zadanie dla producentów maszyn, urządzeń i środków transportu, ale również dla projektantów konstrukcji stosujących odpowiednie zabezpieczenia akustyczne w obiektach budowlanych i inżynierskich. W przypadku kolei, poziom emisji dźwięku zależy od liczby, rodzaju i prędkości pociągów, rodzaju, stanu technicznego torowiska i jego przebiegu (np. na nasypie, w wykopie, na wiadukcie albo na moście, tereny zwartej zabudowy) [9]. Hałas kolejowy powstaje głównie na styku koła i szyny; zależy od chropowatości obu tych elementów, prędkości toczenia oraz charakterystyki dynamicznej toru.

Obecnie, wiele komercyjnych programów metody elementów skończonych (MES) pozwala na modelowanie i symulacyjną analizę pól fizycznych oraz zjawisk sprzężonych. Programy MES ogólnego zastosowania, takie jak Abaqus, Ansys, Comsol i in. umożliwiają analizę zagadnień stanów ustalonych i przejściowych z zakresu mechaniki ciała stałego, mechaniki płynów, akustyki, termodynamiki i elektromagnetyzmu. Wiele z wymienionych programów zawiera narzędzia, które ułatwiają symulacyjne badanie zjawisk typu „multiphysics", w postaci bibliotek specjalnych elementów skończonych, procedur rozwiązywania układów równań różniczkowych, specyficznych dla danego zagadnienia, bądź dodatkowe narzędzia w zakresie post-processingu. W wielu programach, takie narzędzia są skupione w oddzielnych modułach (np. w programie Comsol: Acoustics Module, CFD Module, AC/DC Module i wiele innych).

Przedmiotem niniejszego opracowania jest prezentacja symulacyjnego modelu MES służącego do analizy zjawiska propagacji fali akustycznej w otoczeniu konstrukcji nawierzchni szynowej. W przedmiotowym zagadnieniu zachodzi sprzężenie dwóch pól fizycznych (domen): (i) ciała stałego, które stanowi konstrukcja nawierzchni szynowej oraz (ii) płynu (powietrze otaczające konstrukcję nawierzchni szynowej). W domenie ciała stałego poszukujemy pól przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w każdym punkcie konstrukcji, natomiast w obszarze płynu wielkości szukane to pole prędkości i ciśnienia akustycznego. Model rozważanego zagadnienia został zbudowany w programie Abaqus; wyniki obliczeń komputerowych przedstawiono przy wykorzystaniu dodatkowych narzędzi programistycznych autorów pracy.

Ciśnienie akustyczne

Drgania akustyczne cząstek powietrza powodują cykliczne zagęszczanie i rozrzedzanie ośrodka, przez co wywołują chwilowe różnice między ciśnieniem istniejącym w danym punkcie w chwili przejścia fali akustycznej a statycznym ciśnieniem atmosferycznym. Te różnice nazywamy ciśnieniem akustycznym [10]. Zmiany ciśnienia akustycznego są bodźcem wywołującym wrażenia dźwiękowe. Zakres zmian ciśnienia akustycznego, rejestrowanych przez narząd słuchu zawiera się w granicach od 20 μPa do $20 \cdot 10^7$ μPa . Ze względu na bardzo dużą rozpiętość wartości ciśnienia akustycznego a także na fakt, iż na naszą percepcję oddziałuje nie arytmetyczna różnica pomiędzy porównywanymi wielkościami bodźców, lecz stosunek porównywanych wielkości (tzw. prawo Webera-Fechnera [5, 10]), poziom ciśnienia akustycznego przedstawiany jest w skali logarytmicznej, zgodnie z zależnością

$$L_p(p) = 20\log_{10}\left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}}\right)\text{dB} \qquad (1)$$

gdzie: p_{ref} = 20 μPa – referencyjna wartość ciśnienia, p_{rms} $[Pa]$ – wartość RMS ciśnienia (ang. *root-mean-square pressure*).

W dalszej części artykułu przedstawiono sformułowanie sprzężonego zagadnienia mechaniczno-akustycznego, którego rozwiązanie – przy wykorzystaniu MES – pozwala na symulacyjne określenie poziomu ciśnienia akustycznego w dowolnych punkcie otoczenia konstrukcji nawierzchni szynowej.

Sformułowanie matematyczne

Równania sprężystego ośrodka ciągłego

Równania ośrodka ciągłego formułowane są w opisie Lagrange'a (materialnym). Przy założeniu małych przemieszczeń oraz małych prędkości równania ruchu w obszarze Ω_t^s w przypadku ośrodka ciągłego (prawo zachowania pędu) upraszczają się do postaci [7, 15]:

$$\rho\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_i \qquad (2)$$

gdzie obowiązuje konwencja sumacyjna Einsteina. W równaniu (2) σ_{ij} są składowymi tensora naprężenia $\boldsymbol{\sigma}$, u_i składowymi wektora przemieszczenia cząstki $\mathbf{u}$, ρ gęstością materiału, g_i składowymi wektora przyspieszenia grawitacyjnego $\mathbf{g}$. Składowe f_i reprezentują dodatkowe zewnętrzne

siły masowe, których występowanie spowodowane jest sprzężeniem z innym modelem fizycznym. Składowe wektora przemieszczenia cząsteczki u_i są funkcjami czasu i położenia. Równanie (2) należy uzupełnić o warunki początkowe oraz następujące warunki brzegowe:

$$\begin{aligned} u_i &= \overline{u}_i \qquad \text{na} \quad \Gamma_u^t \\ \sigma_{ij} n_j &= h_i \qquad \text{na} \quad \Gamma_h^t \end{aligned} \tag{3}$$

gdzie h_i są składowymi wektora sił powierzchniowych, które mogą być również wynikiem oddziaływania płynów lub pól elektrostatycznych i magnetycznych.

Ruch ciała musi ponadto spełniać równanie ciągłości (prawo zachowania masy):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{4}$$

gdzie v_i są składowymi wektora prędkości cząstki **v**. Równania konstytutywne liniowego ośrodka anizotropowego można zapisać w postaci:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \tag{5}$$

gdzie C_{ijkl} są składowymi tensora stałych materiałowych **C** (tensor 4-go rzędu), ε_{ij} są składowymi tensora odkształcenia **ε** (tensor 2-go rzędu). W przypadku izotropowego materiału liniowo sprężystego związek (5) upraszcza się do postaci:

$$\sigma_{ij} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + \frac{E}{(1+\nu)} \tag{6}$$

gdzie stałe materiałowe E i ν są nazywane odpowiednio modułem Younga oraz współczynnikiem Poissona.

Przy założeniu małych przemieszczeń, składowe stanu odkształcenia obliczamy ze wzoru:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{7}$$

Równania akustyki

Równania mechaniki płynów formułowane są w opisie Eulera (przestrzennym). Prawa zachowania masy, pędu oraz energii w obszarze Ω_t^f można wyrazić następująco [1, 13, 15]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial (\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_i \tag{9}$$

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i e)}{\partial x_i} = \mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \sigma_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa_f \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \rho q \tag{10}$$

gdzie e jest energią wewnętrzną na jednostkę objętości, μ lepkością dynamiczną, q zewnętrznym źródłem ciepła a κ_f współczynnikiem przewodnictwa cieplnego.

Związek konstytutywny ściśliwego płynu Newtonowskiego jest następujący [13]:

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - p \delta_{ij} \tag{11}$$

W przypadku płynu nielepkiego ($\mu = 0$) równania (9) i (10) upraszczają się do postaci równań Eulera [13]:

$$\frac{\partial (\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + f_i \tag{12}$$

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i e)}{\partial x_i} = -p \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \tag{13}$$

Równania akustyczne są szczególnym przypadkiem równań mechaniki płynów. Podstawowe założenia w przypadku medium akustycznego są następujące [13, 15]:

- ośrodek jest ściśliwy,
- ośrodek nie wykazuje właściwości lepkich (zerowa lepkość),
- nie występują siły masowe ($g_i = 0$, $f_i = 0$),
- ośrodek znajduje się w spoczynku (średnia prędkość przepływu jest zerowa),
- ośrodek jest jednorodny,
- zmiany ciśnienia i gęstości płynu są małe,
- ośrodek jest gazem idealnym oraz proces jest adiabatyczny.

Przyjmując powyższe założenia równanie ciągłości (8) można zapisać następująco:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \tag{14}$$

Równanie równowagi (12) (prawo zachowania pędu) upraszcza się natomiast do postaci:

$$\rho_0 \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \tag{15}$$

W programie Abaqus do równania równowagi wprowadza się dodatkowy człon związany z uwzględnieniem jednorodnego, izotropowego tłumienia objętościowego płynu (ang. *volumetric drag*), tak, że równanie (15) przyjmuje postać [3]:

$$\rho_0 \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x_i} + \gamma v_i - \rho g_i = 0 \tag{16}$$

gdzie γ jest objętościowym współczynnikiem oporu.

Zjawiska akustyczne są procesami adiabatycznymi, gdzie obowiązuje nieliniowa relacja pomiędzy ciśnieniem a gęstością płynu (gazu). Zakładając, że zmiany ciśnienia oraz gęstości są małe, tzn. d p_0 / d $\rho_0 = p / \rho$, otrzymujemy relację:

$$p = K_f \frac{\rho}{\rho_0} \tag{17}$$

gdzie K_f jest modułem ściśliwości objętościowej. Po podstawieniu związku (17) do równania ciągłości (prawa zachowania masy) otrzymujemy związek konstytutywny ośrodka akustycznego:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + K_f \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \tag{18}$$

co prowadzi do relacji:

$$p = -K_f \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \tag{19}$$

Równania (14) i (15) należy uzupełnić o odpowiednie warunki brzegowe [15]:

$$\begin{aligned} v_i &= \overline{v}_i \qquad \text{na} \quad \Gamma_u^f \\ \sigma_{ij} n_j &= h_i \qquad \text{na} \quad \Gamma_h^f \end{aligned} \tag{20}$$

oraz warunki początkowe:

$$v_i(0) = {}^0v_i \quad \text{w} \quad \Omega^f$$
$$p(0) = {}^0p \quad \text{w} \quad \Omega^f \qquad (21)$$

Sprzężenie mechaniczno – akustyczne

Układ równań równowagi mechaniki ośrodków ciągłych metody elementów skończonych można zapisać następująco [15]:

$$\mathbf{M}_e^s\ddot{\mathbf{u}}_e + \mathbf{C}_e^s\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_e^s\mathbf{u}_e = \mathbf{F}_e^s + \mathbf{F}_e^{pr} \qquad (22)$$

gdzie $\mathbf{M}_e^s$ – macierz mas elementu skończonego ośrodka ciągłego, $\mathbf{C}_e^s$ – macierz tłumienia elementu ośrodka ciągłego, $\mathbf{K}_e^s$ – macierz sztywności elementu ośrodka ciągłego, $\mathbf{F}_e^s$ – wektor obciążeń elementu ośrodka ciągłego, $\mathbf{F}_e^{pr}$ – wektor sił elementu związany z ciśnieniem od płynów na powierzchni interfejsu Γ_0. Interfejs rozumiany jest jako wspólna powierzchnia kontaktu obszaru ciała stałego (ang.: *solid domain*) i płynu (ang.: *fluid domain*). Wektor $\mathbf{F}_e^{pr}$ można otrzymać poprzez całkowanie ciśnienia po powierzchni interfejsu [15]:

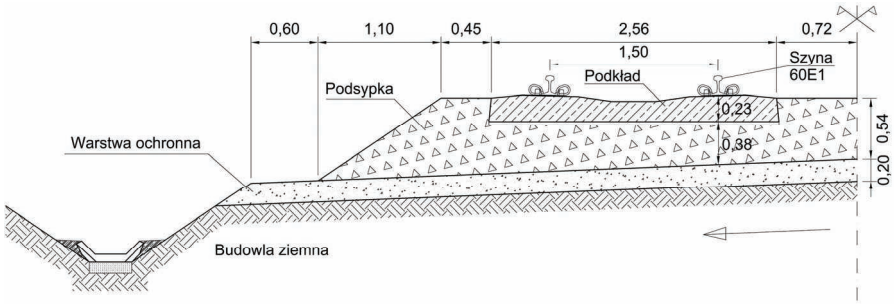
$$\mathbf{F}_e^{pr} = \mathbf{R}_e\mathbf{p}_e \qquad (23)$$

gdzie $\mathbf{p}_e$ – wektor ciśnień, $\mathbf{R}_e$ – macierz transformacji

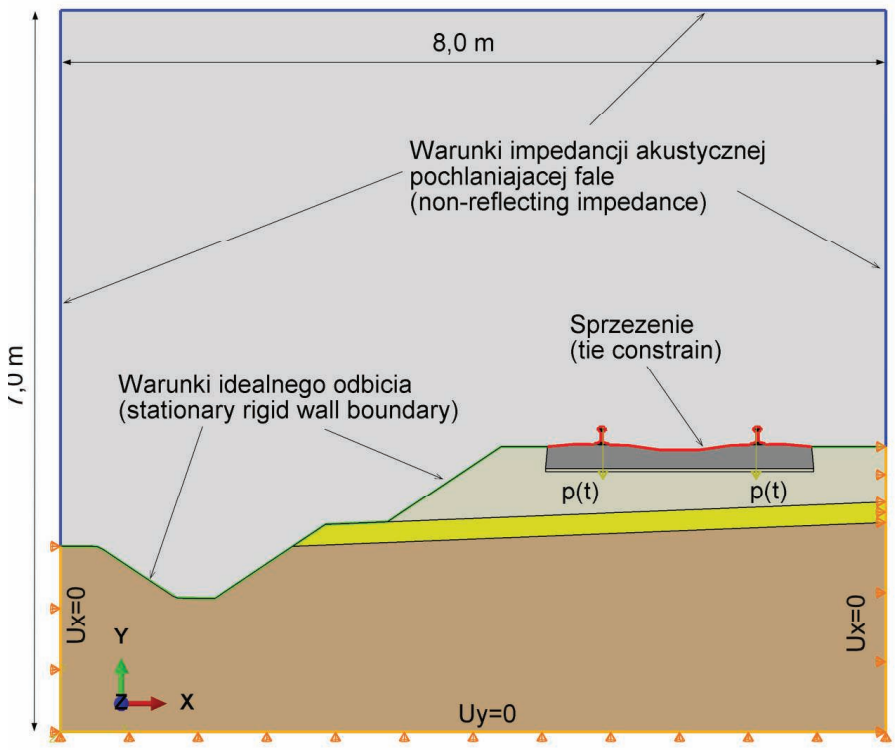
$$R_e = \int_{\Gamma_0} \mathbf{N}_u\mathbf{n}(\mathbf{N}_p)^T \,\mathrm{d}\Gamma \qquad (24)$$

o składowych

$$[R_e]_{ai,b} = \int_{\Gamma_0} \mathbf{N}_u^a\mathbf{n}_i\mathbf{N}_p^b \,\mathrm{d}\Gamma \qquad (25)$$



***1**. Konstrukcja nawierzchni kolejowej przyjęta do analizy MES; wymiary w metrach*



***2**. Wymiary, warunki brzegowe oraz obciążenia w modelu MES*

gdzie $\mathbf{N}_u^a$ – funkcja kształtu przemieszczeń w węźle *a* elementu ośrodka ciągłego, $\mathbf{n}_i$ – wersor normalny na interfejsie, na którym zachodzi sprężenie na i-tym elemencie płynu (ośrodka akustycznego), $\mathbf{N}_p^b$ – funkcja kształtu ciśnienia akustycznego w węźle *b* elementu akustycznego. Podstawiając równanie (23) do (22) otrzymujemy:

$$\mathbf{M}_e^s\ddot{\mathbf{u}}_e + \mathbf{C}_e^s\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_e^s\mathbf{u}_e - \mathbf{R}_e\mathbf{p}_e = \mathbf{F}_e^s \qquad (26)$$

Układ równań metody elementów skończonych ośrodka akustycznego można przedstawić następująco [15]:

$$\mathbf{M}_e^f\ddot{\mathbf{p}}_e + \mathbf{C}_e^f\dot{\mathbf{p}}_e + \mathbf{K}_e^f\mathbf{p}_e + \rho_0(\mathbf{R}_e)^T\ddot{\mathbf{u}}_e = \mathbf{0} \qquad (27)$$

gdzie $\mathbf{M}_e^f$ – macierz mas elementu skończonego ośrodka akustycznego, $\mathbf{C}_e^f$ – macierz tłumienia elementu ośrodka akustycznego, $\mathbf{K}_e^f$ – macierz sztywności elementu ośrodka akustycznego, $\mathbf{R}_e$ – macierz transformacji (24).

Wykorzystując równania (26) oraz (27), układ równań sprzężonego zagadnienia akustycznego można zapisać w postaci macierzowej [15]:

$$\begin{bmatrix}\mathbf{M}^s & \mathbf{0}\\ \mathbf{M}^{fs} & \mathbf{M}^s\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{\mathbf{u}}\\ \ddot{\mathbf{p}}\end{Bmatrix} + \begin{bmatrix}\mathbf{C}^s & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \mathbf{C}^f\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{\mathbf{u}}\\ \dot{\mathbf{p}}\end{Bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix}\mathbf{K}^s & \mathbf{K}^{fs}\\ \mathbf{0} & \mathbf{K}^f\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\mathbf{u}\\ \mathbf{p}\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}\mathbf{F}^s\\ \mathbf{0}\end{Bmatrix} \qquad (28)$$

gdzie macierz mas sprzężonego zagadnienia akustyczno-strukturalnego:

$$\mathbf{M}^{fs} = \sum_e \mathbf{M}_e^{fs} \qquad \mathbf{M}_e^{fs} = \rho_0\mathbf{R}_e^T \qquad (29)$$

oraz macierz sztywności sprzężonego zagadnienia akustyczno-strukturalnego:

$$\mathbf{K}^{fs} = \sum_e \mathbf{K}_e^{fs} \qquad \mathbf{K}_e^{fs} = -\mathbf{R}_e \qquad (30)$$

Równania (28) mogą zostać rozwiązane bezpośrednio przy ciśnieniu akustycznym oraz przemieszczeniach aktualizowanych równocześnie.

Równanie to może również zostać rozwiązane zakładają słabą postać sprzężenia, w której ciśnienie akustyczne jest traktowane jako obciążenie ośrodka ciągłego, a przemieszczenia oraz przyspieszenia stanowią wymuszenie ośrodka akustycznego [15].

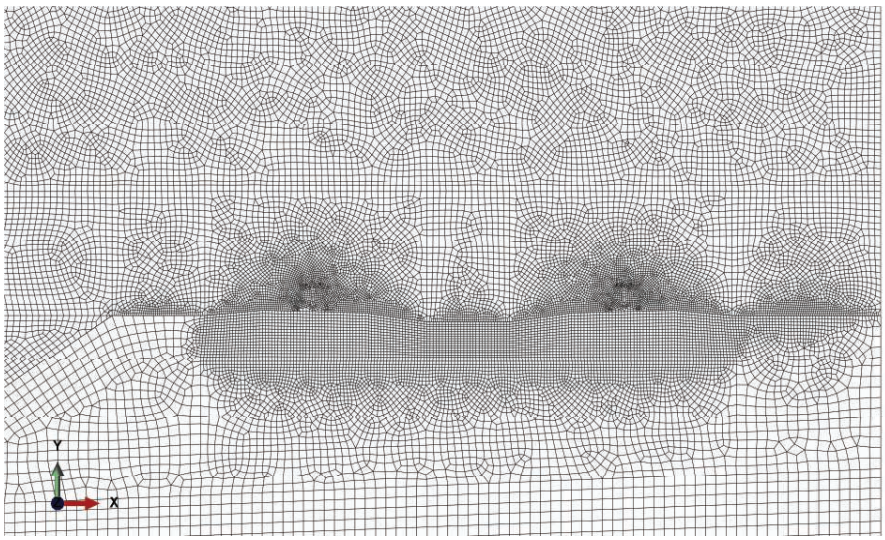
Opis modelu MES

W celu oszacowania propagacji fali akustycznej wywołanej przejazdem koła pociągu zbudowano model numeryczny konstrukcji kolejowej nawierzchni podsypkowej przedstawionej na rysunku **1**. Zagadnienie modelowano w płaskim stanie odkształcenia. W obliczeniach wykorzystano program MES Abaqus.

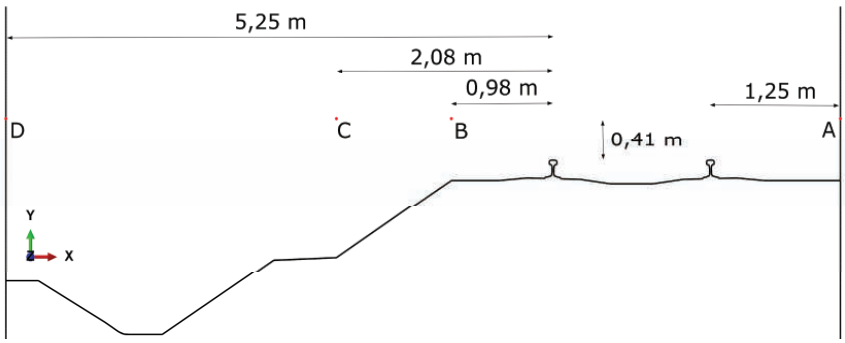
Geometrię modelu numerycznego oraz przyjęte warunki brzegowe przedstawiono na rysunku **2**. Z uwagi na fakt, że nie modelowano tłumienia w ośrodku ciągłym, sprzężenie pomiędzy medium akustycznym a konstrukcją nawierzchni przyjęto tylko na brzegu podkładu kolejowego oraz szyn (kolor czerwony na rys. **2**). Na pozostałej części brzegu przyjęto warunki idealnego odbicia fali akustycznej. Warunki takie odzwierciedlają najbardziej niekorzystny przypadek (otrzymujemy zawyżone wartości poziomu ciśnienia akustycznego), co może odpowiadać na przykład sytuacji oblodzenia tłucznia. Na krawędzi medium akustycznego założono warunki pochłaniające fale akustyczne, będące alternatywą dla nieskończonych akustycznych elementów skończonych. Model MES podzielono na 67 330 elementów skończonych akustycznych i konstrukcyjnych. Założono elementy akustyczne ośmio-węzłowe z interpolacją kwadratową oraz elementy konstrukcyjne w płaskim stanie odkształcenia cztero-węzłowe z interpolacją liniową oraz całkowaniem zredukowanym. Na rysunku 3 przedstawiono szczegół przyjętej siatki MES w okolicy szyn i

Tab. 1. *Przyjęte parametry materiałowe poszczególnych elementów modelu MES*

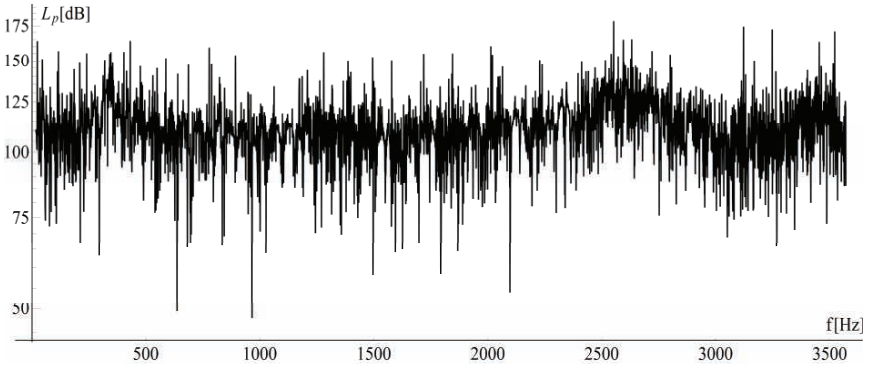
Element modelu	Materiał	Gęstość	Moduł Younga	Współczynnik Poissona	Moduł sprężystości objętościowej
		ρ [kg/m^3]	E [MPa]	v [-]	K [MPa]
Powietrze	Powietrze	1,247	---	---	0,100
Szyna 60E1	Stal	7850	200 000	0,30	166 667
Podpora szynowa	Beton	2500	35 000	0,23	21 605
Podsypka	Tłuczeń kamienny	2000	300	0,20	167
Warstwa ochronna	Pospółka	2000	150	0,20	83
Budowla ziemna	Grunt spoisty	2000	35	0,30	29



3*. Siatka MES w okolicy szyn*



4*. Lokalizacja punktów, z których odczytywano wartości ciśnienia akustycznego*



5*. Poziom ciśnienia akustycznego w punkcie pomiarowym C w zależności od częstotliwości wymuszenia*

podkładów.

Przyjęte parametry materiałowe poszczególnych warstw konstrukcji oraz medium akustycznego przedstawiono w tabeli **1**. W przypadku elementów konstrukcyjnych przyjęto liniowo-sprężysty model materiału.

Przeprowadzono analizę harmoniczną w dziedzinie częstotliwości. Obciążenie przyjęto w postaci pary sił skupionych sinusoidalnie zmiennych (analiza harmoniczna) $q(t) = A \sin \omega t$ gdzie $\omega = 2\pi f$, o amplitudzie równej:

$A = 22{,}5\ t / 2 = 11250\ kg \cdot 9{,}81\ m/s^2 = 110{,}362\ kN$

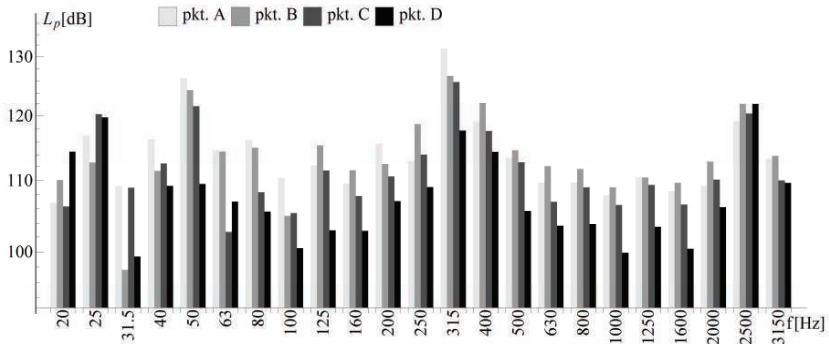
jak dla wagonów o obciążeniu 22,5 t/oś według [6]. Obciążenia przykładano do główki szyny (por. rys. 2) w punktach przesuniętych nieznacznie względem osi symetrii szyny w stronę środka torowiska. Badano zakres częstotliwości wymuszenia od 17 do 3570 Hz.

Wyniki obliczeń numerycznych

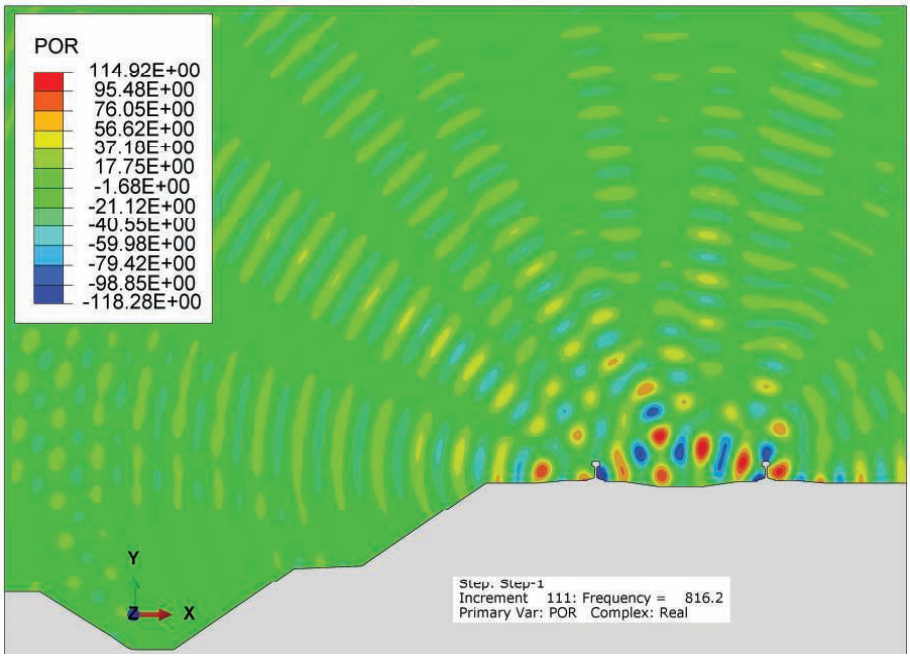
Badano zależność amplitudy ciśnienia akustycznego w wybranych punktach modelu od częstotliwości wymuszenia. Lokalizację punktów A ,B, C i D przedstawiono na rysunku **4**.

Na rysunku **5** przedstawiono wartości poziomu ciśnienia akustycznego L_p w punkcie C dla analizowanego zakresu wymuszenia od 17 do 3570 Hz. Na rysunku **6** zestawiono wartości poziomów ciśnień akustycznych w punktach A, B, C i D w pasmach 1/3 oktawowych.

Na rysunku **7** przedstawiono przykładową mapę warstwicową stanu ustalonego ciśnienia akustycznego (Pa) przy częstotliwości wymuszenia 816 Hz.



***6**. Poziomy ciśnień akustycznych w punktach A, B, C i D w pasmach 1/3 oktawowych*



***7**. Wykres warstwicowy stanu ustalonego ciśnienia akustycznego [Pa] przy częstotliwości wymuszenia 816,2 Hz*

Podsumowanie

Blisko 10 mln mieszkańców europejskich aglomeracji (miast powyżej 100 tys. mieszkańców) zagrożonych jest hałasem kolejowym o wartości LDWN ≥55dB [14]. Problem ten dotyczy również mieszkańców zamieszkałych wzdłuż linii kolejowych poza aglomeracjami. Skala zjawiska, sprawia, że wciąż poszukiwane są rozwiązania, które mogłyby wpłynąć na zmniejszenie uciążliwości linii kolejowych. Jednym z takich sposobów walki z hałasem jest określenie maksymalnych poziomów hałasu wytwarzanego przez nowe (konwencjonalne) pojazdy kolejowe. Rozwiązanie to nie ma jednak zastosowania do taboru już eksploatowanego. Stąd potrzeba szukania nowych rozwiązań technologicznych mających na celu redukcję hałasu kolejowego z wykorzystaniem innowacyjnych rozwiązań w postaci tłumików torowych i tłumików przyszynowych [2].

W Polsce obecnie obowiązuje holenderska metoda według opracowania [12] z roku 1996, zwana dalej RMR [8] oraz metoda CNOSSOS-EU, która powinna obowiązywać od dnia 31 grudnia 2018 roku zgodnie z zapisami dyrektywy [4]. Dotychczas używane komercyjne oprogramowanie wraz ze stosowanymi metodami (RMR, CNOSSOS-EU), nie ma szczegółowo rozpisanych bibliotek odnośnie tychże rozwiązań, które można wykorzystać w sposób bezpośredni, do oceny hałasu w środowisku. W chwili

mini przegląd komunikacyjny

Kluczowa decyzja w sprawie budowy S3 do granicy z Czechami. Prace mogą ruszać

Andrzej Zwoliński, Gazeta Wrocławska, 25.08.2020

Prace przy budowie odcinka S3 od węzła Bolków do węzła Kamienna Góra Północ mogą się rozpocząć. Jak informuje Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Wojewoda Dolnośląski podpisał zezwolenie na budowę odcinka ekpresówki. Koszt budowy całego odcinka S3 od Bolkowa do granicy z Czechami to blisko 1 mld 540 mln złotych. Decyzja umożliwia przejęcie nieruchomości pod budowaną drogę i rozpoczęcie procedury odszkodowawczej, a wykonawcy rozpoczęcie prac po przekazaniu placu budowy. Dziś droga S3 kończy w środku pola, tuż za węzłem Bolków. Od okolic Bolkowa do granicy z Czechami trzeba wybudować łącznie około 31 kilometrów trasy ekspresowej S3 (...).

Nici z jednej z największych inwestycji drogowych we Wrocławiu. Unieważniono przetarg

Andrzej Zwoliński, Gazeta Wrocławska, 20.08.2020

Wstrzymano jedną z największych inwestycji drogowych planowanych w ostatnim czasie we Wrocławiu - budowę Osi Zachodniej. Powód? Konieczność unieważnienia przetargu z powodu błędów w ofercie wybranej przez Wrocławskie Inwestycje. Przypomnijmy, 22 maja Wrocławskie Inwestycje ogłosiły wybór wykonawcy Osi Zachodniej. Chodzi o drogowe połączenie obwodnicy Leśnicy z ul. Kosmonautów i poszerzenie jej samej, co ma rozładować korki tworzące się tam w godzinach szczytu. W przetargu wystartowało 7 firm, wybrano ofertę złożoną przez konsorcjum z liderem - Przedsiębiorstwem Budowy Dróg i Mostów Kobylarnia S.A (...). Tuż po ogłoszeniu zwycięzcy przetargu, dwa konsorcja, których oferty przepadły, zaskarżyły decyzje Wrocławskich Inwestycji do Krajowej Izby Odwoławczej. Zrobiły to Berger Bau Polska i Skanska, wskazując na błędy w wybranej ofercie (...). Przed miesiącem Krajowa Izba Odwoławcza, rozstrzygnęła spór na korzyść skarżących firm i orzekła, że postępowanie przetargowe „jest obarczone niemożliwą do usunięcia wadą, uniemożliwiającą zawarcie umowy" (...).

Ponad 700 „unijnych" milionów na budowę ekspresówki między Lublinem a Kraśnikiem

Artur Jurkowski, Kurier Lubelski, 20.08.2020

Komisja Europejska zatwierdziła prawie 736 mln zł unijnego dofinansowania dla budowy drogi S19. Chodzi o 42-kilometrowy odcinek na odcinku od węzła Lublin Węglin do węzła Kraśnik Południe. Całkowity koszt powstania trasy to ok. 1,5 mld zł (...). Kierowcy zaczną korzystać z budowanych fragmentów trasy w 2021 r. S19 to część transeuropejskiej drogi Via Carpatia, która przebiegać będzie z Litwy do Grecji (...).

obecnej używane są najczęściej jedynie modyfikacje uwzględniające chropowatość szyny, rodzaj podkładek (miękkie, średnie, twarde), rodzaj podkładów.

Omówiona w artykule metodyka oceny hałasu od ruchu kolejowego na podstawie analizy numerycznej MES przeprowadzonej w programie Abaqus jest próbą dokładniejszego opisania zjawiska zmiany emisji hałasu od linii kolejowej po zastosowaniu innowacyjnych rozwiązań. Przygotowany model zostanie w dalszych pracach zweryfikowany na podstawie pomiarów hałasu oraz – po ewentualnych modyfikacjach – zastosowany do oceny przyjętych rozwiązań technologicznych. Tak rozpoznane zagadnienie w dalszej kolejności może zostać zaimplementowane do już istniejących metodyk służących do oceny emisji hałasu w środowisku.

Podziękowania

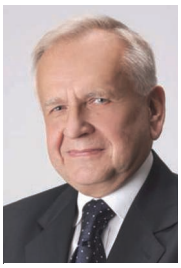
Publikacja powstała w ramach projektu „Innowacyjne rozwiązania w zakresie ochrony ludzi i środowiska przed hałasem od ruchu kolejowego". Projekt jest współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój oraz przez PKP PLK S.A. w ramach wspólnego przedsięwzięcia BRIK. ◄

Materiały źródłowe

[1] Bukowski J., Mechanika płynów, PWN, Warszawa, 1959
[2] Brzeziński K., Kraśkiewicz C. i in., Tłumiki torowe i przyszynowe jako innowacyjne rozwiązania dla ochrony ludzi i środowiska przed hałasem od ruchu kolejowego, Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP Oddział w Krakowie, 2018, 1, 33-46
[3] Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User's Manual Ver. 6.16, Dassault Systèmes, 2016
[4] Dyrektywa Komisji UE 2015/996 z dnia 19 maja 2015 r. ustanawiająca wspólne metody oceny hałasu zgodnie z dyrektywą 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady
[5] Engel Z., Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993
[6] PN-EN 15528: 2015-12, Kolejnictwo - Klasyfikacja linii w odniesieniu do oddziaływań pomiędzy obciążeniami granicznymi pojazdów szynowych a infrastrukturą, 2015
[7] Fung Y. C. Podstawy mechaniki ciała stałego, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1965
[8] Kucharski R. i in. Wytyczne do sporządzania map akustycznych, GIOŚ, IOŚ-PIB, Warszawa, 2016
[9] Lipowczan A., Podstawy pomiarów hałasu, Główny Instytut Górnictwa i Liga Walki z Hałasem, Warszawa-Katowice, 1987
[10] Makarewicz R. Dźwięki i fale, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań, 2017.
[11] Nurzyński J. Akustyka w budownictwie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2018
[12] Reken - en Meetvoorschrift Railverkeerslawaai '96, Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 20.11.1996
[13] Souli M., Benson D. J. (Ed.), Arbitrary Lagrangian-Eulerian and Fluid-Structure Interaction, WILEY, 2010
[14] www.eea.europa.eu/airs/2018/environment-and-health/environmental-noise, 2019
[15] Zhang Q., Song C. Multiphysics Modeling. Numerical Methods and Engineering Applications, Elsevier, 2016

Drony w diagnostyce wizyjnej uszkodzeń szyn kolejowych

Drones in visual diagnostics of defects in railway rails



Piotr Lesiak

Dr hab. inż.

Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie, Wydział Transportu i Informatyki

piotr.lesiak@wsei.lublin.pl

Streszczenie: W artykule omówiono możliwości zastosowania dronów w diagnostyce wizyjnej toru kolejowe-go. Pokazano przykłady badań rozległych wad w główce szyny, wraz z metodą przetwarzania i analizy obrazów. Wymieniono zalety i wady takich badań. Wskazano propozycje kierunków ich wdrażania przez PKP PLK S.A.

Słowa kluczowe: *Drony; Szyny kolejowe; Badania wizyjne; Bezpieczeństwo*

Abstract: The paper discusses the possibilities of the use of drones in the visual diagnostics of the rail-way track. Examples of extensive defects in the railhead are shown, along with methods of image processing and analysis. Pros and cons of such a research were presented. Suggested directions for their implementation at PKP PLK S.A. were presented.

Keywords: *Drones; Railway rails; Vision research; Safety*

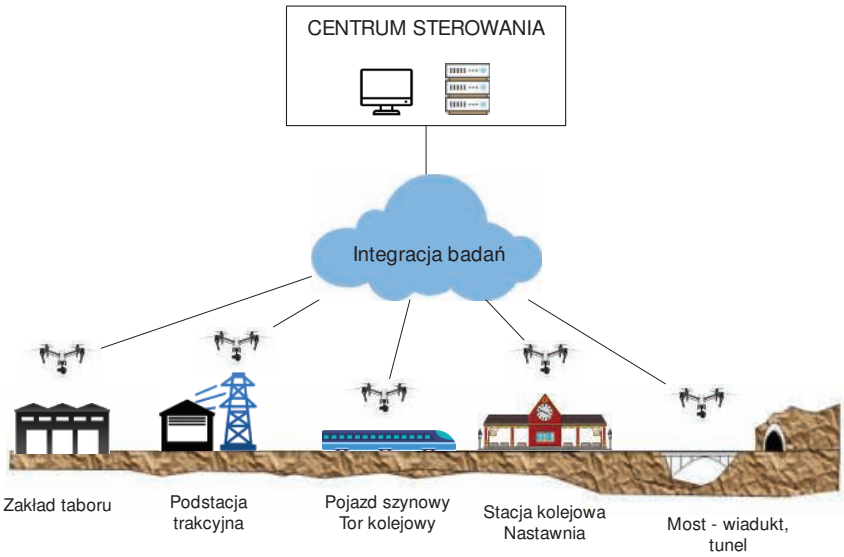
Wstęp

Coraz większa liczba zarządców światowych sieci kolejowych dąży do stworzenia innowacyjnej „cyfrowej kolei", czyli dokładnego i dynamicznego systemu, służącego między innymi do identyfikacji faktycznych i potencjalnych uszkodzeń infrastruktury kolejowej. Polega to na pozyskiwaniu danych o najwyższej jakości, dzięki czemu wspomagane są decyzje podejmowane podczas planowania i ustalania priorytetów w zakresie rozwoju, utrzymania, napraw i odnowy kolei [8].

Narzędziem wspomagającym z dużym powodzeniem te zadania stały się drony, które mogą kontrolować znaczące odcinki linii kolejowych w czasie rzeczywistym. Zwane są też angielskim terminem UAV - ang. *Unmanned Aerial Vehicle*, czyli *Bezzałogowym Statkiem Powietrznym* (BSP). Mogą one wykonywać badania wizyjne infrastruktury kolejowej w zasięgu wzroku, VLOS - ang. *Visual Line of Sight*, lub też poza zasięgiem wzroku (sterowanie za pomocą obrazu przesyłanego z drona), BVLOS – ang. *Beyond Visual Line of Sight* [24].

Na rynku dostępne są drony, dające możliwość mocowania najwyższej jakości sprzętu do obrazowania oraz różnych sensorów, pozwalających rejestrować dane nie tylko o walorach użytkowych, ale również prowadzić prace o jakości badań naukowych. Oprócz kamer wizyjnych, standardem są też kamery wielospektralne, termowizyjne, czujniki temperatury, laserowe, gazu, itp. [22].

Pomiar dokonywany jest z dokładnością od ułamków do pojedynczych milimetrów. Po zarejestrowaniu, nakładające się obrazy lotnicze są przetwarzane w oprogramowaniu do fotogra-



1. *Referencyjna architektura nadzoru infrastruktury kolejowej oparta na dronach [6], [22]*

metrii w celu wytworzenia dokładnej chmury punktów 3D. Poprzez porównanie z chmurami punktów odniesienia z poprzednich inspekcji, można monitorować zmiany infrastruktury.
Dzięki referencyjnej architekturze nadzoru kolei opartej na dronach, można dokonywać szybkiego wykrywania uszkodzeń i zapobiegania wypadkom, rys. **1**. Zmniejsza się też znacząco nakład siły roboczej, wprowadza oszczędność kosztów i czasu badań oraz zapewnia natychmiastowy dostęp do danych.

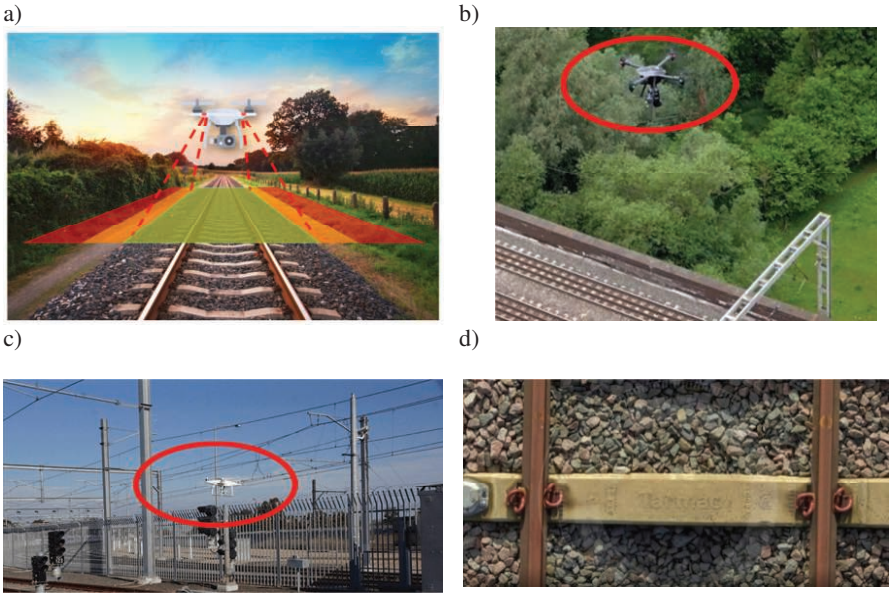
Rozważając przydatność dronów, jako narzędzi użytecznych na kolei, trzeba wziąć pod uwagę praktyczne możliwości techniczne w poszczególnych grupach zastosowań od najprostszych jak monitorowanie wtargnięć, odstraszanie intruzów (złodziei), wandalizm – projekt PKP Cargo [5], poprzez bardziej wyrafinowane, które to na przykład obejmują: monitorowanie i inspekcję infrastruktury takiej jak mosty i wiadukty (wykrywanie usterek jak ubytki, pęknięcia, deformacje, korozja konstrukcji oraz inteligentna konserwacja) [7], [14], [16], tunele (skrajnia) [18], [26], usterki urządzeń sterowania ruchem kolejowym [9], [24], i nawierzchni linii tramwajowych i kolejowych (deformacje i wady powierzchniowe szyn, pęknięcia podkładów, kontrola ogrzewania rozjazdów, konserwacja zwrotnic, ubytki w konstrukcji toru, roślinność) [1], [6], [15], [20], [21], [23], jak również uszkodzenia trakcji kolejowej (słupy i konstrukcje kratowe, izolatory, przewody, stacje transformatorowe), budynków kolejowych (stan techniczny, efektywność energetyczna, katastrofy budowlane), mapowanie inwestycji kolejowych (obrazy geodezyjne wysokiej rozdzielczości) - umowa z 2018 roku pomiędzy PKP PLK S.A. a firmą Fotoraporty Sp. z o.o.

Należy podkreślić, że rynek dronów w ostatniej dekadzie rośnie wykładniczo w skali światowej, przy czym w zastosowaniach kolejowych w 2019 roku wyniósł około 4 miliardów dolarów [8].
Dlatego w artykule skoncentrowano się na wykorzystaniu dronów do wspomagania inspekcji infrastruktury kolejowej, ze szczególnym uwzględnieniem wizyjnych systemów przetwarzania wad w szynach.
Światowy przegląd zastosowania dronów w inspekcji infrastruktury kolejowej oraz innowacyjne systemy wykorzystania w tym obszarze dronów autonomicznych, były przedmiotem rozważań autora w pracy [13].

Wizyjne badania toru kolejowego dronami

Standardowo, profesjonalne drony wyposażono w urządzenia umożliwiające wykonywanie niezwykle precyzyjnych zdjęć lotniczych, korzystając z kamer Ultra 4K o rozdzielczości obrazu rzędu 100 MPx, z funkcją nagrywania wideo w UHD – ang. *Ultra High Definition* o rozdzielczości 4096×2160, z różnymi prędkościami klatek i ze zmiennym systemem widzenia – pionowo w dół lub poziomo, w zależności od badanych obiektów. Np. system *Visual Intelligence* LLC [25], może badać teren torów o wymiarach 15 x 11 metrów z wysokości 21 m, z 90% zachodzeniem na siebie, przy zachowaniu prędkość 5 m/s, co przekłada się na szybkość przechwytywania wynoszącą 4 klatki na sekundę. Przy tak dużej rozdzielczości można zidentyfikować wady powierzchni tocznej główki szyn [23], oznaczenia na podkładach, jakość montażu przytwierdzeń i złączy szynowych, czy też uszkodzenia konstrukcji i powierzchni wiaduktów oraz mostów. Jest to kluczowa funkcja podczas kontroli torów kolejowych, wraz z towarzyszącą im infrastrukturą, rys. **2**.

Rozwiązanie koncepcyjne to hybrydowy dron, dowożony pociągiem na miejsce badań. Początkowo zadokowany jest na końcu jadącego pociągu (ma wówczas doładowywane akumulatory), i zmierza do podejrzanej lokalizacji uszkodzonego toru, rys. **3**.
Z pomocą GPS dron może wystartować, gdy pociąg się zbliża do docelowego obszaru i następnie przemieszcza się na określonej wysokości wzdłuż toru, rejestrując wizyjnie obszary z widocznymi wadami powierzchniowymi szyn, brakującymi łapkami przytwierdzeń szyn, czy też pękniętymi podkładami. W razie potrzeby dron może wylądować na szynie i dokonać bardziej szczegółowej jej kontroli podczas jazdy wzdłuż szyny za pomocą rekonstrukcji 3D. Po badaniach, UAS ponownie wystartuje i wyląduje w pobliżu toru czekając na następny pociąg do dokowania, rys.3. Ten hybrydowy dron ma zdolność latania i lądowania obejmującą 1- 2 km odcinka toru z prędkością 5-10 m/s [18] i [26].



***2**. Skanowanie wizyjne nawierzchni kolejowej dronem: a) poglądowa ilustracja badania [15], b) rzeczywiste badanie [4] i c) [2], d) widok podkładu (napisy)o wysokiej rozdzielczości [4], [17]*

Algorytm przetwarzania obrazów wad w szynach

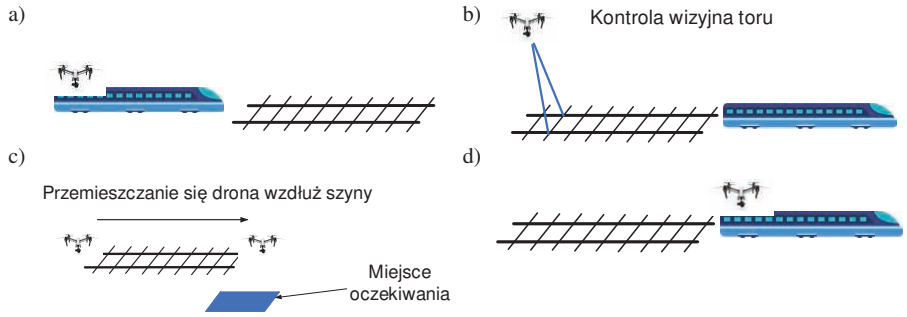
Skuteczność wizyjnej diagnostyki szyn z wykorzystaniem dronów, wymaga opracowania algorytmu przetwarzania i analizy obrazów. Podczas badań, dron powinien się cechować znaczącą odpornością na zmieniające się warunki otoczenia, co mają zapewnić jego systemy pokładowe. Toteż istotna jest tu jego dynamika i szeroko pojęta stabilność lotu na tej samej optymalnej wysokości. Do minimum powinny być wyeliminowane wibracje, gdyż mogą doprowadzić do nieostrości zdjęć [3]. Ważna tu jest także wysoka jakość optyki, a także duża dokładność lokalizacji drona, co ma zapewnić system GPS.

Jako obiekt badań eksperymentalnych, wybrano tory z małej towarowej stacji kolejowej na sieci angielskiej, o zdecydowanie złym stanie ich utrzymania. Szyny zawierają w wielu miejscach ubytki w główkach szyn, czyli wady typu *split* zarówno boczne jak i podłużne [12]. Świadczy to o dużym obciążeniu toru i zaniedbaniami w pracach utrzymaniowych.

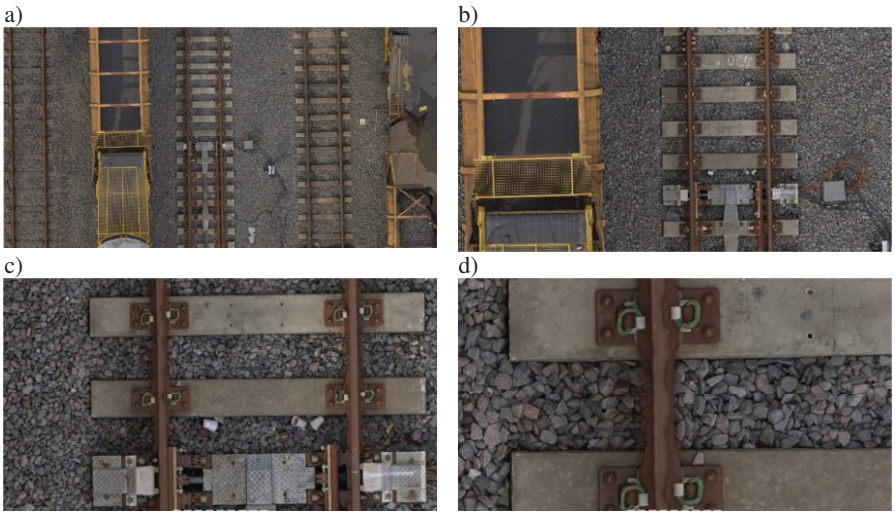
Na rys. **4** przedstawiono wynik badania tych torów, przeprowadzone przez firmę Plowman Craven, dronem Vogel R3D z optyką o rozdzielczości 100 MPx, lecącym na wysokości 25 m nad torami [17], [19]. Poszczególne zdjęcia umieszczone na rys. **4a** do **d**, stanowią kolejne powiększenia tego samego fragmentu stacji wzdłuż torów, wraz ze stojącym taborem. Nie trudno zauważyć, że pomimo uzupełnionej podsypki, stan szyn w wielu miejscach praktycznie uniemożliwia normalny ruch pojazdów szynowych.

W celu oceny tych znaczących uszkodzeń, które nie są zbyt finezyjne, żeby ich nie zauważyć na zdjęciach, autor zastosował dość klasyczny algorytm szczególnie przydatny do oceny geometrii wad typu *split*.

Po uzyskaniu obrazu z drona fragmentu toru, należy dokonać ekstrakcji szyn, czyli obrazów ich powierzchni tocznej główek, rys. **5**. Realizuje się to w procesie zawężania obrazu do pewnego analizowanego dalej fragmentu (ang. *Region of Interest* – ROI), co ma decydujący wpływ na dokładność dalszej oceny uszkodzeń. Mogą tu być wykorzystane metody gradientowe wykrywające krawędzie główki szyny, metody oparte na statystykach pierwszego rzędu badających rozkład intensywności jasności wyznaczające wartość średnią, wariancję lub entropię, a także metody oparte na statystykach drugiego rzędu tzw. miary Haralicka, lub też bazujące na wielu skalach, korzystające z piramidy Gaussa lub Laplacca oraz transformatę falkową, uważaną za najbardziej zaawansowaną [10], jak w przykładzie na rys. **6d**, **g** i **j**. Skorzystano w tym przypadku ze zdjęć drona, o największym powiększeniu i wybrano z nich kilka charakterystycznych próbek toru (szyna + podsypka) o wymiarach 400x400 pikseli, rys. **6a**, **b** i **c**.



***3**. Scenariusz hybrydowego UAS [26]: a) transport drona pociągiem do obszaru badań, b) kontrola wizyjna toru, c) bezpośrednie badanie szyn i oczekiwanie na kolejny pociąg, d) odjazd kolejnym pociągiem*

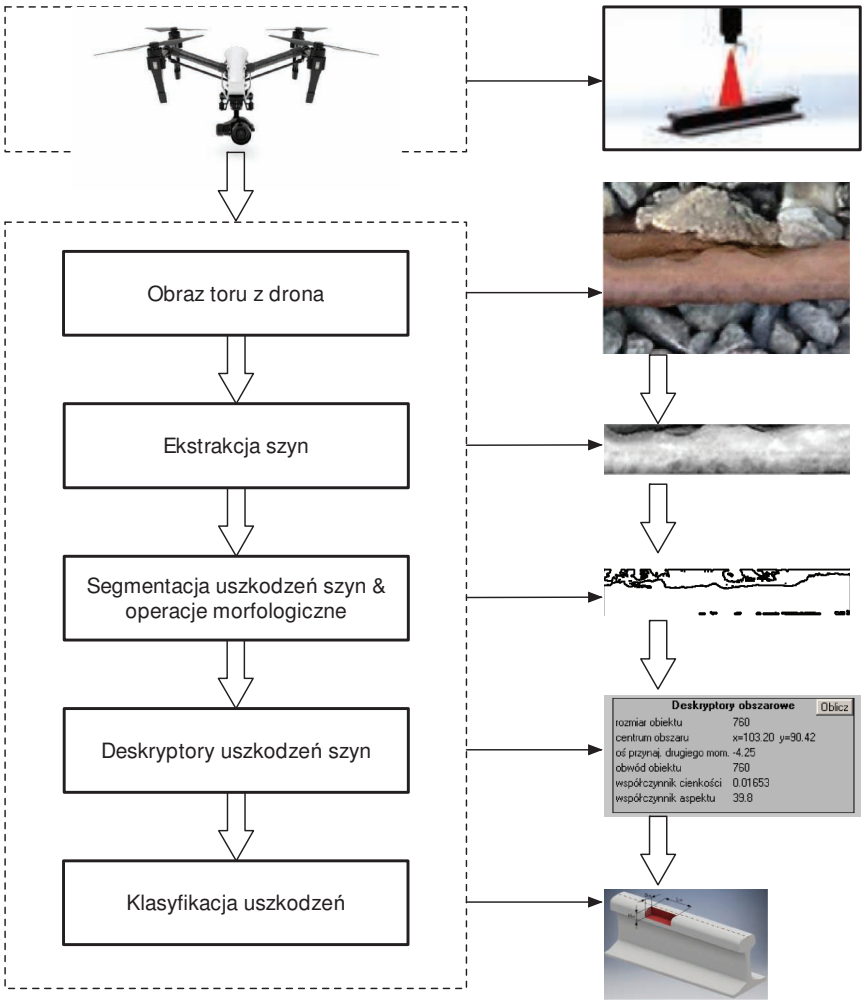


***4**. Wizualizacja badań torów stacyjnych dronem: a) obraz fragmentu toru z rozjazdem, b), c) i d) kolejne powiększenia obrazu tego fragmentu toru z uszkodzonymi szynami [17]*

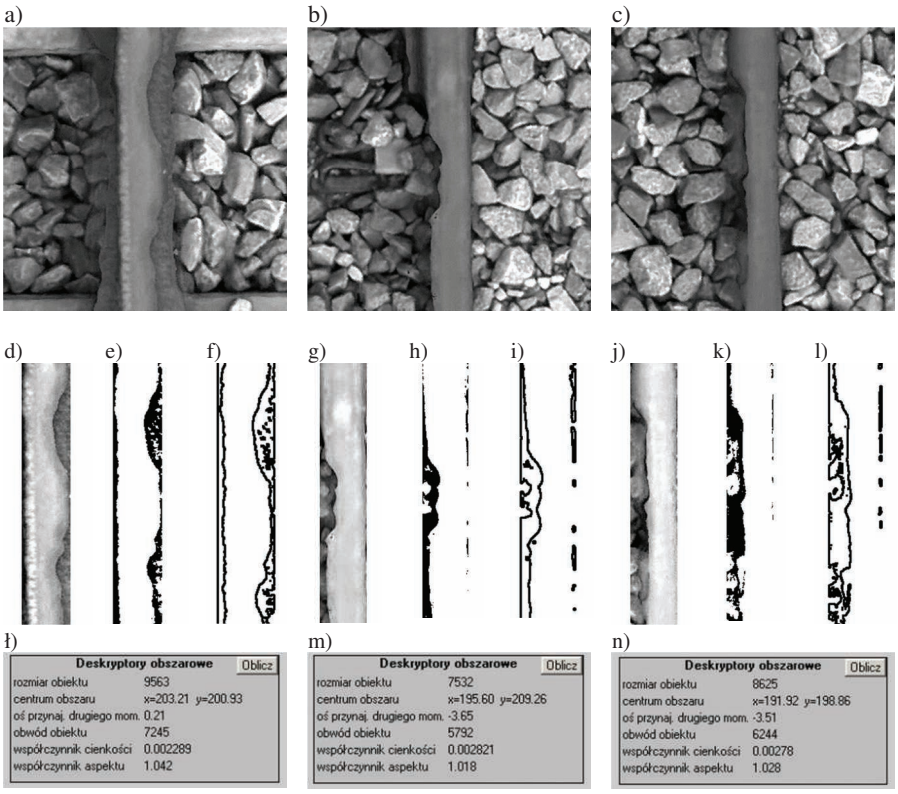
W kolejności zastosowano segmentację progową, uzyskując obraz binarny, na którym już można wykonywać operacje z wykorzystaniem operacji morfologicznych. W przypadku prowadzonych eksperymentów, autor po binaryzacji z progiem 120, zastosował funkcję *remove* i *dylatację*, rys. **6**, dzięki której wyznaczono krawędzie obszarów uszkodzeń szyn typu *split*, rys. **6f, i**, **l**.

Teraz można dokonać analizy wad, która jest kolejnym procesem następującym po wstępnym przetwarzaniu obrazów, tzw. preprocesingu, gdzie wyeliminowano z nich nieistotne lub zakłócające elementy z punktu widzenia zamierzonych celów analizy.

Prowadzi tu prosta droga do pomiarów poszukiwanych cech ilościowych analizowanych obrazów wad. Można tu wyznaczyć tzw. deskryptory obszarowe obrazów wad w szynach,



5. *Algorytm przetwarzania obrazów uszkodzeń szyn*



6. *Preprocesing i deskryptory obszarowe obrazów próbek uszkodzonych szyn*

co zdefiniowano w pracy autora [10]. Dla przetworzonych próbek z rys. **6f**, **i**, **l**, wyznaczono wartości deskryptorów jak rozmiar i obwód wady, centrum obszaru wady, oś przynajmniej drugiego momentu, współczynnik cienkości i aspektu. Największe uszkodzenie szyny w postaci wady *split*, ma próbka z rys. **6a**. Należy też zauważyć symboliczne skręcenie osi szyny, rzędu kilku stopni dla próbek **6b** i **6c**, co nie wpływa na wynik pomiaru. Ze względu na podobieństwo kształtu szyny, wartości współczynników cienkości i aspektu niewiele się różnią dla poszczególnych próbek.

Dysponując znaczącą ilością danych uzyskanych z badań, najczęściej zautomatyzowanych, można zaimplementować algorytmy ich eksploracji (ang. *data mining*), pomocne przy klasyfikacji obrazów wad w szynach (pozostaje tylko kwestia wyboru klasyfikatora wad), rys. **5**. Dalej to już interpretacja otrzymanych wyników i podjęcie na ich podstawie odpowiednich decyzji klasyfikacyjnych. Służą one do oceny diagnostycznej badanych szyn, np. na podstawie parametrów deskryptorów, co jest ostatecznym celem analizy. Zagadnienia te są przedmiotem odrębnych rozważań autora [11].

Zalety i wady badania nawierzchni kolejowej dronami

Wykorzystywanie dronów w badaniach nawierzchni kolejowej zyskuje coraz więcej zwolenników na całym świecie, o czym stanowią następujące ich zalety:

- niewielki koszt badań w porównaniu do inspekcji tradycyjnej, np. pojazdami diagnostycznymi oraz zmniejszone zatrudnienie (drony na kolei zwane są też „robotnikami"), a w przypadku zastosowania dronów autonomicznych, wyposażonych w technologie sztucznej inteligencji (AI – ang. *Artificial Intelligence*) nastąpi drastyczne ograniczenie personelu badawczego, kosztów, czasu i ryzyka,
- badanie bez wprowadzania zaję-

tości toru ani bez jakiegokolwiek ograniczenia ruchu pociągów, szczególnie w przypadku drona połączonego z systemem srk, gdyż system inspekcji miałby zakodowaną informację o lokalizacji „dom", która zwolni drona dopiero po otrzymaniu powiadomienia z systemu sygnalizacyjnego, o niezajętości toru, a jeśli system sygnalizacyjny zgłosi zbliżający się pociąg, wtedy dron zostanie przywołany do „domu",
- mobilność badań, czyli szybkie dostarczanie dronów na miejsce badań (pociągiem – rys. **3**, samochodem),
- badania torowisk trudno dostępnych, ograniczonych wysokimi skarpami, w tunelach, na mostach i wiaduktach.

Ogólnie inspekcja infrastruktury kolejowych i wspomaganie akcji ratowniczych wypadków to dwa kluczowe obszary, w których przedsiębiorstwa kolejowe mogą znacznie skorzystać z wdrożenia technologii dronów.

Jednak stosowanie dronów nad linią kolejową może się wiązać ze znacznym niebezpieczeństwem, ryzykiem i stanowi poważne wyzwania operacyjne, a mianowicie:
- jednorazowo badane są krótkie odcinki toru, gdyż czas lotu drona wynosi 20 – 30 minut i może się to przekładać na problemy powrotu „do domu" w przypadku jakichkolwiek zakłóceń,
- istnieją pewne zagrożenia satelitarnego systemu pozycjonowania GPS – ang. *Global Positioning System*, spowodowanego środowiskiem, jak mosty, wiadukty, wysokie drzewa i tym podobne przeszkody ograniczające widok nieba, ponadto stacje przekaźnikowe BTS (ang. *Base Transceiver Station*) stosowane w systemach łączności bezprzewodowej, w tym GSM, wyposażonych w anteny fal elektromagnetycznych, z reguły na wysokim maszcie oraz tzw. burze słoneczne, czyli nagłe i intensywne zmiany pola magnetycznego Ziemi,
- podczas badania w przestrzeniach zamkniętych (tunelach), trzeba się liczyć z silnymi przepływami powietrza, które należy uwzględnić,
- większość dronów nie toleruje zderzeń fizycznych, dlatego należy odpowiednio zarządzać ryzykiem kolizji, aby uniknąć szkód zarówno po stronie dronów, jak i infrastruktury kolejowej,
- lot poniżej linii trakcyjnej pod napięciem może powodować zakłócenia pracy kompasu na pokładzie dronów i ryzyko kolizji z taborem,
- zwiększa się także ryzyko kolizji podczas obsługi dronów poza wizualną linią wzroku (BVLOS), gdyż awaria kamery lub utrata łącza wideo zmusza operatora do kontroli wzrokowej i manewrowanie, które może być trudne, a czasem nawet niemożliwe, w gąszczu obiektów kolejowych.

Dlatego światowe ośrodki naukowe we współpracy z zarządcami sieci kolejowych, badają wyjątkowe wyzwania związane ze stosowaniem dronów w operacjach do inspekcji i utrzymania infrastruktury kolejowej. Badania te obejmują gromadzenie wiedzy na temat doświadczeń i obaw operatorów kolejowych i innych osób pracujących w tym środowisku. Oczekuje się, że wyniki badań pomogą sformułować wymogi bezpieczeństwa dla bezzałogowych statków powietrznych na terenach kolejowych oraz do analizy obowiązujących przepisów i procedur regulujących ich użytkowanie.

Wnioski

Prognozy wzrostu rynku dronów wskazują na ogromny potencjał w zakresie wykorzystania ich możliwości komercyjnych również w zakresie badań i zarządzania na kolei.

Warto też wskazać możliwości wdrażania przez PKP PLK S.A. dronów do inspekcji infrastruktury kolejowej. Zdaniem autora pole działania jest tu duże, a wybrane propozycje to:
- trakcja elektryczna, w tym inspekcja stanu technicznego konstrukcji stalowych (deformacje, korozja), przewodów trakcyjnych jak również badania kontaktowe z pantografem (w obrębie słupów), badania termowizyjne izolatorów (upływność elektryczna),
- wiadukty i mosty kolejowe, o różnych konstrukcjach (dynamika przemieszczeń), uszkodzenia szczególnie w miejscach trudnodostępnych,
- tor kolejowy – inwentaryzacja i akwizycja stanu technicznego (podkłady, przytwierdzenia, złącza szyn), zwrotnice i rozjazdy (dynamika, geometria, ogrzewanie - termowizja), skrajnia (również w tunelach),
- osuwające się skarpy i nasypy, drzewa zagrażające linii, zarastająca torowiska roślinność (wraz z opryskami),
- stacje (budynki, nastawnie, posterunki ruchu), perony (wiaty), urządzeń sterowania ruchem kolejowym.◀

Materiały źródłowe

[1] Banić M., Miltenović A., Pavlović M., Ćirić I.: Intelligent Machine Vision Based Railway Infrastructure Inspection and Monitoring Using UAV. Facta Universitatis, Se-ries:
Mechanical Engineering Vol. 17, No 3, 2019, s. 357 – 364.
[2] Both E.: Remote track inspections using drones. Infrastructure, 14 June 2019, https://infrastructure-magazine.com.au/2019/06/14/remote-track-inspections-using-drones/, dostęp: 18.05.2020.
[3] Debevec R.: A Smart UAV Platform for Railroad Inspection. Electronic Theses and
Dissertations. B.S. University of Central Florida, 2019, 54 s.
[4] Drone-based rail surveys are a 'game changer'. CIOB, 14 August 2017, http://www.construction-managermagazine.com/technology/drone-based-system-game-changer-rail-surveying/, dostęp: 18.05.2020.

[5] Drony z termowizją chronią pociągi PKP Cargo przed kradzieżami. Rynek Kolejowy, 13 styczeń 2018, https://www.rynek-kolejowy.pl/mobile/drony-z-termowizja-chronia-pociagi-pkp-cargo-przed-kradziezami-85224.html, dostęp: 18.05.2020.

[6] Flammini F., Naddei R., Pragliola C., Smarra G.: Railway Infrastructure Monitoring by Drones. International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship
Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Confer-ence (ESARS-ITEC), November 2016, 6 s.

[7] Garg P., Ozdagli A., Moreu F.: Railroad Bridge Inspections for Maintenance and Replacement Prioritization Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Laser Scan--ning Capabilities. TRB's Rail Safety IDEA Program: Sponsoring Innovation to Im-prove
Railroad Safety and Performance. Transportation Research Board Annual Conference, Washington D. C., January 2018, 29 s.

[8] Inspection and monitoring of railway infrastructure using aerial drones. ESCAP /TARN/WG/2019/4. 6th session Bangkok, 10 and 11 December 2019, 16 s.

[9] Kochan A., Rutkowska P., Wójcik M.: Inspection of the Railway Infrastructure with the use of Unmanned Aerial Vehicles. Archives of Transport System Telematics, Vol.11,
Issue 2, 2018, s. 11-17.

[10] Lesiak P., Bojarczak P.: Przetwarzanie i analiza obrazów w wybranych badaniach defektoskopowych. Monograficzna seria wydawnicza Biblioteka Problemów Eksploat--acji, ITE-PIB Radom 2012.

[11] Lesiak P., Bojarczak P.: Algorytmy klasyfikacji obrazów wad w badaniach toru kole-jowego. Monografia Wydziału Transportu i Informatyki WSEI w Lublinie pod red. T. Rymarczyka „Współczesne trendy technologiczne w informatycznych systemach zło-żonych". Wyd. INNOVATIO PRESS, Lublin 2019, s. 41 -73.

[12] Lesiak P., Podsiadło R.: Modelowanie numeryczne geometrii wzorców wad po-wierzchniowych szyn kolejowych. Przegląd Komunikacyjny, Tom: LXXIV, Zeszyt 6/2019, s. 14-18,

[13] Lesiak P.: Inspekcja i utrzymanie infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem dronów.
Inspection and maintenance of railway infrastructure with the use of
Unmanned Aerial Vehicles. Problemy Kolejnictwa. Zeszyt 188 (w druku).

[14] Moreu F., Taha M.R.: Railroad Bridge Inspections for Maintenance and Replacement Prioritization Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Laser Scanning Capabili-ties. IDEA Program Final Report. Contract Number Rail Safety 32. University of New Mexico, 2016 – 2018, 29 s.

[15] Project EREVOS. European Union's Horizon 2020 research and innovation pro-gramme under grant agreement No 780265. ESMERA, 2018, http://www.esmera-project.eu/erevos/, dostęp: 18.05.2020.

[16] Rau J.Y., Hsiao K.W., Jhan J.P., Wang S.H., Fang W.C., Wang J.L.: Bridge Crack
Detection Using Multi-Rotary UAV and Object-Base Image Analysis. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-2/W6, 2017. International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Ge-omatics, 4–7 September 2017, Bonn, Germany, s. 311-318.

[17] Rail Surveys. Plowman Craven. https://plowmancraven.s3.amazonaws.com/panoramics/grange-sidings/index.html dostęp: 18.05.2020.

[18] Ravitharan R.: The Implementation of Unmanned Autonomous Systems for Railway Inspection. Monash University, Australia. Institute of Railway Technology, https://www.unescap.org/sites/default/files/Item6_Monash_UAS_0.pdf, dostęp: 18.02.2020.

[19] Right on track. AECMagazin 24 January 2018. https://aecmag.com/technology-mainmenu-35/1520-right-on-track-drone-surveying-plowman-craven , dostęp: 18.05.2020.

[20] Singh A. K., Swarup A., Agarwal A. , Singh D.: Vision based rail track extraction and monitoring through drone imagery. ICT Express 5, 2019, s. 250 – 255.

[21] Smith, E.M.: A collection of computer vision algorithms capable of detecting linear
infrastructure for the purpose of UAV control. MSc Thesis, Virginia Tech, USA, 2016,
101 s.

[22] Sherrock E., Neubecker K.: Unmanned Aircraft System Applications in International
Railroads. U.S. Department of Transportation. Federal Railroad Administration. Office of Research, Development and Technology Washington, DC 20590, February 2018, 35 s.

[23] Wu Y., Qin Y., Wang Z., Jia L.: A UAV--Based Visual Inspection Method for Rail Surface Defects. Applied Sciences, Vol. 8, No. 7, 1028, 2018, 20 s.

[24] Wójcik M.: Badanie stanu technicznego infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem
bezzałogowych statków powietrznych. Ogólnopolska Konferencja Naukowo – Tech-niczna, Transport Kolejowy 2017, Przeszłość – Teraźniejszość – Przyszłość, UTK, s. 148 – 164.

[25] Visual Intelligence. https://visualintelligenceinc.com/rail-2/ , dostęp: 18.05.2020.

[26] Zhang D., Vong Ch.H., Ravitharan R., Reichl P., Chung H.: Unmanned Aerial Sys-tem (UAS) for Railway Inspection. AusRAIL 2018, Rail for a Better Future, 27-28 No-vember 2018, Canberra, ACT, 2018, 9 s.

Wspomnienie o Prof. dr hab. inż. Krzysztofie Stypule

Profesor Krzysztof Stypuła urodził się 20 marca 1948 r. w Krakowie.

W 1966 r. ukończył III Liceum Ogólnokształcące im. Jana Kochanowskiego w Krakowie, a następnie z wyróżnieniem ukończył w 1971 r. studia magisterskie na Wydziale Leśnym Wyższej Szkoły Rolniczej w Krakowie ze specjalnością inżynieria leśna.

W latach 1971–1974 pracował w Instytucie Użytkowania Lasu i Inżynierii Leśnej Akademii Rolniczej w Krakowie, tworząc laboratorium mechaniki gruntów i gruntoznawstwa drogowego, którego kierownikiem był w następnym okresie. Jednocześnie od 1969 do 1974 r. studiował na Wydziale Budownictwa Lądowego Politechniki Krakowskiej na specjalności teoria konstrukcji, a jego praca dyplomowa została wyróżniona w konkursie im. prof. I. Stella-Sawickiego.

W 1974 r. zaczął pracę w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej i siedem lat później obronił pracę doktorską nt. badania propagacji w podłożu gruntowym oraz przenoszenia na budynki drgań wywołanych wbijaniem pali fundamentowych. Od 1995 r. pełnił funkcję tam funkcję zastępcy dyrektora ds. badań naukowych i współpracy z przemysłem.

W 2002 r. uzyskał habilitację na podstawie pracy nt. drgań mechanicznych wywołanych eksploatacją metra płytkiego i ich wpływu na budynki. Wieloletni członek senatu uczelni. Wiceprzewodniczący Rady Programowej od pierwszej edycji konferencji naukowo-technicznej pt. „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym" INFRASZYN w latach 2008-2019.

Specjalista badań statyki i dynamiki budowli, dynamiki gruntów i ochrony środowiska przed wibracjami. Autor lub współautor monografii, artykułów, polskich norm, ponad 200 publikacji i ponad 170 prac naukowo-badawczych.

Wyróżniony Nagrodą Sekretarza Naukowego PAN (1982 r.), dwiema Nagrodami Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (1980, 1984 r. – obie zespołowe), Nagrodami Rektora Politechniki Krakowskiej, Nagrodą im. Stefana Bryły i nagrodą Top Builder. Członek Komisji Budownictwa Oddziału Krakowskiego Polskiej Akademii Nauk.

Pisał wiersze i fraszki zebrane w tomiku „Sobie śpiewam, a ludziom".

Zmarł 19 maja 2020 r. w swoim domu w Dobczycach.

Łącząc się w żałobie i smutku po śmierci chcielibyśmy złożyć kondolencje i wyrazy współczucia

Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej

Wspomnienie o inż. Grzegorzu Małetce

Inżynier Grzegorz Małetka urodził się 2 marca 1945 r. w miejscowości Barchów. W roku 1963 ukończył Technikum Ceramiczne w Warszawie a następnie ukończył Studia na Wydziale Inżynierii Lądowej na Politechnice Warszawskiej. Studia podyplomowe w zakresie utrzymania dróg ukończył w roku 1989 na Politechnice Wrocławskiej.

W latach 1963- 1972 pracował w Rejonie Eksploatacji Dróg Publicznych w Warszawie. Od roku 1972 do 1997 r. był pracownikiem Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych, a po reorganizacji Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad na stanowiskach : inspektora i kierownika zespołu utrzymania dróg. W latach 1976-1977 pracował na kontrakcie w Libii na stanowisku inżyniera ds. badań laboratoryjnych.

Od 1982-1983 pracował na kontrakcie w Iraku na stanowisku Kierownika Pracowni Kruszyw w laboratorium inwestora.

W latach 1997-2002 był pracownikiem Agencji Budowy i Eksploatacji Autostrad oraz zajmował stanowiska Naczelnika , Doradcy Prezesa i Kierownika Sekcji Technicznej. Od 2002 do 2005 pracował w Ministerstwie Infrastruktury jako Dyrektor Departamentu Dróg Publicznych. Od 2005 roku pracownik Ministerstwa Transportu – Departamentu Dróg i Transportu Drogowego i Departamentu Dróg i Autostrad na stanowisku radcy ministra.

Autor „Standardów zimowego utrzymania dróg publicznych", które zostały wprowadzone do stosowania na drogach publicznych w 1994 r. i są stosowane do chwili obecnej.

Współautor założeń do programów komputerowych takich jak „Zima" „Utrudnienia", „BUD", „Lato" „Bank Danych Drogowych", „Marszruta", Wizualna Ocena Dróg", oraz kolejnych ich wersji.

Autor rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie : standardów zimowego utrzymania dla dróg publicznych oraz ograniczeń w poruszaniu się pojazdów ciężarowych o masie całkowitej powyżej 12 ton w upały i dni wolne od pracy a także współautorem regulaminów utrzymania dla autostrady A4 (odcinek płatny Katowice - Kraków).

Opracował koncepcję osłony meteorologicznej pracującej na potrzeby administracji drogowej oraz punktu informacji drogowej . Współautor założeń technicznych do urządzeń do wykonywania pomiarów termomapingu na drogach publicznych,polskiej drogowej stacji meteorologicznej, koncepcji zarządzania zimowym utrzymaniem dróg publicznych. Nadzorował wykonanie i wdrażanie tych prac.

Opublikował szereg artykułów z zakresu utrzymania dróg, zarządzania drogami oraz zmian w ustawodawstwie drogowym na Konferencje organizowane przez : Politechnikę Śląską w Gliwicach, Politechnikę w Szczecinie, Politechnikę w Warszawie a także na Konferencje naukowo techniczne pt. „Techniczne Dni Drogowe".

Był członkiem Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji od 40 lat , pełniąc funkcję Sekretarza Generalnego w latach 2010-2013. Przez 15 lat był sekretarzem naukowym konferencji pt. „Techniczne Dni Drogowe". Był członkiem w Komisji Nr 212 „Budowa i utrzymanie dróg" w Polskim Komitecie Normalizacji.

Zmarł 20 września 2020 r. w Warszawie.

Łącząc się w żałobie i smutku po śmieci naszego drogiego przyjaciela składa kondolencje i wyrazy współczucia, dla rodziny Grzegorza w szczególności dla wspaniałej małżonki Janiny oraz ukochanego syna Bartłomieja.

Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej

TOROMIERZ INERCYJNY iTEC
Dokładny pomiar strzałek

www.graw.com

REKLAMA

GM ROADS

CZAS NA INNOWACYJNE **BUDOWNICTWO**

Oferujemy **profesjonalne usługi** z zakresu:

- budowy infrastruktury komunikacyjnej, sieci instalacyjnych i obiektów hydrotechnicznych,
- wykonywania pomiarów geodezyjnych, tworzenia map do celów projektowych, wytyczenia budynku i sieci.

W BUDOWNICTWIE WYBIERZ FIRMĘ,
KTÓREJ MOŻESZ ZAUFAĆ

Zobacz, co już wybudowaliśmy
i dla kogo pracowaliśmy:
www.gm-roads.pl

Biuro:
ul. Krzemieniecka 47,
54-613 Wrocław

Budownictwo inżynieryjne:
tel.: (71) 300 12 40
e-mail: info@gm-roads.pl

Geodezja:
tel.: 697 660 932
e-mail: m.wozniak@gm-roads.com

Siedziba firmy:
ul. Wrocławska 41, Łażany
58-130 Żarów

FORMY WSPARCIA FINANSOWEGO DLA FIRM

Przygotowana we współpracy ze Stowarzyszeniem Inżynierów i Techników Komunikacji RP oferta wsparcia finansowego dla przedsiębiorców, zapewnia pomoc w uzyskaniu finansowania nie tylko w ramach tzw. Tarczy Antykryzysowej ale również z innych źródeł w postaci pożyczek i subwencji oraz gwarancji de minimis na bardzo korzystnych warunkach.

Gwarancja de minimis

udzielana w ramach dopuszczalnej pomocy publicznej na zabezpieczenie spłaty kredytu obrotowego lub inwestycyjnego dla mikro-, małego lub średniego przedsiębiorcy

Pożyczka Płynnościowa POIR

umożliwia mikro, małym i średnim firmom sfinansowanie wydatków związanych z utrzymaniem bieżącej działalności i zapewnienie płynności finansowej.

Subwencja finansowa

finansowanie dla mikrofirm i MŚP - to nieoprocentowane subwencje finansowe, dostępne w uczestniczących bankach komercyjnych i spółdzielczych

Dofinansowanie kosztów wynagrodzeń pracowników

dofinansowanie z Funduszu Pracy na pokrycie części kosztów wynagrodzeń dla swoich pracowników oraz należnych od tych wynagrodzeń składek na ubezpieczenia społeczne

Pożyczka obrotowa udzielana przez PARP S.A.

finansująca wypłatę wynagrodzeń w sektorze MŚP w kwocie netto wymaganej do finansowania deficytu funduszu wynagrodzeń przedsiębiorstwa

kancelariakpg.pl
kpg@kancelariakpg.pl
tel: (+48) 48 377 80 30

www.sitkrp.org.pl
zarzad@sitkrp.org.pl
tel. 506 117 018

REKMA

REKMA Sp. z o.o.

ul. Szlachecka 7
32-080 Brzezie
tel. +48 12/633 59 22
fax +48 12/397 52 20

www.rekma.pl

- Dylatacje bitumiczne EDM typ Rekma
- Dylatacje mechaniczno-asfaltowe SILENT-JOINT RESA
- Szczeliny dylatacyjne w nawierzchniach betonowych i asfaltowych
- Naprawa spękań nawierzchni
- Specjalistyczne cięcie nawierzchni betonowych i asfaltowych
- Wypełnianie szczelin dylatacyjnych w torowiskach tramwajowych
- Natrysk środkami hydrofobowymi i hydrofilowymi
- Rowkowanie (grooving) nawierzchni
- Specjalistyczne wiercenie otworów pod kotwy i dyble
- Kruszenie nawierzchni betonowych metodą ultradźwiękową – RMI

SPECJALISTYCZNE PRACE DROGOWE

budimex

BUDUJ Z NAMI WARSZAWĘ ZACHODNIĄ

DOŁĄCZ DO NASZEGO NOWEGO KONTRAKTU KOLEJOWEGO W WARSZAWIE O WARTOŚCI 2,4 MLN ZŁOTYCH

SPRAWDŹ, KOGO SZUKAMY:

kariera.budimex.pl | rekrutacja@budimex.pl

POLECAJ ZNAJOMYCH I ZARABIAJ:

www.polecambudimex.pl

rail-mil.eu

PROGRAMMING TOOLS

ERTMS / ETCS L1 Components

rmRailProtector 4.0®

rmRailProtector4.0® is a range of products within the Rail-Mil Q7 product family, that has been designed to meet the needs and the requirements of the European Train Control System (ETCS). The product range includes a wide array of components divided into four categories i.e.:

- **BALISE PRODUCTS** (Q7-BL-FX -fixed, Q7-BL-TR -controlled, Q7-BL-FO -controlled with FO),
- **PROGRAMMING TOOLS** (Q7-UPKE, Q7-UPKE-HAND),
- **PROGRAMMING PC SOFTWARE** (Q7-PROG),
- **CENTRAL LEU COMPONENTS** (Q7-LU-XXX, and Q7-LU-FO).

Q7-UPKE (Balise Programming Tool)

- Interface A, for balise reading
- Programming via the air gap
- Fully handheld, with rechargeable batteries
- Wi-Fi host for PC programming
- Silted ethernet connector for cable programming (option)
- GPS, for data collection and time synchronization

made in POLAND

MADE IN EU

ertms

More information on ETCS and ERTMS at: www.ertms.net

Learn more about our products at: ***rail-mil.eu***