

CONCEPTUAL DESIGN OF VEHICLES' PROTECTION AGAINST THE IMPACTS OF COLLISIONS USING THE ENERGY TRANSFER METHOD

Stanisław Gumuła, L. Łągiewka

AGH University of Science and Technology in Cracow
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland
tel./fax: +48 12 6173113, tel: +48 12 6173078
e-mail: KmiUE@imir.agh.edu.pl

Abstract

A subject of the lecture is a description of construction and results of experimental investigations of device called an energy accumulation and diffusion converter – EADC (EPAR). The device gives a possibility of rapid braking and prevention of equipment and mechanical vehicles against collision results by reducing of stroke forces with simultaneous restriction of associated inertia forces in these processes. The operating of these kind of equipment consists of conversion of progressive movement kinetic energy of vehicle into kinetic energy of mechanical accumulator rotational movement. The mechanical accumulator takes over the kinetic energy of vehicle through a gear. In the case of collision the gear is set motion due a force of run obstacle if appears the braking due to subgrade reaction forces.

The investigations have been carried out on model vehicles of about 10 kg mass and real vehicles (cars) of about 1000 kg mass.

One obtained many times lower maximum value of vehicle stroke force against the obstacle and inertia force generating during the collision compared with the same forces in the case when bumping vehicle was without the bumper with energy conversion.

Keywords: vehicles, safety, vehicle crash, mechanical energy transfer

KONCEPCJA ZABEZPIECZANIA POJAZDÓW PRZED SKUTKAMI ZDERZEŃ METODĄ PRZEKAZANIA ENERGII

Streszczenie

Przedmiotem artykułu jest opis konstrukcji i wyniki badań urządzenia doświadczalnych zwanego akumulatorem energii i konwerter rozpraszania - EADC (EPAR). Urządzenie daje możliwość nagłego hamowania i chroni wyposażenie mechaniczne pojazdów przed efektami kolizji poprzez zmniejszanie sił uderzenia z równoczesnym ograniczeniem skojarzonych z tym sił bezwładności występujących w trakcie uderzenia. Działanie tego rodzaju wyposażenia obejmuje konwersję energii kinetycznej ruchu postępowego pojazdu w energię kinetyczną akumulatora mechanicznego ruchu obrotowego. Akumulator mechaniczny przejmuje energię kinetyczną pojazdu przez przekładnię. W wypadku kolizji przekładnia to jest wprawiana w ruch obrotowy w wynik działania ruchomej przeszkody, w sytuacji, gdy wystąpi hamowanie, co jest spowodowane siłami reakcji podłoża.

Badania były wykonane na modelach pojazdów o masie około 10 kg i na rzeczywistych pojazdach (samochody) o masie około 1000 kg.

Otrzymano wielokrotnie niższą maksymalną wartość sił uderzenia pojazdu o przeszkodę oraz bezwładności generowanych podczas kolizji w porównaniu z takimi samymi siłami w sytuacji, kiedy uderzający pojazd był bez zderzaka z konwerterem energii.

Słowa kluczowe: pojazd samochodowy, bezpieczeństwo, zderzenia pojazdów, konwerter energii mechanicznej

Wykaz oznaczeń

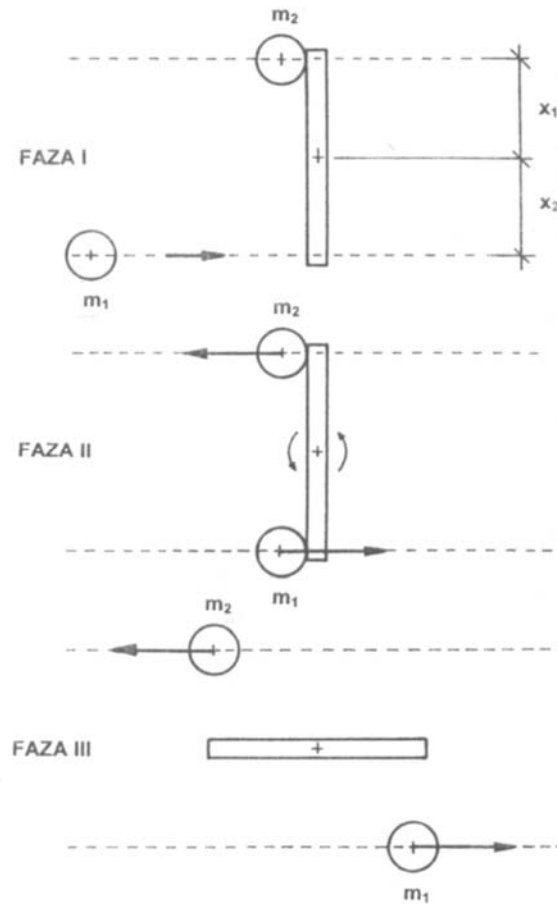
- t – czas,
 x – współrzędna liniowa, długość, przemieszczenie liniowe,
 m – masa,
 $\bar{\pi}$ – popęd,
 \bar{p} – pęd,
 \bar{B}_t – teoretyczna siła bezwładności określona na podstawie zmierzonego przyspieszenia (pomiarów kinematycznych),
 \bar{B}_{rz} – rzeczywista siła bezwładności, określona na podstawie wskazań akcelerometru (pomiaru siłowego),
 \bar{F} – siła uderzenia obiektu ruchomego w przeszkodę, mierzona bezpośrednio czujnikiem siły,
 \bar{R} – siła reakcji przeszkody, równa sił \bar{F} ze znakiem przeciwnym,
 E_{ks} – energia kinetyczna ruchu postępowego samochodu,
 E_{ka} – energia kinetyczna ruchu obrotowego akumulatora mechanicznego,
 E_t – energia przekształcona na pracę termodynamiczną sprężania w sprężynach pneumatycznych,
 E_d – energia ulegająca dyssypacji na skutek tarcia i odkształceń elementów,
 \bar{V} – prędkość liniowa pojazdu, mierzona termoanemometrem,
 \bar{a} – przyspieszenie liniowe pojazdu, określone na podstawie przebiegu jego prędkości $V(t)$ (pomiar kinematyczny),
 $\frac{\bar{a}}{g}$ – bezwymiarowe przyspieszenie liniowe,
 $\frac{\bar{b}}{g}$ – przeciążenie, mierzone bezpośrednio akcelerometrem (pomiar siłowy),
 \bar{b} – jednostkowa siła bezwładności (dla $m = 1$), określona na podstawie mierzonego przeciążenia.

1. Wprowadzenie

Badania eksperymentalne wykazały, że istnieje możliwość znacznego obniżenia siły uderzenia podczas zderzeń obiektów fizycznych posiadających tę samą energię kinetyczną.

Najprostszym, bardzo łatwym do wykonania, eksperymentem ilustrującym tę sytuację są zderzenia stalowych kul za pośrednictwem dźwigni. Z przewidzianych do zderzania się kul wykonujemy dwa wahadła umieszczone po przeciwnych stronach osi obrotu dźwigni. Dźwignia posiada pionową oś obrotu, jest przymocowana do ziemi, dobrze ułożyskowana i ma mały moment bezwładności. Układ elementów przewidzianych do zderzeń i poszczególne fazy badanego zjawiska przedstawia rysunek 1.

- Faza I – kule stanowiące wahadła znajdują się w spoczynku. Kula o masie m_1 jest odchylona od położenia równowagi na wysokość h_1 . Kula o masie m_2 wisi, opierając się o dźwignię.
- Faza II – kula o masie m_1 puszczona z wysokości h_1 rozpędza się i uderza w dźwignię z prędkością $\sqrt{2gh_1}$ i przekazuje za pośrednictwem dźwigni energię kuli o masie m_2 .
- Faza III – kule podążają w kierunkach przeciwnych, kula o masie m_1 straciła część energii kinetycznej przekazując ją kuli o masie m_2 .



Rys. 1. Schemat układu do badań zderzenia z przekazaniem energii za pośrednictwem dźwigni
 Fig. 1. Experimental setup for investigation of crash, process with through lever energy transport

Jeżeli przełożenie dźwigni jest 1:1, czyli ramię x_1 jest identyczne jak ramię x_2 oraz równe sobie są masy m_1 oraz m_2 , to w następstwie zderzenia, kule dzielą się energią kinetyczną po połowie. Jeżeli w tym samym układzie, ukształtujemy ramiona dźwigni w ten sposób, że ramię x_1 będzie większe od ramienia x_2 , to tę samą energię możemy przekazać masie m_2 znacznie mniejszym impulesem siły (popędem). Istnieje możliwość takiego doboru długości ramion dźwigni oraz proporcji pomiędzy masą przejmującą energię a masą oddającą energię, że podczas zderzenia, do masy m_2 przepływnie ponad 80% energii posiadanej przed zderzeniem przez kulę o masie m_1 .

Jeżeli w miejsce kuli uderzającej o masie m_1 wprowadzimy pojazd, dźwignię zastąpimy przekładnią, a masa m_2 będzie elementem przejmującym energię kinetyczną pojazdu podczas zderzenia, to przedstawimy w ten sposób koncepcję działania urządzenia określonego nazwą EPAR (EADC).

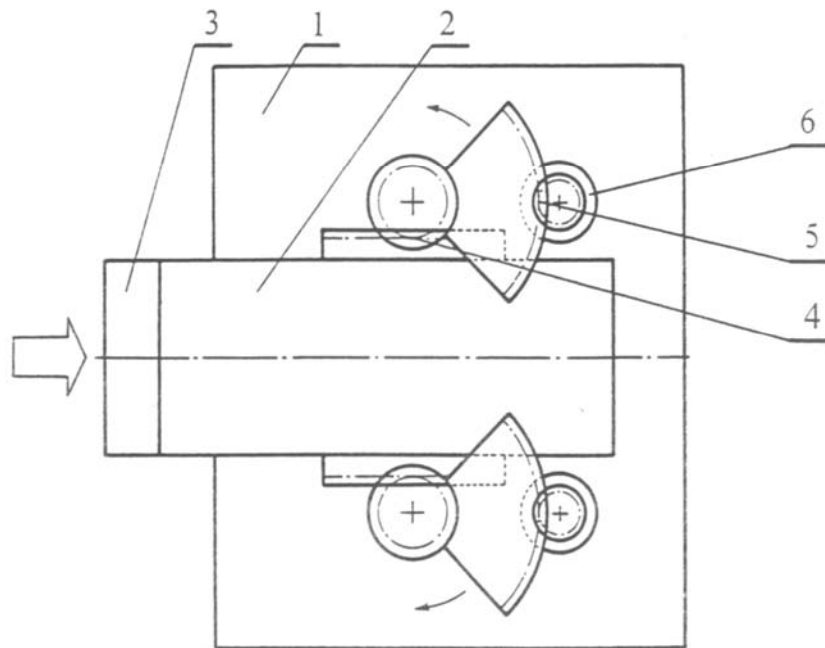
Pokażemy teraz konstrukcję EPARu oraz wyniki badań procesu zderzenia z nieruchomą przeszkodą samochodu wyposażonego w to urządzenie.

2. Obiekty badań

Najpierw przedstawimy przykład rozwiązania konstrukcyjnego urządzenia określonego nazwą EPAR oraz omówimy zasadę jego działania.

EPAR i jego podstawowe części składowe pokazane zostały na rysunku 2. Opis sposobu działania przedstawiono poniżej.

Elementy wchodzące w skład EPARu zamontowane są na płycie nośnej – 1, połączonej na stałe z karoserią pojazdu. Klasyczny zderzak samochodowy wysunięty przed karoserią, nie jest w tym przypadku połączony sztywno z karoserią. Jest natomiast połączony z elementem – 2, ruchomym względem karoserii. Podczas zderzenia, element – 2 przejmuje za pośrednictwem przymocowanego do niego zderzaka siłę uderzenia pojazdu w przeszkodę i przekazuje energię kinetyczną poprzez element sprężysty – 3 do mechanizmu zębatkowego – 4. Element sprężysty 3 posiada blokadę ruchu powrotnego. Energia przepływając przez mechanizm zębatkowy – 4, zostaje zamieniona z energii kinetycznej ruchu postępowego pojazdu w energię kinetyczną ruchu obrotowego elementów EPARu. Z mechanizmem zębatkowym – 4 połączona jest przekładnia multiplikacyjna – 5 przekazująca energię do mechanicznego akumulatora wirnikowego – 6. Element 2 i 3 posiada prowadnice połączone z płytą nośną – 1. Osie obrotu wszystkich kół zębatych i akumulatora mechanicznego również są połączone na stałe z płytą nośną – 1. Przekładnia multiplikacyjna może być kilkustopniowa. Współpraca wszystkich elementów przekazujących sobie energię ma charakter impulsowy, trwający kilkadziesiąt milisekund. Po przepłynięciu energii wszystkie współpracujące elementy przekładni rozłączają się to znaczy ich zęby przestają się zazębiać. W ten sposób energia kinetyczna jest zgromadzona tylko w akumulatorze mechanicznym. Energia zgromadzona w akumulatorze może być stopniowo rozproszona lub wykorzystana do napędu pojazdu. EPAR może posiadać jeden, dwa (rys. 2) lub więcej akumulatorów mechanicznych.

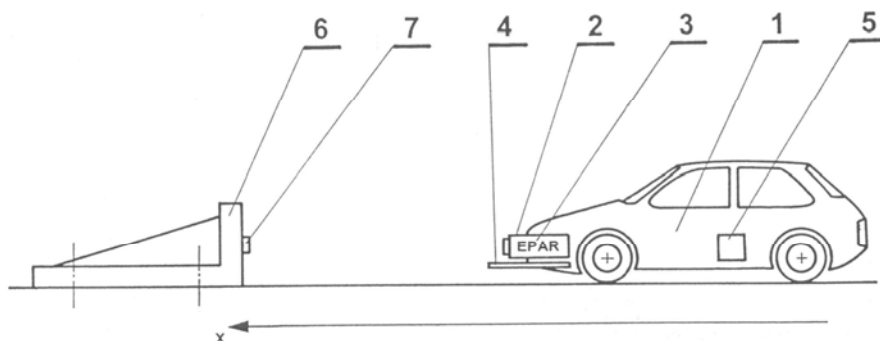


Rys. 2. Schemat rozwiązania konstrukcyjnego EPAR
Fig. 2. EADC structure

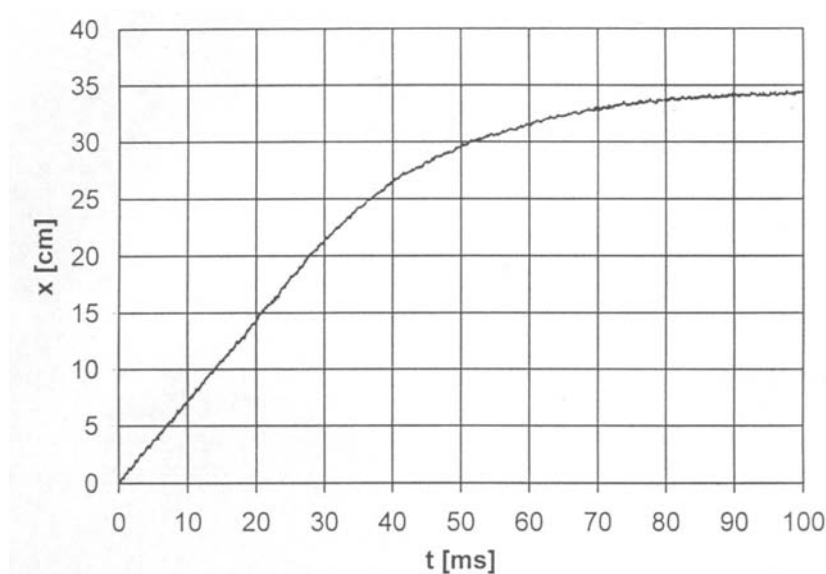
3. Metoda badań

Schemat stanowiska badawczego pokazany został na rysunku 3. Podstawowym elementem stanowiska był samochód – 1. Samochód wyposażony był w zderzak zawierający EPAR, w którym pracował jeden akumulator mechaniczny – 2. EPAR posiadał układ pomiarowy do rejestracji przebiegu prędkości obrotowej akumulatora wirnikowego – 3. Do samochodu przymocowany był układ pomiarowy do określania przebiegu drogi, prędkości i

przyspieszenia w funkcji czasu – 4. Rejestracja tych wielkości dokonywana była przed zderzeniem i podczas zderzenia. Wewnątrz samochodu przymocowany był akcelerometr do pomiaru i rejestracji przeciążeń (sił bezwładności) – 5. Pojazd zderzał się z przeszkodą – 6. Przeszkoda wyposażona była w urządzenia do pomiaru i rejestracji siły uderzenia – 7.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 3. Experimental setup



Rys. 4. Przebieg drogi samochodu w funkcji czasu przed zderzeniem i podczas procesu zderzenia z nieruchomą przeszkodą

Fig. 4. Distance covered by the car before and during the collision, in the function of time

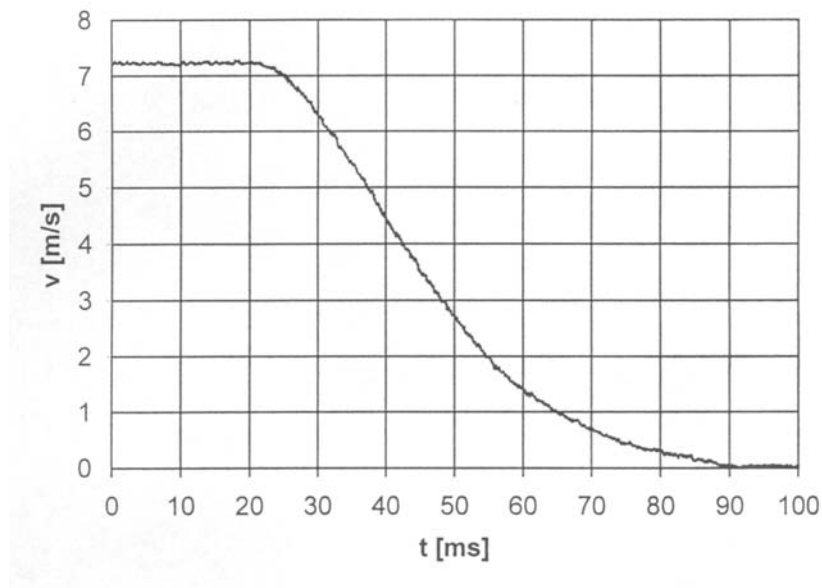
4. Wyniki badań

Przedstawimy wyniki badań uzyskane podczas jednego eksperymentu, w którym pojazd posiadający wraz z kierowcą masę $m = 1100$ kg jadąc z prędkością $V = 7,2$ m/s (25,9 km/h), czyli posiadając energię kinetyczną ruchu postępowego $E_{ks} = 28512$ J, uderzył w nieruchomą przeszkodę zderzakiem połączonym z karoserią za pośrednictwem EPARu. EPAR posiadał mechaniczny akumulator wirnikowy o momencie bezwładności wynoszącym $I = 0,0125$ kg m^2 .

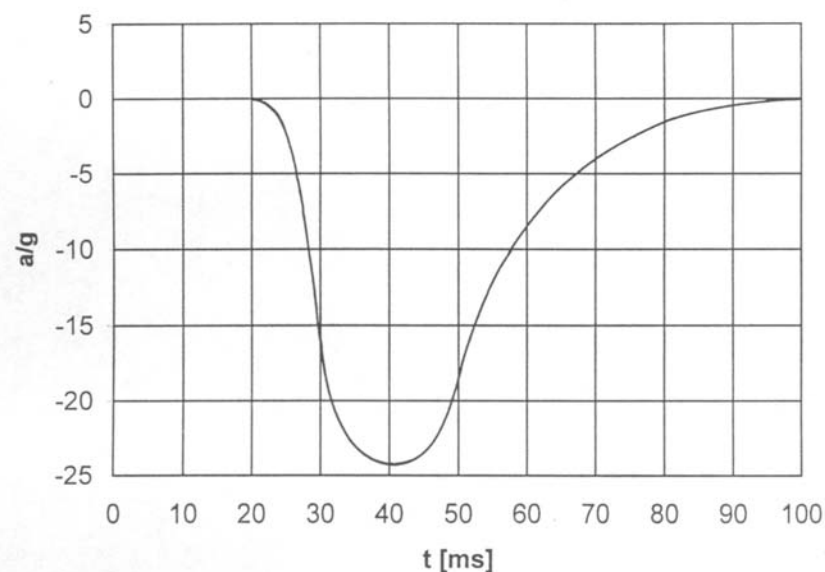
Wyniki badań przedstawione zostały w postaci wykresów na rysunkach 4, 5, 6, 7 i 8. Przebiegi parametrów fizycznych charakteryzujących badany proces rejestrowane były w ciągu czasu $\Delta t = 100$ ms. W przyjętej na rysunkach skali czasu, w chwili równej zero z przeszkodą zetknął się przymocowany do samochodu czujnik przesunięcia mierzący drogę w

funkcji czasu, oznaczony na rysunku 2 numerem 4. W tej samej chwili rozpoczęła się rejestracja wszystkich parametrów. Samochód jechał nadal ze stałą prędkością do chwili czasu $t = 20$ ms. W chwili czasu wynoszącej 20 ms nastąpił początek zderzenia, to znaczy z przeszkodą zetknęła się przednia część zderzaka, która jest ruchoma względem samochodu. Od tej chwili czołowa część zderzaka nie wykonywała już względem przeszkody żadnego ruchu, natomiast nadal w ruchu znajdował się samochód. Ruch samochodu względem przedniej części zderzaka uruchomił elementy EPARu a te przekazywały energię kinetyczną samochodu do akumulatora wirnikowego.

Przebieg drogi – $x(t)$ w czasie zbliżania się samochodu do przeszkody oraz podczas procesu zderzenia przedstawia rysunek 4.



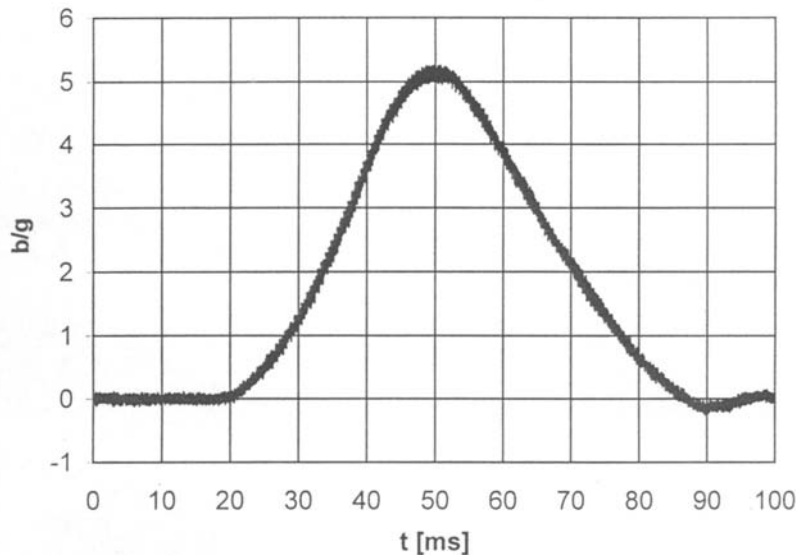
Rys. 5. Przebieg prędkości samochodu przed i podczas zderzenia
Fig. 5. Car's velocity before and during the collision



Rys. 6. Przebieg opóźnienia samochodu podczas procesu zderzenia
Fig. 6. Car's deceleration during the collision

Długość drogi, na której samochód tracił prędkość i energię wynosiła $\Delta x = 0,2$ m. Długość tej drogi można w pewnym zakresie kształtować ciśnieniem początkowym w sprężynach pneumatycznych. Przebieg prędkości ruchu samochodu – $V(t)$, określonej termooanemometrem, przedstawia rysunek 5. Przebieg przyspieszenia (w tym przypadku opóźnienia), określonego jako pochodna prędkości $V(t)$ względem czasu, przedstawia rysunek 6. Przyspieszenie to będące wielkością kinematyczną oznaczone przez \bar{a} , zostało na rysunku wyrażone w bezwymiarowych jednostkach względnych odniesionych do przyspieszenia ziemskiego $\left(\frac{\bar{a}}{g}\right)$. Przebieg prędkości w funkcji czasu, pokazany został na rysunku 5. Przebieg przyspieszenia w funkcji czasu, pokazany na rysunku 6, można również określić na podstawie zarejestrowanego przebiegu drogi w funkcji czasu przedstawionego na rysunku 4. Rysunek 7 pokazuje określony przy pomocy akcelerometru przebieg przeciążenia. Przeciążenie będące wielkością dynamiczną, zgodnie ze swoją definicją, również wyrażone jest w jednostkach względnych odniesionych do przyspieszenia ziemskiego i oznaczone $\frac{\bar{b}}{g}$.

Rysunek 8 pokazuje przebieg siły uderzenia pojazdu w przeszkodę – $F(t)$.



Rys. 7. Przebieg przeciążenia

Fig. 7. Gravity load variation

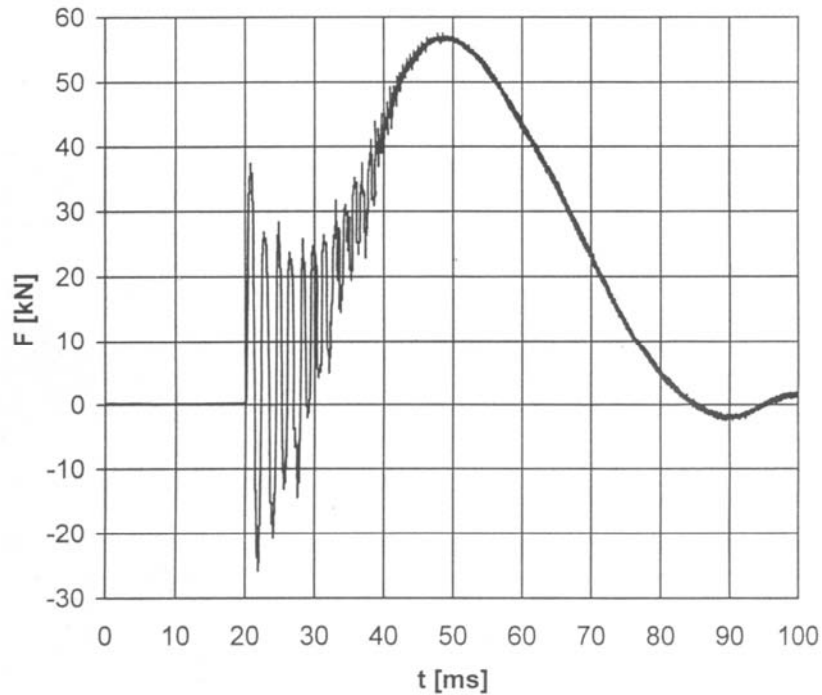
5. Analiza wyników badań i wnioski

Siłę bezwładności działającą na masy w nieinercyjnym układzie współrzędnych związanym z samochodem możemy wyznaczyć na podstawie zależności:

$$\bar{B}_t = -m\bar{a}, \quad (1)$$

czyli na podstawie pomiarów kinematycznych. Występujący we wzorze przebieg przyspieszenia \bar{a} pokazany jest na rysunku 6. Tak określoną wielkość nazwano teoretyczną siłą bezwładności, bowiem wyznaczona jest pośrednio na podstawie zmierzonego przyspieszenia. W zastosowanym układzie pomiarowym możemy siłę bezwładności wyznaczyć również na podstawie bezpośredniego pomiaru dynamicznego, wykonanego akcelerometrem, mierzącym w rzeczywistości przeciążenie, czyli siłę. W tym przypadku posłużymy się zależnością:

$$\bar{B}_{rz} = m\bar{b}. \quad (2)$$



Rys. 8. Przebieg siły uderzenia samochodu w nieruchomą przeszkodę

Fig. 8. Impact force of the collision

Tak określoną siłę bezwładności nazwano rzeczywistą, bowiem pochodzi z bezpośrednich pomiarów siłowych.

Na rysunku 8 przedstawiony jest przebieg siły uderzenia samochodu o przeszkodę – \bar{F} . Siła \bar{F} po zmianie znaku określa siłę reakcji przeszkody działającą na samochód – \bar{R} .

Wzdłuż współrzędnej x podczas zderzenia, na samochód działają tylko te dwie siły: \bar{R} oraz \bar{B}_{rz} . Porównując przebiegi siły \bar{B}_{rz} oraz siły \bar{R} widać, że ich przebiegi są bardzo zbliżone, natomiast znaki posiadają przeciwne. Zatem z dobrym przybliżeniem spełniają równanie:

$$\bar{R} + \bar{B}_{rz} = 0. \quad (3)$$

Przy braku działających na samochód zewnętrznych sił czynnych, zależność (3) wyraża zasadę d'Alemberta. Można, zatem powiedzieć, że badany pojazd potraktowany jako bryła sztywna w ruchu postępowym prostoliniowym spełnia zasadę d'Alemberta.

Energia kinetyczna samochodu przed zderzeniem, uwzględniając tylko ruch postępowy, wynosiła $E_{ks} = 28512$ J. Mechaniczny akumulator wirnikowy przejął i zgromadził w postaci energii kinetycznej ruchu obrotowego energię $E_{ka} = 24200$ J. Energia zamieniona na pracę przemiany termodynamicznej w sprężynach pneumatycznych wynosiła około $E_t \approx 1000$ J. Jeżeli przyjmiemy, że trudna do zmierzenia dysypacja energii E_d na tarcie i odkształcenie elementów wynosiła około $E_d \approx 3300$ J to możemy napisać przybliżoną równość:

$$E_{ks} \approx E_{ka} + E_t + E_d, \quad (4)$$

zawierającą bilans energii, którą można interpretować jako spełnienie zasady zachowania energii.

Zarejestrowane wartości przeciążenia – rysunek 7, posiadają w tych samych chwilach czasu znacznie mniejsze wartości niż zarejestrowane bezwymiarowe przebiegi przyspieszenia – rysunek 6. Oznacza to eksperymentalne stwierdzenie, że siły bezwładności podczas trwania prędkości poprzez przekazanie energii za pośrednictwem przekładni mogą być mniejsze niż określone na podstawie relacji (1).

W sytuacji zderzenia bez pośrednictwa przekładni i przekazania energii, siłę uderzenia podczas zderzenia można określić z zasady pędu i popędu. Według tej zasady popęd siły uderzenia pojazdu w przeszkodę – $\bar{\pi}$ jest równy zmianie pędu pojazdu – $\Delta\bar{p}$, co można zapisać równaniem:

$$\Delta\bar{p} = \bar{\pi} \quad (5)$$

lub równaniem:

$$\Delta(m\bar{V}) = \int_{t_1}^{t_2} \bar{F} dt. \quad (6)$$

W analizowanym wypadku pęd samochodu przed zderzeniem wynosił $\bar{p} = 7,9$ kNs, natomiast po zderzeniu - zero. Tym samym wielkość pędu przed zderzeniem jest równocześnie zmianą pędu. Na mocy zasady pędu i popędu, popęd siły uderzenia, powinien wynosić tyle samo, co zmiana pędu, czyli powinna zachodzić zależność $\Delta\bar{p} = \bar{\pi} = 7,9$ kNs.

Popęd określony na podstawie wyników pomiarów przebiegu czasowego siły uderzenia w przeszkodę, pokazanego na rysunku 8, wynosi około $\bar{\pi} = 1,4$ kNs. Oznacza to, że w sytuacji zderzenia z przekazaniem energii za pośrednictwem przekładni, zmiana pędu masy uderzającej w przeszkodę jest większa niż popęd siły uderzenia. Inaczej mówiąc, tę samą zmianę pędu można spowodować mniejszym popędem siły (mniejszą reakcją przeszkody na uderzający w nią obiekt).

Sposób utraty energii kinetycznej poprzez jej przekazanie za pośrednictwem przekładni stwarza ogromne możliwości wykorzystania tego zjawiska do obniżenia siły uderzenia podczas zderzeń.

