

Stanisław A. Różański

Wykorzystanie toru powietrznego do symulacji zderzenia pojazdu z przeszkodą

JEL: R41 DOI: 10.24136/atest.2018.466

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule omówione zostały niektóre aspekty analizy zdarzeń drogowych z udziałem pojazdów. Wykorzystano tor powietrzny do symulacji zderzeń ciał w skali laboratoryjnej. Zastosowano konsolę pomiarową CoachLabII+ i Cobra3 wraz z oprogramowaniem i czujnikami do detekcji oraz analizy impulsu zderzenia ciała z nieruchomą przeszkodą. Wykazano przydatność modelu Kelvina do analizy procesu zderzenia.

Słowa kluczowe: impuls zderzenia, model Kelvina, tor powietrzny, konsola.

Wstęp

Lawinowy wzrost liczby pojazdów na drogach prowadzi do powstawania różnego rodzaju kolizji między pojazdami, pojazdów z różnego rodzaju przeszkodami lub obiektami znajdującymi się przy drodze oraz do wypadków, w których uczestniczą piesi. Analiza doznanych urazów oraz obrażeń przez pieszych pozwala na określenie prędkości pojazdu, kierunku ruchu pieszego oraz kształtu nadwozia [1]. Bariery montowane przy drodze lub rozdzielające pasy ruchu chronią pojazd przed zjechaniem poza krawędź drogi. Analiza wypadków drogowych pokazuje, że zderzenie następuje zwykle pod kątem około 10° , a kontaktu z barierą ochronną doznaje około 15 % pojazdów [2]. Najczęstszym rodzajem zderzenia pojazdów w Polsce jest zderzenie boczne [3,4]. Jak każda kolizja prowadzi to do deformacji i uszkodzenia pojazdu, co może przyczynić się do znacznych obrażeń doznawanych przez pasażerów. Prowadzone są również badania zderzeniowe pojazdów, w celu określenia ich optymalnej konstrukcji, która powinna zapewnić kierującemu oraz pasażerom jak największe bezpieczeństwo w razie wypadku [5, 6]. Pojazdy muszą być bezpieczne oraz spełniać określone normy. Analiza zderzenia pojazdu jest zadaniem bardzo złożonym, ponieważ należy wziąć pod uwagę dużą liczbę parametrów, które opisują zarówno kinematykę jak i dynamikę procesu zderzenia. Tworzone są odpowiednie modele matematyczne oraz ich symulacje komputerowe z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania [7-9]. Wykorzystywana jest również specjalistyczna aparatura pomiarowa umożliwiająca analizę zjawisk zachodzących w trakcie kolizji [10]. Okazuje się, że podczas zderzeń z małymi prędkościami (około 20-30 km/h) występującymi najczęściej na parkingach, drogach lokalnych, czy przy włączaniu się do ruchu może również dojść do obrażeń ciała pasażerów, szczególnie że w tych warunkach nie następuje uruchomienie poduszki powietrznej [11]. Istotną rolę podczas zderzenia pojazdów odgrywa stan nawierzchni drogi. Pojazd podczas kolizji zachowuje się zupełnie inaczej na nawierzchni suchej, mokrej czy oblodzonej [12].

1 Badanie zderzeń

1.1 Metody badań

W badaniach zdarzeń na drodze, w których uczestniczą pojazdy oraz piesi wykorzystuje się zarówno modele teoretyczne jak i przeprowadza się doświadczenia laboratoryjne. Korzysta się również z analizy wypadków drogowych, do których niestety dochodzi

każdego dnia na drogach nie tylko w naszym kraju. Wszystkie te działania mają na celu opracowanie jak najlepszych metod analizy zdarzeń drogowych oraz znalezienia optymalnych metod zapobiegania tym zdarzeniom. Opracowanie odpowiednich metod analizy zdarzeń na drodze pozwala na optymalizację konstrukcji pojazdów pod względem bezpieczeństwa pasażerów oraz pieszych uczestników ruchu drogowego. W analizie danych oraz symulacjach wykorzystuje się komputery wyposażone w nowoczesne oprogramowanie umożliwiające zarówno pobieranie danych z eksperymentu jak i symulację modeli matematycznych opisujących moment kolizji.

Eksperyment zderzeniowy

W celu zwiększenia bezpieczeństwa produkowanych samochodów w laboratoriach koncernów samochodowych oraz w niektórych laboratoriach naukowych przeprowadzane są eksperymenty zderzeniowe pojazdów.



Rys. 1. Eksperyment zderzeniowy przeprowadzony według standardów EURO NCAP na pojeździe kategorii L7e [13]

W eksperymentach zderzeniowych wykorzystuje się najczęściej standardowe pojazdy, które poddaje się kolizji z nieruchomą przeszkodą (rys. 1). Zderzenie może być centralne lub niecentralne natomiast przeszkodę może stanowić ściana betonowa (blok betonowy) z zamontowaną barierą energochłonną typu „plaster miodu”, sztywny walec betonowy, itp. Pojazd o znanej masie rozpędzany jest do określonej prędkości, z którą zderza się z przeszkodą.



Rys. 2. Manekiny wykorzystywane w testach zderzeniowych [14]

Podczas testu mierzone jest przyspieszenie pojazdu (oraz jego poszczególnych części) w trzech kierunkach oraz zapisywane są zmiany położenia jego środka masy. Rolę pasażerów pełnią manekiny typu *Opat-Ogle* wyposażone w odpowiednie czujniki (rys. 2). Całość eksperymentu filmowana jest za pomocą szybkiej kamery wideo [5, 6, 15].

W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskuje się informacje na temat [5]:

- współczynników opisujących deformacje plastyczne i sprężyste konstrukcji nośnej pojazdów podlegających zderzeniu,
- obrażeń pasażerów i innych uczestników zdarzenia,
- położenia, trajektorii oraz prędkości różnych przedmiotów i osób biorących udział w zdarzeniu.

Programy komputerowe wspomagające analizę zdarzenia drogowego

W modelowaniu oraz symulacji różnego typu zderzeń pojazdów wykorzystuje się oprogramowanie bazujące na metodzie elementów skończonych *FEM* (*Finite Element Method*), modelowanie z wykorzystaniem metody elementów skupionych oraz programy *3D-CAD*, *PC CRASCH*, *MatLab*, czy *LS-DYNA*. Przegląd wielu innych programów służących do analizy i rekonstrukcji zdarzeń drogowych został dokonany w [16]. Wśród dostępnych programów należy wymienić programy graficzne ułatwiające wykonanie szkicu miejsca wypadku, programy do fotogrametrii umożliwiające tworzenie modeli przestrzennych na podstawie fotografii z miejsca zdarzenia, programy kalkulacyjne umożliwiające wykonywanie różnego rodzaju obliczeń dotyczących zdarzenia, programy do analizy czasowo-przestrzennej zdarzenia, czy wreszcie programy symulacyjne.

2 Rodzaje zderzeń

2.1 Teoretyczny opis zderzenia dwóch ciał

W wyidealizowanym przypadku zderzeń sprężystych centralnych dwóch ciał o masach m_1 i m_2 poruszających się z prędkościami v_1 i v_2 spełniona jest zasada zachowania pędu oraz zasada zachowania energii mechanicznej w postaci:

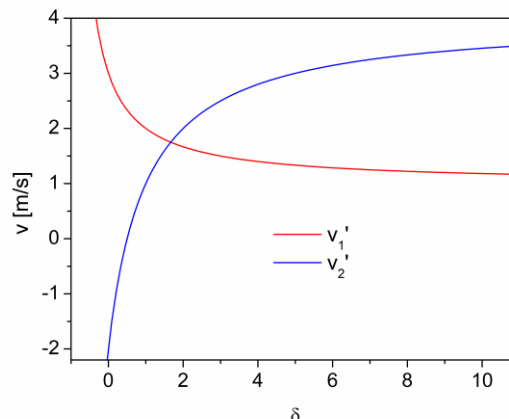
$$\begin{cases} \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_1' + \vec{p}_2', \\ E_1 + E_2 = E_1' + E_2', \end{cases} \quad (1)$$

gdzie \vec{p}_i oznacza pęd i -tego ciała, E_i jego energię kinetyczną, a $i = 1, 2$.

Rozwiązując powyższy układ równań dla przypadku zderzenia zachodzącego wzdłuż tego samego kierunku (można pominąć zapis wektorowy dla pędów) otrzymujemy następujące wartości prędkości po zderzeniu:

$$\begin{cases} v_1' = \frac{1}{1+\delta}((\delta-1)v_1 + 2v_2), \\ v_2' = \frac{1}{1+\delta}((1-\delta)v_2 + 2\delta v_1), \end{cases} \quad (2)$$

gdzie $\delta = m_1/m_2$. W przypadku, gdy $\delta = 1$ (masy obydwu ciał są równe), oraz cało drugie spoczywa $v_2 = 0$, to po zderzeniu $v_1' = 0$ oraz $v_2' = v_1$. Jeżeli ciała o jednakowych masach poruszały się naprzeciwko siebie, to można założyć, że prędkość v_1 jest dodatnia a v_2 ujemna. Wtedy otrzymujemy, że $v_1' = -v_2$ oraz $v_2' = v_1$ - ciała wymieniają się prędkościami. Ciekawym przypadkiem jest sytuacja, gdy masa $m_1 \ll m_2$, co opisuje sytuację np. zderzenia z nieruchomą przeszkodą ($v_2 = 0$) o bardzo dużej masie (np. betonowa ściana). Wtedy $v_1' = -v_1$ oraz $v_2' = v_2$. Ciało po odbiciu od ściany porusza się z tą samą co do wartości prędkością lecz w przeciwnym kierunku.



Rys. 3. Zależność prędkości po zderzeniu od stosunku mas dla ciał poruszających się naprzeciwko siebie

Na rys. 3 przedstawiono teoretyczną zależność prędkości końcowych po zderzeniu sprężystym centralnym ciał, gdy ciała poruszają się naprzeciwko siebie z prędkościami początkowymi $v_1 = 1$ m/s i $v_2 = -2$ m/s (znak minus oznacza kierunek przeciwny prędkości v_2 w stosunku do prędkości v_1). Wykresy przecinają się w punkcie, dla którego $\delta = 5/3$.

W przypadku zderzenia niesprężystego część początkowej energii kinetycznej ciał zamieniana się na energię wewnętrzną U w wyniku ich deformacji (energia kinetyczna nie jest zachowana), natomiast spełniona jest nadal zasada zachowania pędu:

$$\begin{cases} m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2)v, \\ E_1 + E_2 = E_1' + E_2' + U. \end{cases} \quad (3)$$

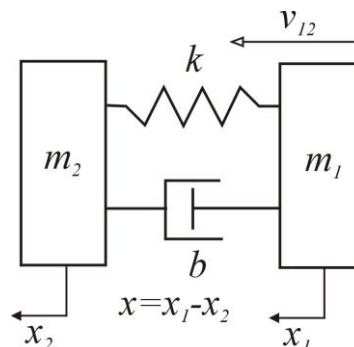
Gdy ciała łączą się po zderzeniu, to wzór na prędkość końcową v ma następującą postać:

$$v = \frac{\delta v_1 + v_2}{1 + \delta}. \quad (4)$$

Innym rodzajem zderzenia ciał jest zderzenie sprężyste niecentralne skośne. Jeżeli uwzględnimy tarcie z podłożem, to ciało ulega również obrotowi. W wyniku takiego zderzenia ciała zmieniają kierunki ruchu, które tworzą między sobą pewien kąt θ zależny od stosunku ich mas. Jeżeli $m_1 = m_2$, to $\theta = \pi/2$, gdy $m_1 > m_2$, to $\theta > \pi/2$ oraz gdy $m_1 < m_2$, to $\theta < \pi/2$ [17].

Model Kelvina

W celu opisanego kinematyki i dynamiki impulsu zderzenia często wykorzystuje się model *Kelvina* zawierający masę połączoną ze sprężyną i elementem tłumiącym, które są połączone wzajemnie równolegle (rys. 4). Układ tworzy oscylator harmoniczny tłumiony, za pomocą którego można modelować zderzenia pojazd-pojazd, pojazd-przeszkoda lub wpływ zderzenia na elementy pojazdów.



Rys. 4. Model Kelvina

Wykorzystuje się również model *Maxwella*, w którym sprężyna oraz element tłumiący połączone są szeregowo [7]. Równanie różniczkowe opisujące układ *Kelvina* jest następujące:

$$\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (5)$$

gdzie α oznacza współczynnik tłumienia, ω_0 częstość drgań własnych. Ponadto $2\alpha = \gamma / m$ i $\omega_0 = \sqrt{k / m}$, gdzie m oznacza masę ciała, k współczynnik sprężystości, a γ stałą dodatnią. Przemieszczenie $x(t)$ będące rozwiązaniem równania (5), w przypadku słabego tłumienia, ma postać:

$$x(t) = A e^{-\alpha t} \sin(\omega_r t), \quad (6)$$

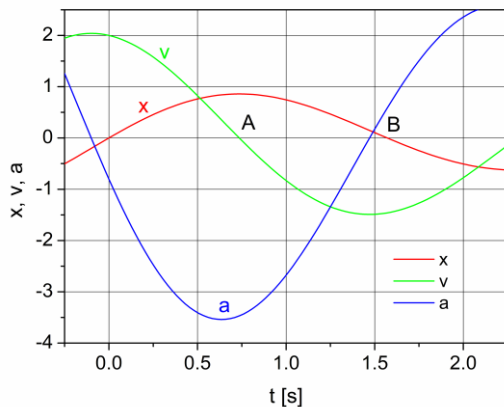
gdzie $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ oznacza częstość rezonansową.

Natomiast prędkość v i przyspieszenie a wyrażają się następującymi wzorami:

$$v = A e^{-\alpha t} (\omega_r \cos(\omega_r t) - \alpha \sin(\omega_r t)) \quad (7)$$

oraz

$$a = A e^{-\alpha t} (-2\alpha\omega_r \cos(\omega_r t) + (\alpha^2 - \omega_r^2) \sin(\omega_r t)). \quad (8)$$



Rys. 5. Teoretyczny przebieg zależności położenia x , prędkości v oraz przyspieszenia a od czasu w modelu *Kelvina*

Na rys. 5 przedstawiono teoretyczny przebieg zależności $x(t)$, $v(t)$ i $a(t)$ w momencie zderzenia dla amplitudy $A = 1 \text{ m}$, współczynnika tłumienia $\alpha = 0,2 \text{ s}^{-1}$ i częstości rezonansowej $\omega_r = 2 \text{ rad/s}$. Na wykresie w punkcie A prędkość osiąga wartość zerową przy największej deformacji sprężyny i największym opóźnieniu. Zachodzi to w chwili czasu $t_m = 0,75 \text{ s}$. Natomiast w punkcie B, w chwili czasu $t_k = 1,5 \text{ s}$, zarówno przyspieszenie jak i wychylenie z położenia równowagi osiągają wartość równą zero, a prędkość wartość maksymalną. Należy zauważyć, że stosunek czasów $t_k / t_m = 2$.

3 Doświadczenia na torze powietrznym

3.1 Układ pomiarowy

W przeprowadzonych próbach zderzeniowych, w skali laboratoryjnej, wykorzystano układ składający się z toru powietrznego wyposażonego w system otworów oraz dmuchawę. Ślizgacz-wózek o znanej masie poruszał się bez tarcia po torze na poduszce powietrznej. Wózek mógł być obciążony wybraną masą oraz posiadał zamontowaną dużą płaską powierzchnię pełniącą rolę tłumienia. Na końcu wózka, który podlegał zderzeniu umocowana była w specjalnym uchwycie gumka recepturka pełniąca rolę sprężyny. Naciąg gumki mógł być regulowany dzięki czemu uzyskiwano różne współczynniki sprężystości. Doświadczenia zderzeniowe przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch różnych interfejsów pomiarowych, a mianowicie *Cobra3* oraz *CoachLabII+*.

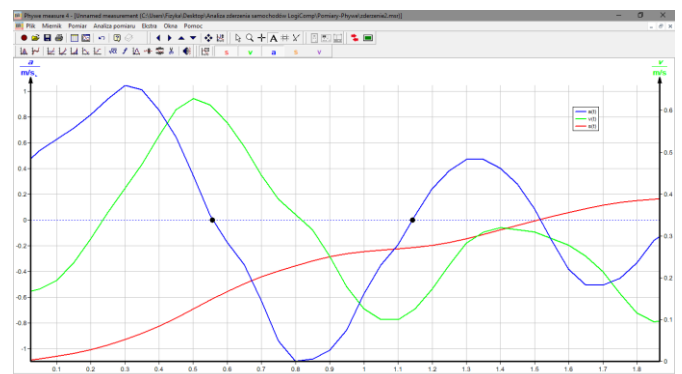
Doświadczenie zderzeniowe z wykorzystaniem konsoli *Cobra3*

W doświadczeniu pierwszym przedstawionym na rys. 6 zastosowano konsolę pomiarową *Cobra3* firmy *PHYWE* połączoną z komputerem za pomocą portu szeregowego *RS232* [18]. Rolę detektora ruchu pełniła bramka świetlna wyposażona w bloczek, przez który przerzucona była nić ciągnąca wózek o masie $m_1 = 0,41 \text{ kg}$ ze stałą siłą $F = 0,5 \text{ N}$ (na nici zawieszony był ciężarek o masie $m_2 = 0,05 \text{ kg}$).



Rys. 6. Tor powietrzny z wózkiem i bramką świetlną. Widoczna konsola pomiarowa *Cobra3*

Dane uzyskane w trakcie doświadczenia były zbierane, analizowane i przedstawiane w postaci wykresów z wykorzystaniem programu *Measure* dostarczonego wraz z konsolą pomiarową *Cobra3*. Uwolnienie wózka powodowało automatyczne wyzwolenie pomiaru i zbieranie danych. Wózek ciągnięty przez stałą siłę poruszał się ruchem jednostajnie przyspieszonym i ulegał kolizji z nieruchomą przeszkodą. Podczas zderzenia gumka w zderzaku wózka ulegała odkształceniu, a wózek odbijał się sprężysto z niewielkim tłumieniem i poruszał się ruchem jednostajnie opóźnionym w kierunku przeciwnym. Amplituda kolejnych drgań malała w czasie. Na rys. 7 przedstawiono zależność wychylenia x , prędkości v oraz przyspieszenia a od czasu dla kolejnych zderzeń z przeszkodą. W pierwszej fazie ruchu, w przedziale czasu $\Delta t = [0,1 \text{ s}; 0,4 \text{ s}]$, zależność $x(t)$ jest opisana funkcją kwadratową, a podczas kolejnych zderzeń jest superpozycją funkcji kwadratowej oraz funkcji przedstawionej wzorem 6. W przedstawionej konfiguracji doświadczenia układ podlega cały czas działaniu stałej siły F raz skierowanej zgodnie z kierunkiem ruchu wózka aż do momentu zderzenia, a następnie po odbiciu przeciwnie do jego ruchu.

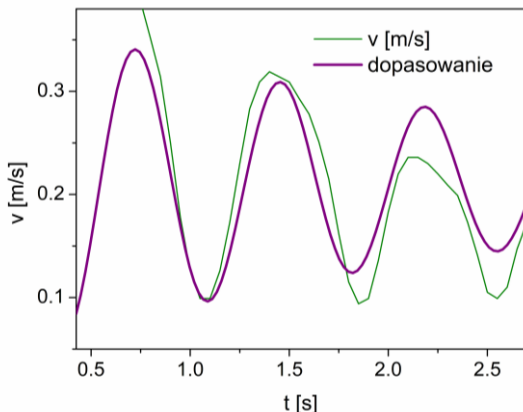


Rys. 7. Zależność wychylenia x , prędkości v oraz przyspieszenia a od czasu podczas zderzenia wózka z przeszkodą na torze powietrznym pod wpływem działania stałej siły. Pokazano zapis kolejnych zderzeń

W przedziale czasu Δt prędkość zmienia się liniowo zgodnie z funkcją $v = 1,22t + 0,05$, z czego wynika, że przyspieszenie wó-

ka zaraz przed zderzeniem było równe $a = 1,22 \text{ m/s}^2$, a prędkość początkowa $v_0 = 0,05 \text{ m/s}$.

Zgodnie z drugą zasadą dynamiki Newtona przyspieszenie wózka, w badanym układzie, w fazie ruchu przed zderzeniem można obliczyć ze wzoru $a = F/(m_1 + m_2)$. Po podstawieniu danych z doświadczenia otrzymujemy wartość $a = 1,21 \text{ m/s}^2$, która doskonale zgadza się z wartością odczytaną z wykresu $a(t)$ (rys. 7) oraz uzyskaną z metody najmniejszych kwadratów. W punktach wykresu, w których przyspieszenie uzyskuje wartość równą zero (rys. 7), prędkość przyjmuje wartość maksymalną. W punktach, w których wykres prędkości przecina się z wykresem wychylenia przyspieszenie/opóźnienie przyjmuje wartość maksymalną. Przebieg zależności $x(t)$, $v(t)$ oraz $a(t)$ jest zgodny jakościowo z modelem Kelvina przedstawionym na rys. 5.



Rys. 8. Zależność prędkości v od czasu podczas zderzenia wózka z przeszkodą na torze powietrznym (kolor zielony). Wykres dopasowano zmodyfikowaną funkcją $v(t)$ zgodnie ze wzorem 7 (kolor purpurowy)

Na rys. 8 przedstawiono wykres zależności $v(t)$ zawierający zapis dłuższego odcinka czasu w porównaniu z rys. 7. Wyniki pomiarów dopasowano zmodyfikowanym wzorem 7 w postaci $v = 0,02e^{-0,38t} (8,6 \cos \beta - 0,38 \sin \beta) + 0,21$, gdzie $\beta = 8,6t - 6,3$. Z dopasowania wynika, że tłumienie jest równe $\alpha = 0,38 \text{ s}^{-1}$, a częstość rezonansowa $\omega_r = 8,6 \text{ rad/s}$.

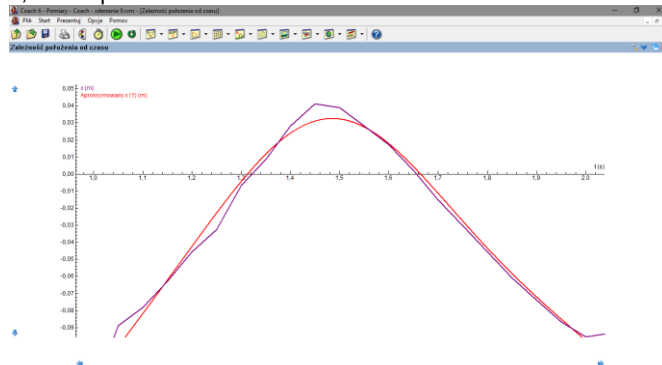
Doświadczenie zderzeniowe z wykorzystaniem konsoli CoachLabII+

Drugie doświadczenie przeprowadzono wykorzystując ultradźwiękowy czujnik położenia podłączony do konsoli pomiarowej CoachLabII+, która poprzez złącze USB sprzężona była z komputerem (rys. 9). Zainstalowane oprogramowanie Coach6 firmy CMA



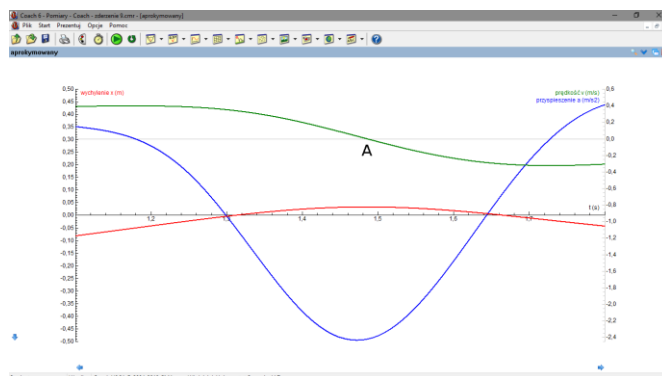
Rys. 9. Tor powietrzny z wózkiem i ultradźwiękowym czujnikiem położenia (po prawej stronie). Widoczna konsola CoachLabII+ umożliwiła sterowanie pomiarem, akwizycję danych pomiarowych, wizualizację wyników pomiarów oraz ich analizę [18].

Ultradźwiękowy detektor położenia wyzerowano dla pozycji, w której gumka zderzaka wózka dotyka przeszkody. Umożliwiło to na zaobserwowanie, że zderzenie rozpoczyna się w chwili ruchu równej $t_1 = 1,31 \text{ s}$, a kończy się w chwili $t_2 = 1,61 \text{ s}$. Proces zderzenia trwa więc $0,3 \text{ s}$. Maksymalne wychylenie z położenia równowagi odpowiada odkształceniu gumki o $0,032 \text{ m}$ od punktu równowagi. Wózek o masie $m = 0,31 \text{ kg}$ został uwolniony w odległości około $0,7 \text{ m}$ od punktu zderzenia.



Rys. 10. Zależność drogi od czasu w chwili zderzenia wózka z przeszkodą (kolor fioletowy). Kolorem czerwonym zaznaczono aproksymowany przebieg zależności $x(t)$

W pierwszej fazie ruchu wózek porusza się ruchem jednostajnym z prędkością równą około $0,4 \text{ m/s}$. Prędkość wyznaczono z nachylenia wykresu zależności przebytej drogi od czasu (rys. 10). W punkcie zderzenia zależność drogi od czasu zmienia się w sposób nieliniowy. Po odbiciu wózek ponownie porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym (w pewnym przedziale czasu) z prędkością około $0,3 \text{ m/s}$, jednak teraz w kierunku przeciwnym. Część energii kinetycznej wózka została rozproszona w procesie zderzenia. Na rys. 10 przedstawiono sygnał uzyskany podczas zderzenia wózka z przeszkodą (kolor niebieski) oraz jego aproksymację (kolor czerwony). Następnie aproksymowany sygnał położenia wózka wykorzystano do obliczenia jego prędkości oraz przyspieszenia w punkcie zderzenia.



Rys. 11. Zależność drogi x , prędkości v oraz przyspieszenia a od czasu w trakcie zderzenia wózka z przeszkodą

Na rys. 11 przedstawiono zależność położenia x , prędkości v oraz przyspieszenia a podczas zderzenia z przeszkodą. Jak wynika z wykresu, w punkcie zderzenia prędkość przyjmuje wartość równą zero, opóźnienie osiąga wartość maksymalną natomiast deformacja gumki (jej rozciągnięcie) jest maksymalne. Następnie wózek ulega odbiciu sprężystemu z tłumieniem i oddala się od punktu kolizji. W chwilach czasu, w których przyspieszenie przyjmuje wartość równą zero prędkość osiąga wartość maksymalną (co do wartości bezwzględnej).

Podczas doświadczenia udało się uchwycić jedynie pierwszy charakterystyczny moment kolizji oznaczony na rys. 5 i rys. 11 literą A. Zgodnie z modelem *Kelvina* dokonano dopasowania zależności wychylenia od czasu za pomocą wzoru 6. Otrzymano, że w badanym układzie współczynnik tłumienia $\alpha = 0,33 \text{ s}^{-1}$, a częstość rezonansowa $\omega_r = 7 \text{ rad/s}$. Są to wartości bardzo zbliżone do tych, które uzyskano w doświadczeniu pierwszym z wykorzystaniem konsoli pomiarowej *Cobra3*.

Podsumowanie

Symulacje zderzeniowe przeprowadzone na torze powietrznym z zastosowaniem konsoli pomiarowych *Cobra3* oraz *CoachLabII+* pokazały, że w warunkach mikro-laboratoryjnych można uzyskać wyniki pomiarów, które mogą być wskazówką do dalszych badań w eksperymentach zderzeniowych pojazdów w makroskali. Mimo, że badany układ zderzeniowy był bardzo uproszczony, to uzyskane sygnały zderzeniowe zgadzają się jakościowo z modelem *Kelvina*. Proces zderzenia zachodzi w bardzo krótkim czasie i jego detekcja jest możliwa jedynie za pomocą odpowiednio dobranych czujników. W analizie uzyskanych wyników istotna jest również możliwość eliminowania niepożądanych szumów z uzyskanych sygnałów, co umożliwia ich analizę z wykorzystaniem metody pierwszej i drugiej pochodnej funkcji względem czasu.

Bibliografia:

- Cieślak M., Kalwarska M., Łagan S., Biomechanika zderzenia z pieszym a ekspertyza wypadku drogowego, „Aktualne Problemy Biomechaniki” 2011, nr 5.
- Prochowski L., Analiza toru ruchu samochodu po uderzeniu w barierę betonową, „Eksploatacja i Niezawodność” 2011, nr 2.
- Kisilowski J., Zalewski J., Analiza wybranych aspektów modelowania zderzenia pojazdów i wynikających stąd zaburzeń niektórych parametrów samochodu po wypadku, „Studies & Proceedings of Polish Association for Knowledge Management” 2011, nr 47.
- Gidlewski M., Jemioł L., Badanie zderzeń bocznych samochodów. Prędkości samochodów po zderzeniu, „Logistyka” 2015, nr 4.
- Seńko J., Zielonka K., Analiza wyników zderzenia samochodu osobowego ze sztywną przeszkodą, „Logistyka” 2011, nr 3.
- Seńko J., Analiza zderzenia samochodu osobowego z drzewem, „LogiTrans - VII Konferencja Naukowo-Techniczna” 2010, Streszczenia, str. 867 -874.
- Pawlus W., Nielsen J. E., Karimi H. R., Robbersmyr K. G., Development of mathematical models for analysis of a vehicle crash, “WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics” 2010, nr 2.
- Kreja I., Mokołajków L., Wekezer J.W., Komputerowa symulacja zderzeń pojazdów z urządzeniami bezpieczeństwa ruchu drogowego, „Drogownictwo” 2000, nr 8.
- Lewkowicz R., Łata A., Ściegienka R., Piątkowski P., Wybrane zagadnienia rekonstrukcji wypadków komunikacyjnych, „Autobusy” 2011, nr 5.
- Gajda M., Pomiar przebiegu zmian prędkości podczas zderzeń pojazdów, „Pomiary Automatyka Robotyka” 2004, nr 6.
- Jackowski J., Wieczorek M., Żmuda M., Badania eksperymentalne zderzeń z małymi prędkościami (z udziałem manekina i człowieka), „Logistyka” 2014, nr 3.
- Szada-Borzyszkowski W., Szada-Borzyszkowska M., Rekonstrukcja zderzenia pojazdów na różnych nawierzchniach drogi, „Autobusy” 2015, nr 5.
- <http://www.przyjaznamotoryzacja.pl/Co-nowego-w-branzy/Test-zderzeniowy-przy-predkosci-90km-h> (dostęp 28.10.2018).
- <https://www.autocentrum.pl/newsy/newsy/pierwszy-test-zderzeniowy-wg-standardow-euro-ncap-w-polsce/> (dostęp 28.10.2018).
- Pawlus W., Nielsen J. E., Karimi H. R., Robbersmyr K.G., Further results on mathematical models of vehicle localized impact, 3rd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics, Harbin, China, 2010.
- Jagielowicz-Ryznar C., Przegląd możliwości komputerowego wspomaganie rekonstrukcji wypadków drogowych, „Logistyka” 2015, nr 3.
- Herman M. A., Kalestyński A., Widomski L., Podstawy fizyki, PWN, Warszawa 2006.
- Różański S. A., Wykorzystanie interfejsu pomiarowego CoachLabII+ i programu Coach6 w pomiarach oraz modelowaniu drgań tłumionych 1/4 zawieszenia pojazdu samochodowego, „Technika Transportu Szybnego” 2017, nr 12.

Use of the air track to the vehicle collision simulation with an obstacle

The article discusses some aspects of the analysis of road accidents involving vehicles. An air track was used to simulate collisions of the bodies in a laboratory scale. The *CoachLabII+* and *Cobra3* measuring console were used together with the software and sensors for detection and analysis of the body impact pulse with a fixed obstacle. The usefulness of the *Kelvin* model for the analysis of the impact processes was demonstrated.

Keywords: collision impulse, *Kelvin* model, air track, console.

Autor:

dr hab. **Stanisław A. Różański** – Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Stanisława Staszica w Pile.