

Adam CIESIOŁKIEWICZ

Zakład Silników Spalinowych ITC
Politechniki Śląskiej, Gliwice

BADANIE PRZEBIEGÓW FUNKCJI PARAMETRÓW KINEMATYCZNYCH W PRÓBIE WYBIEGU POJAZDU SAMOCHODOWEGO*

Streszczenie. Celem opracowania było określenie równań opisujących wybieg pojazdu, będący sposobem wyznaczania oporów ruchu samochodu. Przeprowadzono kompleksową analizę przebiegów funkcji parametrów kinematycznych pojazdu samochodowego w próbie wybiegu i określono wpływ współczynników równania na przebieg tych funkcji. Opracowano załączenia do metodyki przeprowadzania prób wybiegu samochodu. Przedstawiono przykładowe przebiegi parametrów kinematycznych pojazdu w zależności od prędkości początkowej próby wybiegu i współczynników równania ruchu.

1. WPROWADZENIE

Do wyznaczania oporów ruchu pojazdu samochodowego stosowana jest metoda wybiegu. Polega ona na określeniu parametrów kinematycznych samochodu po wyłączeniu napędu. Znane są próby wybiegu przeprowadzone w zakresie niskich i dużych prędkości pojazdu. Jednak w każdym z tych sposobów określa się całkowitą drogę, jaką przebył rozpędzony pojazd w zakresie prędkości przyjętych w próbie (od prędkości początkowej do prędkości końcowej) i czas, odpowiadający przejechanemu odcinkowi drogi. Taki sposób pomiaru nie pozwala na określenie modelu próby i właściwy dobór współczynników równania ruchu pojazdu.

Celem niniejszego opracowania jest określenie równań opisujących ruch pojazdu w czasie próby wybiegu oraz analityczne badanie przebiegów funkcji parametrów kinematycznych samochodu i określenie wpływu współczynników równań na przebiegi tych funkcji.

Kompleksowa analiza i zbadanie charakteru zmian funkcji kinematycznych pojazdu w czasie wybiegu pozwoli wybrać najkorzystniejszą metodę pomiarową. Zmodyfikowaną próbę wybiegu wynikającą z niniejszego opracowania przedstawiono w pracy [6]. Metoda ta polega na ciągłej rejestracji szybkozmiennych

* Opracowanie wykonane w ramach CEBP - 02.22 pt.: "Badania przemysłowych procesów termodynamicznych".

parametrów kinematycznych pojazdu (w całej próbie od chwili załączenia urządzeń pomiarowych do zatrzymania pojazdu) z wykorzystaniem minikomputera. Jednak nie wyczerpuje ona wszystkich wniosków wynikających z analizy przebiegów funkcji parametrów kinematycznych pojazdu.

2. OKREŚLENIE RÓWNAŃ RUCHU POJAZDU W PRÓBIE WYBIEGU

2.1. Ogólne równanie ruchu

Równanie ruchu pojazdu samochodowego w próbie wybiegu ma postać

$$F_{\varphi} + F_p + \frac{M_m + M_w}{r_d} = m \delta_w \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

gdzie:

F_{φ} - siła oporu drogi,

F_p - siła oporu powietrza,

M_m - moment strat mechanicznych w zespołach układu napędowego połączonych podczas próby wybiegu z kołami jezdnyymi,

M_w - suma momentów wentylacyjnych kół jezdnych samochodu i związanych z nimi elementów,

r_d - promień dynamiczny kół,

m - masa pojazdu,

δ_w - współczynnik mas zredukowanych pojazdu w próbie wybiegu,

$\frac{dv}{dt}$ - opóźnienie w czasie próby wybiegu.

Poszczególne składniki w równaniu ruchu określają zależności:

- siła oporu drogi

$$F_{\varphi} = mg [f_t \cos\varphi + \sin\varphi] \quad (2)$$

gdzie:

f_t - współczynnik oporu toczenia,

φ - kąt nachylenia drogi.

Współczynnik oporu toczenia wg literatury [1], [2], [3], [4] i [5] najczęściej podawany jest w postaci zależności

$$f_t = f_t^{\circ} (1 + a v^2) \quad (3a)$$

lub

$$f_t = f_t^{\circ} (1 + bv + av^2) \quad (3b)$$

gdzie:

- f_t^0 - podstawowy współczynnik oporu toczenia,
 a, b - stałe,
 v - prędkość pojazdu.

- siła oporu powietrza

$$F_p = c_x A \frac{\rho v^2}{2} \quad (4)$$

gdzie:

- c_x - bezwymiarowy współczynnik kształtu pojazdu,
 A - powierzchnia czołowa pojazdu,
 ρ - gęstość powietrza.

- straty mechaniczne

$$M_m = \text{const.}$$

- straty wentylacji

$$M_w = v^2 \quad (5)$$

gdzie:

- α - współczynnik strat wentylacji, $\alpha = \text{const.}$

Po uwzględnieniu warunków (2), (3), (4) i (5) zależność (1) można zastąpić wielomianem

$$\frac{dv}{dt} = A_0 + A_2 v^2 \quad (6)$$

lub

$$\frac{dv}{dt} = A_0 + A_1 v + A_2 v^2 \quad (7)$$

W zakresie eksploatacyjnych prędkości pojazdów samochodowych ($v < 100$ km/h) z punktu widzenia zjawisk fizycznych, rzeczywiste warunki najlepiej odzwierciedla równanie (7). Jednak współczynnik wyrazu liniowego, występującego w tym równaniu, ma niewielką wartość bezwzględną i jego wpływ w zakresie użytecznych prędkości pojazdu jest mały. Pominięcie tego wyrazu nie wpływa w sposób zasadniczy na charakter procesów fizycznych zachodzących podczas ruchu pojazdu. W związku z tym do dalszych rozważań przyjęto zależność [6] jako równanie ogólne ruchu samochodu w próbie wybiegu.

Współczynniki równania ogólnego ruchu pojazdu podczas próby wybiegu wynoszą (dla płaskiej drogi - $\varphi = 0$):

- współczynnik wyrazu niezależnego od prędkości pojazdu

$$A_0 = \left[mg \cdot f_t^0 + \frac{M'_m}{r_d} \right] \cdot \frac{1}{m \sigma_w} \quad (8)$$

- współczynnik wyrazu zależnego od kwadratu prędkości pojazdu

$$A_2 = \left[c_x A \frac{\rho}{2} + \frac{\sigma_c}{r_d} + a \cdot f_t^0 \cdot mg \right] \frac{1}{m \sigma_w} \quad (9)$$

Przyjęte stałe A_0 i A_2 zależą od wielu różnych warunków ruchu pojazdu i nie są równoznaczne z ustaleniem bezwymiarowych współczynników oporów ruchu. Stała A_0 ujmuje wpływ takich czynników, jak składowa podstawowego oporu toczenia i moment strat w zespołach układu napędowego badanego pojazdu, natomiast stała A_2 ujmuje zarówno składową oporów toczenia zależną od kwadratu prędkości, współczynnik oporu powietrza, jak również współczynnik momentu wentylacyjnego.

2.2. Określenie równań ruchu w funkcji prędkości liniowej pojazdu

Do określenia przebiegu drogi pojazdu samochodowego w próbie wybiegu wykorzystuje się zależność (6) i warunek

$$ds = - \frac{v dv}{a} \quad (10)$$

Znak minus wynika z opóźnienia ruchu pojazdu.

Z kolei przebieg czasu w próbie wybiegu wyznacza się z warunku

$$\frac{dv}{dt} = - (A_0 + A_2 v^2) \quad (11)$$

Ustalając granice całkowania od $v = v_0$ do $v = 0$ otrzymuje się wartość całkowitej drogi w próbie wybiegu pojazdu, natomiast uzyskanie przebiegu drogi lub czasu w funkcji prędkości wymaga określenia stałej całkowania na podstawie warunku brzegowego. Dla prędkości początkowej próby wybiegu $v = v_0$ jest

$$s = 0$$

$$t = 0$$

Po scałkowaniu i uwzględnieniu warunku brzegowego, otrzymuje się przebieg drogi podczas wybiegu samochodu w postaci:

$$S = \frac{1}{2 A_2} \left[\ln \left| 1 + \frac{A_2}{A_0} v_0^2 \right| - \ln \left| 1 + \frac{A_2}{A_0} v^2 \right| \right] \quad (12)$$

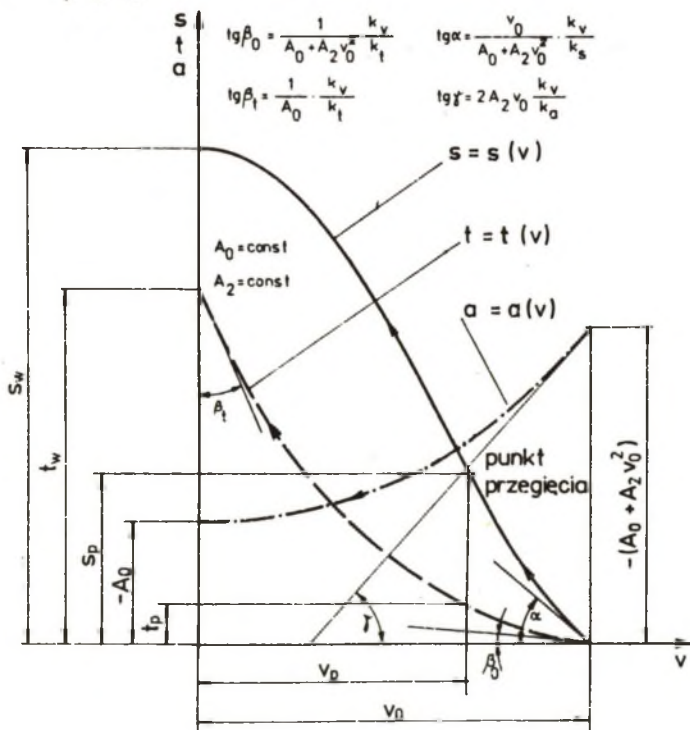
lub

$$S = \frac{1}{2 A_2} \ln \frac{B}{A_0 + A_2 v^2} \quad (13)$$

przy czym stała $B = A_0 + A_2 v_0^2$ określa opóźnienie początkowe pojazdu w próbie wybiegu.

Przebieg czasu ma postać

$$t = \frac{1}{\sqrt{A_0 A_2}} \left[\operatorname{arctg} \left(v_0 \sqrt{\frac{A_2}{A_0}} \right) - \operatorname{arctg} \left(v \sqrt{\frac{A_2}{A_0}} \right) \right] \quad (14)$$



k_s - skala drogi. k_v - skala prędkości
 k_t - skala czasu. k_a - skala przyspieszenia (opóźnienia)

Rys. 1. Przebieg drogi, czasu i opóźnienia pojazdu samochodowego w próbie wybiegu dla stałej prędkości początkowej v_0 .

Fig. 1. Time, route and car deceleration in rolling test for constant initial velocity v_0 .

Wartość całkowitej drogi wybiegu i odpowiadającego czasu oznaczono przez S_w i t_w określono z równań (12) i (14) dla $v = 0$

$$S_w = \frac{1}{2} \frac{A_2}{A_0} \ln \left| 1 + \frac{A_2}{A_0} v_0^2 \right| \quad (15)$$

$$t_w = \frac{1}{\sqrt{A_0 A_2}} \operatorname{arctg} \left(v_0 \sqrt{\frac{A_2}{A_0}} \right) \quad (16)$$

Przebiegi drogi, czasu i opóźnienia pojazdu samochodowego w próbie wybiegu dla stałej prędkości początkowej v_0 pokazano na rys. 1.

2.3. Określenie równań ruchu w funkcji czasu

W literaturze [1] można spotkać wyniki próby wybiegu i przebiegi parametrów kinematycznych pojazdu samochodowego jako funkcje czasu. Równania próby wybiegu zależne od czasu najprościej jest wyznaczyć poprzez wykorzystanie zależności $t = f(v)$, a następnie obliczenie drogi i opóźnienia z warunków:

$$\frac{dS}{dt} = v, \quad \frac{dv}{dt} = a \quad (17a), (17b)$$

Przekształcenie równania (14) daje zależność

$$v = - \sqrt{\frac{A_0}{A_2}} \operatorname{tg} \left[(t - t_w) \sqrt{A_0 A_2} \right] \quad (18)$$

gdzie:

t_w - czas trwania całej próby wybiegu wg (16).

Wylimitowanie czasu t_w prowadzi do bezpośredniej zależności prędkości od czasu

$$v = \frac{v_0 - \sqrt{\frac{A_0}{A_2}} \operatorname{tg} (t \sqrt{A_0 A_2})}{1 + v_0 \sqrt{\frac{A_2}{A_0}} \operatorname{tg} (t \sqrt{A_0 A_2})} \quad (18a)$$

Wynikiem scałkowania zależności (18) względem czasu oraz uwzględnienia warunku $S = 0$ dla $t = 0$ jest przebieg drogi

$$S = \frac{1}{A_2} \ln \left| \frac{\cos \left[(t - t_w) \sqrt{A_0 A_2} \right]}{\cos \left(t_w \sqrt{A_0 A_2} \right)} \right| \quad (19)$$

lub w postaci bezpośredniej zależności od czasu

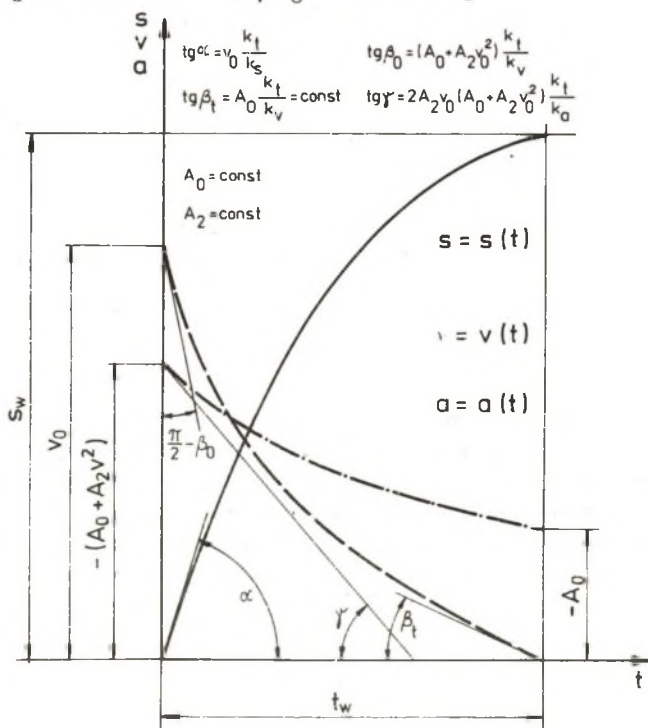
$$s = \frac{1}{A_2} \ln \left| \cos(t \sqrt{A_0 A_2}) + v_0 \sqrt{\frac{A_2}{A_0}} \sin(t \sqrt{A_0 A_2}) \right| \quad (19a)$$

Zróżniczkowanie zależności (18) daje przebieg opóźnienia pojazdu w czasie próby wybiegu:

$$a = -A_0 \frac{1}{\cos^2 \left[(t - t_w) \sqrt{A_0 A_2} \right]} \quad (20)$$

lub

$$a = - \frac{A_0 + A_2 v_0^2}{\left[\cos(t \sqrt{A_0 A_2}) + v_0 \sqrt{\frac{A_2}{A_0}} \sin(t \sqrt{A_0 A_2}) \right]^2} \quad (20a)$$



Rys. 2. Schematy przebiegów parametrów kinematycznych próby wybiegu w zależności od czasu

Fig. 2. Scheme of kinematic parameters courses of rolling test according to time

Schematy przebiegów parametrów kinematycznych pojazdu samochodowego w próbie wybiegu w zależności od czasu przedstawiono na rys. 2, na którym podano również wartości tych parametrów w charakterystycznych punktach.

3. BADANIE PRZEBIEGÓW FUNKCJI PARAMETRÓW KINEMATYCZNYCH PRÓBY WYBIEGU

Analiza równań próby wybiegu zależnych od prędkości pojazdu polega na wyznaczeniu przebiegu i określeniu gradientu zmian funkcji drogi i czasu. W szczególności celem tych analiz i badań jest:

- analityczne określenie wpływu współczynników równania na przebieg drogi pojazdu samochodowego w próbie wybiegu,
- wyznaczenie pochodnych poszczególnych funkcji, określenie ich przebiegów oraz obliczenie wartości tych pochodnych w punktach skrajnych (początek i koniec próby wybiegu),
- znalezienie punktów charakterystycznych funkcji w przypadku, gdy istnieją,
- określenie zakresu zmian prędkości punktu przegięcia w zależności od współczynników ogólnego równania ruchu pojazdu w próbie wybiegu,
- zbadanie wpływu prędkości początkowej na parametry kinematyczne próby wybiegu,
- określenie wpływu współczynników równania ogólnego próby wybiegu na przebieg drogi, czasu i opóźnienia.

W efekcie analizy i badania funkcji przebiegów parametrów kinematycznych pojazdu próby wybiegu pozwalają z jednej strony na opracowanie metodyki pomiarów, a z drugiej strony na określenie wpływu czynników konstrukcyjnych i stanu technicznego samochodu oraz warunków eksploatacyjnych na opory ruchu.

3.1. Badanie funkcji drogi

Analityczne określenie wpływu współczynników ogólnego równania ruchu pojazdu na przebieg drogi polega na wyznaczeniu osobno funkcji drogi tylko dla jednej stałej przy zerowaniu się drugiej. Synteza obydwóch przebiegów przedstawia zależność drogi od prędkości w próbie wybiegu.

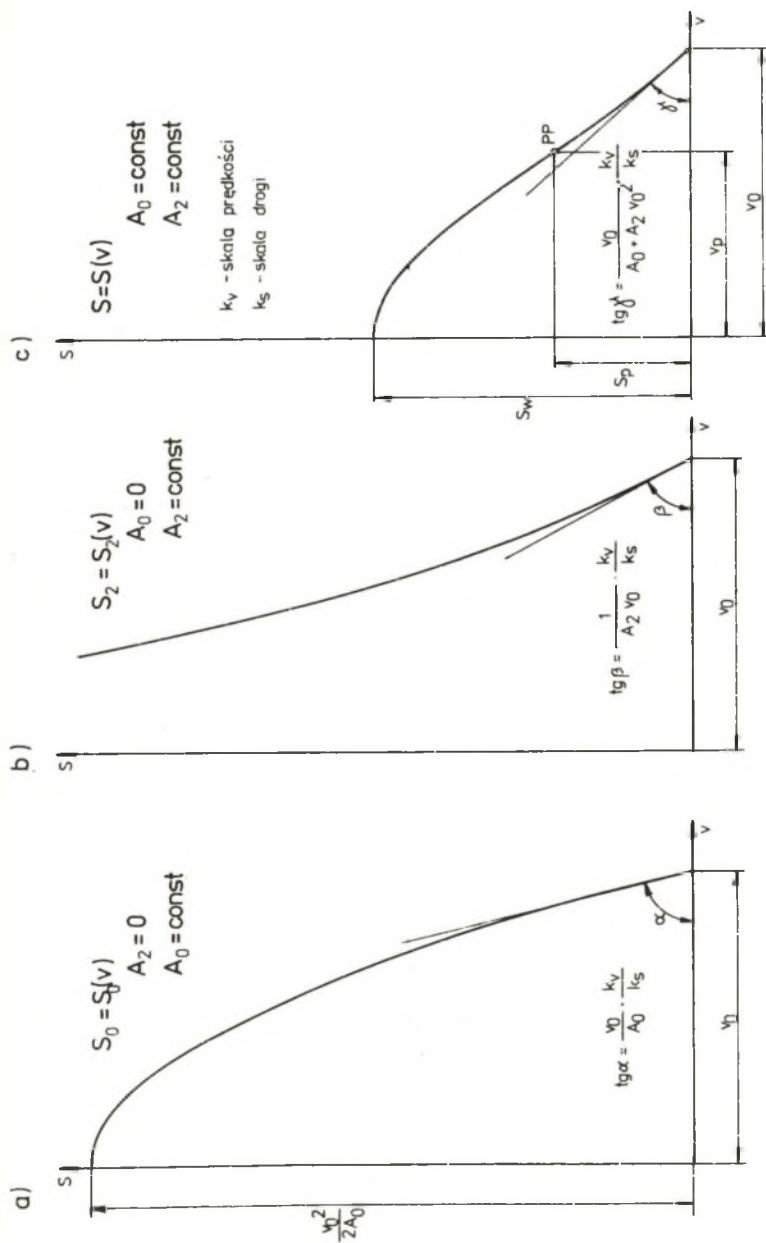
Dla współczynnika $A_2 = 0$ równanie ogólne ma postać

$$a = -A_0 \quad (21)$$

skąd z uwzględnieniem warunku początkowego $S = 0$ dla $v = v_0$ otrzymuje się zależność

$$S_0 = \frac{1}{2 A_0} [v_0^2 - v^2] \quad (22)$$

oraz przebieg jak na rys. 3a.



Rys. 3. Przebiegi funkcji drogi pojazdu samochodowego w próbie wybiegu
 a) przebieg drogi dla $A_2 = 0, A_0 = \text{const}$, b) przebieg drogi dla $A_0 = 0, A_2 = \text{const}$, c) przebieg drogi dla $A_0 = \text{const}, A_2 = \text{const}$
 Fig. 3. Car road function course in rolling test
 a) route for $A_2 = 0, A_0 = \text{const}$, b) route for $A_0 = 0, A_2 = \text{const}$, c) route for $A_0 = \text{const}, A_2 = \text{const}$

Podobnie przyjmując współczynnik $A_0 = 0$ otrzymuje się równanie

$$S_2 = \frac{1}{2A_2} \left[\ln |v_0^2| - \ln |v^2| \right] \quad (23)$$

i przebieg wg rys. 3b.

Z kolei funkcja obrazująca zależność drogi od chwilowej prędkości w próbie wybiegu jest odpowiednim (uwzględniającym skończoność zjawiska fizycznego) złożeniem - syntezą przebiegów, ujmujących wpływ tylko jednego współczynnika (rys. 3c).

Przebieg wypadkowy określony jest zależnością (12).

Ciekawym spostrzeżeniem wynikającym z badania funkcji składowych i funkcji będącej syntezą składowych jest to, że odwrotność pochodnej funkcji wynikowej jest sumą odwrotności pochodnych funkcji składowych

$$\frac{1}{S'} = \frac{1}{S'_0} + \frac{1}{S'_2} \quad (24)$$

gdzie pochodna funkcji wynikowej

$$S' = \frac{dS}{dv} = - \frac{v}{A_0 + A_2 v^2} \quad (25a)$$

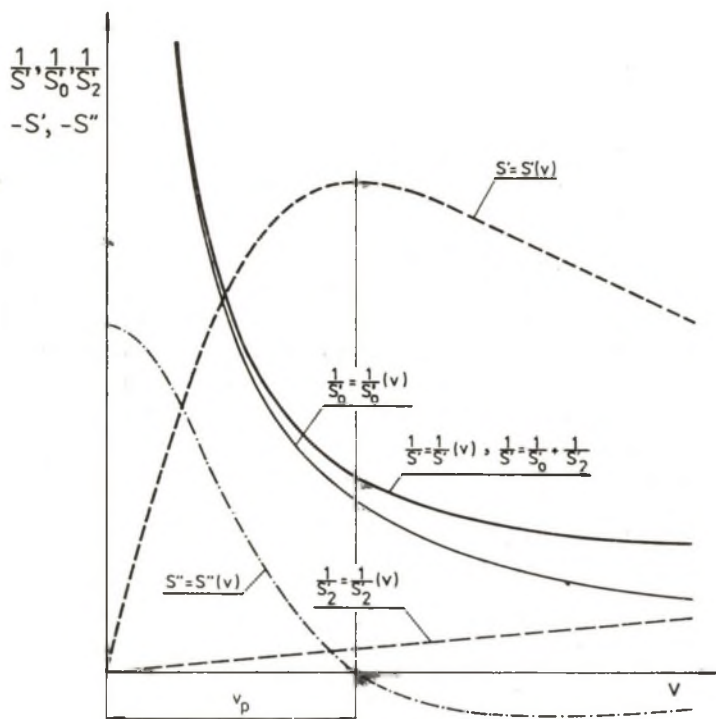
oraz pochodne funkcji składowych

$$S'_0 = \frac{dS_0}{dv} = - \frac{v}{A_0} \quad (25b)$$

$$S'_2 = \frac{dS_2}{dv} = - \frac{v}{A_2 v^2} \quad (25b)$$

Przykładowe przebiegi odwrotności pochodnych funkcji składowych i funkcji wynikowej przedstawiono na rys. 4. Na rysunku tym zaznaczono również przebiegi pierwszej (S') i drugiej (S'') pochodnej funkcji drogi względem prędkości. Pochodne drogi ze względu na prędkość chwilową nie zależą od prędkości początkowej próby wybiegu.

Na podstawie pochodnych funkcji składowych i funkcji wynikowej określono wartości współczynników kątowych (tangensy) stycznych do tych funkcji w punktach skrajnych (początek i koniec próby wybiegu). Wyznaczenie rzeczywistych wartości tych współczynników (zgodnych z wykresem) wymaga uwzględnienia skal odpowiednich parametrów przyjętych na osiach układu współrzędnych. Funkcja wynikowa w punkcie $v = 0$ osiąga ekstremum (maksimum), natomiast dla $v = v_0$ styczna posiada silnie zależny od prędkości początkowej współ-



Rys. 4. Przebieg pochodnej drogi oraz przebiegi odwrotności pochodnych funkcji składowych i funkcji wynikowej

Fig. 4. Road derivative course and course of derivative reciprocals of component functions and result function

czynnik katowy, którego wartość określa przebiegi drogi po wyjściu z punktu początkowego próby wybiegu. Druga pochodna funkcji drogi względem prędkości określa punkt przegięcia.

Pochodna ta wynosi

$$\frac{d^2 S}{dv^2} = - \frac{A_0 - A_2 v^2}{A_0 + A_2 v^2} \quad (26)$$

skąd po spełnieniu warunków

$$\frac{d^2 S}{dv^2} = 0 \quad \text{i} \quad \frac{d^3 S}{dv^3} (v_p) \neq 0 \quad (27a) \quad (27b)$$

otrzymuje się punkt przegięcia, dla którego wartość prędkości pojazdu wynosi

$$v_p = \sqrt{\frac{A_0}{A_2}} \quad (28)$$

Punkt przegięcia rozgranicza wpływ współczynników ogólnego równania ruchu pojazdu podczas próby wybiegu. W zakresie dużych prędkości pojazdu (prędkość początkowa próby) dominujące znaczenie ma współczynnik wyrazu zależnego od kwadratu prędkości (A_2) - główny wpływ oporów powietrza, a w zakresie małych prędkości (końcowa faza próby) o charakterze funkcji decydującej składowa stała (A_0) - główny wpływ oporów toczenia. Punkt przegięcia jest niezależny od prędkości początkowej próby wybiegu, jednak dla danego pojazdu i określonych warunków eksploatacji występuje tylko w przypadku spełnienia warunku $v_0 > v_p$.

Wartości drogi i czasu dla punktu przegięcia wynoszą:

$$s_p = \frac{1}{2A_2} \left[\ln \left| 1 + \frac{A_2}{A_0} v_0^2 \right| - \ln 2 \right] \quad (29)$$

$$t_p = \frac{1}{\sqrt{A_0 A_2}} \left[\arctg \left(v_0 \sqrt{\frac{A_2}{A_0}} \right) - \frac{\pi}{4} \right] \quad (30)$$

Z powyższego wynika wniosek, że aby dokładnie określić współczynniki ogólnego równania ruchu pojazdu, a przez to uchwycić wpływ poszczególnych składowych, prędkość początkowa próby wybiegu powinna być 1,5 do 2 razy większa od prędkości punktu przegięcia.

3.2. Badanie funkcji czasu

Podobnie jak w przypadku drogi, można analitycznie określić wpływ współczynników ogólnego równania ruchu na czas wybiegu. Osobno wyznacza się przebiegi czasu dla jednego i drugiego współczynnika, a synteza tych przebiegów określa zależność czasu od prędkości chwilowej w próbie wybiegu. Odpowiednie złożenie tych przebiegów określone jest zależnością (14). Wyznaczenie pochodnej funkcji czasu względem prędkości określa zachowanie się krzywej w otoczeniach punktów skrajnych. Niezbędne jest to do opracowania dokładności pomiaru czasu właśnie w tych punktach, co ma istotne znaczenie do określenia pewności metody wybiegu.

Współczynnik kątowy stycznej do funkcji czasu w punkcie $v = v_0$ zależy w dużym stopniu od prędkości początkowej (im większa prędkość, tym współczynnik mniejszy). Natomiast duża prędkość początkowa próby wybiegu potrzebna jest do dokładnego określenia współczynników ogólnego równania ruchu pojazdu, a przez to do wyznaczania rzeczywistych jego oporów w warunkach eks-

platacji. Jednakże powoduje to spłaszczenie przebiegu czasu i powstanie znacznych błędów pomiarowych.

W punkcie $v = 0$ (koniec próby wybiegu) współczynnik kątowy stycznej do funkcji czasu jest stały i nie zależy od prędkości początkowej, z której przeprowadzana jest próba wybiegu. Jednak współczynnik ten jest znaczny, co powoduje stromy przebieg funkcji czasu i duże błędy pomiaru drogi w zależności od czasu.

4. WPŁYW PRĘDKOŚCI POCZĄTKOWEJ I WSPÓŁCZYNNIKÓW OGÓLNEGO RÓWNIANIA RUCHU POJAZDU NA PARAMETRY KINEMATYCZNE W PRÓBIE WYBIEGU

Badanie wpływu prędkości początkowej próby wybiegu na przebiegi parametrów kinematycznych przeprowadzono przyjmując współczynniki ogólnego równania wyznaczone w pracy [6] dla samochodu osobowego FIAT 126p. Współczynniki te wynoszą:

$$A_0 = 0,14 \text{ m/s}^2$$

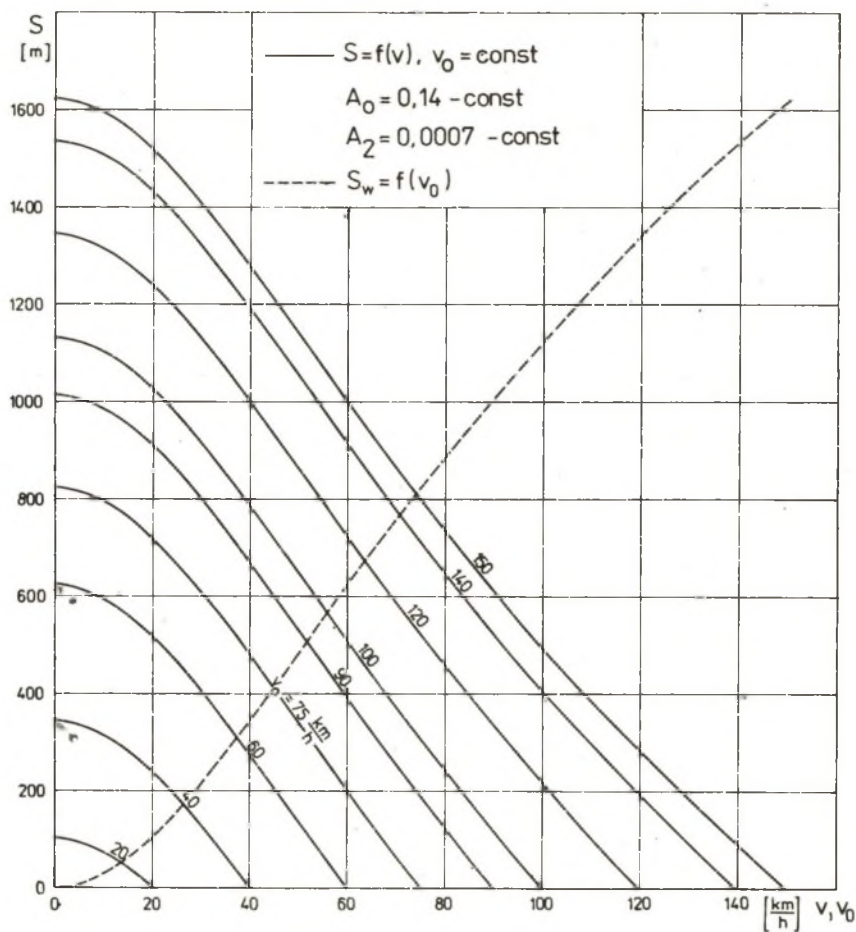
$$A_2 = 0,0007 \text{ 1/m}$$

Przebiegi zmian drogi w funkcji prędkości pojazdu dla różnych prędkości początkowych próby wybiegu przedstawiono na rys. 5, a przebieg czasu na rys. 6. Zakres zmian prędkości początkowej wynosi $v_0 \in < 20, 150 > \text{ km/h}$. Dodatkowo podano przebiegi całkowitej drogi wybiegu S_w i odpowiadającego tej drodze czasu t_w (od prędkości początkowej do zatrzymania pojazdu) w funkcji prędkości pojazdu. Przebieg opóźnienia (rys. 6) nie zależy od prędkości początkowej próby wybiegu i dla stałych wartości współczynników A_0 i A_2 stanowi jedną linię.

Z kolei przebieg zmian drogi pojazdu w funkcji czasu próby wybiegu dla różnych prędkości początkowych przedstawiono na rys. 7, na którym zaznaczono również linię $S_w = f(t_w)$.

Wpływ współczynników ogólnego równania ruchu pojazdu na przebiegi drogi w próbie wybiegu obrazuje rys. 8a i 8b. Na podstawie danych literaturowych oszacowano wartości tych współczynników dla samochodów osobowych, ciężarowych i autobusów. Wartość współczynnika wyrazu stałego zależy głównie od współczynnika oporu toczenia f_t^0 . Dla najczęściej spotykanych nawierzchni dróg (asfalt, beton) współczynnik ten ma wartość $f_t^0 = 0,012$ do $0,015$. Przyjmując wartość współczynnika mas zredukowanych $\delta_w = 1,02$ do $1,05$ oraz przyspieszenie ziemskie i uwzględniając, że straty mechaniczne w układzie napędowym podczas próby wybiegu są niewielkie (mniej niż 2-3% oporów toczenia), uzyskuje się najbardziej prawdopodobny zakres zmian współczynnika $A_0 = 0,12$ do $0,15$.

Z kolei wartość współczynnika wyrazu kwadratowego zależy w głównej mierze od iloczynu $c_x A$ i masy pojazdu.



Rys. 5. Przebiegi drogi w funkcji prędkości pojazdu dla różnych prędkości początkowych próby wybiegu

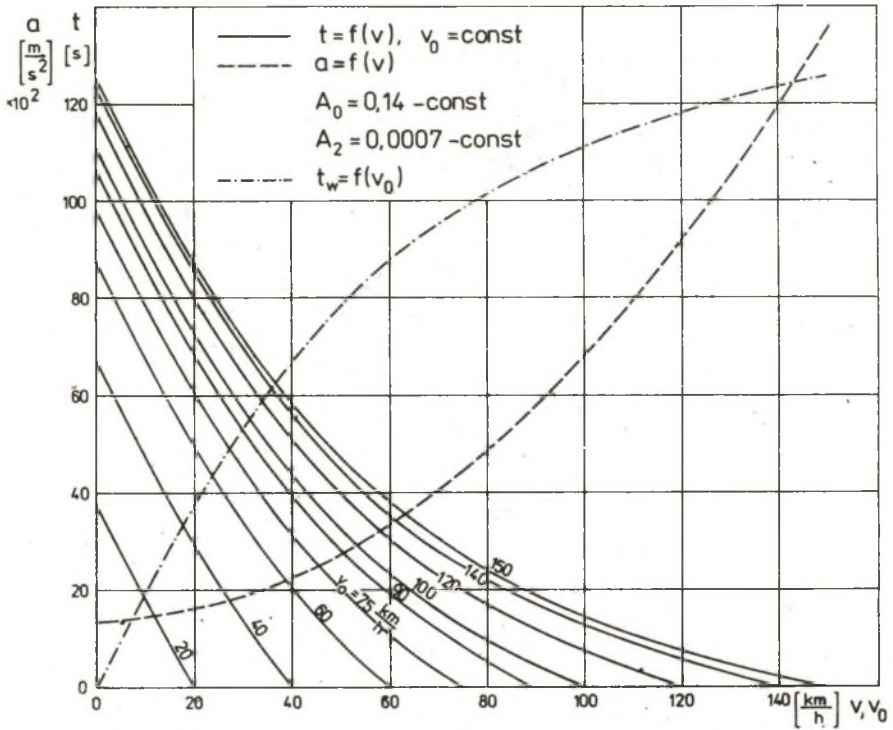
Fig. 5. Routes in car velocity function for different initial velocities of rolling test

Według literatury dla poszczególnych grup samochodów wynosi ona:

samochody osobowe

$$c_x \cdot \lambda = 0,5 \div 0,8$$

$$m = 700 \div 1500 \text{ kg}$$



Rys. 6. Przebiegi czasu w funkcji prędkości pojazdu dla różnych prędkości początkowych próby wybiegu

Fig. 6. Time courses in car velocity function for different initial velocities of rolling test

samochody ciężarowe

$$c_x \cdot A = 4+7$$

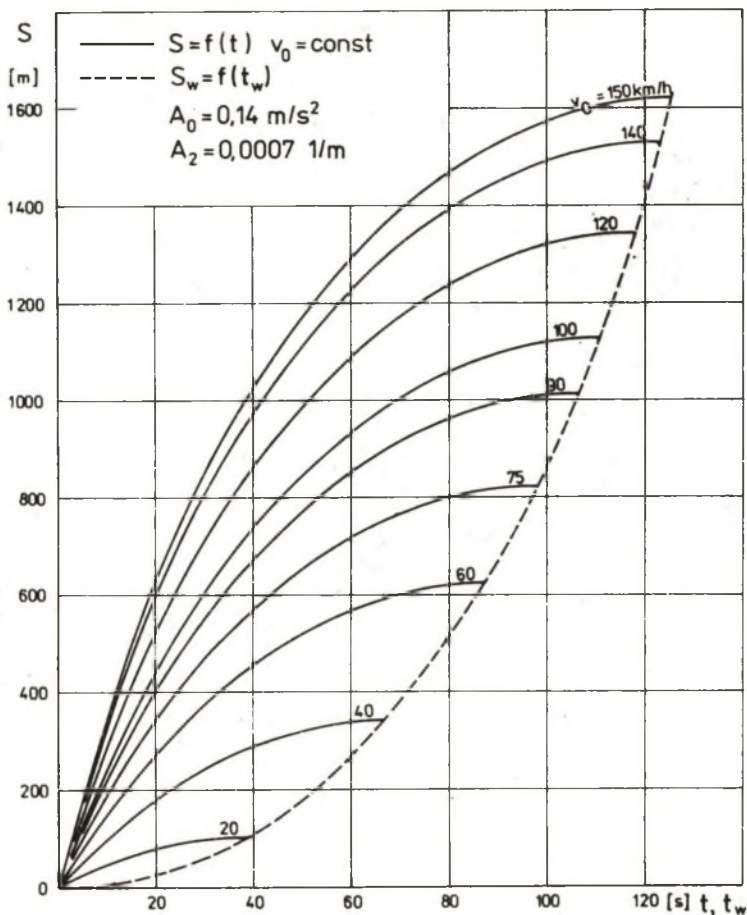
$$m = 10\ 000 \div 16\ 000\ \text{kg}$$

autobusy

$$c_x \cdot A = 3+6$$

$$m = 7\ 000 \div 15\ 000\ \text{kg}$$

Biorąc pod uwagę niewielki wzrost współczynnika A_2 ze względu na straty wentylacji i wpływ oporów toczenia, otrzymuje się najbardziej prawdopodobny zakres zmian współczynnika $A_2 = 0,0002 - 0,0008$.



Rys. 7. Przebiegi drogi pojazdu w funkcji czasu dla różnych prędkości początkowych próby wybiegu

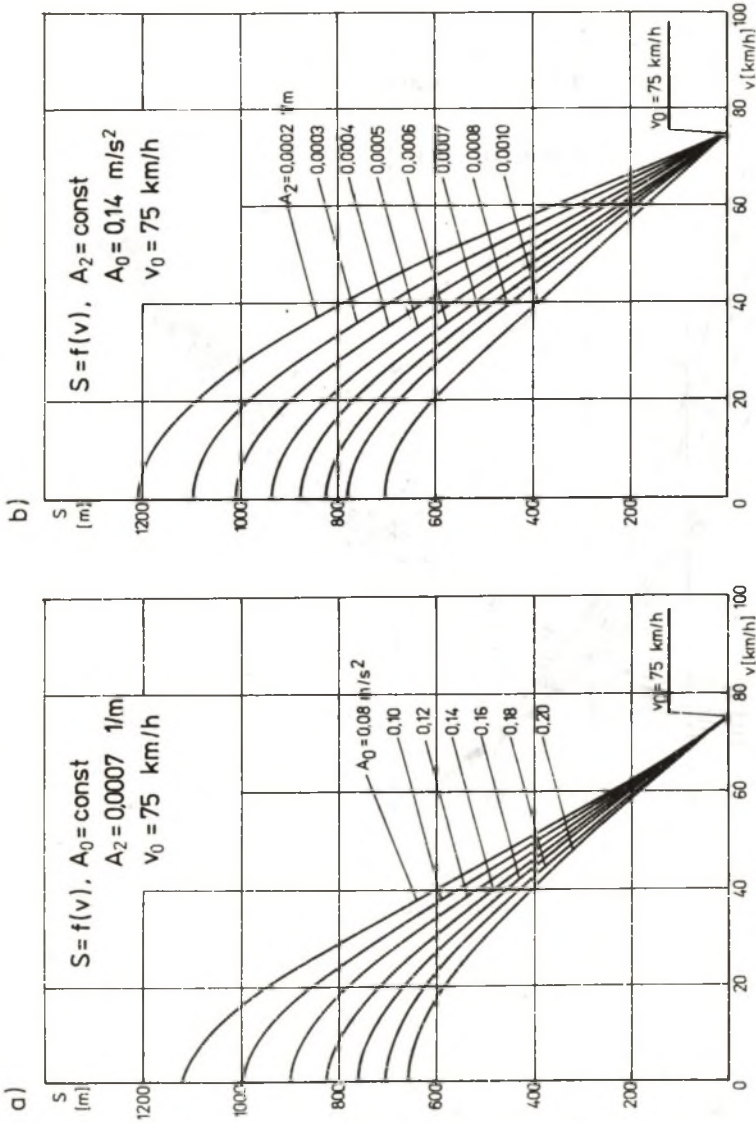
Fig. 7. Car routes in time function for different initial velocities of rolling test

Do analiz przyjęto przedziały zmian

$$A_0 \in \langle 0,08; 0,20 \rangle, \quad \Delta A_0 = 0,02 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$A_2 \in \langle 0,0002; 0,0010 \rangle, \quad \Delta A_2 = 0,0001 \frac{1}{\text{m}}$$

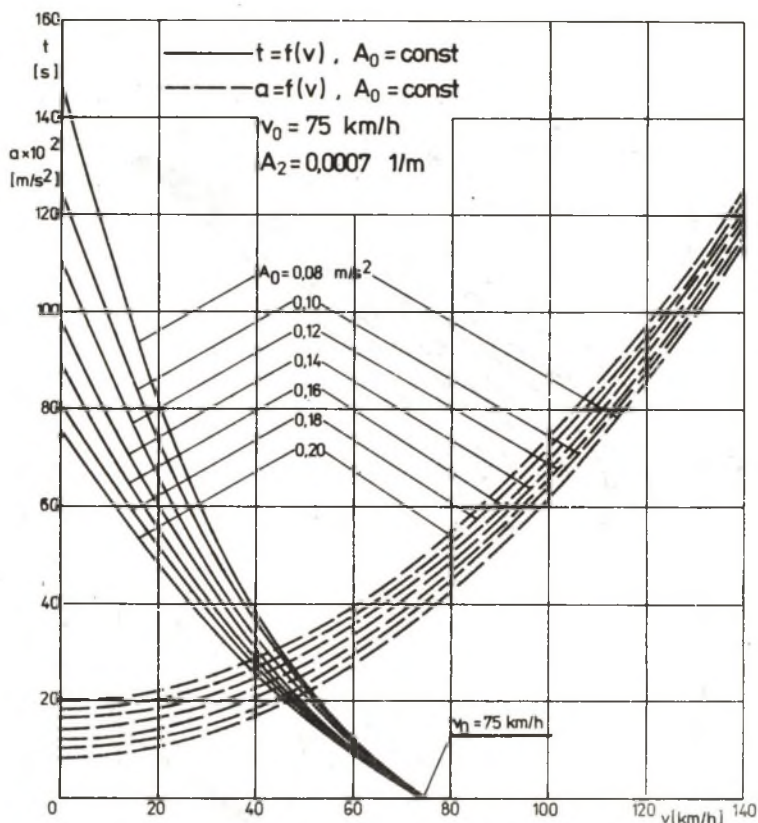
Obliczenia przeprowadzono dla prędkości początkowej $v_0 = 75 \text{ km/h}$, będącej prędkością większą od prędkości punktu przecięcia funkcji drogi wyno-



Rys. 8. Wpływ współczynników ogólnego równania ruchu pojazdu na przebiegi drogi w próbie wybiegu

Fig. 8. Coefficients of car motion general equation influence on the routes in rolling test
 a) wpływ współczynnika A_0 , b) wpływ współczynnika A_2
 a) coefficient A_0 influence, b) coefficient A_2 influence

szącej $v_p = 51 \text{ km/h}$ dla $A_0 = 0,14 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ i $A_2 = 0,0007 \frac{1}{\text{m}}$. Równocześnie prędkość ta jest prędkością możliwą do uzyskania w warunkach badań drogowych.

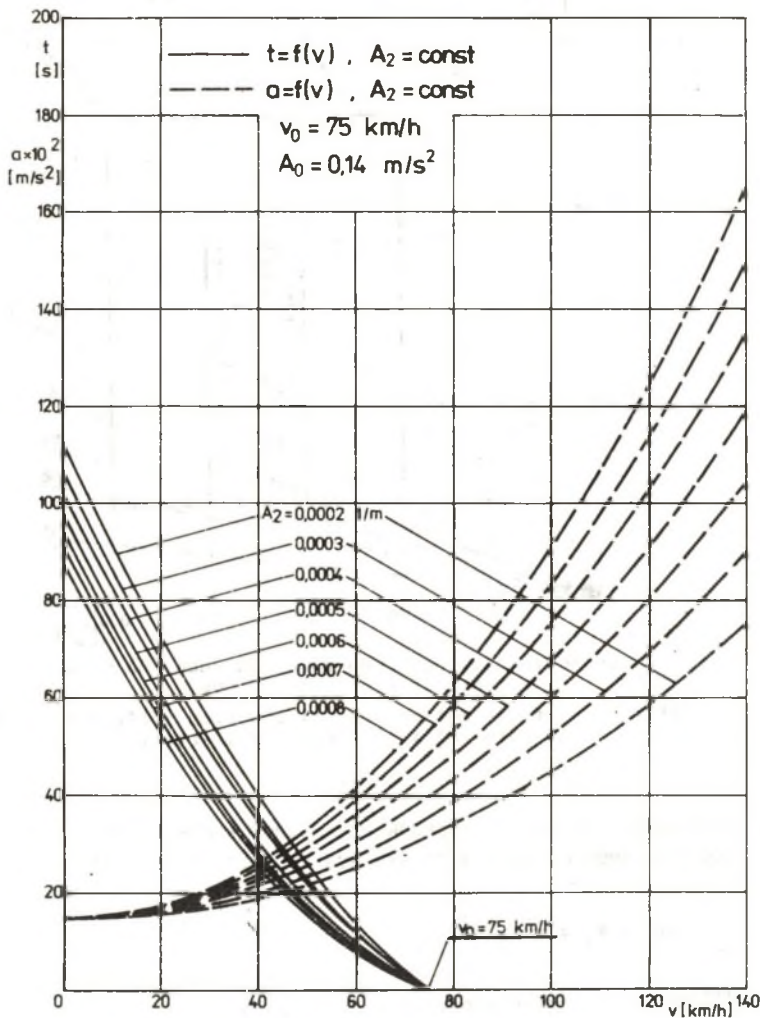


Rys. 9. Wpływ współczynnika A_0 na przebiegi czasu i opóźnienia pojazdu w próbie wybiegu

Fig. 9. Coefficient A_0 influence on time courses and car deceleration in rolling test

Wykresy przedstawione na rys. 9 i rys. 10 obrazują wpływ współczynników ogólnego równania ruchu na przebiegi czasu i przebiegi opóźnienia pojazdu w próbie wybiegu. Przebiegi czasu dotyczą próby wybiegu, dla której prędkość początkowa wynosi $v_0 = 75 \text{ km/h}$, a przebiegi opóźnień sporządzono dla pełnego zakresu rozpatrywanych prędkości pojazdu samochodowego $v \in <0, 150>$ km/h (opóźnienia nie zależą od prędkości początkowej próby wybiegu). Ze względu na to, że opóźnienie w próbie wybiegu przedstawia wprost opory ruchu

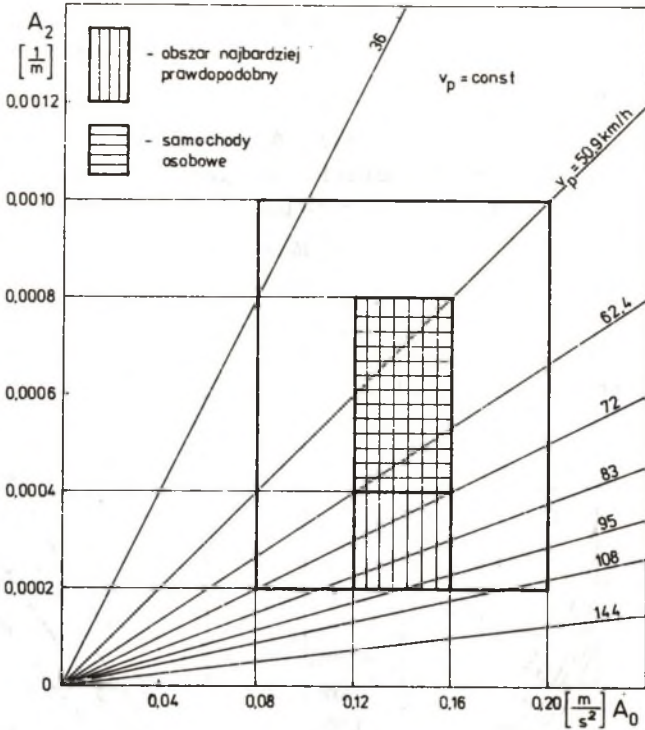
pojazdu, przebiegi tych opóźnień mogą służyć do określenia wpływu różnych czynników (konstrukcyjnych, eksploatacyjnych, trybologicznych) na ruch samochodu.



Rys. 10. Wpływ współczynnika A_2 na przebiegi czasu i opóźnienia pojazdu w próbie wybiegu

Fig. 10. Coefficient A_2 influence on time courses and car deceleration in rolling test

Z kolei na rys. 11 przedstawiono wpływ współczynników ogólnego równania ruchu pojazdu w próbie wybiegu na prędkość punktu przegięcia. Wykres ten ma istotne znaczenie przy ustalaniu prędkości początkowej próby dla wstępnie oszacowanych współczynników równania.



Rys. 11. Wpływ współczynników ogólnego równania ruchu na prędkość punktu przegięcia w próbie wybiegu

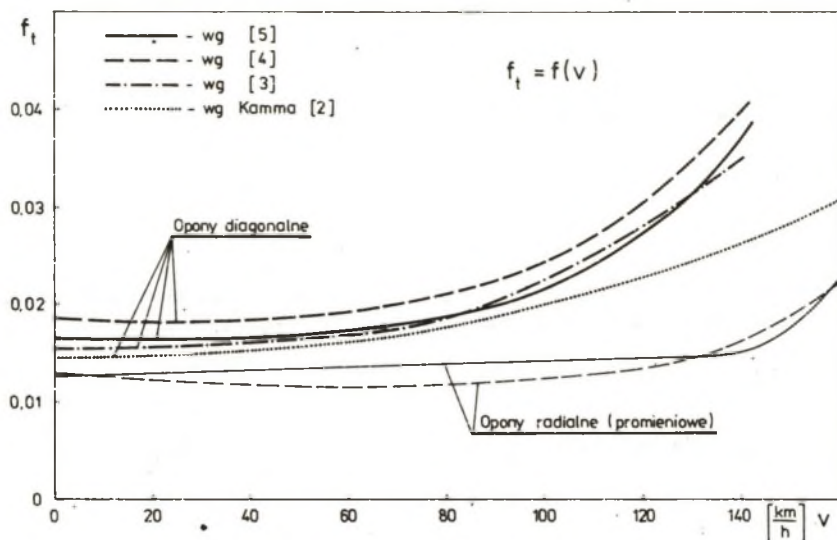
Fig. 11. Coefficient of car motion general equation influence on velocity of point of inflexion in rolling test

5. OKREŚLENIE FUNKCJI PRZEBIEGÓW PARAMETRÓW KINEMATYCZNYCH POJAZDU SAMOCHODOWEGO W PRÓBIE WYBIEGU DLA OPÓŹNIENIA POSTACI

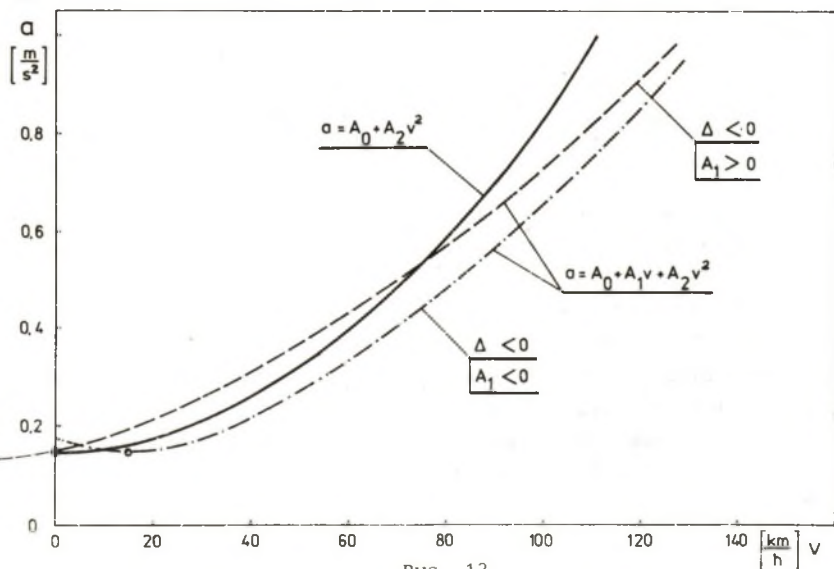
$$A = -(A_0 + A_1 v + A_2 v^2)$$

Dotychczasowe rozważania przeprowadzono przyjmując ogólne równanie ruchu pojazdu samochodowego w próbie wybiegu według zależności (6). Zależność ta wynika z przyjęcia wzoru określającego współczynnik oporu toczenia jako sumę wyrazu stałego i wyrazu z kwadratem prędkości liniowej. Słuszne jest to dla opon diagonalnych. Natomiast przebieg funkcji $f_t(v)$ dla stosowanych obecnie opon radialnych (promieniowych) należy opisać wielomianem co najmniej drugiego stopnia. Przyjęcie $f_t(v)$ zgodnie z (3b) i literaturą ([1], [3], [4], [5]), daje przebieg opóźnienia w próbie wybiegu według zależności (7), co pokazano na rys. 12. Współczynnik wyrazu liniowego ma niewielką wartość bezwzględną i może być dodatni lub ujemny.

a)



b)



Rys. 12

a) przebieg współczynnika oporu toczenia f_t w zależności od prędkości jazdy samochodu, b) przebieg opóźnień pojazdu w próbie wybiegu dla różnych postaci ogólnego równania ruchu

Fig. 12

a) rolling resistance f_t coefficient course according to car velocity, b) car deceleration course in rolling test for different forms of general motion equation

Wyróżnik trójmianu kwadratowego zawsze jest ujemny. Przyjmując

$$\Delta = -\Delta' = A_1^2 - 4 A_0 A_2$$

oraz uwzględniając warunki początkowe

$$\begin{aligned} s &= 0 \\ t &= 0 \end{aligned} \quad \text{dla} \quad v = v_0$$

otrzymuje się przebiegi drogi i czasu w funkcji prędkości chwilowej pojazdu w próbie wybiegu dla założonego ogólnego równania ruchu.

Przebieg drogi

$$\begin{aligned} s &= \frac{1}{2A_2} \left[\ln |A_2 v_0^2 + A_1 v_0 + A_0| - \ln |A_2 v^2 + A_1 v + A_0| \right] - \\ &- \frac{A_1}{A_2 \sqrt{\Delta'}} \left[\operatorname{arctg} \frac{2A_2 v_0 + A_1}{\sqrt{\Delta'}} - \operatorname{arctg} \frac{2A_2 v + A_1}{\sqrt{\Delta'}} \right] \end{aligned} \quad (31)$$

Przebieg czasu

$$t = \frac{1}{\sqrt{\Delta'}} \left[\operatorname{arctg} \frac{2A_2 v_0 + A_1}{\sqrt{\Delta'}} - \operatorname{arctg} \frac{2A_2 v + A_1}{\sqrt{\Delta'}} \right] \quad (32)$$

Analityczne określenie wpływu współczynników równania (7) na parametry kinematyczne pojazdu samochodowego w próbie wybiegu może być dokonane analogicznie do zależności (6). W tym przypadku dochodzi wyraz liniowy, który w wyniku całkowania daje liniowy przebieg drogi.

Szczegółowa analiza zależności (31) prowadzi do wniosków:

- charakter przebiegu funkcji drogi przy przyjęciu równania ruchu z wyrazem liniowym i bez wyrazu liniowego jest taki sam,
- funkcja drogi posiada punkt przegięcia, dla którego wartość prędkości jest niezależna od współczynnika wyrazu liniowego i wynosi

$$v_p = \sqrt{\frac{A_0}{A_2}}$$

co jest zgodne z zależnością (28).

Przebiegi parametrów kinematycznych pojazdu w funkcji czasu dla równania ruchu wg (7) są bardzo podobne do zależności wyznaczonych na podstawie równania bez wyrazu liniowego i wynoszą:

- funkcja prędkości

$$v = \frac{v_0 - \frac{2A_0 + A_1 v_0}{\sqrt{\Delta'}} \operatorname{tg}\left(t \frac{\sqrt{\Delta'}}{2}\right)}{1 + \frac{A_1 + A_2 v_0}{\sqrt{\Delta'}} \operatorname{tg}\left(t \frac{\sqrt{\Delta'}}{2}\right)} \quad (33)$$

- funkcja drogi

$$s = \frac{2(2A_0 + A_1 v_0)}{\Delta'} \ln \left| \cos\left(t \frac{\sqrt{\Delta'}}{2}\right) + \frac{A_1 + 2A_2 v_0}{\sqrt{\Delta'}} \sin\left(t \frac{\sqrt{\Delta'}}{2}\right) \right| \quad (34)$$

- funkcja opóźnienia

$$a = \frac{-(A_0 + A_1 v_0 + A_2 v_0^2)}{\left[\cos\left(t \frac{\sqrt{\Delta'}}{2}\right) + \frac{A_1 + 2A_2 v_0}{\sqrt{\Delta'}} \sin\left(t \frac{\sqrt{\Delta'}}{2}\right) \right]^2} \quad (35)$$

Przedstawione zależności stanowią pełny zestaw równań opisujących przebiegi parametrów kinematycznych pojazdu samochodowego w próbie wybiegu dla dwóch postaci ogólnego równania ruchu.

6. ZAŁOŻENIA DO METODYKI PRZEPROWADZANIA PRÓB WYBIEGU POJAZDU SAMOCHODOWEGO

6.1. Koncepcja urządzenia pomiarowego

Określenie najbardziej prawdopodobnych funkcji opisujących ruch pojazdu w próbie wybiegu i w innych warunkach eksploatacji (rozpedzanie, przyspieszanie - zwiększanie prędkości, opóźnianie - zmniejszanie prędkości itp.), wymaga wprawdzie doboru postaci ogólnego równania ruchu, a następnie dokładnego wyznaczenia współczynników jego wyrazów.

Należy podkreślić, że w literaturze brak jest równań odwzorowujących z wystarczającą dokładnością przebieg funkcji $f_t(v)$ dla opon radialnych, przez co nieznaną jest właściwa postać równania ruchu pojazdu dla różnych warunków eksploatacji. Analiza funkcji przedstawiających przebiegi parametrów kinematycznych samochodu w próbie wybiegu prowadzi do wniosku, że najkorzystniejszą funkcją jest zależność $a = f(v)$. Funkcję tę można zapisać w postaci wielomianu dowolnego stopnia, a wyrównanie wyników pomiarowych i dobór niewiadomych współczynników jest wówczas najprostsze. W tym przypadku uzyskuje się proste równania wynikające z wyznaczania pochodnych cząstkowych ze względu na niewiadome współczynniki i parametry mierzone. W efek-

cie zmniejsza się ilość operacji zmiennoprzecinkowych i zwiększa dokładność oraz czas przetwarzania danych pomiarowych. Wynikła z tego potrzeba opracowania doświadczalnego sposobu wyznaczania zależności $a = f(v)$. Ze względu na specyfikę badań, korzystnym sposobem jest pomiar parametru dS/dt , będącego prędkością.

Bezpośrednie wyznaczanie wartości prędkości obarczone jest dużym błędem wynikającym z dyskretnego charakteru jej pomiaru (zliczanie impulsów w jednostce czasu). Zastosowanie prądniczki tachometrycznej umożliwi, co prawda, ciągły pomiar prędkości, jednak nieliniowość tej prądniczki spowoduje wzrost błędów. Przy pomiarze elementarnych wielkości $dS \approx \Delta S$ i $dt \approx \Delta t$ można, ze względów technicznych, osiągnąć bardzo dużą dokładność. W opracowanym w Zakładzie Silników Spalinowych Politechniki Śląskiej urządzeniu badawczym osiągnięto następujące dokładności:

$$\Delta S = \frac{1}{34} \text{ m}$$

$$\Delta t = 0,01 \text{ s}$$

Dla porównania można podać, że samochód osobowy Fiat 126p przy prędkości początkowej $v_0 = 75 \text{ km/h}$ przebywa podczas wybiegu drogę ok. 800 m w czasie ok. 100 s. Z kolei brak dostępnych w kraju czujników do pomiaru przyspieszeń (opóźnień) w zakresie $0-2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ spowodował, iż opracowane urządzenie posiada układ do różniczkowania zależności dS/dt . Bezpośrednio na wyjściu otrzymuje się zależność

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = f\left(\frac{dS}{dt}\right), \quad (36)$$

co odpowiada szukanej funkcji $a = f(v)$.

Wartości $\frac{d^2 S}{dt^2}$ i $\frac{dS}{dt}$ rejestrowane są na magnetofonie z odpowiednim (nastawianym) przedziałem czasu w zakresie $t = 0,01 \div 0,99 \text{ s}$. Dla podanych parametrów uzyskuje się dokładności

$$\Delta\left(\frac{d^2 S}{dt^2}\right) = \frac{1}{500} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\Delta\left(\frac{dS}{dt}\right) = \frac{1}{10} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

6.2. Wpływ masy pojazdu na wyniki badań

Współczynniki ogólnego równania ruchu pojazdu złożone są z kilku składowych. Jedne składowe zależą od masy pojazdu, a inne nie zależą. Wynika z tego wniosek, że przeprowadzenie prób wybiegu dla różnych mas pojazdu pozwo-

li na rozdzielenie tych składników i dokładne określenie bezwymiarowych współczynników oporów ruchu i samych oporów. W ten sposób można osobno wyznaczyć współczynnik podstawowego oporu toczenia f_t , straty mechaniczne w układzie napędowym M_m oraz stałe funkcji współczynnika toczenia. Rozdzielenie współczynnika kształtu i współczynnika wentylacji nie jest możliwe. Jednak obydwie te współczynniki dotyczą oporu powietrza i mogą być uważane w złożeniu jako zastępczy współczynnik oporów powietrza (zredukowany współczynnik kształtu).

6.3. Wpływ pochylenia drogi na wyniki badań

Ważnym założeniem przy przeprowadzaniu badań drogowych jest zapewnienie poziomego odcinka drogi. W rzeczywistych warunkach drogowych założenie to jest trudne do spełnienia. Uwzględnienie pochylenia drogi polega na przeprowadzeniu badań w obydwie strony. Jednak komplikuje się kwestia uśrednienia tych wyników. Dokładnym sposobem wyeliminowania wpływu pochylenia drogi na wyniki badań jest uśrednienie wyników na podstawie zależności

$$\frac{2}{\frac{dS}{dv}} = \frac{1}{\frac{dS_{w1}}{dv}} + \frac{1}{\frac{dS_{w2}}{dv}} \quad (37)$$

gdzie:

- \bar{S} - uśredniona wartość drogi na odcinku pomiarowym,
- S_{w1} - wartość drogi w jedną stronę,
- S_{w2} - wartość drogi w drugą stronę.

Zależność (37) wynika ze wzoru (24). Rozwiązanie jej eliminuje wpływ pochylenia drogi na wyniki badań oraz umożliwia określenie oporu wzniesienia, co w wyniku prowadzi do oznaczenia kąta nachylenia drogi.

6.4. Ogólne założenia próby wybiegu

Po określeniu postaci równania ruchu pojazdu, do czego niezbędne jest urządzenie przedstawione w punkcie 6.1, do wyznaczania jego współczynników, wystarczy przeprowadzić próby wybiegu z zapisem całkowitej drogi od chwili załączenia urządzenia badawczego do zatrzymania pojazdu dla różnych prędkości początkowych i różnych mas, przy dość wyraźnej różnicy pomiędzy tymi wielkościami zadanymi. Liczba prób zależna jest od liczby współczynników i parametrów oporów ruchu (nie mniejsza niż 4 do 6). Każdą próbę przeprowadza się w obydwie strony odcinka pomiarowego, a uśrednienie dokonuje się zgodnie z zależnością (37).

Wynikiem rozwiązania układu równań nieliniowych

$$(S_w)_{ij} = f(v_{oi}, m_j) \quad (38)$$

jest uzyskanie współczynników równania ruchu, a przez to określenie oporów ruchu i znalezienie parametrów charakteryzujących nawierzchnię drogi, kształt pojazdu, straty mechaniczne układu przeniesienia napędu oraz uchwycenie wpływu prędkości na współczynnik toczenia.

7. PODSUMOWANIE

W opracowaniu przeanalizowano ruch samochodu podczas próby wybiegu (po wyłączeniu napędu). W pierwszej kolejności określono ogólne równanie ruchu pojazdu samochodowego w próbie wybiegu. Na podstawie przyjętej postaci ogólnego równania, określono równania ruchu w funkcji prędkości liniowej pojazdu i czasu trwania próby. Należy podkreślić, że literatura [1] podaje tylko zależności określające całkowitą drogę, jaką przebył rozpedzony pojazd w zakresie prędkości przyjętych w próbie (od prędkości początkowej do prędkości końcowej) i całkowity czas, odpowiadający przejechaniu odcinkowi drogi. Niniejsze opracowanie podaje natomiast ciągle funkcje przebiegów parametrów kinematycznych pojazdu samochodowego w próbie wybiegu. Ważne jest to przy określaniu ogólnego równania ruchu samochodu i wyznaczaniu jego współczynników.

Analiza równań próby wybiegu miała na celu zbadanie przebiegów i określenie zmian funkcji drogi, prędkości, czasu i opóźnienia. Znalaziono wpływ współczynników równania na parametry kinematyczne pojazdu, oznaczono punkty charakterystyczne funkcji oraz zbadano wpływ prędkości początkowej na wybieg samochodu. Uzyskano interesujące zależności analityczne wynikające z badania funkcji oraz określono zachowanie się tych funkcji w punktach skrajnych (początek próby wybiegu i faza zatrzymania się pojazdu). Przedstawiono przykładowe przebiegi parametrów kinematycznych pojazdu samochodowego w zależności od prędkości początkowej próby i współczynników ogólnego równania ruchu.

Wyniki rozważań posłużyły do opracowania założeń metodyki przeprowadzania prób wybiegu pojazdu samochodowego. Realizacja techniczna nowego sposobu badań i rejestracji wyników pomiarowych pozwoli na określenie funkcji rzeczywiście opisujących ruch pojazdu w różnych warunkach eksploatacji (rozpedzanie, przyspieszanie, opóźnianie).

LITERATURA

- [1] Lanzendoerfer J.: Badania pojazdów samochodowych. WKŁ, Warszawa 1977.
- [2] Dębicki M.: Teoria samochodu - teoria napędu, WNT, Warszawa 1976.
- [3] Studziński K.: Samochód - teoria, konstrukcja i obliczanie. WKŁ, Warszawa 1980.
- [4] Lanzendoerfer J.; Szczepaniak C.: Teoria ruchu samochodu WKŁ, Warszawa 1980.

- [5] Mitschke M.: Dynamika samochodu. WKŁ, Warszawa 1977.
- [6] Prugar E., Ciesiołkiewicz A., Jeszka P., Żmudka Z., Sładkowski S.: Określenie parametrów kinematycznych i wyznaczanie oporów ruchu pojazdu samochodowego metodą wybiegu. ZN Energetyka nr 101, Gliwice 1987 (w druku).

Recenzent: Doc. dr inż. Wojciech Siłka

Wpłynęło do Redakcji w czerwcu 1987 r.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИДА ФУНКЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОБЕ ВЫБЕГА АВТОМОБИЛЯ

Р е з ю м е

Целью настоящей разработки было определение уравнений описывающих выбег автомобиля, как способа получения сил сопротивления машины. Проведён комплексный анализ видов функций кинематических параметров автомобиля во время пробы выбега и определено влияние коэффициентов уравнения на вид этих функций. Разработаны основы методики проведения проб выбега автомобиля. Представлены примерные виды кинематических параметров автомобиля в зависимости от начальной скорости проб выбега и коэффициентов уравнения движения.

STUDY OF THE KINEMATIC PARAMETERS FUNCTION IN THE CAR ROLLING TEST

S u m m a r y

The aim of the paper was to determine the equations describing the car start being the way to determine the car resistance to motion. Complex analysis of car kinematic parameters function in the start test was carried out and the influence of equation coefficients on these function runs was determined. The assumptions for the methodics of carrying out the car start test were elaborated. The exemplary courses of car kinematic parameters courses were presented according to the initial velocity of start test and coefficients of motion equation.