

JAN KEMPA<sup>1)</sup>

## WPŁYW UKSZTAŁTOWANIA KRZYWOLINIOWYCH ODCINKÓW DROGI W PLANIE NA WYGODĘ RUCHU<sup>2)</sup>

**STRESZCZENIE.** W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu ukształtowania krzywoliniowych odcinków drogi na warunki wygody ruchu. Rozważano wpływ promienia łuku kołowego, kąta zwrotu i szerokości jezdni na wartość przyspieszenia poprzecznego na łuku kołowym i przyrostu przyspieszenia poprzecznego w czasie na kłoidzie doznawanych przez kierowców oraz pasażerów pojazdów. Wykazano, że wraz ze zwiększeniem szerokości jezdni wzrasta wartość przyspieszenia poprzecznego oraz jego przyrostu w czasie działającego na kierowców i pasażerów pojazdu, a zależności te można opisać funkcjami liniowymi. Natomiast zwiększenie wartości promienia łuku kołowego powoduje zmniejszenie wartości przyspieszenia poprzecznego oraz jego przyrostu w czasie i w tym przypadku zależności te można opisać funkcjami potęgowymi. Z kolei zależność między omawianymi miernikami warunków ruchu a kątem zwrotu można opisać funkcjami krzywoliniowymi, osiągającymi maksima w przedziale kątów zwrotu od 25° do 40°. Zachowanie przez kierowców pojazdów dużych prędkości na łukach poziomych odbywa się kosztem wygody ruchu. Świadczy o tym fakt osiągania przez nich znacznych wartości przyspieszeń poprzecznych i ich przyrostów w czasie.

### 1. WPROWADZENIE

Projektowanie krzywoliniowych elementów drogi w planie można umownie podzielić na dwa etapy. Pierwszy etap dotyczy wyboru rodzaju odcinka krzywoliniowego, a więc ustalenia czy to ma być: łuk kołowy, łuk kołowy z krzywymi przejściowymi,

<sup>1)</sup> dr inż. – Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy

<sup>2)</sup> praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004 - 2005 jako projekt badawczy

ogólna krzywa przejściowa, itd. Natomiast drugi etap dotyczy doboru parametrów elementów tego odcinka drogi. W każdym z tych etapów decyzja o wyborze danego rozwiązania projektowego powinna zawsze wynikać z analiz bezpieczeństwa i wygody ruchu, a dużą rolę odgrywają również warunki terenowe oraz względy estetyki trasy drogowej.

Jedno z najważniejszych kryteriów doboru parametrów łuku poziomego (łuk kołowy z klotoidami) zawarte w polskich przepisach projektowania dróg wynika z tzw. warunku dynamiki ruchu, bazującego na mierniku wygody ruchu, jakim jest przyrost przyspieszenia dośrodkowego w czasie [1]. Jednak dokładniej rzeczywisty poziom wygody ruchu określić można za pomocą przyspieszeń poprzecznych i ich przyrostów w czasie. Z praktycznego punktu widzenia powyższe mierniki są bardzo istotne, gdyż bezpośrednio odzwierciedlają siłę bodźca fizycznego działającego na kierowcę i pasażerów.

Długi czas jazdy charakteryzującej się dużymi wartościami przyspieszeń poprzecznych i ich przyrostów w czasie może powodować zmęczenie kierowców, zmniejszenie ich uwagi i koncentracji, co znacznie zwiększa prawdopodobieństwo powstania zdarzenia drogowego. Zarówno wyniki badań polskich [2, 3], jak i zagranicznych [4, 5] dowodzą, że nie tylko warunki stateczności pojazdu, ale również i warunki wygody ruchu mają wpływ na poziom bezpieczeństwa ruchu na krzywoliniowych elementach drogi w planie.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące wpływu podstawowych parametrów łuków poziomych, tj. promienia łuku kołowego  $R$ , kąta zwrotu  $KZ$  i szerokości jezdni  $SJ$  na wartość przyspieszenia poprzecznego oraz jego przyrostu w czasie doznawanych przez kierowców i pasażerów pojazdów podczas jazdy po krzywoliniowych odcinkach drogi w planie.

Badania prędkości i trajektorii samochodów osobowych w warunkach ruchu swobodnego w celu wyznaczenia wpływu promienia łuku kołowego, kąta zwrotu oraz szerokości jezdni na warunki wygody ruchu wykonano na łukach poziomych położonych na dwupasowych drogach dwukierunkowych o szerokości jezdni 7,0, 6,0 i 5,5 m, kątach zwrotu od  $\sim 20^\circ$  do  $\sim 60^\circ$  oraz promieniach od  $\sim 200,0$  m do  $\sim 700,0$  m. Każdy z odcinków pomiarowych spełniał następujące wymogi: jezdnie o nawierzchniach bitumicznych, pobocza gruntowe, pochylenie podłużne  $-1,5\% \leq ip \leq +1,5\%$ , odległość przeszkód bocznych od krawędzi jezdni większa od 2,0 m, teren niezabudowany, brak lokalnych ograniczeń prędkości, administracyjny limit prędkości 90,0 km/h, odległość widoczności na wyprzedzanie większa od 450,0 m. Stan nawierzchni zgodnie z kryteriami podanymi w opracowaniu [6] odpowiadał klasie B. Badane łuki poziome składały się z łuku kołowego z symetrycznymi klotoidami (parametr klotoidy zawarty był w granicach od 0,4 do 0,6 promienia łuku kołowego) i poprzedzone były prostymi o długości  $\sim 700,0$  m, a oznakowanie poziome i pionowe było zgodne z zasadami podanymi w opracowaniu [7].

Pomiary prędkości i trajektorii pojazdów wykonano urządzeniem UPT-1 opisanym szczegółowo w pracy [8]. Natomiast opis zastosowanych metod pomiaru prędkości i trajektorii pojazdu oraz ocenę ich dokładności zawarto w pracach [9, 10].

## 2. WARTOŚCI PRZYSPIESZEŃ POPRZECZNYCH ORAZ ICH PRZYROSTY W CZASIE

Wartości przyspieszeń poprzecznych wyznaczone na podstawie danych zawartych w polskich oraz kilku wybranych zagranicznych przepisach projektowania dróg zamieszczono na rys. 1. Wartości tych przyspieszeń wyliczono przy założeniu, że promienie łuków kołowych odpowiadają minimalnym, a pochylenie poprzeczne jezdni na łuku – maksymalnym wartościom przy danej prędkości projektowej z następującego wzoru

$$a_p = 0,077 \frac{VPR^2}{R_{\min}} - g \cdot q_{\max} \quad [m/s^2], \quad (1)$$

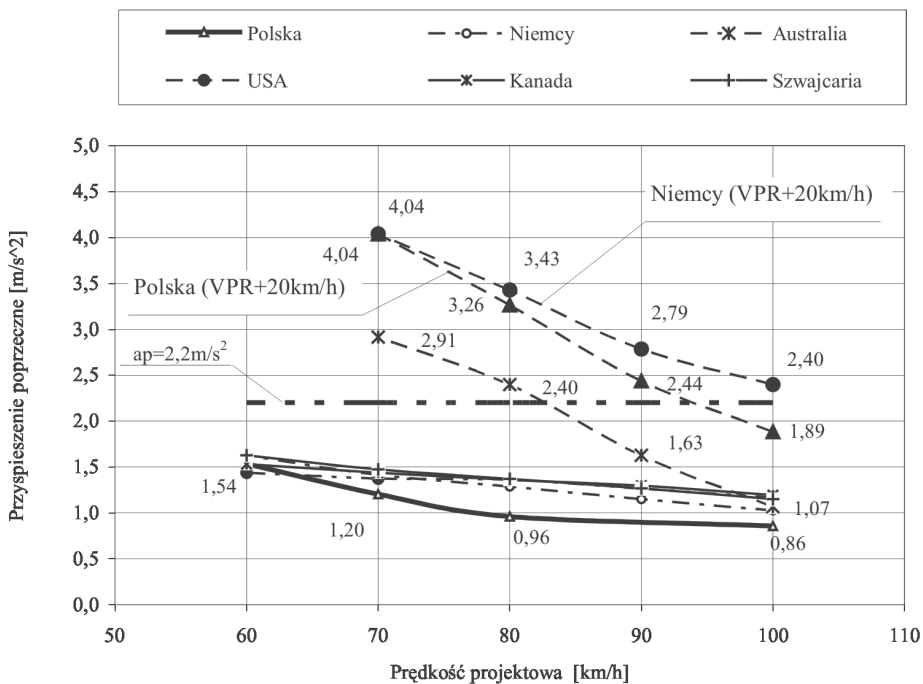
gdzie:

$VPR$  – prędkość projektowa [km/h],

$R_{\min}$  – minimalny promień łuku kołowego przy danej prędkości projektowej [m],

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $m/s^2$ ],

$q_{\max}$  – maksymalne pochylenie poprzeczne jezdni na łuku kołowym [-].



Rys.1. Zależności przyspieszenia poprzecznego od prędkości projektowej wyznaczone na podstawie danych zawartych w przepisach projektowania dróg w wybranych krajach

Fig.1. The relationship between lateral acceleration and design speed in road design standards in selected countries

Z danych zamieszczonych na rys. 1 wynika, że tylko wartości przyspieszeń poprzecznych w Australii znacząco różnią się od przyjętych w pozostałych analizowanych krajach – szczególnie w zakresie prędkości projektowych od 70 km/h do 80 km/h. Trzeba jednak podkreślić, że rzeczywiste prędkości pojazdów na drogach australijskich z reguły odpowiadają prędkościom projektowym [5] i ten fakt prawdopodobnie zdecydował o przyjęciu tak dużych wartości  $a_p$ . W wielu krajach dopuszcza się pewną różnicę pomiędzy prędkością projektową a rzeczywistą. Na przykład w Polsce czy w Niemczech różnica ta może wynosić nawet 20 km/h, co wynika z kryterium tzw. zgodności ukształtowania drogi z jej funkcją w sieci. Przy takim założeniu, na przykład, gdy  $VPR = 70$  km/h, wartość przyspieszenia poprzecznego, wyliczona na podstawie danych zawartych w polskich przepisach projektowania dróg, mogłaby wynosić nawet  $2,44 \text{ m/s}^2$ , a wg niemieckich  $2,79 \text{ m/s}^2$ .

Miernikiem wygody ruchu na łukach poziomych, bezpośrednio zawartym w polskich przepisach projektowania dróg, jest tzw. „przyrost przyspieszenia dośrodkowego”, którego maksymalne wartości uzależnione są od prędkości projektowej – tablica 1 [1].

Tablica 1. Zależność maksymalnego przyrostu przyspieszenia dośrodkowego od prędkości projektowej wg polskich przepisów projektowania [1]

Table 1. The relationship between maximum values of lateral acceleration and design speed according to Polish road design standards [1]

Prędkość projektowa [km/h]	120 - 100	80	70	60	50	40
Przyrost przyspieszenia dośrodkowego [ $\text{m/s}^3$ ]	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

W stosunku do tego miernika można, zdaniem autora, wysunąć dwa zastrzeżenia. Pierwsze dotyczy nazewnictwa. Użycie określenia przyrost przyspieszenia dośrodkowego jest niepoprawne, na co wskazuje jednostka tej wielkości. Gdyby rzeczywiście chodziło o przyrost przyspieszenia dośrodkowego jednostką powinien być  $\text{m/s}^2$ , a nie  $\text{m/s}^3$ . Poprawne nazwanie tej wielkości powinno brzmieć przyrost przyspieszenia dośrodkowego w czasie lub np. prędkość zmiany przyspieszenia dośrodkowego.

Drugie zastrzeżenie dotyczy tego, że warunki wygody ruchu na krzywoliniowym odcinku drogi w planie dokładniej odzwierciedla przyrost przyspieszenia poprzecznego w czasie niż przyrost przyspieszenia dośrodkowego w czasie. Wynika to z faktu, że przyrost przyspieszenia poprzecznego w czasie stanowi bezpośredni bodziec, jaki odczuwa kierowca i pasażer samochodu podczas jazdy po łuku poziomym. Przyspieszenie to jest sumą składowych przyspieszenia dośrodkowego oraz ziemskiego i działa w płaszczyźnie równoległej do powierzchni jezdni.

Odczucia kierowcy i pasażera związane z ruchem po krzywoliniowym odcinku drogi, w zależności od działających na nich przyspieszeń poprzecznych, przedstawiono w tablicy 2 [3, 11], a ich przyrostów w czasie w tablicy 3 [3]. Znajomość wpływu tych wielkości na organizm ludzki jest bardzo ważna z punktu widzenia kształtowania i oceny warunków wygody ruchu.

Tablica 2. Odczucia kierowcy i pasażera związane z ruchem po krzywoliniowym odcinku drogi w zależności od wartości działających na nich przyspieszeń poprzecznych [3, 11]  
 Table 2. Drivers and passengers feelings during movement on curve section of road in relation to lateral acceleration [3, 11].

	Przyspieszenie poprzeczne $a_p$ [m/s <sup>2</sup> ]					
	$a_p < 0,20$	$0,20 \leq a_p < 0,45$	$0,45 \leq a_p < 0,75$	$0,75 \leq a_p < 1,25$	$1,25 \leq a_p \leq 2,20$	$a_p > 2,20$
Uczestnik ruchu	Ruch					
Kierowca	bez napięcia psychicznego <sup>3)</sup>	bez napięcia psychicznego z minimalnym lub z brakiem napięcia psychicznego	z niedużym napięciem psychicznym	z wyraźnym napięciem psychicznym	nieprzyjemny	bardzo nieprzyjemny
Pasażer	bez napięcia psychicznego (nie patrząc na drogę nie odróżnia ruchu po łuku od ruchu po odcinku prostym)	z minimalnym lub z brakiem napięcia psychicznego (nadal nie patrząc na drogę nie odróżnia ruchu po łuku od ruchu po odcinku prostym)	ze słabym odczuciem	z wyraźnym odczuciem		

<sup>3)</sup> napięcie psychiczne – stan silnego pobudzenia myśli i uczuć oraz gotowość do szybkiego działania występuje zwykle w sytuacjach trudnych i ważnych [Encyklopedia PWN]

Tablica 3. Odczucia kierowcy i pasażera związane z ruchem po krzywoliniowym odcinku drogi w zależności od wartości działających na nich przyrostów przyspieszeń poprzecznych w czasie [3]

Table 3. Drivers and passengers feelings during movement on curve section of road in relation to changes of lateral acceleration in time [3]

Przyrost przyspieszenia poprzecznego w czasie $k_p$ [m/s <sup>3</sup> ]			
$k_p < 0,30$	$0,30 \leq k_p \leq 1,00$	$1,00 < k_p \leq 2,40$	$k_p > 2,40$
nieodczuwalny	znośny, ale nieprzyjemny	powodujący utrudnienie ruchu	powodujący duże utrudnienie ruchu

### 3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

#### 3.1. ZAŁOŻENIA DO ANALIZY

Przedstawiane poniżej wyniki badań i ich analizy dotyczą zachowań kierowców samochodów osobowych poruszających się ze średnimi prędkościami i prędkościami kwantyla 85%, po wewnętrznym pasie ruchu, po suchych i mokrych nawierzchniach. Rozważania ograniczono do wewnętrznego pasa ruchu, ponieważ ruch na nim, z punktu widzenia wygody ruchu, jest bardziej niekorzystny niż na pasie zewnętrznym. Wynika to przede wszystkim z faktu, że wartości promieni krzywizny trajektorii pojazdu poruszającego się po pasie wewnętrznym są mniejsze niż pojazdu poruszającego się po pasie zewnętrznym. Natomiast na prędkość pojazdu, zgodnie z wynikami badań zawartymi w pracy [12], wpływ rodzaju pasa ruchu (wewnętrzny, zewnętrzny) jest niewielki. Ponadto przedstawiane w analizach wartości przyspieszeń poprzecznych dotyczą najbardziej niebezpiecznego, z punktu widzenia stateczności pojazdu, miejsca na łuku poziomym, a więc miejsca, w którym te przyspieszenia osiągają wartość maksymalną:

$$a_p = \max\{a_{pi}\} \quad [\text{m} / \text{s}^2] , \quad (2)$$

gdzie:

$a_{pi}$  – wartość przyspieszenia poprzecznego w  $i$ -tym miejscu na łuku poziomym [m/s<sup>2</sup>].

Przeprowadzone analizy wyników badań wykazały, że maksymalne wartości przyspieszeń poprzecznych występują w punkcie połączenia kłotojdy trajektorii pojazdu z łukiem kołowym trajektorii pojazdu [12] i wyznaczyć je można ze wzoru:

$$a_{p(\max)} = 0,077 \frac{V_{PLK(T)}^2}{R_{LK(T)}} - g \cdot q_{0(T)} \quad [\text{m} / \text{s}^2] , \quad (3)$$

gdzie:

$V_{PLK(T)}$  – prędkość danej miary pozycyjnej rozkładu prędkości na początku łuku kołowego trajektorii pojazdu [km/h],

- $R_{LK(T)}$  – promień łuku kołowego trajektorii pojazdu odpowiadający danej mierze pozycyjnej rozkładu prędkości [m],
- $q_{0(T)}$  – pochylenie poprzeczne jezdni na łuku kołowym trajektorii pojazdu [-]; odpowiada pochyleniu poprzecznemu jezdni na łuku kołowym drogi.

Natomiast w celu wyznaczenia przyrostu przyspieszenia poprzecznego w czasie, najpierw wyznaczono przyspieszenie poprzeczne występujące na początku klotoidy trajektorii pojazdu ze wzoru:

$$a_{pp(T)} = -g \cdot q_{p(T)} \quad [\text{m} / \text{s}^2] , \quad (4)$$

gdzie:

- $a_{p(T)}$  – pochylenie poprzeczne jezdni w punkcie początkowym klotoidy trajektorii pojazdu [-]; odpowiada pochyleniu poprzecznemu jezdni na prostej poprzedzającej łuk poziomy,

a następnie czas przejazdu po klotoidzie trajektorii pojazdu ze wzoru:

$$t = \frac{72 \cdot LP_{(T)}}{V_{PKP(T)} + V_{PLK(T)}} \quad [\text{s}] , \quad (5)$$

gdzie:

- $LP_{(T)}$  – długość klotoidy trajektorii pojazdu [m],
- $V_{PKP(T)}$  – prędkość danej miary pozycyjnej rozkładu prędkości na początku klotoidy trajektorii pojazdu [km/h].

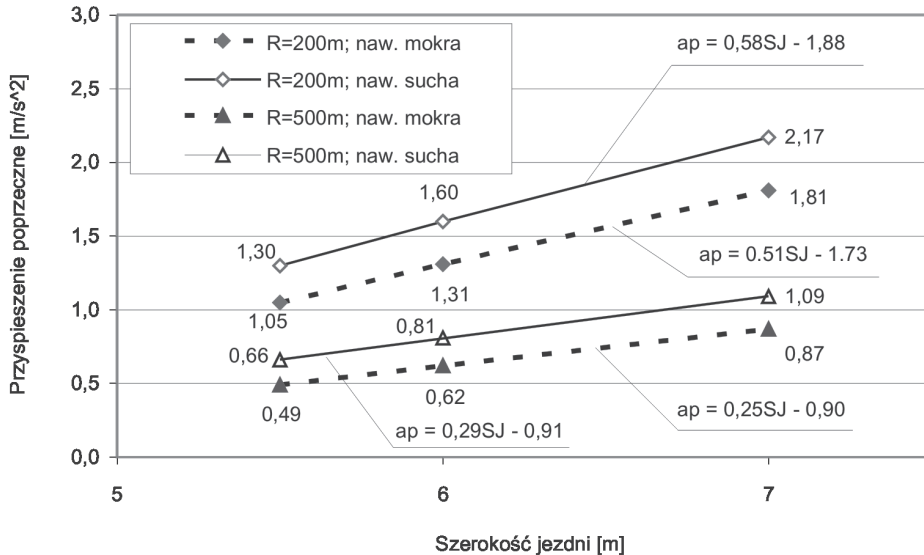
Wzór (5) wyprowadzono przy założeniu, popartym wynikami badań [12], że pojazd po klotoidach trajektorii, w zależności od wartości promienia łuku kołowego i kąta zwrotu, porusza się albo ruchem jednostajnym, albo jednostajnie opóźnionym lub jednostajnie przyspieszonym. Dysponując zależnościami (3 ÷ 5) przyrost przyspieszenia poprzecznego w czasie można wyznaczyć ze wzoru:

$$k_{p(\max)} = 0,0107 \cdot \frac{(V_{PKP(T)} + V_{PLK(T)}) \cdot [V_{PLK(T)}^2 - 12,96 \cdot g \cdot (q_{0(T)} - q_{p(T)}) \cdot R_{LK(T)}]}{LP_{(T)} \cdot R_{LK(T)}} \quad [\text{m} / \text{s}^2] . \quad (6)$$

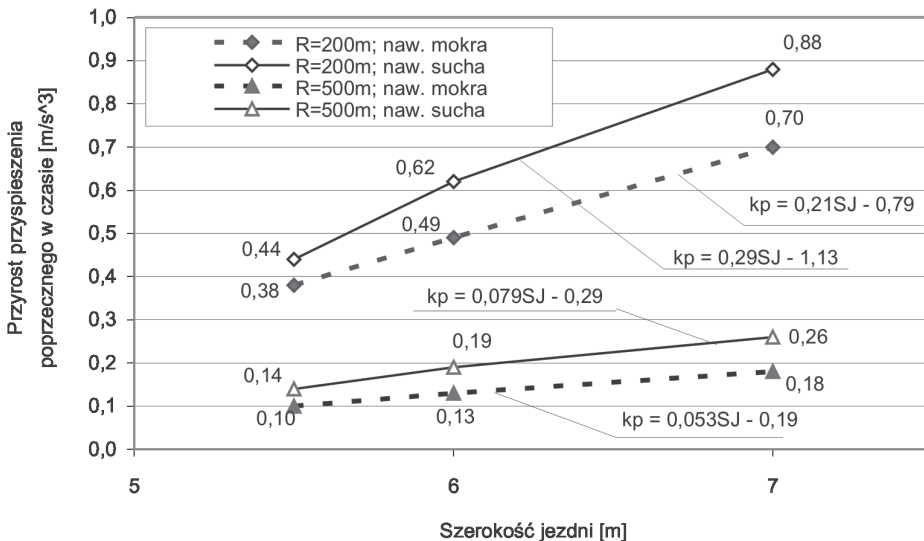
### 3.2. WPLYW SZEROKOŚCI JEZDNI

Wpływ szerokości jezdni na wartość przyspieszenia poprzecznego i jego przyrostu w czasie, w przypadku uczestników ruchu poruszających się z prędkością kwantyla 85% po mokrej nawierzchni (prędkość miarodajna -  $VM$ ) i suchej nawierzchni (zgodnie z pracą [13] nazwano ją maksymalną eksploatacyjną -  $VE_{\max}$ ) ilustrują rys. 2 i 3. Ponadto w celu przedstawienia pełniejszej informacji o warunkach wygody ruchu na krzywoliniowych odcinkach dróg w planie, w tabelicy 4 zamieszczono wartości przyspieszeń poprzecznych i ich przyrostów w czasie oddziałujących na uczestników

ruchu w pojeździe poruszającym się ze średnią prędkością. Zależności przedstawione na rys. 2 i 3 oraz w tabelicy 4 dotyczą łuków poziomych o kącie zwrotu równym  $\sim 30^\circ$  i promieniach łuków kołowych 500,0 m i 200,0 m.



Rys.2. Zależność między przyspieszeniem poprzecznym a szerokością jezdni  
Fig.2. The relationship between lateral acceleration and cross section width



Rys.3. Zależność między przyrostem przyspieszenia poprzecznego w czasie a szerokością jezdni  
Fig.3. The relationship between changes of lateral acceleration in time and cross section width



Tablica 4. Wartości przyspieszeń poprzecznych oraz ich przyrostów w czasie podczas jazdy ze średnią prędkością  
 Table 4. Values of lateral acceleration and their change in time during drive with average speed

Miernik wygody ruchu	Stan nawierzchni	Szerokość jezdni [m]		
		5,5	6,0	7,0
		R = 200,0 m		
$a_p$ [m/s <sup>2</sup> ]	sucha	0,84	1,06	1,48
	mokra	0,67	0,86	1,24
$k_p$ [m/s <sup>3</sup> ]	sucha	0,30	0,38	0,55
	mokra	0,23	0,30	0,44
		R = 500,0 m		
$a_p$ [m/s <sup>2</sup> ]	sucha	0,36	0,46	0,66
	mokra	0,25	0,34	0,52
$k_p$ [m/s <sup>3</sup> ]	sucha	0,08	0,10	0,15
	mokra	0,06	0,08	0,12

Z analizy danych zamieszczonych na rys. 2 i 3 oraz w tablicy 4 wynika, że przyspieszenie poprzeczne oraz jego przyrost w czasie, zarówno w przypadku prędkości  $VM$  i  $VE_{\max}$ , jak i średnich prędkości, wzrasta wraz ze zwiększeniem szerokości jezdni. Zależności te można opisać funkcjami liniowymi (wartości współczynników regresji w przypadku  $VM$  i  $VE_{\max}$  podano na rys. 2 i 3). Ponadto, wraz ze zwiększeniem wartości promienia łuku kołowego, wpływ szerokości jezdni na wartość przyspieszenia poprzecznego maleje.

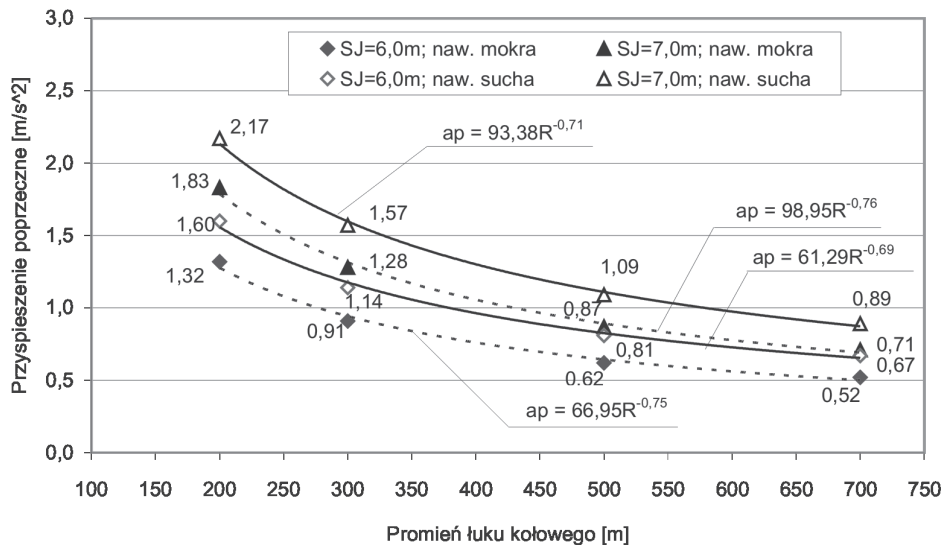
Największe wartości tych przyspieszeń, wynoszące  $\sim 2,2$  m/s<sup>2</sup>, uzyskali kierowcy poruszający się z prędkością  $VE_{\max}$  na łuku poziomym o  $R=200,0$ m i szerokości jezdni równej 7,0 m. Taka wartość  $a_p$  świadczy o tym, że odczucia kierowcy i pasażera związane z ruchem po krzywoliniowym odcinku drogi w planie, zgodnie z danymi w tablicy 3, można zakwalifikować jako nieprzyjemne. Natomiast najmniejsza wartość  $a_p = 0,25$  m/s<sup>2</sup> (tabl. 4) wystąpiła na łuku poziomym o  $R=500,0$  m i szerokości jezdni 5,5 m, gdy pojazd poruszał się ze średnią prędkością po mokrej nawierzchni. W tym przypadku kierowca prowadził pojazd bez wyraźnego napięcia psychicznego, a pasażer, który nie patrzył na drogę, nie odróżniał ruchu po łuku poziomym od ruchu po prostym odcinku (tabl. 2).

Największa wartość przyspieszenia poprzecznego w czasie  $k_p \sim 0,9$  m/s<sup>3</sup> wystąpiła na łuku poziomym o  $R=200,0$  m i  $SJ=7,0$  m, gdy kierowca pojazdu poruszał się z maksymalną prędkością eksploatacyjną. W tym przypadku odczucia kierowcy i pasażera, wynikające z ruchu pojazdu po krzywoliniowym odcinku drogi w planie, są znośne, ale nieprzyjemne (tabl. 3). Natomiast na łukach poziomych o  $R=500,0$  m, bez

względem na szerokość jezdni i stan jezdni spowodowany warunkami pogodowymi, wartości  $k_p$  dla żadnej z rozpatrywanych miar pozycyjnych rozkładu prędkości nie przekroczyły granicy  $0,3 \text{ m/s}^3$ , a więc ruch po krzywoliniowym odcinku drogi w planie jest nieodczuwalny i przez kierowców i przez pasażerów.

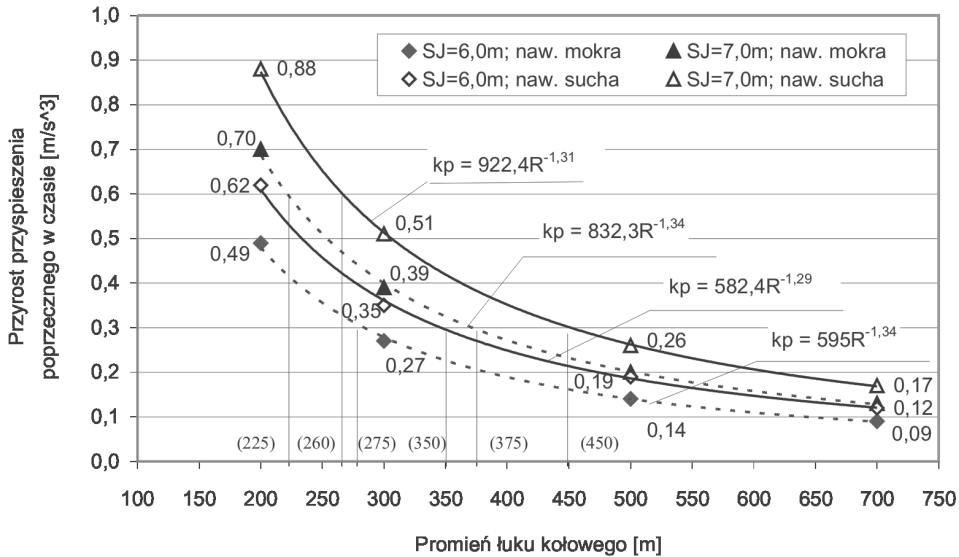
### 3.3. WPŁYW PROMIENIA ŁUKU KOŁOWEGO

Wpływ promienia łuku kołowego na przyspieszenie poprzeczne i jego przyrost w czasie, jakich doznają kierowcy i pasażerowie pojazdów poruszający się po łukach poziomych z prędkością miarodajną i maksymalną eksploatacyjną przedstawiono na rys. 4 i 5. Natomiast w tabelicy 5 zamieszczono wartości  $a_p$  i  $k_p$  w przypadku jazdy po łuku poziomym ze średnią prędkością po mokrej i suchej nawierzchni. Do tej analizy wybrano łuki poziome o kącie zwrotu równym ok.  $30^\circ$  i szerokościach jezdni 7,0 m i 6,0 m.



Rys.4. Zależność między przyspieszeniem poprzecznym a promieniem łuku kołowego  
Fig.4. The relationship between lateral acceleration and curve radius

Z analizy danych zamieszczonych na rys. 4 i 5 oraz w tabelicy 5 wynika, że zmniejszenie wartości promienia łuku kołowego powoduje zwiększenie wartości  $a_p$  i  $k_p$ . Zależności między przyspieszeniem poprzecznym i jego przyrostem w czasie a promieniem można opisać funkcjami potęgowymi (wartości współczynników regresji w przypadku prędkości  $VE$  i  $VM_{\max}$  podano na rys. 4 i 5).



Rys.5. Zależność między przyrostem przyspieszenia poprzecznego w czasie a promieniem łuku kołowego

Fig.5. The relationship between changes of lateral acceleration in time and curve radius

Tablica 5. Wartości przyspieszeń poprzecznych oraz ich przyrostów w czasie podczas jazdy ze średnią prędkością  
Table 5. Values of lateral acceleration and their change in time during drive with average speed

Miernik wygody ruchu	Stan nawierzchni	Promień łuku kołowego [m]							
		200,0	300,0	500,0	700,0	200,0	300,0	500,0	700,0
		Szerokość jezdni [m]							
		6,0				7,0			
$a_p$ [m/s <sup>2</sup> ]	sucha	1,06	0,70	0,46	0,39	1,48	1,00	0,66	0,54
	mokra	0,87	0,53	0,34	0,29	1,24	0,80	0,52	0,43
$k_p$ [m/s <sup>3</sup> ]	sucha	0,38	0,20	0,10	0,07	0,55	0,30	0,15	0,10
	mokra	0,30	0,16	0,08	0,06	0,44	0,23	0,12	0,08

Dopuszczalna przez polskie przepisy projektowania dróg wartość  $k_p = 0,6 \text{ m/s}^3$  (tabl. 1 – prędkość projektowa 70 km/h) na drogach o szerokości jezdni 7,0 m jest przekraczana przez kierowców poruszających się z prędkością  $VE_{\max}$  na łukach poziomych o  $R \leq 260,0 \text{ m}$  i  $KZ = 30^\circ$ , a przez kierowców pojazdów poruszających się z prędkością  $VM$  na łukach poziomych o  $R \leq 225 \text{ m}$  i  $KZ = 30^\circ$  (rys. 5). Natomiast dopuszczalna wartość  $k_p = 0,7 \text{ m/s}^3$  na drogach o szerokości jezdni 6,0 m i prędkości projektowej 60 km/h nie jest przekraczana na żadnym z analizowanych łuków poziomych.

Wartość  $k_p = 0,3 \text{ m/s}^3$  przyjmowana w literaturze przedmiotu jako graniczna, poniżej której kierowca i pasażer nie odczuwa, że ruch odbywa się po krzywoliniowym odcinku drogi w planie (tablica 3) nie jest przekraczana przez kierowców pojazdów poruszających się z prędkością miarodajną na łukach poziomych o  $KZ=30^\circ$ , gdy:

$$R > 375,0 \text{ m i } SJ=7,0 \text{ m,}$$

$$R > 275,0 \text{ m i } SJ=6,0 \text{ m,}$$

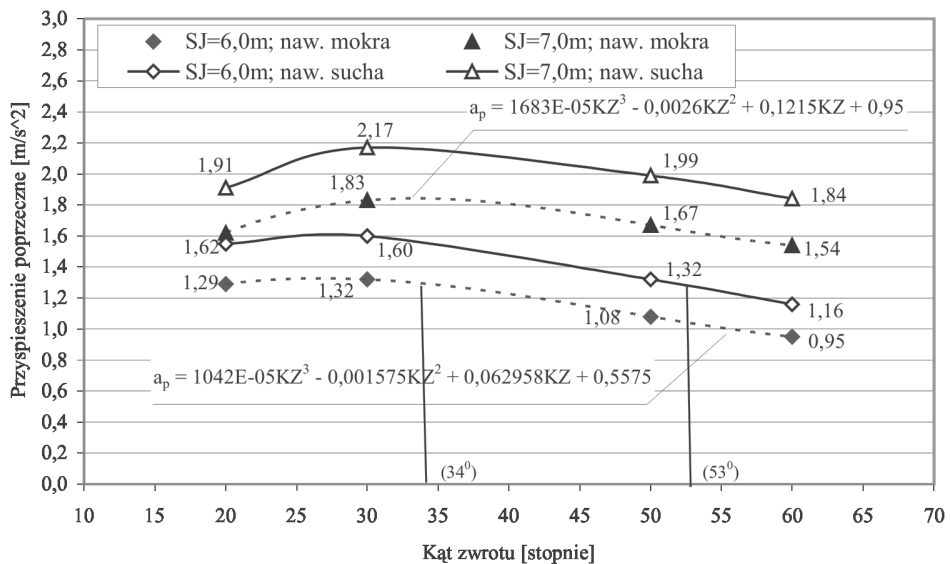
a w przypadku kierowców pojazdów poruszających się z maksymalną prędkością eksploatacyjną na łukach poziomych o  $KZ=30^\circ$ , gdy:

$$R > 450,0 \text{ m i } SJ=7,0 \text{ m,}$$

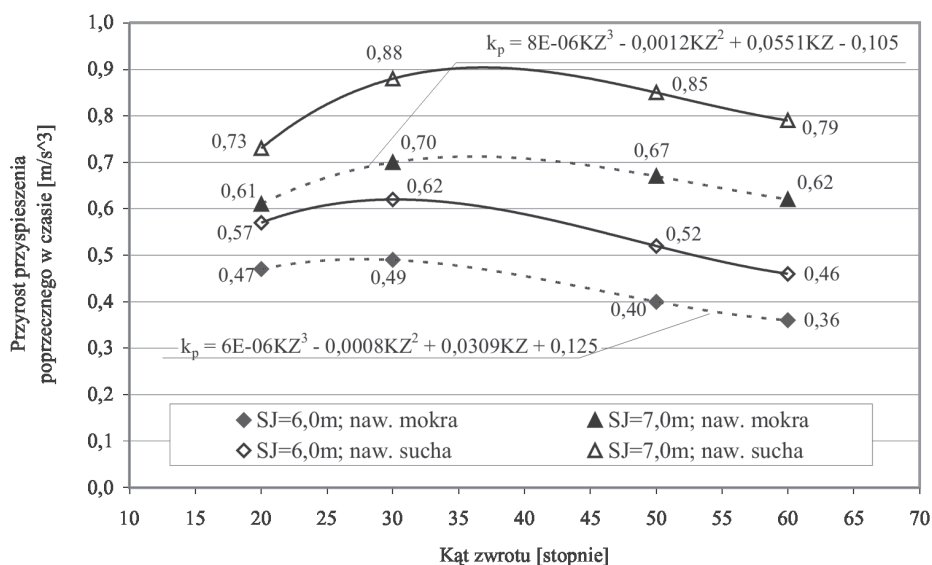
$$R > 350,0 \text{ m i } SJ=6,0 \text{ m,}$$

### 3.4. WPŁYW KĄTA ZWROTU

Wpływ kąta zwrotu na przyspieszenie poprzeczne i jego przyrost w czasie, jakich doznają kierowcy i pasażerowie pojazdów poruszający się po łukach poziomych z prędkościami  $VM$  i  $VE_{\max}$  ilustrują rys. 6 i 7. Natomiast w tablicy 6 zamieszczono wartości  $a_p$  i  $k_p$ , jakie oddziałują na kierowców i pasażerów pojazdów poruszających się po łukach poziomych ze średnią prędkością. Przedstawiane zależności dotyczą łuków poziomych o  $R=200,0 \text{ m}$  położonych na drogach o szerokościach jezdni 6,0 i 7,0 m.



Rys.6. Zależność między przyspieszeniem poprzecznym a kątem zwrotu  
Fig.6. The relationship between lateral acceleration and deflection angle



Rys.7. Zależność między przyrostem przyspieszenia poprzecznego w czasie a kątem zwrotu

Fig.7. The relationship between changes of lateral acceleration in time and deflection angle

Tablica 6. Wartości przyspieszeń poprzecznych oraz ich przyrostów w czasie podczas jazdy ze średnią prędkością

Table 6. Values of lateral acceleration and their change in time during drive with average speed

Miernik wygody ruchu	Stan nawierzchni	Kąt zwrotu [stopnie]							
		20°	30°	50°	70°	20°	30°	50°	70°
		Szerokość jezdni [m]							
		6,0				7,0			
$a_p$ [m/s <sup>2</sup> ]	sucha	1,04	1,06	0,84	0,73	1,32	1,48	1,33	1,22
	mokra	0,85	0,86	0,68	0,58	1,11	1,24	1,10	1,01
$k_p$ [m/s <sup>3</sup> ]	sucha	0,38	0,38	0,31	0,28	0,48	0,55	0,52	0,48
	mokra	0,30	0,30	0,25	0,22	0,39	0,44	0,41	0,39

Zależności zamieszczone na rys. 6 i 7 można opisać funkcjami krzywoliniowymi. Funkcje te osiągają maksima, które występują w przedziale kątów zwrotu od ~ 25° do ~ 40°. Wzrost wartości omawianych mierników wygody ruchu ze wzrostem kąta zwrotu w przedziale przed osiągnięciem maksimum spowodowany jest przede wszystkim zmniejszeniem promienia łuku kołowego trajektorii pojazdu przy równoczesnym, niewielkim

spadku prędkości. Z przeprowadzonych badań wynika, że zwłaszcza w tym zakresie kątów zwrotu efekt „ścianania łuku”, czyli różnica pomiędzy promieniem łuku kołowego trajektorii pojazdu a promieniem łuku kołowego osi pasa ruchu, jest tym większy im mniejszym kątem zwrotu charakteryzuje się łuk poziomy. Również kąt zwrotu ma wpływ na prędkość i wraz z jego wzrostem zmniejsza się prędkość. Natomiast zmniejszenie wartości przyspieszeń poprzecznych i ich przyrostów w czasie w zakresie kątów zwrotu większych od  $25^\circ$  do  $40^\circ$  wynika przede wszystkim ze spadku prędkości i równoczesnego, ale już niewielkiego, zmniejszenia promienia łuku kołowego trajektorii pojazdu.

Wartość  $a_p = 1,25 \text{ m/s}^2$ , stanowiąca dolną granicę kiedy ruch po krzywoliniowym odcinku drogi w planie zarówno dla kierowcy, jak i pasażera zaczyna być odczuwany już jako nieprzyjemny (tabl. 2), przekraczana jest przez kierowców pojazdów poruszających się z prędkościami  $VM$  i  $VE_{\max}$  na łukach poziomych o  $R = 200,0 \text{ m}$  i  $SJ = 7,0 \text{ m}$  w całym zakresie rozpatrywanych kątów zwrotu, tj.  $20^\circ - 60^\circ$ . Natomiast w przypadku dróg o  $SJ = 6,0 \text{ m}$  i  $R = 200,0 \text{ m}$  wartość  $a_p = 1,25 \text{ m/s}^2$  przekraczana jest przez kierowców pojazdów jadących z prędkością  $VE_{\max}$  na łukach poziomych o kątach zwrotu zawartych w granicach od  $20^\circ$  do  $53^\circ$ , a z prędkością  $VM$  na łukach poziomych o kątach zwrotu od  $20^\circ$  do  $34^\circ$ . Również kierowcy pojazdów poruszających się ze średnią prędkością po suchej nawierzchni przekraczają omawianą wartość  $a_p$  na łukach poziomych o  $R = 200,0 \text{ m}$ ,  $SJ = 7,0 \text{ m}$  w zakresie kątów zwrotu od  $20^\circ$  do  $50^\circ$ .

Dopuszczalna przez polskie przepisy projektowania dróg wartość  $k_p = 0,6 \text{ m/s}^3$  (tabl. 1 – prędkość projektowa  $70 \text{ km/h}$ ) jest przekraczana przez kierowców pojazdów poruszających się z prędkością  $VE_{\max}$  i  $VM$  na łukach poziomych o  $R = 200,0 \text{ m}$  i  $SJ = 7,0 \text{ m}$  w całym zakresie rozważanych kątów zwrotu, tj.  $20^\circ - 60^\circ$ . Natomiast na łukach poziomych o  $R = 200,0 \text{ m}$  i szerokości jezdni  $6,0 \text{ m}$  dopuszczalna wartość  $k_p = 0,7 \text{ m/s}^3$  (tabl. 1 prędkość projektowa  $60 \text{ km/h}$ ) nie jest przekraczana w całym zakresie rozważanych kątów zwrotu ani przez kierowców pojazdów poruszających się z prędkością miarodajną, ani z maksymalną eksploatacyjną.

#### 4. WNIOSKI I POSTULATY BADAWCZE

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań można sformułować następujące wnioski:

1. Miernikiem warunków wygody ruchu na krzywoliniowych odcinkach dróg w planie, ze względu na dokładniejsze odzwierciedlenie rzeczywistych warunków wygody ruchu, powinien być przyrost przyspieszenia poprzecznego w czasie, a nie przyrost przyspieszenia dośrodkowego w czasie.
2. Znajomość wpływu parametrów geometrycznych łuków poziomych na wartości przyspieszeń poprzecznych oraz ich przyrostów w czasie, jakich doznają kierowcy i pasażerowie pojazdów, umożliwi świadome i racjonalnie kształtowanie poziomu wygody, a tym samym i bezpieczeństwa ruchu drogowego.

3. Wpływ na wartości przyspieszeń poprzecznych oraz ich przyrosty w czasie oddziałujące na kierowców i pasażerów pojazdów mają takie parametry łuków poziomych, jak: promień łuku kołowego, kąt zwrotu i szerokość jezdni.

Wartości przyspieszeń poprzecznych oraz ich przyrosty w czasie na łukach poziomych o  $R = 200,0$  m oraz  $R = 500,0$  m i kątach zwrotu od  $20^\circ$  do  $60^\circ$  ulegają zwiększeniu wraz ze zwiększeniem szerokości jezdni. Zależności między przyspieszeniami poprzecznymi oraz ich przyrostami w czasie a szerokością jezdni, w zakresie powyżej podanych wartości promieni i kątów zwrotu, można opisać funkcjami liniowymi.

Zwiększenie wartości promienia łuku kołowego z  $200,0$  m do  $500,0$  m na łukach poziomych o kącie zwrotu  $30^\circ$  oraz szerokościach jezdni  $7,0$  m i  $6,0$  m powoduje zmniejszenie wartości przyspieszeń poprzecznych oraz ich przyrostów w czasie, a zależność tę można opisać funkcją potęgową.

Na łukach poziomych o  $R = 200,0$  m, szerokościach jezdni  $7,0$  m i  $6,0$  m oraz kątach zwrotu od  $20^\circ$  do  $60^\circ$  zależności między przyspieszeniami poprzecznymi oraz ich przyrostami w czasie można opisać funkcjami krzywoliniowymi. Funkcje te osiągają maksima w przedziale kątów zwrotu od  $25^\circ$  do  $40^\circ$ .

4. Bardzo często jazda z dużymi prędkościami na krzywoliniowych odcinkach dróg w planie odbywa się kosztem wygody ruchu. Świadczą o tym znaczne wartości przyspieszeń poprzecznych i ich przyrostów w czasie, jakich doznają kierowcy i pasażerowie pojazdów poruszających się na krzywoliniowych odcinkach dróg.

Dalsze badania zagadnienia, będącego przedmiotem niniejszego opracowania, powinny polegać na rozszerzeniu zakresu wartości promieni i kątów zwrotu krzywoliniowych odcinków drogi w planie w stosunku do rozważanych w niniejszym opracowaniu. Ponadto celowe byłoby uwzględnienie wpływu na wartości przyspieszeń poprzecznych i ich przyrostów w czasie kolejnych parametrów geometrycznych łuków poziomych takich, jak na przykład pochyleń podłużnych jezdni, rodzaju poboczy, itd.

Wydaje się celowe i zasadne prowadzenie badań wpływu wartości przyspieszeń poprzecznych i ich przyrostów w czasie na organizm kierowcy i pasażerów pojazdów. Wyniki tych badań powinny stanowić ważną przesłankę przy ustalaniu wartości parametrów geometrycznych łuków poziomych zawartych w przepisach projektowania dróg.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. Dz. U. Nr 43, Warszawa 1999
- [2] *Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.*: Inżynieria ruchu. WKŁ, Warszawa 1997



- [3] *Szczuraszek T.*: Wygoda ruchu na krzywych w planie drogi. *Drogownictwo*, nr 1/1983, 9–15
- [4] *Elvik R., Vaa T.*: The handbook of road safety measures. Elsevier, Amsterdam 2004
- [5] *Lamm R., Psarianos B., Mailaender T.*: Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook. McGraw-Hill, New York 1999
- [6] System oceny stanu nawierzchni SOSN – Wytyczne stosowania, GDDP, Warszawa 2002
- [7] Instrukcja o znakach drogowych poziomych. Zasady stosowania i konstrukcje znaków. Instrukcja o znakach drogowych pionowych. Zasady stosowania znaków i urządzeń bezpieczeństwa ruchu. *Monitor Polski, Dziennik Urzędowy Rzeczypospolitej Polskiej*, załącznik do numeru 16 poz. 120 z dnia 9 marca 1994
- [8] *Kempa J., Kończal P., Pawłowski P.*: Urządzenie do automatycznego pomiaru prędkości i toru pojazdu. *Drogownictwo*, nr 7/1998, 213 – 216
- [9] *Gadomski J., Kempa J.*: Teoretyczna i empiryczna dokładność pomiaru toru pojazdu metodą bezreflektorową z wykorzystaniem fal ultradźwiękowych. *Zeszyty Naukowe ATR w Bydgoszczy* nr 213, seria Budownictwo, **30**, Bydgoszcz 1998, 29 – 38
- [10] *Kempa J.*: Rzeczywiste a projektowe trajektorie pojazdów na krzywoliniowych odcinkach dróg. XLVIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Krynica 2002”, Opole – Krynica 2002, 4, 69 – 76
- [11] *Grabowski R.J.*: Kształtowanie geometryczne krzywych przejściowych w drogach kołowych, kolejowych i trasach wodnych. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1996
- [12] *Kempa J.*: Metoda oceny poziomu bezpieczeństwa i wygody ruchu oraz zasady projektowania i oznakowania krzywych poziomych dwupasowych dróg dwukierunkowych. Projekt badawczy własny nr 4 T07E 074 27 (w opracowaniu)
- [13] *Szczuraszek T.* i in.: Bezpieczeństwo ruchu miejskiego. WKŁ, Warszawa 2005

## **INFLUENCE OF HORIZONTAL CURVES GEOMETRY ON DRIVING COMFORT**

### **Abstract**

Results of investigation concerning an influence of horizontal curve parameters (that is: circle radius, deflection angle and road width) on lateral acceleration and its change in time experienced by vehicle drivers and passengers are presented. It was found that for a wider cross section a higher value of lateral acceleration and its change in time is obtained, and these relationships can be described as linear functions. Higher values of circle curve radius caused lower values of lateral acceleration and its change in time and in this case relationships can be described as power functions. The relationship between presented measures of driving condition and deflection angle can be described by curvilinear functions with a maximum for a deflection angle between 25° and 40°. Drivers choose driving with a high speed on curve section of road instead of their comfort. This is confirmed by considerable values of lateral acceleration and their change in time.