

WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA OPORU TOCZENIA I WSPÓŁCZYNNIKA OPORU POWIETRZA

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynników oporu powietrza c_x i oporu toczenia f samochodu metodą wybiegu.

Wprowadzenie

Pomiar prowadzony będzie podczas wybiegu. Oznacza to, że pojazd będzie rozpędzony do prędkości około 80-90 km/h, a następnie dźwignia zmiany biegów zostanie ustawiona w położeniu neutralnym. Jeżeli samochód toczy się po prostym płaskim odcinku, to działają na niego siły:

- oporu powietrza,
- oporu toczenia,
- bezwładności.

Siła oporu powietrza

Siła oporu powietrza działa na pojazd podczas gdy porusza się on względem masy otaczającego go powietrza. Wyrażenie opisujące siłę oporu powietrza:

$$F_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_x \cdot v_p^2 \quad (1)$$

gdzie:

ρ - gęstość powietrza [kg/m^3],

A - pole powierzchni czołowej pojazdu [m^2],

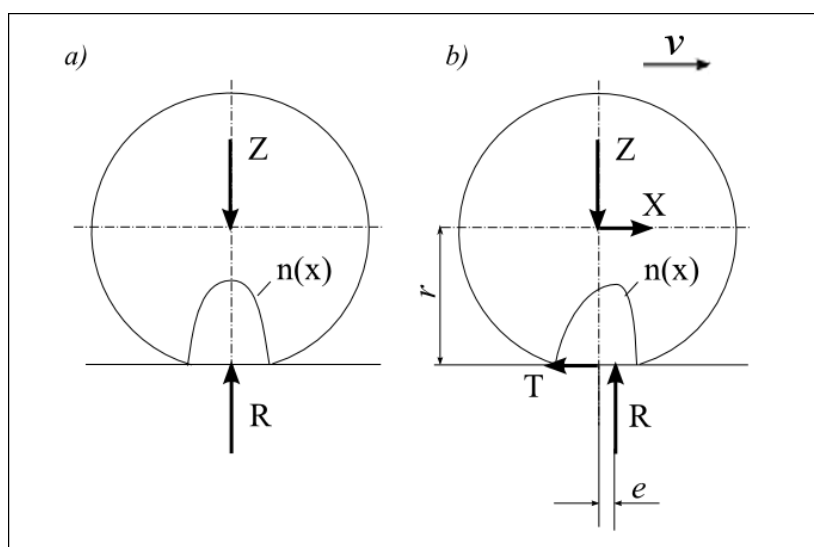
c_x - współczynnik czołowego oporu powietrza (bezwymiarowy),

v_p - prędkość pojazdu względem masy otaczającego go powietrza [m/s].

Współczynnik oporu powietrza c_x dla danego pojazdu jest wielkością stałą, zależy od kształtu bryły nadwozia.

Siła oporu toczenia

Siła oporu toczenia wynika z odkształceń opony koła jezdnego. Rozkład nacisków pod kołem, które się nie toczy jest symetryczny względem pionowej osi symetrii koła (rysunek 1a).



Rysunek 1: Siły działające na koło: a - nieruchome, b - toczące się.

Jeżeli koło toczy się, na skutek właściwości sprężysto-tłumiących opony, rozkład nacisków pod kołem $n(x)$ staje się niesymetryczny względem pionowej osi symetrii koła (rysunek 1b). Wypadkowa siła reakcji R jest więc przesunięta w kierunku toczenia się koła. Moment siły R na ramieniu e jest momentem oporu toczenia. Moment ten jest równoważony momentem siły T na ramieniu równym promieniowi dynamicznemu r . Stąd:

$$T = \frac{e}{r} \cdot Z, \quad (2)$$

gdzie: $\frac{e}{r} = f$ - współczynnik oporu toczenia.

Współczynnik oporu toczenia zależy m.in. od typu opony, ciśnienia w ogumieniu, rodzaju i stanu nawierzchni.

Dla całego pojazdu:

$$T = \sum_{i=1..4} f \cdot Z_i = f \cdot Q, \quad (3)$$

gdzie: Q - ciężar pojazdu.

Siła bezwładności

Siła bezwładności obiektu poruszającego się w ruchu postępowym, na mocy II zasady dynamiki wynosi:

$$F_b = m \cdot a, \quad (4)$$

gdzie: m - masa obiektu, a - przyspieszenie.

Jeżeli ruch postępowy związany jest z ruchem obrotowym pewnych elementów, energia kinetyczna takiego obiektu jest powiększona o energię kinetyczną ruchu obrotowego i siła bezwładności działająca na taki obiekt wynosi:

$$F_b = \delta \cdot m \cdot a, \quad (5)$$

gdzie: δ - współczynnik mas wirujących, uwzględniająca bezwładność kół pojazdu:

$$\delta = 1 + \frac{4 \cdot I_k}{m \cdot r^2}. \quad (6)$$

Bilans sił

Równanie bilansu sił działających na pojazd podczas wybiegu:

$$F_p + T + F_b = 0. \quad (7)$$

Równanie to można przekształcić do postaci:

$$\frac{\delta}{g} \cdot a = -\frac{\rho \cdot A \cdot c_x}{2 \cdot m \cdot g} \cdot v^2 - f. \quad (8)$$

Wykonanie pomiarów

Pojazd użyty do pomiarów musi być sprawny. Przed badaniami powinno być sprawdzone ogumienie i ustawione odpowiednie ciśnienie. Pomiar wykonuje się na prostym odcinku drogi bez wniesień i spadków. Pogoda podczas pomiaru powinna być bezwietrzna i bez opadów.

Samochód rozpędza się do prędkości 80-90 km/h, a następnie ustawia się dźwignię zmiany biegów w położeniu neutralnym i jednocześnie uruchamia się rejestrację prędkości. Prędkość jest rejestrowana do całkowitego zatrzymania pojazdu.

Opracowanie wyników

Na podstawie zarejestrowanej prędkości wyznacza się zależność przyspieszenia od prędkości. Następnie wykonuje się wykres pomocniczy $a \cdot \frac{\delta}{g} (v^2)$ - rysunek 2.

Punkty pomiarowe aproksymuje się prostą. W przykładzie na rys. 2 równanie prostej ma postać:

$$f(x) = -0,000046 \cdot x - 0,012 \quad (9)$$

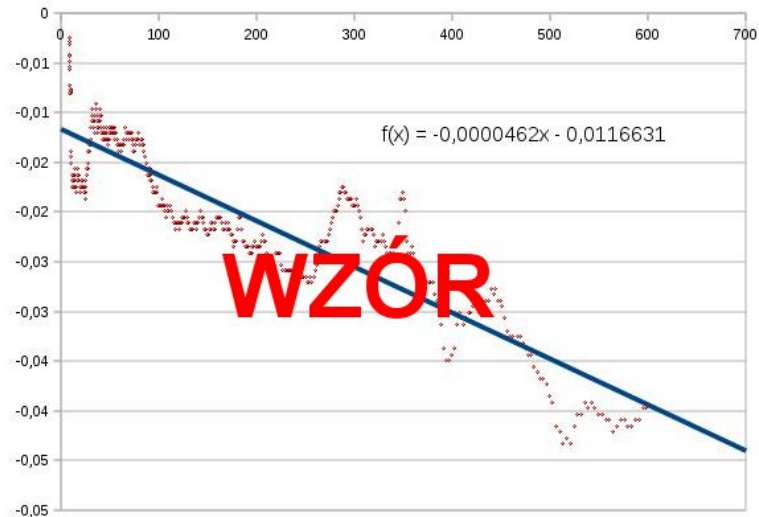
Konfrontując to równanie z równaniem (8) wyznacza się:

współczynnik oporu toczenia:

$$f = 0,012, \quad (10)$$

współczynnik oporu powietrza:

$$\frac{\rho \cdot A \cdot c_x}{2 \cdot m \cdot g} = 4,6 \cdot 10^{-5}. \quad (11)$$



Rysunek 2: Wykres pomocniczy (opis w tekście).

dla:

$A = 4,1m^2$, $\rho = 1,28kg/m^3$, $m = 2300kg$, $g = 9,81m/s^2$ otrzymuje się:

$$c_x = \frac{2 \cdot 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot m \cdot g}{A \cdot \rho} = 0,40. \quad (12)$$

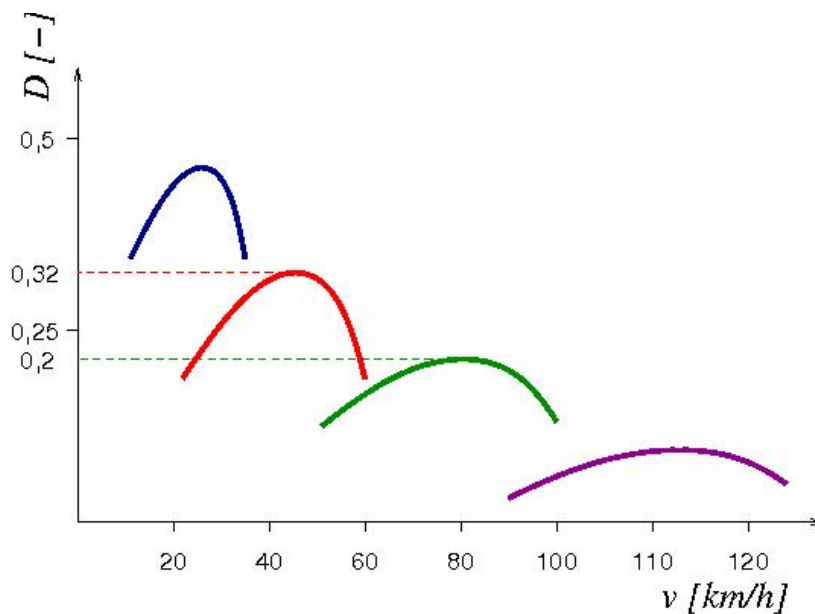
WYZNACZENIE CHARAKTERYSTYKI DYNAMICZNEJ POJAZDU

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie charakterystyki dynamicznej pojazdu na podstawie jego właściwości trakcyjnych.

Charakterystyka dynamiczna

Charakterystyka dynamiczna jest zależnością wskaźnika dynamicznego D od prędkości pojazdu v - rysunek 3.



Rysunek 3: Charakterystyka dynamiczna (przykład).

W ogólnym przypadku bilans sił działających na pojazd podczas jazdy przy założeniu pracy silnika na charakterystyce zewnętrznej (maksymalna możliwa do osiągnięcia wartość momentu napędowego) i całkowitego obciążenia pojazdu ma postać:

$$F_n = F_p + T + F_w + F_b, \quad (13)$$

gdzie: F_n – siła napędowa, F_p – siła oporu powietrza, T – siła oporu toczenia, F_w – siła oporu wzniesienia, F_b – siła bezwładności.

Poszczególne składniki równania:

$$T = Q_c \cdot f, \quad (14)$$

$$F_w = Q_c \cdot \sin \alpha \approx Q_c \cdot \tan \alpha = Q_c \cdot w, \quad (15)$$

$$F_b = \delta \cdot m_c \cdot a = \delta \cdot \frac{Q_c}{g} \cdot a. \quad (16)$$

Jeżeli wartość siły oporu powietrza przeniesie się na lewą stronę równania (13) i obie strony równania podzieli się przez ciężar pojazdu Q_c , to pamiętając definicję wskaźnika dynamicznego:

$$D = \frac{F_n - F_p}{Q_c}, \quad (17)$$

otrzymujemy poniższą postać równania:

$$D = f + w + \frac{\delta}{g} \cdot a. \quad (18)$$

Jeżeli pojazd nie jest całkowicie obciążony, to trzeba uwzględnić współczynnik załadowania pojazdu:

$$\lambda = \frac{Q}{Q_c}, \quad (19)$$

z którego wynika:

$$Q_c = Q \cdot \lambda \quad (20)$$

i równanie (18) przyjmuje postać:

$$D = \lambda \cdot \left(f + w + \frac{\delta}{g} \cdot a \right). \quad (21)$$

Znając charakterystykę dynamiczną, można wyznaczyć podstawowe parametry ruchu pojazdu, nie wykonując skomplikowanych obliczeń.

Przykład 1 Wyznaczyć maksymalną wartość przyspieszenia na II biegu na płaskim odcinku ($w = 0$) drogi asfaltowej ($f = 0,01$). Znamy aktualne obciążenie pojazdu: $Q = 10kN$, obciążenie maksymalne pojazdu: $Q = 15kN$, maksymalna wartość wskaźnika dynamicznego na II biegu: $D = 0,32$, współczynnik mas wirujących na II biegu (liczony dla całego pojazdu, uwzględniając bezwładność kół, układu napędowego i silnika) $\delta = 1,25$. Obliczamy:

$$\lambda = \frac{10}{15} = 0,67, \quad (22)$$

z równania (21) wynika:

$$a = \frac{g}{\delta} \left(\frac{D}{\lambda} - f - w \right) = \frac{9,81m/s^2}{1,25} \cdot \left(\frac{0,32}{0,67} - 0,01 - 0 \right) = 3,7m/s^2. \quad (23)$$

Przykład 2 Wyznaczyć maksymalną wartość wzniesienia, na które można wjechać ze stałą prędkością na III biegu na drodze piaszczystej ($f = 0,1$). Jaka to prędkość? Maksymalna wartość wskaźnika dynamicznego na III biegu: $D = 0,2$, samochód całkowicie załadowany.

Jeżeli pojazd podejżdża pod górę o maksymalnym wzniesieniu, to nie może on już przyspieszać, więc jego przyspieszenie wynosi: $a = 0m/s^2$. Obliczamy:

$$w = D - f = 0,2 - 0,1 = 0,1 = 10\%. \quad (24)$$

Wprowadzenie

Pomiary prowadzone będą podczas rozpędzania pojazdu na poszczególnych biegach. Podczas rozpędzania pedał przyspieszenia będzie wciśnięty do oporu, przez co silnik pojazdu pracować będzie według charakterystyki zewnętrznej, czyli w każdej chwili wartość momentu napędowego będzie największa.

Podczas przyspieszania na prostym płaskim odcinku drogi na pojazd działają siły:

- siła oporu powietrza F_p ,
- siła oporu toczenia T ,
- siła bezwładności F_b ,
- siła napędowa F_n .

Równanie bilansu sił ma postać:

$$F_n = F_p + T + F_b. \quad (25)$$

Po przeniesieniu F_p na lewą stronę równania i podzieleniu obu stron przez ciężar pojazdu otrzymuje się:

$$\frac{F_n - F_p}{Q} = \frac{T}{Q} + \frac{F_b}{Q}. \quad (26)$$

Oznaczając Q_c ciężar pojazdu całkowicie obciążonego (odpowiadający dopuszczalnej masie całkowitej), współczynnik załadowania pojazdu:

$$\lambda = \frac{Q}{Q_c}. \quad (27)$$

Równanie (26) można przekształcić do postaci:

$$\frac{F_n - F_p}{Q_c} = \lambda \cdot f + \lambda \cdot \frac{\delta}{g} \cdot a. \quad (28)$$

Wyrażenie po lewej stronie równania jest równe współczynnikowi dynamicznemu. Współczynnik mas wirujących pojazdu podczas rozpędzania uwzględnia bezwładność kół i bezwładność silnika. Równanie (28) można zatem zapisać w postaci:

$$D = \lambda \cdot f + \frac{\lambda + \delta_s \cdot i_s^2 + \delta_k}{g} \cdot a. \quad (29)$$

Zatem, znając chwilowe przyspieszenie pojazdu a , można wyznaczyć wartość współczynnika dynamicznego w danej chwili.

Wykonanie pomiarów

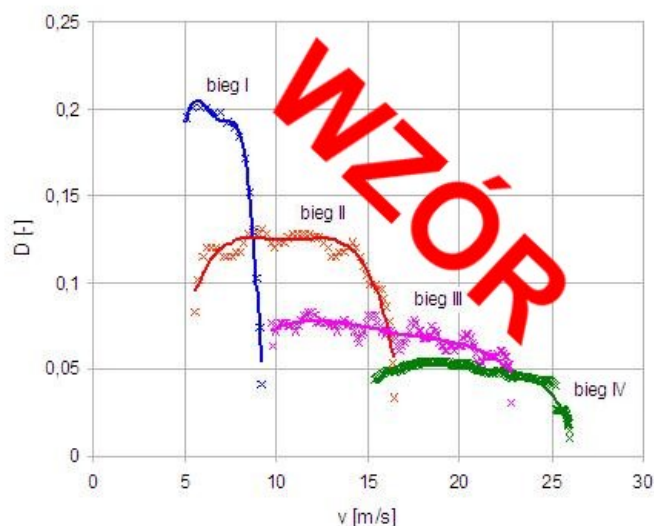
Pojazd użyty do pomiarów musi być sprawny. Przed badaniami powinno być sprawdzone ogumienie i ustawione odpowiednie ciśnienie. Pomiar wykonuje się na prostym odcinku drogi bez wniesień i spadków. Pogoda podczas pomiaru powinna być bezwietrzna i bez opadów.

Na każdym biegu pojazd rozpędza się z pełnym wciśnięciem pedału przyspieszenia w całym zakresie prędkości obrotowej silnika. Rejestruje się prędkość pojazdu.

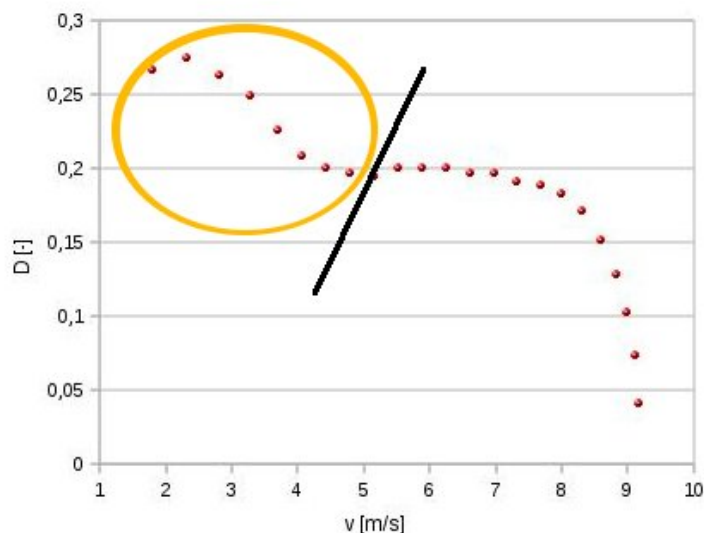
Opracowanie wyników

Z przebiegu prędkości oblicza się przyspieszenie pojazdu. Znając przyspieszenie, ze wzoru (29) oblicza się wartość wskaźnika dynamicznego. Wartości wskaźnika dynamicznego (z kilku przejazdów) nanosi się na wykres w funkcji prędkości i aproksymuje liniami odpowiadającymi poszczególnym biegom - rysunek 4.

Uwaga: Podczas gwałtownego ruszania z miejsca z wciśniętym do oporu pedałem przyspieszenia następuje poślizg sprzęgła. Zanim nastąpi ten poślizg, następuje szarpnięcie, czego efektem jest chwilowy skok przyspieszenia. W efekcie wartość wskaźnika dynamicznego dla małych prędkości podczas ruszania z miejsca jest zafałszowana, więc część wykresu należy pominąć (rysunek 5 - punkty w żółtej obwódce należy pominąć w dalszej analizie).



Rysunek 4: Charakterystyka dynamiczna - wyniki obliczeń.



Rysunek 5: Charakterystyka dynamiczna podczas ruszania z miejsca.

Dodatek - wyznaczenie przyspieszenia

Poniżej pokazano sposób wyznaczenia przyspieszenia. Do obliczeń użyto arkusz kalkulacyjny. Założono, że początkowo w kolumnie A znajdują się wartości prędkości otrzymane podczas pomiarów, wyrażone w km/h, a czas pomiędzy kolejnymi pomiarami wynosił 0,2 s. Poniżej pokazany jest fragment arkusza kalkulacyjnego z formułami, które mają na celu wyznaczenie przebiegu przyspieszenia.

	A	B	C	D
1	15,5	=A1/3,6	=ŚREDNIA(B1:B10)	
2	15,9	=A2/3,6	=ŚREDNIA(B2:B11)	=(C2-C1)/0,2
3	16,2	=A3/3,6	=ŚREDNIA(B3:B12)	=(C3-C1)/0,2

Formuły w kolumnie B służą do zmiany jednostki prędkości - z km/h na m/s. Ponieważ każdy punkt pomiarowy obarczony jest błędem przypadkowym, zarejestrowany przebieg prędkości zwykle jest "poszarpany" (niemonotoniczny) i nie można wyznaczyć z niego bezpośrednio przyspieszenia. W celu "wygładzenia" przebiegu prędkości oblicza się średnią z kilku kolejnych punktów pomiarowych (kolumna C). Ilość komórek arkusza do uśredniania należy dobrać doświadczalnie, pamiętając, że zależy ona od wartości przyspieszenia i stopnia zniekształcenia zapisu. W kolumnie D jest już obliczane przyspieszenie z definicji przyspieszenia:

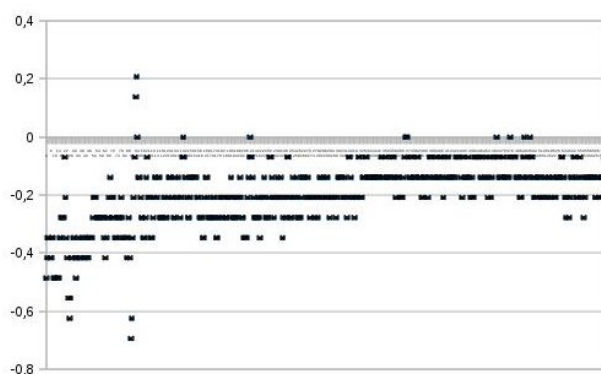
$$a = \frac{dv}{dt} \approx \frac{\Delta v}{\Delta t}. \quad (30)$$

W ten sposób mamy w kolumnie C prędkość w m/s i w kolumnie D przyspieszenie w m/s². W kolejnych kolumnach arkusza można zatem dopisywać kolejne formuły, konieczne do wykonania obliczeń.

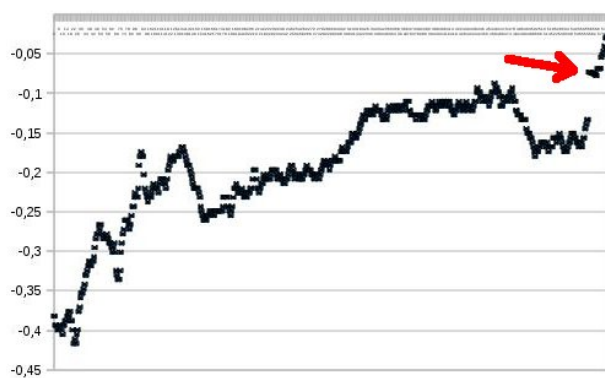
Ważnym problemem jest tu dobór długości przedziału zapisanej prędkości do uśredniania (w przykładzie - formuła w kolumnie C). Na rysunku 6 pokazano przebieg przyspieszenia obliczony bez wygładzenia przebiegu prędkości. Na rysunku 7 - z dobrze dobraną długością przedziału uśredniania, a na rysunku 8 - za dużą. Warto zauważyć, że taka metoda wygładzania zarejestrowanego przebiegu powoduje utratę końcowych punktów pomiarowych, tym większą, im większa długość przedziału uśredniania. Strzałką na rysunkach 7 i 8 oznaczono miejsce, od którego zapis na skutek uśredniania należy pominąć (jeżeli na przykład usreńia się kolejnych 50 punktów pomiarowych, ostatnich 49 punktów nie można brać do dalszych obliczeń).

Literatura

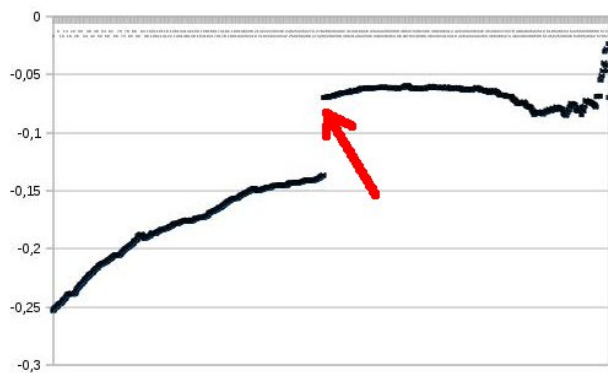
- [1] Arczyński S.: *Teoria ruchu samochodu*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1984.
- [2] Orzełowski S.: *Eksperymentalne badania samochodów i ich zespołów*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.



Rysunek 6: Wygładzanie zapisu prędkości - przykład 1.



Rysunek 7: Wygładzanie zapisu prędkości - przykład 2.



Rysunek 8: Wygładzanie zapisu prędkości - przykład 3.