

Energetyczne aspekty toczenia koła ogumionego o dużej odkształcalności

STANISŁAW TARYMA, RYSZARD WOŹNIAK

Politechnika Gdańska

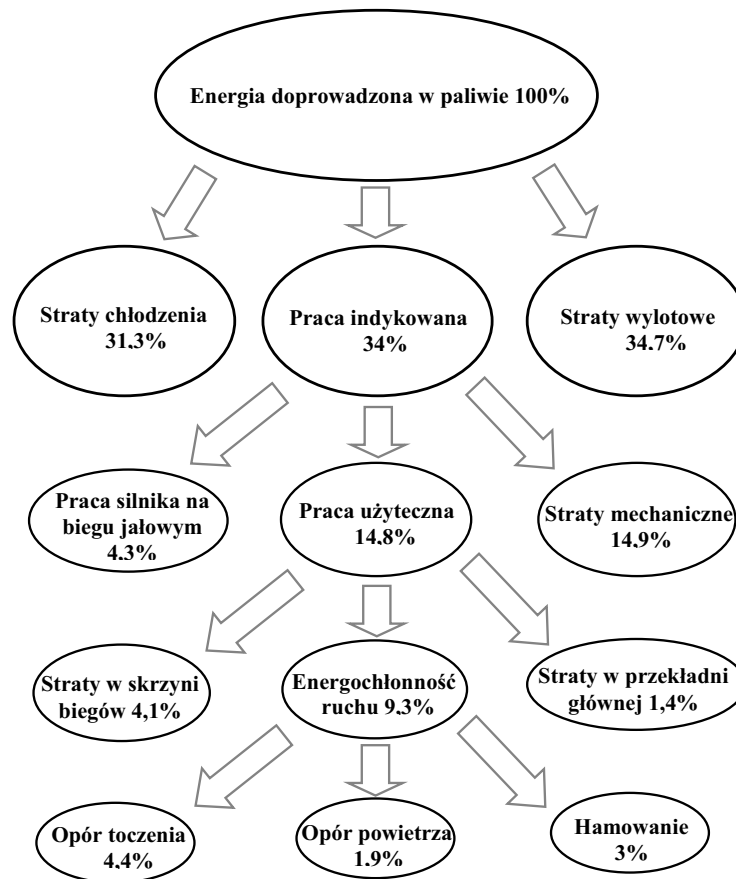
W pracy przedstawiono czynniki wpływające na energochłonność ruchu samochodu. Jej znacznym składnikiem jest energia wydatkowana na pokonanie oporu toczenia. Energia ta rozpraszana jest we wszystkich kołach jezdnych pojazdu. Przeanalizowano ogólny przypadek toczenia się koła ogumionego o dużej odkształcalności na miękkim podłożu. Opisano składowe energii rozpraszanej na skutek poruszania się po miękkim podłożu z kątem pochylenia oraz obciążenia koła momentem obrotowym, siłą boczną i zmienną siłą pionową. Składowe te obliczono na podstawie wyznaczonych eksperymentalnie przyrostów współczynnika oporu toczenia spowodowanych powyższymi przyczynami. Zestawienie wyników pokazuje, że dominujące są straty związane z odkształceniem podłoża i spychaniem gruntu. W przypadku toczenia się koła po nieodkształcalnym podłożu przeważają straty wynikające z obciążenia momentem i siłą boczną. Nieznaczące są straty związane z istnieniem kąta pochylenia koła.

1. Wstęp

Ruch samochodu jest następstwem działania siły wzdłużnej, która równoważąc opory ruchu i pokonując siłę bezwładności wykonuje pracę na danym odcinku drogi. Pracy tej odpowiada wydatek energii, która musi być doprowadzona do kół napędowych, aby realizować ruch samochodu według określonego profilu prędkości opisanej zależnością prędkość - czas. Ten wydatek energii definiowany jest jako energochłonność ruchu i stanowi podstawowy składnik bilansu energetycznego samochodu. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy bilans energii samochodu osobowego poruszającego się w cyklu europejskim miejskim.

Z przedstawionego bilansu wynika, że energochłonność ruchu stanowi jedynie 9,3% energii całkowitej dostarczonej w paliwie dla realizowanego profilu prędkości w cyklu miejskim. Zależnie od realizowanego profilu prędkości energochłonność ruchu może zmieniać się w szerokim przedziale wartości. Mimo przeważającego udziału strat energii, energochłonność ruchu ma decydujący wpływ na zużycie paliwa przez samochód.

Energię dostarczoną od silnika wydatkowaną na pokonanie oporów ruchu samochodu można opisać zależnością (1).



Rys. 1. Bilans energii samochodu osobowego poruszającego się w europejskim cyklu miejskim [1].
 Fig.1. Energy balance of moving car under European urban drive cycle [1].

$$E = G_L \cdot W_d - \Delta E_S - \Delta E_P \quad [1] \quad (1)$$

gdzie:

G_L - ilość doprowadzonego paliwa do silnika [dcm^3],

W_d - wartość opałowa paliwa [J/dcm^3],

ΔE_S - straty przetwarzania energii w silniku [J],

ΔE_P - straty przekazywania energii do kół napędowych [J],

E - energochłonność ruchu samochodu [J].

Składniki energochłonności ruchu samochodu opisuje równanie (2):

$$E = E_t + E_p + E_w + E_k \quad [1] \quad (2)$$

gdzie:

- E_t - energia wydatkowana na pokonanie oporu toczenia [J],
- E_p - energia wydatkowana na pokonanie oporu powietrza [J],
- E_w - energia wydatkowana na pokonanie oporu wzniesienia [J],
- E_k - energia kinetyczna samochodu [J].

Energię wydatkowaną na pokonanie oporu toczenia można opisać zależnością (3):

$$E_t = m \cdot g \cdot (\cos \alpha) \int_0^L f_t \cdot ds \quad [1] \quad (3)$$

gdzie:

- m - masa samochodu [kg],
- g - przyspieszenie ziemskie [m/s²],
- α - kąt pochylenia wzdłużnego drogi [°],
- f_t - współczynnik oporu toczenia [-],
- L - droga przebyta przez samochód [m].

Ponieważ $ds = v \cdot dt$, gdzie: v - prędkość samochodu [m/s], to energię wydatkowaną na pokonanie oporu toczenia można opisać także równaniem (4):

$$E_t = m \cdot g \cdot (\cos \alpha) \cdot f_t \int_0^T v \cdot dt \quad [1] \quad (4)$$

gdzie: T - czas przejazdu [s] drogi L .

Energia E_t wydatkowana na pokonanie oporu toczenia samochodu uwarunkowana jest energią E_n rozpraszaną w poszczególnych kołach o dużej odkształcalności i w zawieszeniu samochodu:

$$E_t = \sum_{n=1}^z E_n + E_s \quad (5)$$

gdzie:

- $\sum_{n=1}^z E_n$ - suma energii rozpraszanej w z kołach samochodu [J],
- E_s - energia rozpraszana np. w zawieszeniu samochodu - wliczana do energii wydatkowanej na pokonanie oporu toczenia [J].

2. Ogólny przypadek toczenia się koła ogumionego

Energię E_n rozpraszaną w pojedynczym kole jezdnym samochodu można opisać zależnością (6):

$$E_n = E_{tp} + E_{op} + E_M + E_Y + E_B + E_Q \quad (6)$$



gdzie:

E_p - energia niezbędna do ruchu koła toczącego po twardej i nieodkształcalnej nawierzchni przy zerowym kącie znoszenia i pochylenia ze stałą prędkością nie obciążonego ani momentem napędowym, ani hamującym [J],

E_{op} - energia odkształcenia podłoża i spychania gruntu [J],

E_M - energia rozpraszana w wyniku obciążenia koła momentem napędowym lub hamującym [J],

E_Y - energia rozpraszana w wyniku obciążenia koła siłą boczną [J],

E_B - energia rozpraszana w wyniku istnienia kąta pochylenia koła [J],

E_Q - energia rozpraszana w wyniku obciążenia koła pionową siłą zmienną $Q+Q(t)$ [J] (Q – składowa stała pionowego obciążenia, $Q(t)$ – składowa zmienna obciążenia pionowego).

Równanie (6) dotyczy koła toczącego się po miękkim odkształcalnym podłożu z kątem pochylenia β , obciążonego momentem obrotowym M , siłą wzdłużną P , siłą boczną Y oraz pionową siłą zmienną $Q+Q(t)$. Taki ogólny przypadek toczącego się koła przedstawiono na rysunku 2.

Podstawowe pomiary oporu toczenia opon samochodowych wykonywane są dla opon toczących się przy zerowym kącie znoszenia i pochylenia ze stałą prędkością po równej, twardej i nieodkształcalnej nawierzchni, nie obciążonych ani momentem napędowym, ani momentem hamującym. Podczas takich pomiarów mierzona jest energia E_p .

Energię wydatkowaną na odkształcenie podłoża i spychanie gruntu podczas toczenia się koła pneumatycznego po miękkim podłożu można opisać zależnością (7), wyznaczoną na podstawie wzoru Bekkera na opór toczenia cytowanego w pracy [2]:

$$E_{op} = \frac{[b \cdot (p_i + p_c)]^{\frac{n+1}{n}}}{(k_c + b \cdot k_p)^{\frac{1}{n}} \cdot (n+1)^0} \int ds \quad (7)$$

gdzie:

b - szerokość utworzonej koleiny [m],

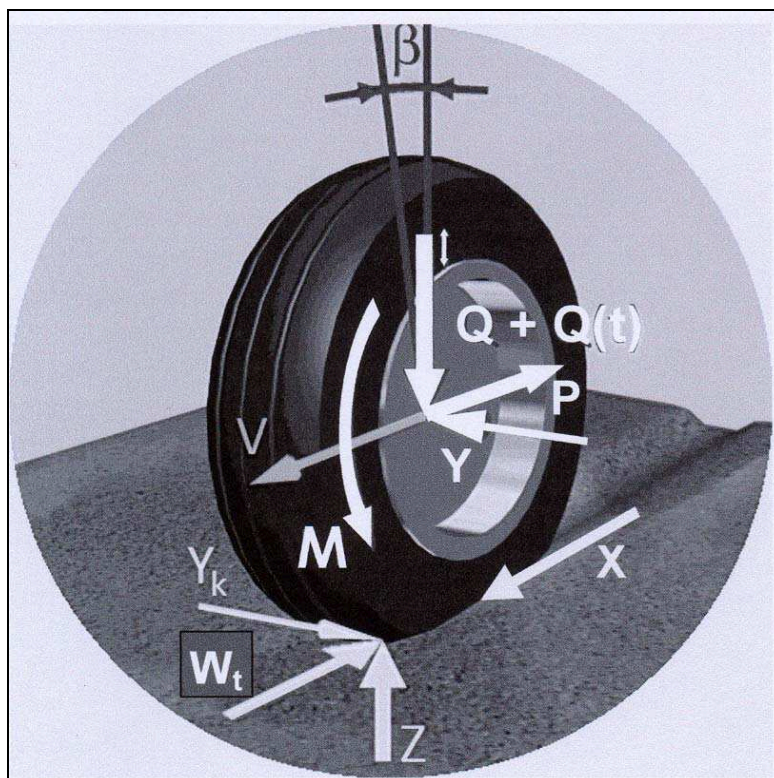
p_i - ciśnienie powietrza w ogumieniu [N/m^2],

p_c - dodatkowy nacisk na podłożu wywołany sztywnością ogumienia [N/m^2],

n - wykładnik potęgi zależny od rodzaju, struktury i własności mechanicznych podłoża [-],

k_c, k_p - współczynniki wyznaczone doświadczalnie dla danego podłoża (k_c [N/m^{n+1}], k_p [N/m^{n+2}]),

L - droga, na której toczony jest koło [m].



Rys. 2. Ogólny przypadek toczącego się koła:

Z - reakcja pionowa podłoża, X - reakcja wzdłużna podłoża, W_t - siła oporu toczenia, Y_k - reakcja boczna podłoża, V - prędkość linowa koła, M - moment obrotowy, Y - siła boczna, P - reakcja wzdłużna w osi koła, $Q + Q(t)$ - składowa stała i zmienna obciążenia pionowego, β - kąt pochylecia koła.

Fig. 2. General event of rolling wheel:

Z - vertical surface reaction, X - longitudinal surface reaction, W_t - rolling resistance force, Y_k - transversal surface reaction, V - linear wheel speed, M - torque, Y - side force, P - longitudinal reaction acting to wheel axle, $Q + Q(t)$ - constant component and variable component of vertical load, β - camber angle.

Energię rozpraszaną w wyniku obciążenia koła momentem napędowym lub hamującym można opisać zależnością (8):

$$E_M = \Delta E \cdot L \quad (8)$$

gdzie:

L - droga, na której toczone jest koło [m],

ΔE - strata energii w toczącym się kole na jednostkę przebytej drogi wywołana przyłożeniem momentu napędowego lub hamującego.

Clark w pracy [3] przedstawił zależność strat energii w toczącym się kole w zależności od przyłożonej siły napędowej lub hamującej dla różnych obciążeń pionowych opony. Na podstawie tej zależności można odczytać dla danego obciążenia pionowego opony i dla danej siły napędowej lub hamującej straty energii na jednostkę przebytej drogi. Mnożąc te straty przez długość przebytej drogi otrzymamy całkowite straty energii na danej drodze spowodowane obciążeniem koła momentem obrotowym.

W wyniku obciążenia toczącego się koła siłą boczną Y , koło to toczy się z pewnym kątem znoszenia δ . Wzrasta odkształcenie boczne opony. Energię E_Y rozpraszaną w wyniku toczenia się koła ze znoszeniem można wyznaczyć z zależności (9):

$$E_Y = \Delta f_Y \cdot Q \int_0^L ds \quad (9)$$

gdzie:

Δf_Y - przyrost wartości współczynnika oporu toczenia w wyniku obciążenia toczącego się koła siłą boczną Y powodującą kąt znoszenia δ [-],

Q - siła pionowa obciążająca koło [N],

L - długość przebytej drogi [m].

Przyrost wartości współczynnika oporu toczenia Δf_Y w wyniku toczenia się koła z pewnym kątem znoszenia można wyznaczyć z zależności przedstawionych dla danej opony na rysunku 3. Zależność tę wyznaczono eksperymentalnie dla opony radialnej z drogową rzeźbą bieżnika przy ciśnieniu w ogumieniu 210 kPa i przy prędkości toczenia 80 km/h na nawierzchni gładkiej SW. Na rysunku 3 zaznaczono przyrost współczynnika oporu toczenia $\Delta f_Y = 0,012$ opony toczącej się z kątem znoszenia $\delta = 1,50^\circ$. Siła pionowa obciążająca koło wynosiła 3000 N.

W ruchu samochodu koła jezdne toczą się z pewnym kątem pochylenia β . Spotykane wartości tego kąta we współczesnych pojazdach wahają się w granicach od $-1,5^\circ$ do $+5,5^\circ$. Takiemu toczeniu się koła towarzyszy najczęściej wzrost oporu toczenia. Energię rozpraszaną w kole w wyniku istnienia kąta pochylenia koła można opisać zależnością (10). Wzrost współczynnika oporu toczenia w takich warunkach oznaczono Δf_β , a wartość tego wzrostu można określić z wykresu przedstawionego na rysunku 4.

$$E_B = \Delta f_\beta \cdot Q \int_0^L ds \quad (10)$$

gdzie: Δf_β - przyrost wartości współczynnika oporu toczenia toczącego się koła z kątem pochylenia β [-].

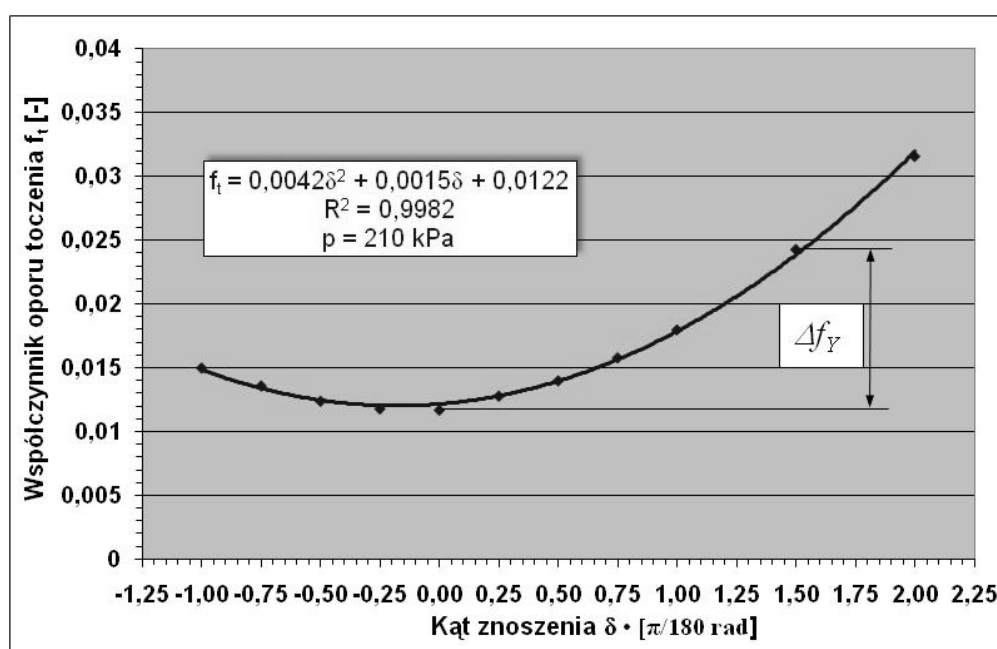
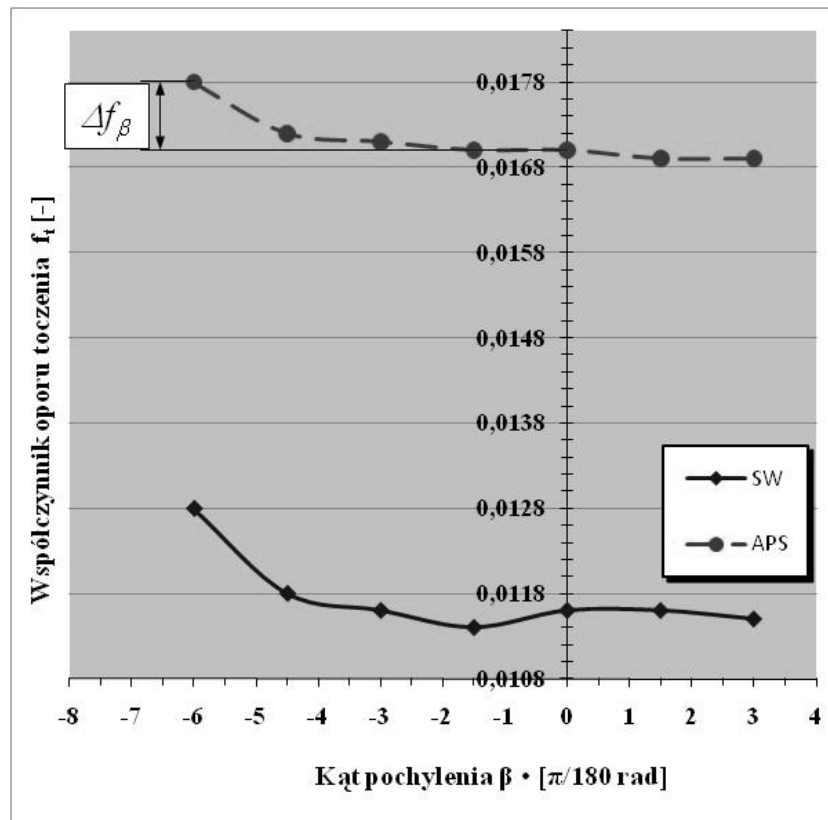
Rys. 3. Zależność współczynnika oporu toczenia opony od kąta znoszenia δ .

Fig. 3. Rolling resistance coefficient versus slip angle.

Na rysunku 4 pokazano zależność współczynnika oporu toczenia opony od kąta pochylenia koła β na nawierzchni gładkiej SW oraz na nawierzchni szorstkiej APS. Pomiary wykonano na bębnowej maszynie bieżnej przy prędkości toczenia opony 80 km/h.



Rys. 4. Zależność współczynnika oporu toczenia opony na dwóch nawierzchniach od kąta pochylenia koła β .

Fig. 4. Rolling resistance coefficient versus camber angle β .

W wyniku obciążenia toczącego się koła pionową siłą zmienną $Q+Q(t)$ jego współczynnik oporu toczenia zmienia się. Energię rozpraszaną w kole E_Q w wyniku tego obciążenia można opisać zależnością (11):

$$E_Q = \Delta f_Q \cdot Q \int_0^L ds \quad (11)$$

gdzie: Δf_Q - przyrost wartości współczynnika oporu toczenia toczącego się koła obciążonego pionową siłą zmienną $Q+Q(t)$ [-].

W pracy [4] dokonano obliczeń zależności współczynnika oporu toczenia koła pneumatycznego w zależności od częstotliwości zmian obciążenia pionowego wykorzystując model Pacejki uzupełniony modelem Gong'a. W oparciu o te dwa modele

uzyskano wyniki najbardziej zbliżone do zależności otrzymanych na podstawie badań rzeczywistych opon. Zaobserwowano dwa rezonanse przy częstotliwościach 17Hz i 25Hz. Dla częstotliwości 17Hz otrzymano przyrost współczynnika oporu toczenia Δf_Q wynoszący około 0,054, a dla częstotliwości 25Hz przyrost ten wyniósł 0,064.

3. Podsumowanie

Równanie (6) opisuje energię, jaką trzeba doprowadzić do toczącego się koła, aby pozostawało ono w ruchu jednostajnym. Dotyczy ono koła toczącego się po miękkim, odkształcalnym podłożu z kątem pochylenia β , obciążonego momentem obrotowym M i siłą boczną Y oraz pionową siłą zmienną $Q+Q(t)$. Dla założonych warunków toczenia przeciętnego koła samochodowego wyznaczono poszczególne przyrosty współczynnika oporu toczenia oznaczone jako Δf_x . Na podstawie tych przyrostów obliczono poszczególne składniki w równaniu (6). Wyniki tych obliczeń zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Przyrosty rozpraszanej energii.
Table 1. Increases of energy dissipation.

Przyczyna	Założenia	Przyrost współczynnika oporu toczenia Δf_x	Rozpraszana energia na drodze jednego metra
Miękkie podłoże	Suchy piasek $Q = 3000 \text{ N}$	$\Delta f_{op} = 0,18$	540 Nm/m
Obciążenie momentem	$Q = 3000 \text{ N}$ $M = 960 \text{ Nm}$	–	180 Nm/m
Obciążenie siłą boczną	$Q = 3000 \text{ N}$ $\delta = 1,5^\circ$	$\Delta f_Y = 0,012$	36 Nm/m
Kąt pochylenia koła	$Q = 3000 \text{ N}$ $\beta = 6,0^\circ$	$\Delta f_B = 0,001$	3 Nm/m
Pionowe obciążenie zmienne	$f = 17 \text{ Hz}$ $Q = 3000 \text{ N}$	$\Delta f_Q = 0,054$	162 Nm/m
<i>Toczenie swobodne</i>	<i>$Q = 3000 \text{ N}$</i>	<i>$f_t = 0,01$</i>	<i>30 Nm/m</i>

Analizując to zestawienie można zauważyć, że najbardziej energochłonne jest odkształcenie podłoża i spychanie gruntu. Toczenie koła obciążonego momentem obrotowym charakteryzuje się także dużym rozpraszaniem energii. W wyniku toczenia ze znośniami rozpraszana energia rośnie z kwadratem kąta znośnienia δ . W przypadku toczenia koła pochylonego o kąt β wzrost rozpraszanej energii jest nieznaczny. Obciążenie toczącego się koła pionową siłą zmienną powoduje dla pewnego zakresu zmian częstotliwości istotny wzrost rozpraszanej energii. Maksyma tego wzrostu występują przy częstotliwościach rezonansowych. Rozpraszana energia spowodowana przyczynami wymienionymi w tabeli 1 porównana została z zapotrzebowaniem energii E_p na toczenie swobodne tego koła po równej, gładkiej (SW) nieodkształcalnej nawierzchni

($\delta = 0, \beta = 0$), wynoszącym 30 Nm/m dla $f_i = 0,01$. Z porównania tego wyniku, że dla założonych warunków tylko energia rozpraszana w wyniku istnienia kąta pochylenia koła ($\beta = 6,0^\circ$) jest mniejsza od zapotrzebowania energii na swobodne toczenie. W pozostałych przypadkach rozpraszana energia spowodowana wymienionymi przyczynami przekracza od paru do paru dziesięciu razy zapotrzebowanie energii na swobodne toczenie.

4. Wnioski

Opór toczenia koła o dużej odkształcalności powodowany jest następującymi stratami energetycznymi podczas toczenia po równej, nieodkształcalnej nawierzchni:

- a) straty histerezy sprężystego odkształcania powłoki opony,
- b) straty tarcia i odkształcenia elementów bieżnika na powierzchni styku opony z nawierzchnią,
- c) straty uderzeń elementów bieżnika o nawierzchnię,
- d) straty adhezji elementów bieżnika do nawierzchni,
- e) straty bezwładności powstające na skutek istnienia "fali stojącej" na obwodzie opony.

Składowa strata histerezy w warunkach swobodnego toczenia lub przy jednostajnej jeździe po równej i twardej nawierzchni jest dominująca i stanowi do 90% całkowitych strat toczenia [2]. Wielu badaczy straty b), c) i d) traktuje łącznie i szacuje ich udział na poziomie od 5 - 10%. Straty bezwładności są powodem gwałtownego wzrostu oporu toczenia przy prędkościach wyższych od prędkości krytycznej. Dominujące straty histerezy są powodowane pracą sił tarcia pomiędzy cząsteczkami materiału opony.

Obciążenie koła momentem obrotowym, siłą boczną i zmienną siłą pionową powoduje wzrost obwodowego, bocznego i promieniowego odkształcenia opony, a tym samym wzrost strat histerezy, które są dominujące na nieodkształcalnej nawierzchni. Wzrastają także straty tarcia i odkształcenia elementów bieżnika na powierzchni styku opony z nawierzchnią, których udział jest mniejszy. Jednakże podczas toczenia po miękkim podłożu straty odkształcenia podłoża i spychania gruntu znacznie przewyższają straty wymienione powyżej i wtedy one są dominujące.

Literatura

- [1] SIŁKA W.: *Energochłonność ruchu samochodu*. WKŁ, Warszawa 1997.
- [2] DAJNIAK H.: *Ciągniki*. WKŁ, Warszawa 1974.
- [3] CLARK K. S.: *Mechanics of Pneumatic Tires*. Washington. USA 1978.
- [4] MIEGE A. J. P.: *Truck tyre rolling resistance under dynamic vertical load*. University of Nottingham, School of Mechanical, Materials, Manufacturing Engineering and Management, Nottingham 2004.

Energetic aspects of rolling flexible wheel

S u m m a r y

The paper presents the factors which have an effect on moving car energy consumption. Its significant element is energy used for rolling resistance overcoming. This energy is dissipated in all car wheels. General event of rolling flexible wheel on soft ground was analyzed. Components of dissipated energy during movement on soft ground were described when: chamber angle, torque, side force or variable vertical load was applied to the wheel. Those components were calculated taking the measured increases of rolling resistance coefficient into account. Comparison of results shows that the dominant losses are connected with ground deformation and pushing. In the case of wheel rolling on undeflectable ground the dominant losses are connected with the torque and side force. Losses connected with chamber of the wheel are insignificant.