



**Robert
Owsiański**



**Piotr
Czech**

Wykorzystanie impulsu siły uderzenia w obliczeniach zderzeń

Streszczenie

Na przykładzie zderzenia się dwóch samochodów na skrzyżowaniu autorzy przedstawiają metody wykorzystania parametrów zderzenia w podejściu symulacyjnym, przy użyciu wektora impulsu uderzenia, określonego na podstawie trwałej deformacji pojazdów. Przedstawiają metodykę postępowania prowadzącą do określenia zakresów wartości impulsu uderzenia i prędkości kolizyjnych.

Słowa kluczowe

Symulacja, impuls siły uderzenia, metoda trójkątów, *EES*.

* * *

1. Wstęp

Analizy zderzeń powstałych podczas – wydalaby się – nieskomplikowanych okoliczności również wymagają od opiniujących szczególnej uwagi. Fatalnym efektem szablonowego, bezkrytycznego podejścia do takiej analizy może bowiem być oskarżenie o wypadek niewłaściwej osoby. Jest to obecnie problem coraz częściej zauważalny, gdy przedstawiciele organów procesowych, przed zleceniem opinii, przeprowadzają telefoniczny „*casting* na biegłego”, z pytaniem, kto sporządzi opinię za najmniejsze wynagrodzenie. Wówczas biegły, który podjął się wykonania opinii za kilkaset złotych, sporządza opinię adekwatną do wynagrodzenia, nie wnikając odpowiednio głęboko w istotę problemu. Jeżeli znana jest odległość pozderzeniowego przemieszczenia się pojazdów i możliwe jest obliczenie ich prędkości pozderzeniowych, to korzysta z dostępnego narzędzia w postaci programu *RWD*, wyznacza prędkości zderzeniowe i – niestety – nie pochyła się z należyłą uwagą nad otrzymanymi wynikami, nie sprawdza bilansu energetycznego ani wartości impulsu uderzenia. Niestety takie przypadki są coraz częściej zauważalne.

Mgr inż. Robert Owsiański, biegły sądowy z listy Sądu Okręgowego w Szczecinie, rzeczoznawca Stowarzyszenia POLEKSMOT w Katowicach.

Dr hab. inż. Piotr Czech, profesor nadzwyczajny Politechniki Śląskiej, Wydział Transportu Politechniki Śląskiej w Katowicach.

W przedstawionej tu sprawie, biegły opiniujący na zlecenie Prokuratury przyjął jako drogę pełnego hamowania odcinek pomiędzy miejscem zderzenia a miejscem zatrzymania się jednego ze zderzających się samochodów, a tak wcale nie było. Nie uwzględnił drogi przebytej przez ten samochód w czasie reakcji kierowcy i w czasie narastania siły hamowania. Wobec tego wyliczył w programie *RWD* niewiarygodną prędkość w ruchu pozderzeniowym, a co za tym idzie, otrzymał zbyt wysoką prędkość w początkowej chwili zderzenia. Otrzymanych wyników nie sprawdził za pomocą bilansu energetycznego i wskazał jako sprawcę wypadku kierowcę jadącego drogą z pierwszeństwem z zawyżoną prędkością 90 km/h, w terenie zabudowanym. Prokurator skierował przeciwko temu kierowcy akt oskarżenia do sądu rejonowego, który zlecił nam sporządzenie drugiej opinii. Przypadek ten uznaliśmy za charakterystyczny, wart opublikowania.

* * *

Obliczenia prędkości zderzeniowych są początkowym krokiem postępowania i jeżeli tu zostanie popełniony błąd, to będzie on skutkował nieprawidłowymi wynikami w analizie czasowo-przestrzennej. Przełoży się to na niewłaściwe wnioski i błędną ocenę zachowania się kierowców w danej sytuacji drogowej.

Przystępując do analizy zdarzenia, na wstępie należy:

- przemyśleć możliwe zachowania się kierujących,
- rozważyć przyjęcie wersji, czy któryś z nich rzeczywiście hamował przed zderzeniem, czy też rozpoczął hamowanie po kolizji, i z jaką zwłoką.

Oczywiste jest, że przyjęcie założenia o rozwiniętym w pełni hamowaniu na całym odcinku ruchu pozderzeniowego będzie ułatwieniem pracy biegłego, ale także będzie rzutowało na wyniki wyliczeń prędkości w chwili zderzenia. Jeżeli nie ma pewności co do tego, czy hamowanie faktycznie miało miejsce i czy nie wystąpiła jakaś nieokreślona zwłoka w jego podjęciu, to rekonstrukcyjna metoda analizy zderzenia nie będzie właściwa, a więc należy korzystać z metod symulacyjnych.

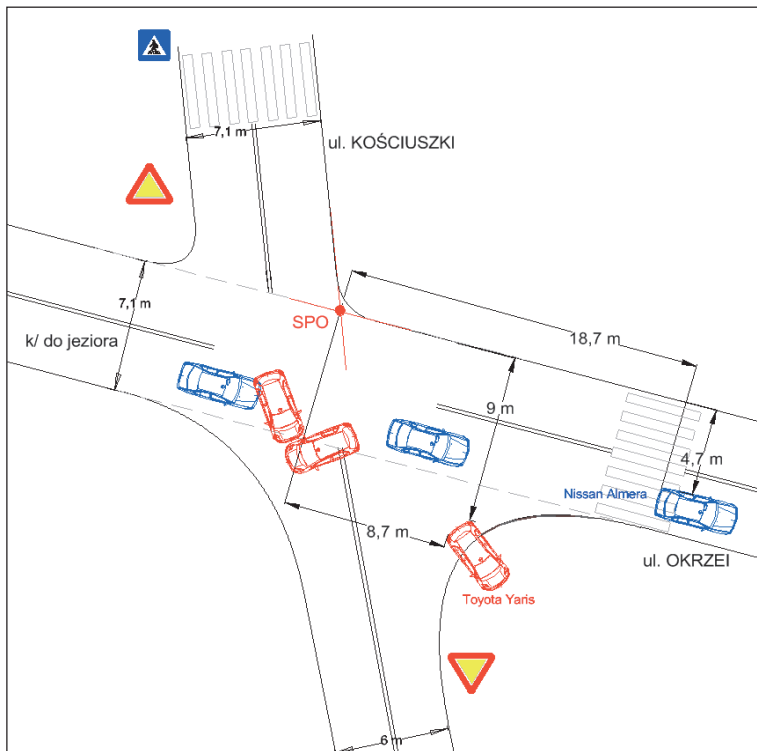
2. Przykład obliczeniowy

Wykorzystanie obliczeń symulacyjnych przy użyciu impulsu siły uderzenia przedstawimy na przykładzie ukośnego zderzenia samochodów Nissan Almera i Toyota Yaris.

W tej sprawie zawarty w aktach *szkic miejsca wypadku drogowego* oraz *protokół oględzin miejsca wypadku drogowego* nie zachwycały starannością, a wręcz wprowadzały w błąd. Skrzyżowanie narysowano jako prostopadłe, chociaż takim nie było, jezdnie w rzeczywistości nie były równej szerokości, ślady i powypadkowe pozycje samochodów zmierzono od tak odległego punktu odniesienia, że bez własnych pomiarów, przeskalowania wymiarów i sporządzenia prawidłowego szkicu, pokazanego na rycinie 1, zrekonstruowanie wypadku byłoby co najmniej niezwykle utrudnione.

Na płaskim skrzyżowaniu o ustalonych znakach pierwszeństwa samochód Nissan Almera, jadąc drogą z pierwszeństwem (z zachodu), uderzył lewym przednim narożem w prawy tył toyoty, która wjechała na skrzyżowanie z północy, kierując się na południe. Wypadek miał miejsce nocą, na mokrej asfaltowej nawierzchni, w terenie zabudowanym. Po zderzeniu nissan zatrzymał się za skrzyżowaniem, zgodnie z dotychczasowym kierunkiem jazdy, tylnymi kołami na przejściu dla pieszych. Uderzona toyota została zarzucona w prawo i w rotacji o blisko pełen obrót wjechała na chodnik (ryc. 1).

Niestety, kierujący toyotą starszy mężczyzna po pewnym czasie zmarł w szpitalu, po różnorodnych powikłaniach związanych z udziałem w wypadku.



Ryc. 1. Szkic sytuacyjny wypadku sporządzony przez autorów.

Uszkodzenia nissana obejmowały: pogięte i załamane wzmocnienie czołowe oraz boczne lewe z podłużnicą, załamany lewy błotnik, pogiętą pokrywę komory silnika, połamany zderzak, kratę wlotu powietrza i zgnieciony reflektor (ryc. 2).



Ryc. 2. Widok uszkodzeń samochodu Nissan Almera.

Ten obraz uszkodzeń pozwala przyjąć, że impuls siły uderzenia był przyłożony w bliskiej okolicy przedniej części lewej podłużnicy (najbardziej wytrzymałego elementu przodu nadwozia) i był skierowany ukośnie w stronę prawego tylnego narożnika tego samochodu. Co istotne, kierunek działania tego impulsu powinien był przebiegać przez środek masy nissana, gdyż w ruchu poźderzeniowym, na mokrej jezdni, nie nastąpiła rotacja tego samochodu.

Strefa uszkodzeń toyoty (ryc. 3) obejmowała okolice tyłu nadwozia z prawej strony: pognięty tylny błotnik wraz ze szkieletem, zagiętą krawędź drzwi, przemieszczone i pognięte zawieszenie tylnego koła. Impuls uderzenia działał poprzecznie do podłużnej osi pojazdu, przyłożony w okolicy prawego tylnego narożnika toyoty, co poskutkowało znacznym momentem obrotowym.



Ryc. 3. Widok uszkodzeń samochodu Toyota Yaris.

W opinii zawartej w przedłożonych nam aktach sprawy, na podstawie powyższych przemieszczeń pojazdów błędnie zostały obliczone parametry zderzenia, w efekcie czego prędkość uderzającego nissana ustalono na 90 km/h (!) i oskarżono kierującego nim o spowodowanie wypadku. Tymczasem przedstawiona poniżej analiza wypadku wykazała, że faktyczna prędkość nissana była znacznie mniejsza, a rzeczywistym sprawcą wypadku był kto inny.

3. Impuls siły uderzenia

Do obliczenia wartości impulsu siły uderzenia konieczne jest oszacowanie wartości wskaźników *EES* obu pojazdów. Zawarte w aktach zdjęcia uszkodzeń uczestniczących w wypadku pojazdów porównaliśmy ze zbliżonymi przypadkami ze zbiorów własnych i z katalogu *EES* prof. Gabora Melegha. Po porównawczym przeanalizowaniu uszkodzeń (ryc. 4a), w przypadku nissana za najbardziej odpowiedni przedział wartości *EES* uznaliśmy 14–15 km/h.

Samochód Toyota Yaris został uderzony w tylny prawy narożnik i okolice tylnego koła. Korzystając z własnych zbiorów przykładowych deformacji (ryc. 4b) przyjęliśmy dla toyoty wartość wskaźnika *EES* na poziomie 12–15 km/h.



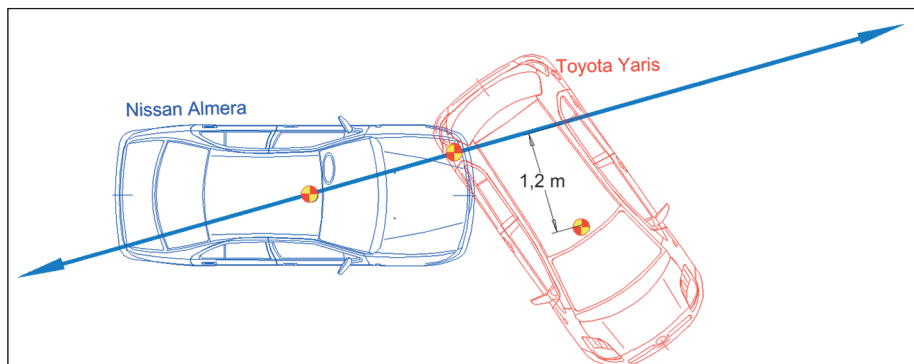
a)



b)

Ryc. 4. Porównawcze przykłady deformacji.

Na podstawie uszkodzeń nadwozi oraz po przeanalizowaniu pozderzeniowego ruchu samochodów można było założyć, że wektor impulsu uderzenia mógł być przyłożony w okolicy przedniej części lewej podłużnicy nissana i prawego tylnego narożnika toyoty – tak, jak to przedstawia ryc. 5.



Ryc. 5. Położenie kolizyjne samochodów i kierunek impulsu uderzenia.

Liczyliśmy się z tym, że w trakcie obliczeń potrzebna może okazać się korekta punktu przyłożenia i orientacji wektora impulsu zarówno *in plus* jak i *in minus*, co spowoduje niewielkie zmiany wartości zaznaczonego ramienia (1,2 m).

Przed wyznaczeniem wartości impulsu siły uderzenia niezbędne jest określenie wartości współczynnika restytucji, która m.in. zależy od prędkości względnej zderzenia, ale również od rodzaju zderzających się obiektów. W tym przypadku uderzenie nastąpiło m.in. w ogumione koło, co wspomagało odbicie się uderzonej toyoty. Prędkość względną oszacowaliśmy na około 50 km/h i wyznaczyliśmy wartość współczynnika restytucji k , na poziomie 0,15, pomocniczo korzystając ze wzoru (1).

$$k = \frac{25}{v_{wzgl}^2} \quad (1)$$

Zależność pozwalająca określić wartość impulsu siły uderzenia wyraża się wzorem:

$$S_1 = \frac{I_{c1} \cdot I_{c2} (m_1 \cdot EES_1^2 + m_2 \cdot EES_2^2) \cdot (1+k)}{\left[I_{c2} \cdot \left(\frac{I_{c2}}{m_2} + h_2^2 \right) + I_{c1} \cdot \left(\frac{I_{c1}}{m_1} + h_1^2 \right) \right] \cdot (1-k)} \quad (2)$$

gdzie:

I_{c1}, I_{c2} – momenty bezwładności samochodów [kgm²],

m_1, m_2 – masy samochodów z obciążeniem [kg],

EES_1, EES_2 – parametry energii deformacji [m/s],

k – współczynnik restytucji,

h_1, h_2 – ramiona działania impulsu uderzenia [m].

Wartość wektora impulsu siły uderzenia obliczona według wzoru (2) zawierała się w przedziale od 3920 do 4500 Ns.

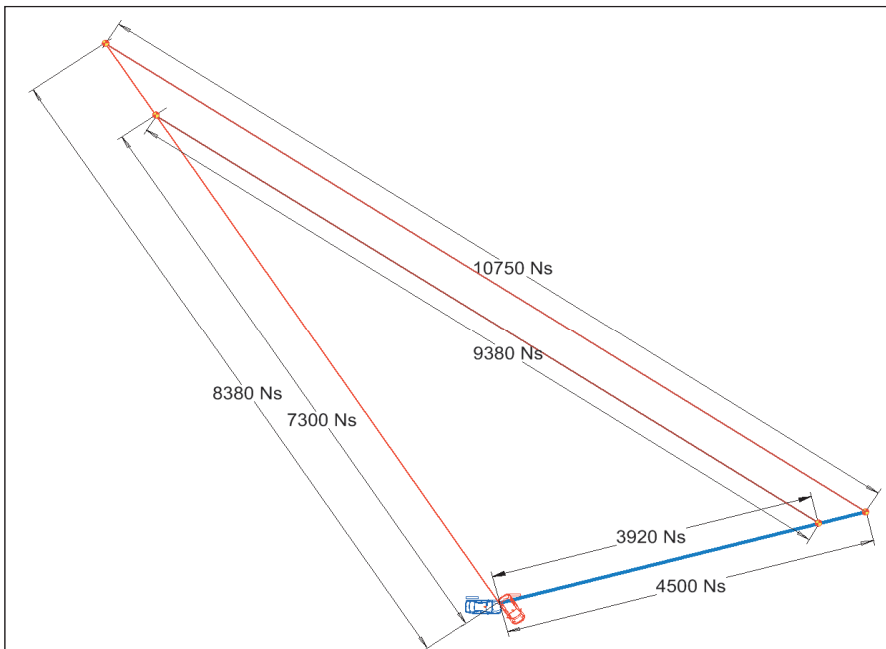
Tabela 1. Wartości parametrów wejściowych do obliczeń

	masa [kg]	moment bezwładności [kgm ²]	parametr <i>EES</i> , przedziały wartości [km/h]	praca deformacji nadwozi – przedziały wartości [J]	ramię impulsu [m]
Toyota Yaris	1155	1256	12–15	6420–10000	1,2
Nissan Almera	1260	1468	14–15	9530–10900	0

4. Obliczenia prędkości

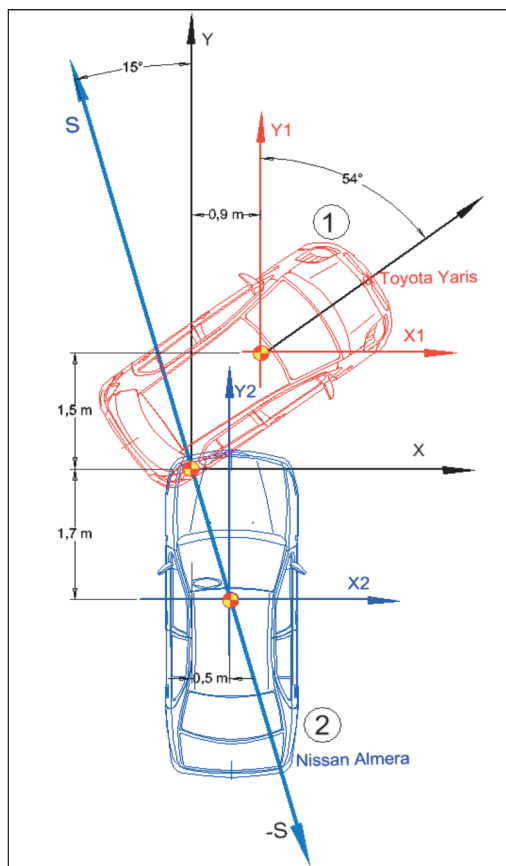
Na podstawie kształtu skrzyżowania można odtworzyć tor jazdy toyoty przed zderzeniem i zgodnie z nim przyjąć kierunek pędu. Ten, wraz z wektorem impulsu uderzenia, utworzyły dwa boki trójkąta według metody *Slibara*. Trzeci bok trójkąta można było wyrysować równoległe do stycznej do ruchu środka masy toyoty. W ten sposób graficznie zostały wyznaczone pozderzeniowe pędy, a po podzieleniu przez masę został ustalony zakres prędkości toyoty (ryc. 6), który wynosi:

- przed zderzeniem 6,3–7,2 m/s (23–26 km/h), zaś
- w ruchu pozderzeniowym 8,1–9,3 m/s (29–33 km/h).



Ryc. 6. Wykres pędów toyoty i impulsu uderzenia.

Trudniejszym zadaniem było obliczenie prędkości nissana. Nie można było bowiem wykorzystać jego ruchu pozderzeniowego, gdyż był on obciążony niustalowaną zwłoką w podjęciu reakcji przez kierującego i niustalowaną intensywnością hamowania na mokrej jezdni. A także dlatego, że samochód po zderzeniu jechał w tym samym kierunku, co przed zderzeniem. Dlatego też należało przekształcić podstawowe zależności teorii uderzenia opisane w literaturze¹ oraz przyjąć układy współrzędnych, takie jak przedstawione na rycinie 7. Dla uproszczenia obliczeń, początek globalnego układu umieszczono w miejscu przyłożenia impulsu uderzenia, o osi X równoległej do prostej stycznej, a dwa pomocnicze układy prawoskrętne umieszczono w środkach mas samochodów.



Ryc. 7. Przyjęte układy współrzędnych i wymiary.

Po przekształceniu wzorów określających związki kinematyczne obu obiektów otrzymany wzór przedstawia poszukiwaną wartość prędkości nissana wzdłuż osi OY2.

¹ Zob. *Wypadki drogowe – elementy analizy technicznej i opiniowania*, praca zbiorowa pod red. J. Wiercińskiego, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1985.

$$v_{2y} = \frac{S_y \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{x_1 \cdot (x_1 - q \cdot y_1)}{I_{c1}} + \frac{x_2 \cdot (x_2 - q \cdot y_2)}{I_{c2}} \right)}{1+k} + v_{1y} \quad (3)$$

gdzie:

$$S_y = S \cdot \cos 15^\circ, q = \operatorname{tg} 15^\circ, v_{1y} = v_1 \cdot \cos 54^\circ, v_{2y} = v_2$$

m_1, m_2 – masy samochodów z obciążeniem [kg],

I_{c1}, I_{c2} – momenty bezwładności samochodów [kgm²],

k – współczynnik restytucji,

S_y – współrzędna impulsu uderzenia rzutowana na osi OY [Ns],

x_1, x_2 i y_1, y_2 – współrzędne punktu działania impulsu w układach pomocniczych,

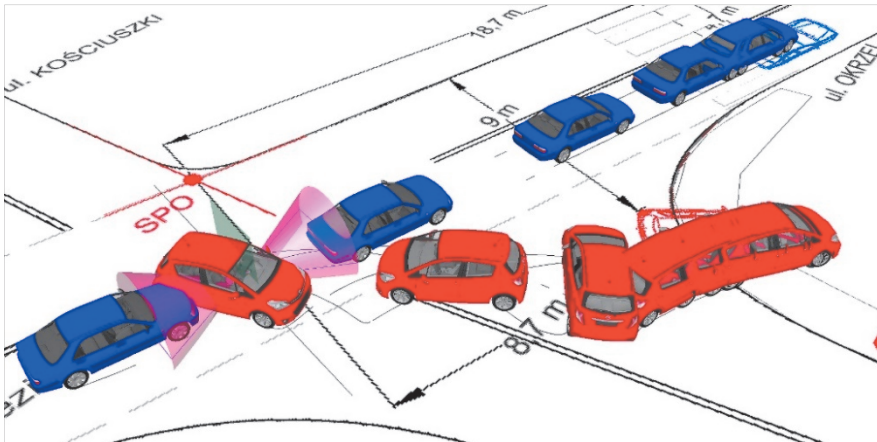
v_{1y} – prędkość początkowa toyoty rzutowana w układzie pomocniczym OY1,

q – współczynnik opisujący współrzędne wektora impulsu $q = \frac{S_x}{S_y}$.

Po podstawieniu przedziałów wartości wejściowych, okazało się, że prędkość nissana w początkowej chwili zderzenia wynosiła 11,4–13,1 m/s (41–47 km/h), co dalece różni się od wyniku zawartego w poprzedniej opinii zalegającej w aktach sprawy (90 km/h).

5. Kontrola wyników z wykorzystaniem programu PC-Crash

Przedstawiony przypadek ukośnego zderzenia przeliczono w programie *PC-Crash* (ryc. 8) metodą optymalizacyjną, z wykorzystaniem algorytmu liniowego. Na krawędzi chodnika wyznaczono powierzchnię o zwiększonej przyczepności, imitującej przejechanie przez krawężniki. Zdefiniowano pozycje pozderzeniowe oraz przewidywane położenia pośrednie.



Ryc. 8. Wynik obliczeń zderzenia z programu PC-Crash.

Obliczona w tym programie prędkość toyoty wynosiła 25 km/h, a nissana 51 km/h, przy błędzie całkowitym 8,1%. Impuls siły uderzenia wynosił 4243 Ns, zaś całkowita energia deformacji 19 690 J, co było bliskie wyższym wartościom z przedstawionego wyżej wyliczenia, gdzie całkowita energia deformacji zawierała się w przedziale 15 950–20 900 J. Stąd też można przyjąć prędkość nissana w chwili początkowej zderzenia w przedziale 47–55 km/h i – bazując na tym przedziale wartości – sporządzić analizę czasowo-przestrzenną.

6. Podsumowanie

Przedstawiona metoda dwuwymiarowych obliczeń symulacyjnych wymaga oszacowania wartości parametrów *EES* oraz ustalenia:

- kolizyjnego położenia samochodów,
- miejsca przyłożenia impulsu uderzenia oraz
- określenia przebiegu impulsu.

Ów przebieg impulsu z pozoru wydaje się być trudny do określenia, ale eksperci z doświadczeniem warsztatowym są w stanie, na podstawie kształtu uszkodzonej strefy, wskazać, w jaki sposób była deformowana struktura nadwozia. W ten sposób mogą z dobrym skutkiem posłużyć się doświadczeniem i ustalić miejsce przyłożenia impulsu oraz wyznaczyć jego kierunek we wspólnym obszarze zdeformowanych nadwozi. Do tego pomocna jest analiza powypadkowego ruchu pojazdów, a szczególnie ich rotacji, aby właściwie zdefiniować przebieg impulsu względem któregośkolwiek ze środków masy zderzających się samochodów.

Opisanej metody można użyć jako podstawowego wyliczenia symulacyjnego lub wykorzystać impuls uderzenia jako parametr kontrolny w innych sposobach obliczeń.

* * *

The use of impact force impulse in collision calculations

Abstract

Using the collision of two cars at an intersection as an example the authors present methods of impact parameters application in the simulation approach, using the impact impulse vector specified on the basis of vehicles' permanent deformation. The methodology of the procedure leading to the determination of the value ranges of impact impulse and collision velocities is presented.

Key words

Simulation, impact force impulse, triangles method, *EES*.