

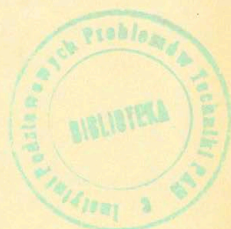
4.45 — maszyny, części maszyn,
diagnostyka

W. Wojno, S. Imielowski

**IDENTYFIKACJA WSKAZAŃ
CZUJNIKÓW OPÓZNIENIA
ZANOTOWANYCH PODCZAS PRÓBY
BARIEROWEJ SAMOCHODU OSOBOWEGO**

2/1987

P. 269



WARSZAWA 1987

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 17 października 1986 r.



56843



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 160 egz. Ark.wyd. 1,35 Ark.druk. 2

Oddano do drukarni w styczniu 1987 r.

Nr zamówienia 47/87.

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich 8

Włodzimierz Wojno, Szymon Imiełowski

Samodzielna Pracownia
Teorii Materiałów Niesprężystych

IDENTYFIKACJA WSKAZAŃ CZUJNIKÓW OPÓZNIENIA
ZANOTOWANYCH PODCZAS PRÓBY BARIEROWEJ
SAMOCHODU OSOBOWEGO

Streszczenie:

Niniejsza praca przedstawia metodę identyfikacji wskazań czujników opóźnienia zanotowanych podczas próby barierowej samochodu osobowego. Ruch czujników w trakcie próby jest złożonym z ruchu względnego odbywającego się wzdłuż osi pomiarowej, która jednocześnie obraca się względem ustalonego punktu. Aby ten ruch opisać wprowadzono nieruchomy układ współrzędnych, związany z jezdnią i barierą oraz układ ruchomy, związany z osią pomiarową. Wyodrębniono trzy następujące po sobie fazy ruchu samochodu: zgniot części nadwozia znajdującej się przed silnikiem przy sztywnym zachowaniu się części pozostałej, obrót połączony z deformacją części uznanej w fazie poprzedniej za sztywną oraz w końcu opadanie podczas którego znikają deformacje sprężyste. W wykonanych obliczeniach posłużono się zależnościami przyrostowymi. W rezultacie otrzymano wykresy przyspieszeń, prędkości, przemieszczeń zgniatania i kąta obrotu osi pomiarowej oraz oszacowanie z góry skróceń poszczególnych odcinków osi i jej kąta obrotu. W pracy zaproponowano również pewne uzupełnienia opracowania do tego typu prób wykonywanych w przyszłości.

Wstęp

Celem niniejszej pracy jest identyfikacja wskazań czujników opóźnienia zanotowanych podczas próby barierowej samochodu osobowego.

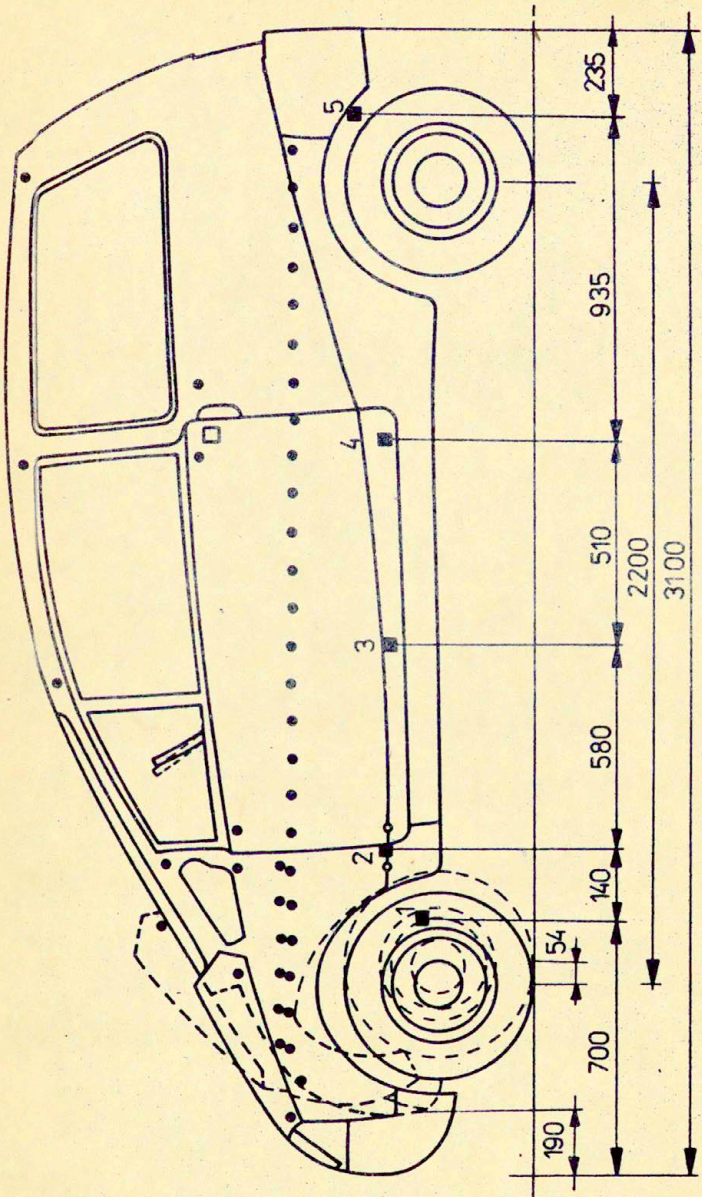
Według przedstawionego na rys.1 schematu czujniki zostały rozmieszczone w dolnej części nadwozia samochodu w następujący sposób:

- czujnik nr 1 na silniku
- czujniki nr 2, 3, 4 w przedniej części kabiny pasażerów /czujnik nr 2 odpadł w czasie próby/
- czujnik nr 5 za tylnym kołem

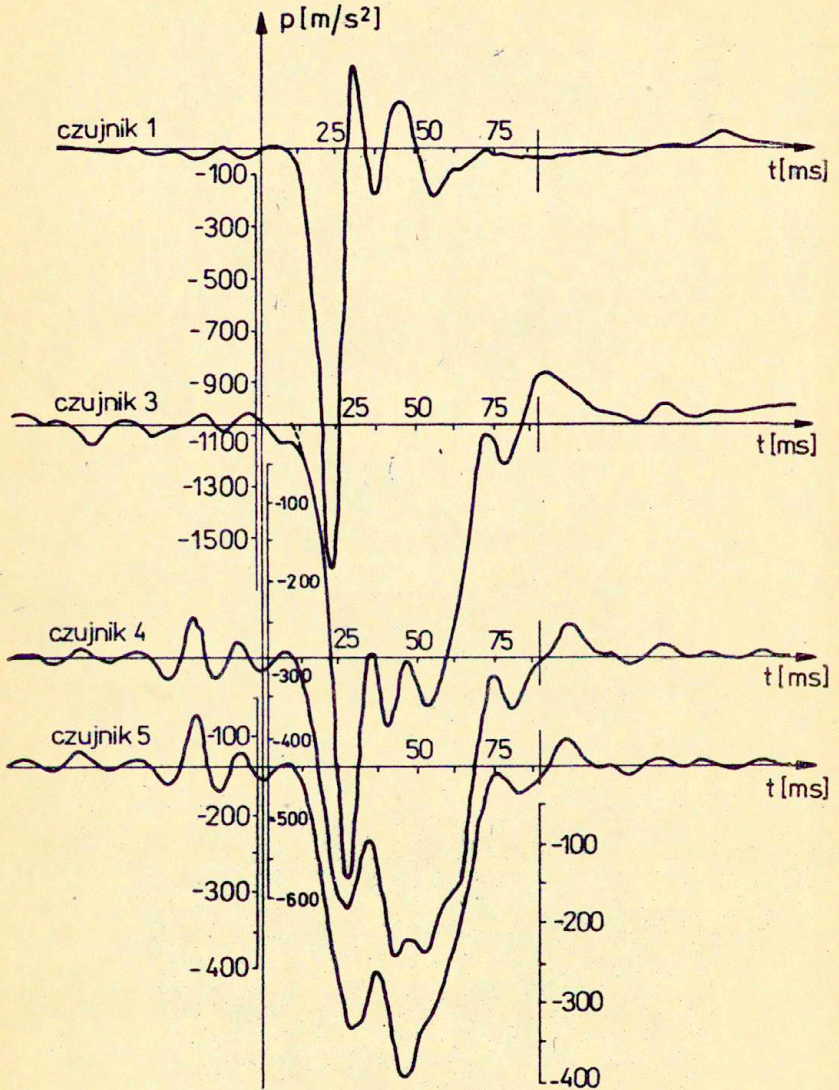
1. Opis zachowania się samochodu na podstawie bezpośredniej analizy wykresów przyspieszeń

Przedstawione autorom pracy wykresy przyspieszeń pomierzonych w czasie próby pokazane są na rys. 2. Przyspieszenia te są rzutami przyspieszeń bezwzględnych na kierunki pomiarowe czujników w punktach ich zamocowania. W celu przeprowadzenia wstępnej analizy wykresy te poddano bezpośredniemu dwukrotnemu całkowaniu numerycznemu. Wynik pierwszego całkowania przedstawiony jest na rys. 3, zaś drugiego pokazany jest na rys. 4.

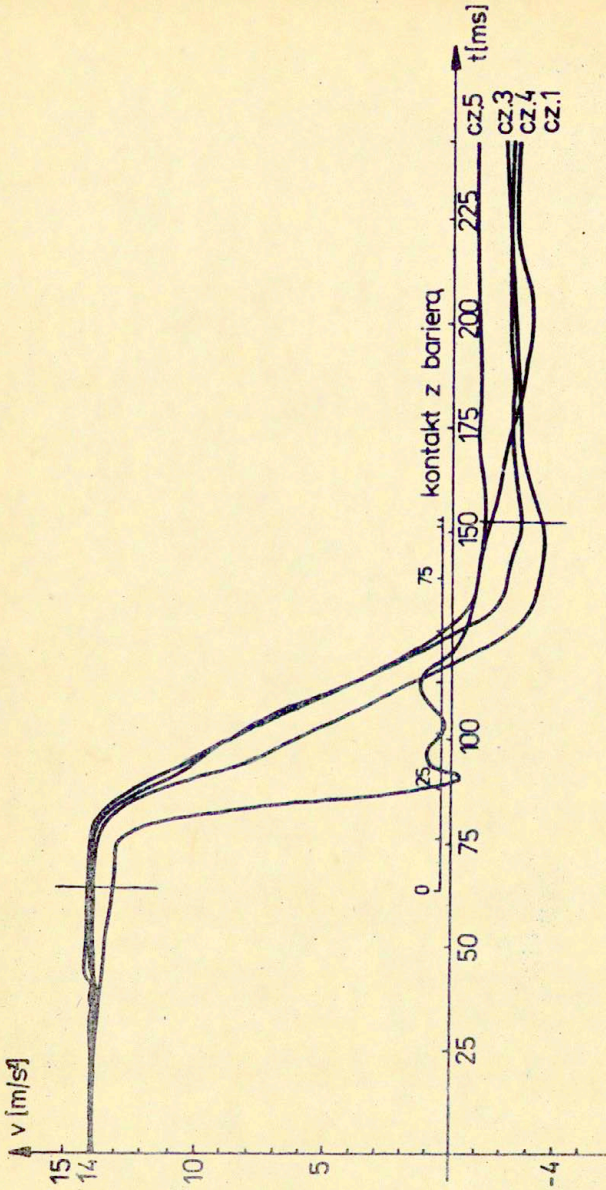
Ponieważ zderzeniu pojazdu towarzyszy jego obrót w płaszczyźnie pionowej pierwsze i drugie całki nie przedstawiają odpowiednio rzutów prędkości i przemieszczeń punktów zamocowania czujników na kierunki pomiarowe, a tylko ich pewne przybliżenia. Jednakże jak wykazano poniżej, analiza



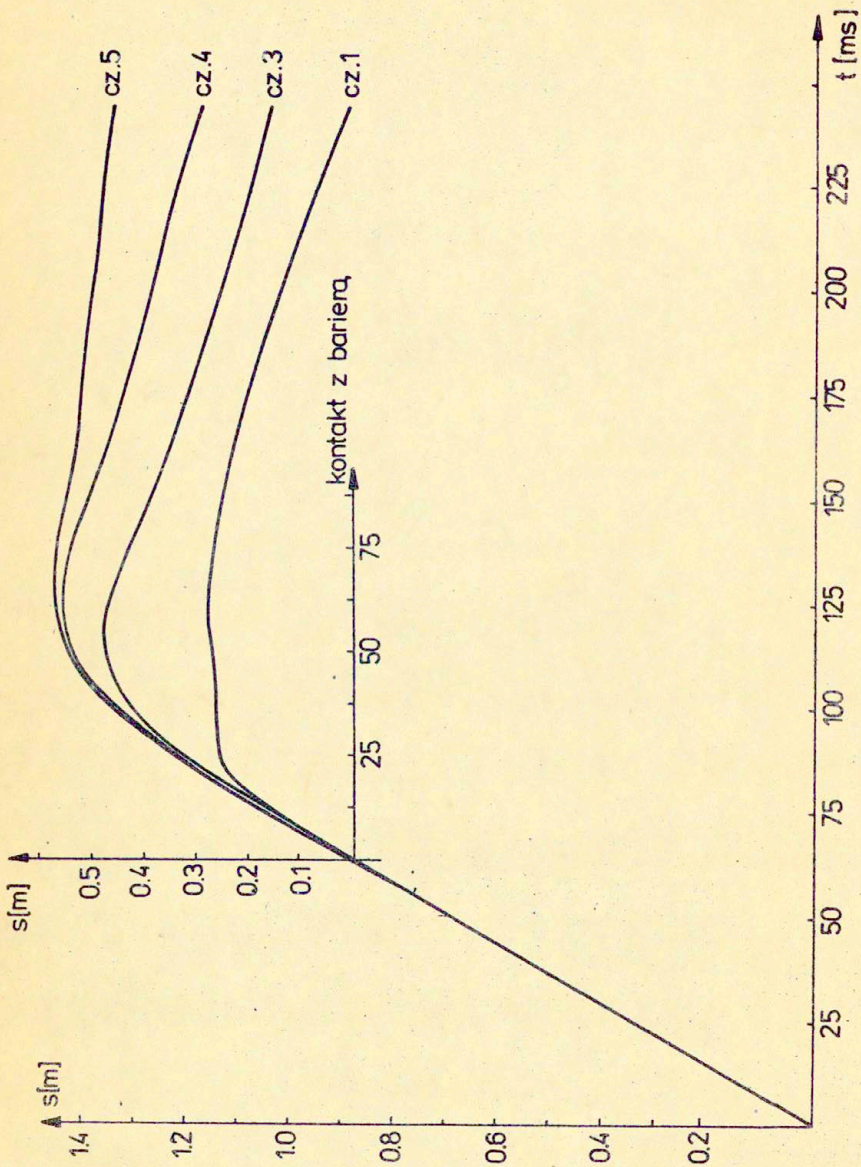
Rys.1



Rys.2



Rys. 3



tych wyników bezpośredniego całkowania jest w pewnej mierze przydatna, gdyż pomaga przyjąć odpowiedni dla identyfikacji model ruchu.

Dla zachowania prostoty dalszego tekstu pierwsze i drugie całki wykresów przyśpieszeń będą nazywane krótko prędkościami i przemieszczeniami bez każdorazowego zaznaczenia, że są to wielkości przybliżone. Z wykresów /rys. 2/ wynika, że do chwili wejścia w kontakt z barierą czujniki wykazują nieznaczne wahania przyśpieszeń wokół zera. Wahania te przypuszczalnie wynikają z rozkołysania samochodu. W rezultacie, w chwili zetknięcia się z barierą obserwuje się niezerowe wartości przyśpieszeń.

Na rys.4 widać, że przez pierwsze mniej więcej 9 ms od początku kontaktu z barierą przemieszczenia czujników 1,3,4,5 można z dużą dokładnością uważać za jednakowe i narastające liniowo w czasie. Należy więc wywnioskować, że część nadwozia pomiędzy czujnikami 1 i 5 porusza się jako ciało sztywne ruchem jednostajnym. Co więcej, ten ruch jednostajny zachodzi z niezmienną prędkością $13,89 \text{ m/s}$ /50 km/h/, bowiem w tej fazie ruchu kąt nachylenia wykresów przemieszczeń dla wszystkich czterech czujników jest taki sam jak przed wejściem w kontakt z barierą. W konsekwencji w opisywanej tu fazie zderzenia następuje zgniatanie głównie tej części nadwozia, która znajduje się przed czujnikiem 1, a więc przed silnikiem /prawdopodobnie plastikowych zderzaków/.

Jednakowe wartości prędkości /rys.3/ dla czujników 3,4 i 5 potwierdzają powyższe obserwacje na pewno dla części nadwozia zawartej pomiędzy czujnikami 3 i 5. Jednakże, na tym wykresie widać pewną anomalię zachowania się prędkości czujnika 1 w stosunku do czujników 3, 4 i 5 w rozpatrywanej fazie zgniatania. A mianowicie, prędkości czujników 3, 4 i 5 są jednakowe i takie same jak przed wejściem samochodu w kontakt z barierą podczas gdy prędkość czujnika 1 począwszy od pewnej chwili przed wejściem

samochoodu w kontakcie zaczyna maleć do wartości 13,04 m/s w chwili kontaktu z barierą. Następnie w tym przedziale czasu, w którym przemieszczenia pozostałych czujników są jednakowe zachowuje wartość stałą.

Ponieważ czujnik 1 umieszczony jest na silniku zamocowanym podatnie względem nadwozia, anomalia ta jest przypuszczalnie konsekwencją wpływu wypięcia zaczepu katapulty, które ma miejsce przed wejściem pojazdu w kontakt z barierą, a nie obrazem deformacji odcinka nadwozia pomiędzy czujnikami 1 i 3. Jeżeli tak, to wykresy prędkości nie przeczą powyżej sformułowanemu wnioskowi o sztywnym zachowaniu się odcinka pomiędzy czujnikami 1 i 5.

Zdecydowane narastanie opóźnień spowodowanych wyhamowaniem samochodu obserwuje się dopiero po upływie 9 ms. W przypadku czujników 4 i 5 /rys. 2/ ten wzrost opóźnienia rozpoczyna się od zera po upływie 8,75 ms wyznaczając w naturalny sposób charakterystyczną chwilę, którą w dalszych rozważaniach przyjmuje się za początek drugiej fazy ruchu samochodu. Aby wystartować do drugiej fazy ruchu z zerowych opóźnień dla wszystkich czujników dokonuje się ekstrapolacji krzywej pierwszego zdecydowanego opóźnienia czujnika 3 /linia przerywana rys.2/ tak, aby w chwili przyjętej za początkową również i ona przecięła oś czasu.

Tak więc wnioskuje się, że w pierwszej fazie ruchu tj. od początku kontaktu z barierą do 8,75 ms wszystkie czujniki wykazują w przybliżeniu przyspieszenia zerowe. Następnie, aż do 28 ms opóźnienia te wzrastają, po czym ulegają zawahaniom tworząc 3 lokalne maxima i od około 50 ms monotonicznie maleją do wartości bliskich zeru.

Pierwsze maximum powstaje niemalże w tej samej chwili dla wszystkich trzech czujników, dokładnie w 27,5 ms dla czujników 3 i 4, oraz w 29 ms dla czujnika 5. Maxima drugie pojawiają się: w 40 ms dla czujnika 3, w 43 ms dla czujnika 4 i w 46 ms dla czujnika 5. Dla każdego następnego czujnika chwila powstania drugiego lokalnego maximum jest więc przesunięta o 3 ms. Dla czujników 3 i 4 trzecie maxima obserwuje

się w 53 ms. W przypadku czujnika 5 w chwili tej występuje jedynie zmniejszenie kąta nachylenia stycznej do krzywej opóźnienia. W 78 ms dla czujnika 4 pojawia się czwarte lokalne maximum, które podobnie jak maximum drugie, dla każdego kolejnego czujnika jest przesunięte o 3 ms. Obserwuje się więc je w 81 ms dla czujnika 4 oraz w 84 ms dla czujnika 5. Wartości opóźnień dla trzech pierwszych maximum są rzędu -300 do -400 m/s². Jedynie czujnik 3 wykazuje pierwsze maximum opóźnienia zdecydowanie większe i równe -569 m/s². Wartości opóźnień dla czwartego maximum są rzędu -40 do -70 m/s².

Nieco inny charakter ma wykres opóźnienia czujnika 1 zamocowanego na silniku. Opóźnienie to, do 8.75 ms kontaktu z barierą jest bliskie zeru, po czym gwałtownie rośnie osiągając w 21 ms maximum równe -1589 m/s². Od tej chwili raptownie maleje do zera w 28 ms, a następnie oscyluje wokół niego aż do końca kontaktu z barierą.

Wykres ten zawiera również cztery lokalne maxima, tak jak wykresy dla czujników pozostałych.

Porównując wykresy opóźnień czujnika 1 oraz pozostałych widać, że pierwsze maxima czujników 3 i 4 pojawiają się dokładnie w chwili, gdy opóźnienie czujnika 1 na silniku jest równe zeru tzn. w 28 ms.

Przyпуска się, że od 21 ms, w której opóźnienie czujnika 1 osiągnęło wartość największą, do 28 ms zostają zerwane więzy łączące silnik z nadwoziem. Spowodowało to nagły "przeskok" samochodu do przodu oraz gwałtowne zmniejszanie się opóźnień czujników 3, 4 i 5 zamocowanych na nadwoziu.

W konsekwencji na wykresie opóźnień czujników 3, 4, 5 powstają pierwsze lokalne maxima i minima. W chwili pojawienia się lokalnego minimum zachodzi prawdopodobnie ponowne oparcie się samochodu na następnym węźle konstrukcji, co powoduje kolejny wzrost opóźnień. I znów w chwili zerwania tego węzła pojawiają się kolejne maxima na wykresie opóźnień.

Na podstawie analizy wykresów opóźnień czujników 1, 3, 4, 5 /rys.2/ oraz wykresów powstałych z bezpośredniego ich całkowania /rys. 3,4/ można wyodrębnić następujące fazy zachowania się samochodu podczas próby barierowej.

- 1/ Faza pierwsza, trwająca od początku kontaktu z barierą do 8,75 ms, podczas której następuje zgniot głównie przedniej części nadwozia samochodu znajdującej się przed silnikiem. Pozostała część samochodu porusza się jako sztywna ruchem jednostajnym. Zachodzą w niej co prawda niewielkie różnice w prędkościach czujników /rys. 3/ prowadzące jednakże do pomijalnych różnic w przebieganych drogach.
- 2/ Faza druga, trwająca od 8,75 ms do 55-60 ms, a więc mniej więcej do chwili zmiany znaku prędkości czujników, w której na odcinku czasu od około 24 ms prędkości czujników 4 i 5 są prawie jednakowe i większe od prędkości czujnika 3. To ważne dla dalszych rozważań spostrzeżenie posłuży jako podstawa przyjęcia założenia o nieodkształcalności odcinka pomiędzy czujnikami 4 i 5.
- 3/ Faza trzecia, która zachodzi od chwili zmiany znaku prędkości czujników do chwili utraty kontaktu z barierą i dalej, po odbiciu, do końca pomiaru. W przeciwieństwie do fazy poprzedniej prędkości czujników 4 i 5 /rys.3/ są tu różne, natomiast prędkości czujników 3 i 4 zbliżają się do siebie.

W konsekwencji, jak widać na rys.4 skrócenie odległości pomiędzy czujnikami 3 i 4 ustala się do wartości około 130 mm, natomiast skrócenie odległości pomiędzy czujnikami 4 i 5 stale wzrasta i przyjmuje końcową wartość w przybliżeniu 170 mm. Daje to ciągle wzrost skrócenia odległości pomiędzy czujnikami 3 i 5 aż do wartości około 300 mm. Skrócenia te wydają się być nieprawdopodobnie duże, zwłaszcza, że w dużej mierze zachodzą po utracie kontaktu z barierą. Nasuwa to, a nawet wręcz uzasadnia podejrzenie, że wyciąganie ilościowych wniosków odnośnie trwałych deformacji pojazdu tylko

poprzez analizę wykresów bezpośredniego całkowania jest niewłaściwe. Analiza ta, jest jednakże bardzo przydatna dla uzyskania wniosków jakościowych dla fazy pierwszej i drugiej, które stanowią podstawę do wprowadzenia założeń do poniżej wprowadzonego modelu zachowania się samochodu.

2. Identyfikacja wskazań czujników

Dla przeprowadzenia analizy zachowania się samochodu w trakcie próby barierowej wprowadza się nieruchomy prostokątny układ odniesienia XOY związany z jezdnią i przeszkodą. Jednocześnie z samochodem związany jest ruchomy, prostokątny układ współrzędnych $\xi\eta$, którego osie do chwili końcowej pierwszej fazy, tj. dla czasu $t < t_1 = 8,75$ ms, są równoległe do odpowiednich osi układu nieruchomego. Przyjmuje się, że czujniki 2, 3, 4 i 5 leżą na osi ξ układu ruchomego, którego początek znajduje się w odległości Ψ za przodem samochodu /rys. 5a/, dzieląc w ten sposób jego długość na dwie części. Część przednia o długości Ψ od chwili początkowej $t_0 = 0$ ms /rys. 5b/ do $t_1 = 8,75$ ms /rys. 5c/ ulega zgnieceniu pod działaniem naporu, uznanej za sztywną, pozostałej części samochodu poruszającej się ruchem jednostajnym. Oś ξ wyznacza kierunek pomiarowy czujników. W chwili t_1 rozpoczyna się główny proces wyhamowania samochodu, w którym decydującą rolę odgrywa deformacja części traktowanej dotychczas jako sztywną. Deformacji tej towarzyszy również i obrót samochodu, a zatem i obrót związanego z nim układu $\xi\eta$. Przyjmuje się, że środek obrotu samochodu nie zmienia swego położenia i pokrywa się z początkiem układu ruchomego. Prędkość liniowa początku układu $\xi\eta$ jest w tej fazie ruchu równa zero, natomiast punkty zamocowania czujników poruszają się wzdłuż osi ξ . Przemieszczenia i prędkości tego ruchu względnego reprezentują przebieg deformacji samo-

chodu. Otrzymuje się zatem model ruchu punktów zamocowania czujników przedstawiony na rys. 6.

Zgodnie z przyjętą koncepcją

$$/2.1/ \quad \bar{v}_j = \bar{u}_j + \bar{w}_j,$$

gdzie:

\bar{v} - wektor prędkości bezwzględnej,

\bar{u} - wektor prędkości unoszenia,

\bar{w} - wektor prędkości względnej, odpowiadającej za deformację,

j - numer czujnika.

Wartość prędkości unoszenia określona jest wzorem

$$/2.2/ \quad u_j = \omega \cdot r_j,$$

gdzie:

r_j - odległość j -tego czujnika od środka obrotu,

ω - prędkość kątowa ruchu unoszenia jednakowa dla wszystkich czujników.

Dla czujników 3,4,5 odległości r_j wynoszą

$$r_3 = a(t),$$

$$/2.3/ \quad r_4 = a(t) + b(t),$$

$$r_5 = a(t) + b(t) + c(t),$$

gdzie:

$a(t)$, $b(t)$, $c(t)$ - odległości jak na rys. 6.

Przyspieszenie bezwzględne \bar{p}_b działające na czujnik określone jest wzorem

$$/2.4/ \quad \bar{p}_{bj} = \bar{p}_{wj} + \bar{p}_{uj} + \bar{p}_{cj}$$

gdzie przyspieszenie unoszenia

$$/2.5/ \quad \bar{p}_{uj} = \bar{p}_{tuj} + \bar{p}_{nuj} ;$$

składa się z przyspieszenia unoszenia stycznego \bar{p}_{tu} i normalnego \bar{p}_{nu} , o wartościach odpowiednio

$$/2.6/ \quad p_{tuj} = \frac{d\omega}{dt} \cdot r_j ,$$

$$p_{nuj} = \omega^2 \cdot r_j ,$$

zaś \bar{p}_c jest przyspieszeniem Coriolisa, którego wartość ze względu na warunek $\bar{\omega} \perp \bar{w}$ określa wzór

$$/2.7/ \quad p_{cj} = 2 \cdot \bar{\omega} \cdot w_j$$

i w końcu \bar{p}_w jest przyspieszeniem względnym o wartości

$$/2.8/ \quad p_{wj} = \frac{dw_j}{dt} .$$

Rzutowanie zależności /2.4/ na osie układu $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ daje związki

$$/2.9/ \quad p_{b\varepsilon_j} = \frac{dw_j}{dt} + \omega^2 \cdot r_j ,$$

$$p_{bn_j} = \frac{d\omega}{dt} r_j + 2 \cdot \omega \cdot w_j ,$$

w których odległość r_j zmienia się zgodnie ze wzorem

$$/2.10/ \quad r_j = r_j(0) - \int_0^t w_j(t) dt$$

Ruch czujników na kierunku pomiarowym osi E_3 opisany jest równaniami /2.9/ i /2.10/. Jeśli dla uproszczenia zapisu przyjąć oznaczenie $P_{bE_j} = P_j$, wówczas równania, te wyspecyfikowane dla czujników 3, 4 i 5, przyjmują postać równań różniczkowo-całkowych

$$\begin{aligned}
 /2.11/ \quad P_3(t) &= \frac{dw_3(t)}{dt} + \omega^2(t) \cdot (a_0 - \int_0^t w_3(t) dt), \\
 P_4(t) &= \frac{dw_4(t)}{dt} + \omega^2(t) \cdot (a_0 + b_0 - \int_0^t w_4(t) dt), \\
 P_5(t) &= \frac{dw_5(t)}{dt} + \omega^2(t) \cdot (a_0 + b_0 + c_0 - \int_0^t w_5(t) dt),
 \end{aligned}$$

w których $p_3(t)$, $p_4(t)$, $p_5(t)$ są znane i zmieniają się zgodnie z wynikami pomiarów przedstawionych na rys. 2. Gdyby dostępne były wyniki pomiaru dla czujnika 2, to układ /2.11/ zawierałby 4 równania. Sposób przeprowadzenia analizy byłby taki sam jak poniżej, jednakże wnioski okazałyby się z pewnością bardziej obszerne.

Związki /2.11/ stanowią niedookreślony układ trzech równań z czterema niewiadomymi funkcjami $w_3(t)$, $w_4(t)$, $w_5(t)$ oraz $\omega(t)$. Aby tę niedookreśloność usunąć przyjmuje się, że zachodzi tożsamość

$$/2.12/ \quad w_4(t) \equiv w_5(t).$$

Jest to oczywiście dodatkowe założenie, którego zasadność wynika z obserwacji w fazie drugiej wykresów bezpośredniego całkowania. Założenie to byłoby zbędne, gdyby dostępne były zdjęcia zachowania się pojazdu w trakcie próby. Wtedy, z bezpośredniego pomiaru kąta obrotu samochodu w poszczególnych chwilach można by uzyskać rzeczywisty przebieg prędkości kątowej a w konsekwencji zredukować liczbę niewiadomych do $w_3(t)$, $w_4(t)$ i $w_5(t)$.

Również i pomiar przyspieszenia na kierunku prostopadłym do osi pomiarowej ξ , chociażby dla jednego, najlepiej najbardziej odległego od środka obrotu czujnika, pozwoliłby wyeliminować założenie /2.12/, bowiem w tym przypadku czwartym równaniem byłby związek /2.9/2 wyspecyfikowany dla tego czujnika.

Z zależności /2.11/2, /2.11/3 oraz /2.12/ oblicza się kwadrat prędkości kątowej

$$/2.13/ \quad \omega^2(t) = \frac{p_2(t) - p_4(t)}{c_0},$$

następnie zapisując równania /2.11/1 i /2.11/2 w postaci przyrostowej

$$p_3(t) = \frac{w_3(t+\Delta t) - w_3(t)}{\Delta t} + \omega^2(t) \cdot [a_0 - \sum w_3(t) \cdot \Delta t]$$

$$p_4(t) = \frac{w_4(t+\Delta t) - w_4(t)}{\Delta t} + \omega^2(t) \cdot [a_0 + b_0 - \sum w_4(t) \cdot \Delta t]$$

znajduje się wyrażenie na prędkości liniowe

$$/2.14/ \quad w_3(t+\Delta t) = w_3(t) + [p_3(t) - \omega^2(t) \cdot (a_0 - \sum w_3(t) \Delta t)] \Delta t$$

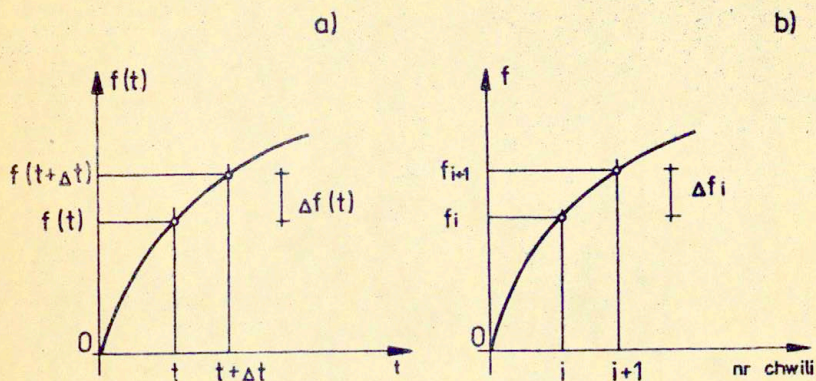
$$w_4(t+\Delta t) = w_4(t) + [p_4(t) - \omega^2(t) \cdot (a_0 + b_0 - \sum w_4(t) \Delta t)] \Delta t,$$

z których bezpośrednio otrzymuje się wzory rekurencyjne

$$/2.15/ \quad w_{3(i+1)} = w_{3i} + [p_{3i} - \omega_i^2 \cdot (a_0 - \sum w_{3i} \cdot \Delta t)] \cdot \Delta t$$

$$w_{4(i+1)} = w_{4i} + [p_{4i} - \omega_i^2 \cdot (a_0 + b_0 - \sum w_{4i} \cdot \Delta t)] \cdot \Delta t$$

gdzie i oznacza numer chwili /rys. 7b/.



Rys.7

Wzór /2.13/ wyznacza jedynie kwadrat prędkości kątowej pozostawiając nierozstrzygniętą kwestię jej znaku, który w rozpatrywanym przedziale czasu może się zmieniać. Jest to oczywiście dotkliwa konsekwencja założenia /2.12/, którą można częściowo usunąć jak poniżej.

Ze związku /2.13/ wynika zależność:

$$/2.16/ \quad d\omega^2(t) = \frac{1}{c_0} \frac{d}{dt} [p_5(t) - p_4(t)] dt,$$

którą po przekształceniu można zapisać w przyrostach

$$/2.17/ \quad \Delta\omega^2(t) = \frac{1}{c_0} [\Delta p_5(t) - \Delta p_4(t)].$$

Jeśli posłużyć się podstawową zależnością przyrostową /rys. 7a/ wówczas przyrost $\Delta\omega^2(t)$ wyraża się jako

$$\Delta \omega^2(t) = \omega^2(t+\Delta t) - \omega^2(t) = [\omega(t) + \Delta \omega(t)]^2 - \omega^2(t),$$

/2.19/

$$\Delta \omega^2(t) = 2 \omega(t) \Delta \omega(t) + [\Delta \omega(t)]^2,$$

natomiast przyrosty opóźnień uzyskują formę

$$\Delta p_5(t) = p_5(t+\Delta t) - p_5(t),$$

$$\Delta p_4(t) = p_4(t+\Delta t) - p_4(t),$$

/2.20/

$$\Delta p_5(t) - \Delta p_4(t) = [p_5(t+\Delta t) - p_4(t+\Delta t)] - [p_5(t) - p_4(t)].$$

Przy małych przyrostach funkcji we wzorze /2.19/, można pominąć ich kwadraty i wtedy

/2.21/

$$\Delta \omega^2(t) = 2 \cdot \omega(t) \cdot \Delta \omega(t).$$

Ze wzorów /2.17/, /2.20/ i /2.21/ otrzymuje się zatem wyrażenie na przyrost prędkości kątowej w chwili t

/2.22/

$$\Delta \omega(t) = \frac{[p_5(t+\Delta t) - p_4(t+\Delta t)] - [p_5(t) - p_4(t)]}{2 \omega(t) \cdot c_0}.$$

Startując na przykład z zerową prędkością kątową

/2.23/

$$\omega(0) = 0,$$

i zakładając znak przyrostu na pierwszym kroku można wyznaczyć przebieg prędkości kątowej $\omega(t)$ tzn. nie tylko wartość, ale również znak, wykorzystując zależność

/2.24/

$$\omega(t + \Delta t) = \omega(t) + \Delta \omega(t),$$

którą można zapisać w postaci wzoru rekurencyjnego

$$/2.25/ \quad \omega_{i+1} = \omega_i + \Delta\omega_i,$$

gdzie:

$$/2.26/ \quad \Delta\omega_i = \frac{[p_{5(i+1)} - p_{4(i+1)}] - [p_{5i} - p_{4i}]}{2 \cdot \omega_i \cdot c_0},$$

i oznacza numer chwili /rys. 7b/.

Ze wzoru /2.21/ można korzystać wówczas, gdy $\Delta\omega \ll \omega$. Jeśli na pierwszym kroku przyjąć $\omega_1 = 0$, wówczas warunek ten nie jest spełniony i wtedy pierwszy przyrost prędkości kątowej należy obliczać korzystając ze wzoru pełnego /2.19/.

Wynosi on:

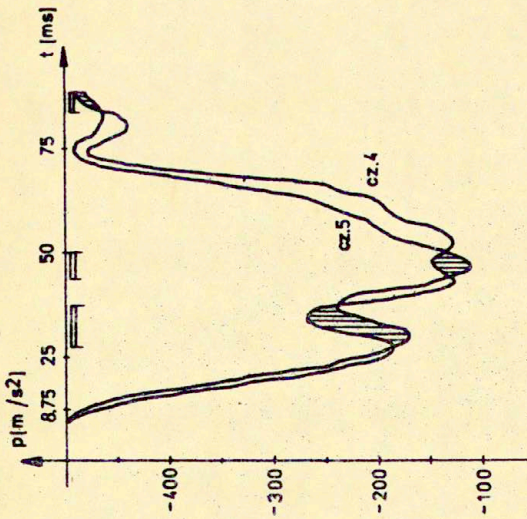
$$/2.27/ \quad \Delta\omega_1 = \sqrt{\frac{[p_{5(i+1)} - p_{4(i+1)}] - [p_{5i} - p_{4i}]}{c_0}}.$$

Dalej, na każdym następnym kroku można już stosować bardziej prosty wzór /2.25/.

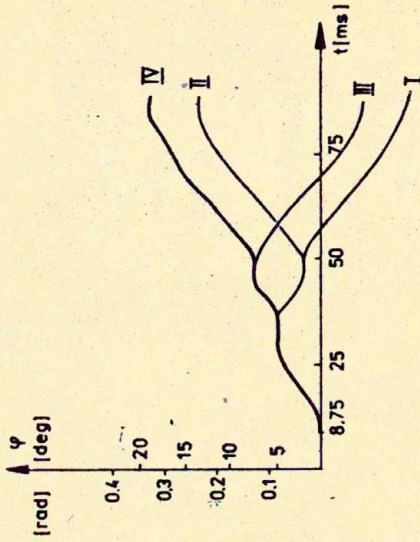
Rozważania zawarte pomiędzy wzorami /2.16/ i /2.27/ zostaną wykorzystane tylko w celu określenia znaku prędkości kątowej, bowiem jej absolutna wartość jest określona przez pierwiastek kwadratowy prawej strony wyrażenia /2.13/, jeśli tylko $p_5(t) - p_4(t) \geq 0$.

Istnieją jednakże także przedziały czasu zaznaczone na rys. 8, w których warunek ten nie jest spełniony.

Początki tych przedziałów odpowiadają chwilom występowania lokalnych maximów opóźnień, a więc pojawiają się one bezpośrednio po przypuszczalnych zerwaniach węzłów konstrukcji. Wydaje się, że wtedy istotniejszy wpływ na zachowanie się samochodu ma przemieszczenie zgniatania niż jego obrót. W opisywanym ruchu przyjmuje się wobec tego



Rys. 8



Rys. 9

krańcowe założenie, że w tych przedziałach czasu prędkość kątowa nie zmienia się, a ponieważ na brzegach tych przedziałów przyjmuje ona wartość zero jest to równoznaczne z przyjęciem, że również i wewnątrz tych przedziałów funkcja prędkości kątowej jest zerowa.

Tak więc przyjmuje się następujący algorytm obliczeń. W poszczególnych krokach wyznacza się wartości bezwzględne prędkości kątowych korzystając ze wzoru dokładnego /2.13/, przyjmując, że w przedziałach czasu, w których $p_5(t) - p_4(t) < 0$ prędkość kątowa $\omega(t) = 0$.

Znak prędkości przyjmuje się taki, jaki wynika z zastosowania schematu /2.25/, przy czym na pierwszych krokach przyjmuje się zawsze $\Delta\omega(t) > 0$.

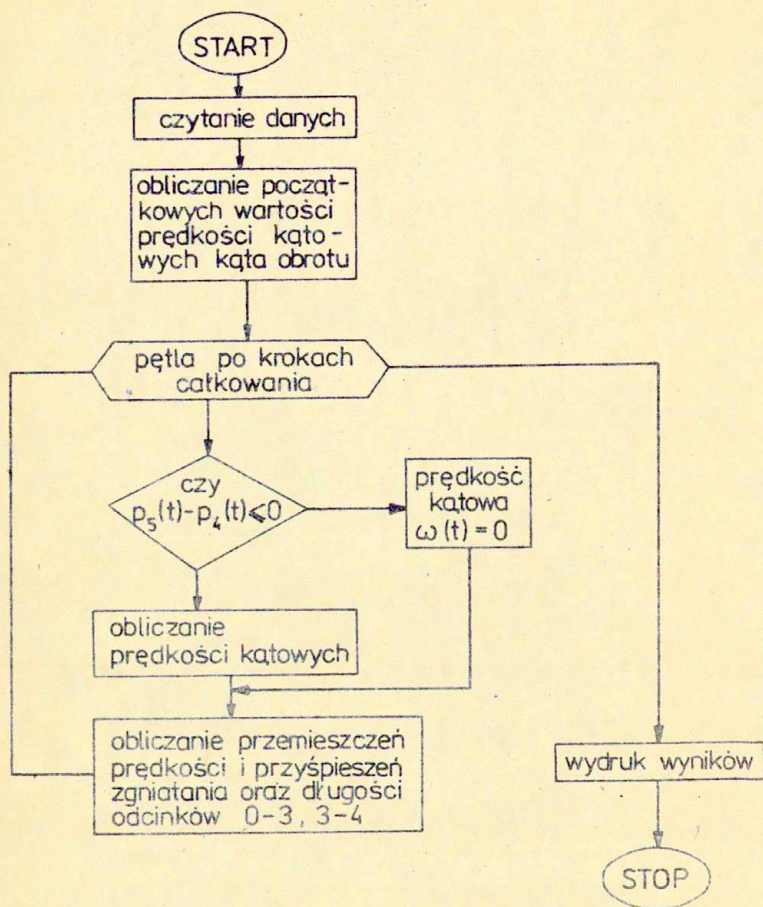
Na podstawie obliczonych wartości $\omega(t)$ wyznacza się prędkości zgniatania $w_3(t)$ i $w_4(t)$ oraz kąty obrotu samochodu $\varphi(t)$ korzystając z zależności całkowej

$$/2.28/ \quad \varphi(t) = \int_0^t \omega(t) dt .$$

W opisanym algorytmie, w chwili początkowej oraz w pierwszych krokach po wyjściu z przedziałów, w których $p_5(t) - p_4(t) < 0$, przyjęcie dodatnich lub ujemnych przyrostów prędkości kątowej nie zmienia algorytmu obliczeń numerycznych i prowadzi w rezultacie do czterech przebiegów kątów obrotu pokazanych na rys. 9.

Analizując te krzywe, jako najbardziej prawdopodobną przyjmuje się krzywą IV, która odpowiada założeniu, że na każdym pierwszym kroku $\Delta\omega(t) > 0$.

Przedstawiony algorytm pokazuje schemat blokowy /rys. 10/.



Rys. 10

3. Analiza wyników

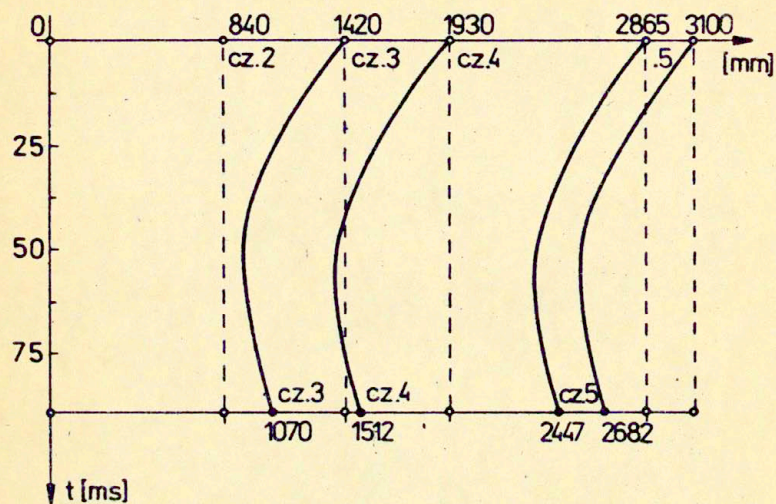
W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano wykresy przebiegów przemieszczeń s_j , prędkości w_j i przyspieszeń $\frac{dw_j}{dt}$ zgniatania oraz kąta obrotu samochodu φ .

Uzyskany przebieg przemieszczeń zgniatania s_j /rys.13/, pozwala prześledzić zmiany długości odcinków 0-3, 0-4, które są odległościami pomiędzy przodem samochodu a punktami 3 i 4 oraz odcinka 3-4 pomiędzy czujnikami 3 i 4. Ponieważ założono, że odcinek 4-5 oraz część samochodu znajdująca się poza czujnikiem 5 są nieodkształcalne, znane są również zmiany długości odcinków 0-5, 3-5 oraz całego samochodu. Na wykresie /rys. 13/, przerywaną linią pokazane są przemieszczenia powstałe z bezpośredniego całkowania. Długość odcinka 3-4 wynosząca w chwili t_k 115 mm dla bezpośredniego całkowania, obliczona wg schematu przedstawionego w pracy zmniejszyła się do 68 mm co jest wielkością bardziej prawdopodobną.

Rys. 11 przedstawia ruch czujników wzdłuż osi pomiarowej w czasie kontaktu z barierą, jest więc w tym przedziale czasu obrazem deformacji samochodu.

Ważniejsze wartości deformacji rozpatrywanych odcinków zostały zestawione w tabeli, gdzie:

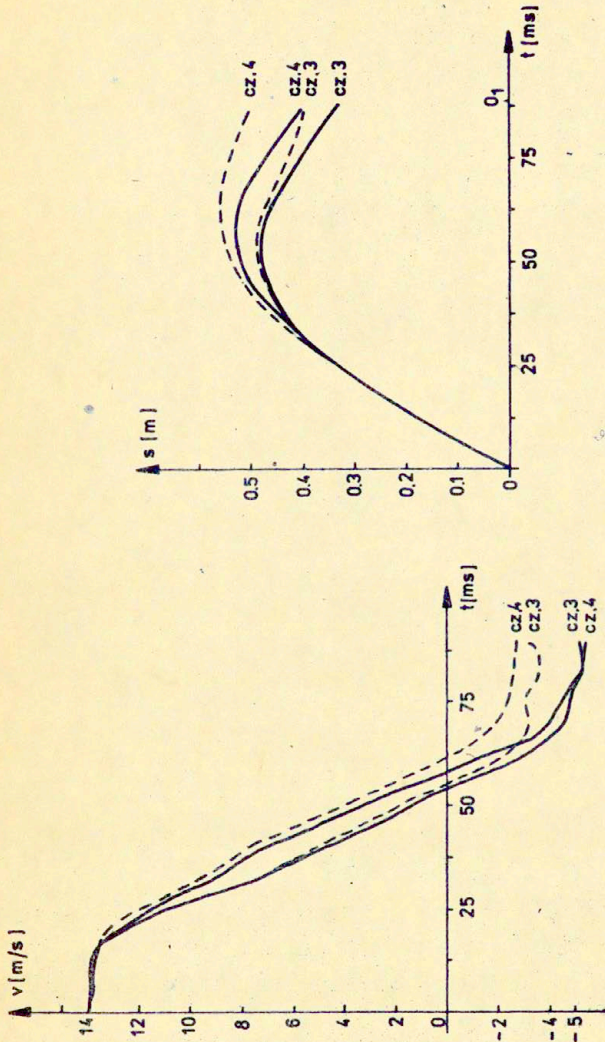
- t_d - chwila wystąpienia skrócenia dynamicznego,
- s_{dyn} - skrócenie dynamiczne,
- l_{dyn} - długości odcinka w chwili t_d ,
- s_k - skrócenie w chwili końca kontaktu z barierą t_k ,
- l_k - długości odcinka w chwili t_k .



Rys. 11

tabela 1

nr odcinka	t_d [s]	s_{dyn} [mm]	l_{dyn} [mm]	s_k [mm]	l_u [mm]
0-3	53.73	485	935	350	1010
0-4	57.50	536	1324	418	1512
3-4	82.50	69	441	68	442
cały samoch.	57.50	536	2564	418	2682



Rys.13

Rys.12

Obserwuje się, że po 75 ms kontaktu z barierą długość odcinka 3-4 wynosi 442 mm i dalej zmienia się już nieznacznie. Odpowiada to skróceniu tego odcinka o 68 mm.

Maksymalne skrócenie odcinka, nazywane skróceniem dynamicznym, występuje w chwili zmiany znaku prędkości liniowej odpowiednich czujników. Wartość ta obliczona dla całego samochodu wynosi 536 mm.

Ponieważ w chwili t_k zakumulowana jest jeszcze energia sprężysta, wyniki obliczeń dla tej chwili stanowią jedynie oszacowanie z góry dla ostatecznych po próbie skróceń i z dołu - dla długości odcinków. Można więc stwierdzić, że trwałe skrócenia odcinków 0-3 i 3-4 są nie większe niż kolejno 350 mm i 68 mm a odpowiednie skrócenie dla całego samochodu jest nie większe od 418 mm. Alternatywnie, ostateczne po próbie długości odcinków 0-3, 3-4 są nie mniejsze niż odpowiednio 1070 mm i 442 mm, a długość całego samochodu nie przekracza 2682 mm. Wykresy prędkości /rys. 12/, wskazują na zbliżanie się krzywych dla czujników 3 i 4, czego nie wykazują krzywe powstałe z bezpośredniego całkowania.

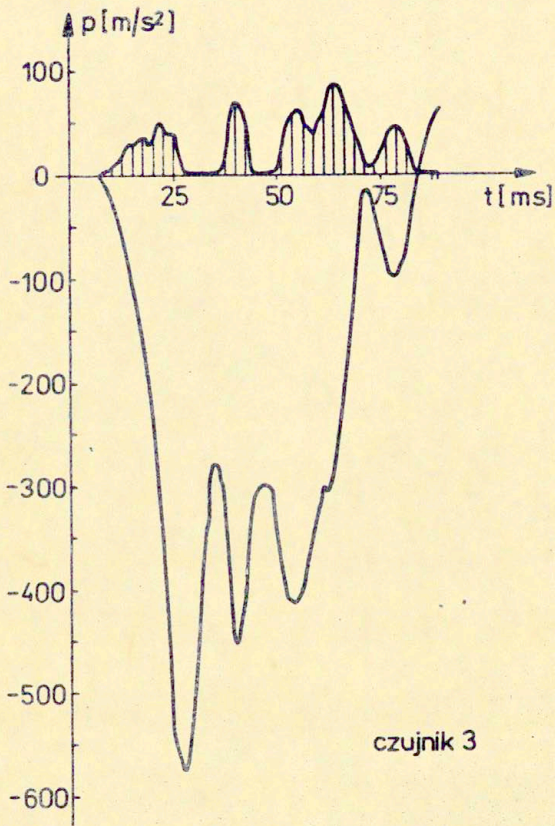
Od 75 ms do końca kontaktu z barierą prędkości zgniatania w przeciwieństwie do wykresów bezpośredniego całkowania praktycznie już pokrywają się, co świadczy o ustalaniu się odległości pomiędzy czujnikami 3 i 4.

Ponadto bezwzględne wartości prędkości czujników 3 i 4 w chwili t_k są większe od bezwzględnych wartości odpowiednich prędkości dla krzywych bezpośredniego całkowania.

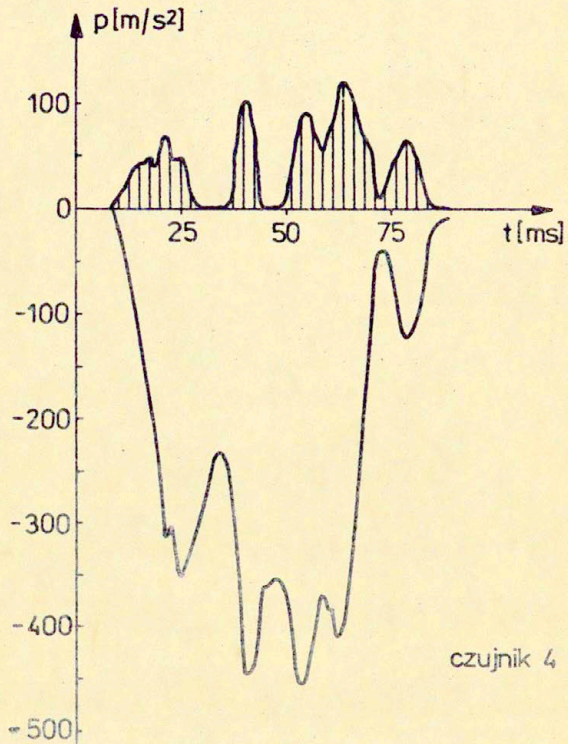
Na rys. 14 i 15 zestawiono wykresy przyspieszeń zgniatania $\frac{dw}{dt}$ oraz przyspieszeń dośrodkowych ruchu unoszenia

$$p_{nuj} = \omega^2 \cdot r_j$$

Zgodnie ze wzorem /2.9/, algebraiczna suma tych przyspieszeń jest oczywiście równa przyspieszeniu pomiarowemu. Naturalnie, w przedziałach czasu, w których z założenia $\omega(t) \equiv 0$, przyspieszenie zgniatania jest równe przyspieszeniu pomiarowemu.



Rys.14



Rys. 15

Należy zauważyć, że wykres ten wykazuje największą wrażliwość na zachodzące w krótkich przedziałach czasu zjawiska typu zerwania węzłów konstrukcji, którym na wykresie przyspieszeń odpowiadają lokalne maxima. Wrażliwości tej nie wykazują już powstałe w wyniku całkowania wykresy prędkości zgniatania, a tym bardziej przemieszczenia zgniatania. Porównując wykresy przyspieszeń pomierzonych z przyspieszeniami zgniatania dla czujnika 3 można stwierdzić, że charakter wykresów zasadniczo się nie zmienił.

Występuje taka sama liczba lokalnych maximów opóźnienia, jedynie w 63 ms pojawia się dodatkowe, niewielkie maximum. Na wykresie przyspieszeń zgniatania czujnika 4 pojawiły się już wyraźnie dwa dodatkowe lokalne maxima opóźnień w 22 ms oraz w 63 ms.

Pierwsza z nich jest jednocześnie z pierwszym lokalnym maximum opóźnienia na wykresie dla czujnika 1, drugie natomiast na wykresie przyspieszeń dla czujnika 4, zasygnalizowane jest jedynie niewielkim zaburzeniem.

Przewiduje się, że kąt obrotu zmienia się zgodnie z krzywą IV pokazaną na rys. 9.

Do chwili t_k kąt ten wzrasta monotonicznie aż do wartości $18^{\circ}48'$, co jest oczywiście dolnym oszacowaniem kąta obrotu w całej próbie.

4. Wnioski i zalecenia końcowe

Przedstawione wykresy przyspieszeń z próby barierowej pozwalają na opis zachowania się samochodu jedynie do chwili utraty kontaktu z barierą.

Wyniki uzyskane dla założonego modelu ruchu zależą w dość istotny sposób od przyjętych założeń odnośnie:

- a/ położenia środka obrotu układu ruchomego,
- b/ nieodkształcalności odcinka 4-5,

c/ zerowej prędkości kątowej obrotu układu ruchomego w tych przedziałach czasu, w których $p_5(t) - p_4(t) < 0$.

Do pełnej identyfikacji ruchu konieczna jest weryfikacja tych założeń na podstawie obserwacji zdjęć wykonanych podczas próby. Pozwoliło by to na opis zachowania się samochodu przypuszczalnie aż do chwili jego uspokojenia się, a więc na określenie przebiegu prędkości kątowej oraz wędrówki środka obrotu w całym czasie trwania próby. Ponadto można by wyjaśnić przyczyny powstania kolejnych maximów lokalnych.

Proponuje się, aby w następnych próbach tego typu umieścić czujniki mierzące przyspieszenie w kierunku prostopadłym do osi pomiarowej ξ .

Czujniki te powinny znajdować się możliwie najbliżej czujników mierzących przyspieszenie w kierunku normalnym, tak aby pomiar przyspieszeń normalnego i stycznego odnosił się w przybliżeniu, a najlepiej dokładnie, do tego samego punktu. Pomiar przyspieszenia wykonany przez jeden taki czujnik umieszczony, co najkorzystniejsze, przy najbardziej oddalonym od środka obrotu czujniku istniejącym umożliwiłby wykorzystanie w układzie równań /2.11/ zależności /2.9/2, dzięki czemu możnaby zaniechać założenia o nieodkształcalności odcinka 4-5.

W przypadku umieszczenia dwóch czujników na kierunku prostopadłym analiza byłaby bardziej precyzyjna.

Sugeruje się, aby w następnych próbach wprowadzić dodatkowe oznaczenie poprzez kropki również i na osi pomiarowej czujników. Możliwość porównać obliczone końcowe wartości deformacji z wartościami pomierzonymi bezpośrednio na samochodzie.