

## OPTIMALIZACJA KOLEJOWYCH KRZYWYCH PRZEJŚCIOWYCH WYJAZDOWYCH<sup>1</sup>

Piotr WOŹNICA, Krzysztof ZBOIŃSKI  
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Niniejsza praca dotyczy optymalizacji kształtu kolejowych krzywych przejściowych (KP) wyjazdowych. Za KP wyjazdowe uważano krzywe znajdujące się bezpośrednio za łukiem kołowym, a bezpośrednio przed torem prostym. Jako krzywe przejściowe autorzy pracy wykorzystali wielomian 9. stopnia. W optymalizacji kształtu krzywych posłużono się modelem 2-osioвого pojazdu szynowego. Badania wykonano dla trzech wartości promienia łuku kołowego oraz czterech funkcji celu. W pracy przedstawiono wyniki optymalizacji – typy krzywizn optymalnych krzywych przejściowych wyjazdowych oraz przebiegi dynamiczne – przemieszczenia i przyspieszenia tak poprzeczne, jak i pionowe środka masy nadwozia.

Słowa kluczowe: kolejowe krzywe przejściowe wyjazdowe, dynamika pojazdów szynowych, symulacja komputerowa.

### 1. WSTĘP

Przedmiotem badań autorów niniejszego artykułu są właściwości dynamiczne kolejowych wielomianowych krzywych przejściowych (KP) wyjazdowych. Za KP wyjazdowe uważano krzywe znajdujące się bezpośrednio za łukiem kołowym, a bezpośrednio przed torem prostym, za wjazdowe – KP między torem prostym, a łukiem. We wcześniejszych swoich pracach, np. [5] i [8], autorzy artykułu badali właściwości dynamiczne wielomianowych krzywych przejściowych głównie wjazdowych. Jako KP wjazdowe autorzy pracy przyjmowali wielomiany stopnia od 5. do 11. W badaniach do oceny właściwości KP wykorzystano model 2-osioowego pojazdu szynowego towarowego. Jako kryteria oceny stosowano funkcje celu zawierające wielkości tak dynamiczne (przyspieszenia środka masy nadwozia pojazdu), jak i zużyciowe (poślizgi w kontakcie koło-szyna). W pracach tych przyjęto wartość promienia łuku kołowego równą 600 m. Krzywizny znalezionych optymalnych krzywych przejściowych w wielu przypadkach nie posiadały styczności w skrajnych – początkowym i końcowym – punktach krzywej do przebiegu funkcji krzywizny w torze prostym i łuku kołowym, np. [7].

KP wyjazdowe były do tej pory badane (wstępnie) tylko w dwóch pracach – [5] i [6]. Oceniane były pod kątem jednego promienia łuku i jednego kryterium oceny.

---

<sup>1</sup> DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.25.33

Wspomniane wyniki dla KP wjazdowych, a i mała liczba wyników dla KP wyjazdowych, niech będą zatem przyczynkiem do szerszych badań KP wjazdowych – tak jeśli chodzi o przyjęte promienie łuku, jak i kryteria oceny KP.

## 2. CEL PRACY

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie wyników optymalizacji krzywych przejściowych wjazdowych stopnia 9. z wykorzystaniem modelu pojazdu szynowego oraz kryteriów tak dynamicznych, jak i zużyciowych. W pracy zatem dążono do tego, aby minimalizować wartości czterech funkcji celu.

Jako wspomniane kryteria oceny (funkcje celu) zastosowano tu:

- znormalizowaną po długości drogi wartość całki z wartości bezwzględnej przyspieszenia poprzecznego nadwozia:

$$FC_1 = L_C^{-1} \int_0^{L_C} |\ddot{y}_b| dl, \quad (1)$$

- wartość maksymalną z sumy wartości bezwzględnych sum iloczynów sił kontaktowych stycznych wzdłużnych i poprzecznych przez odpowiadające im poślizgi względne dla wszystkich kół:

$$FC_2 = \max \left( F_{1lp} v_{1lp} + F_{2lp} v_{2lp} / F_{1rp} v_{1rp} + F_{2rp} v_{2rp} / + \right. \\ \left. + F_{1lk} v_{1lk} + F_{2lk} v_{2lk} / F_{1rk} v_{1rk} + F_{2rk} v_{2rk} \right), \quad (2)$$

- znormalizowaną po długości drogi wartość całki z wartości bezwzględnej zmiany przyspieszenia poprzecznego nadwozia, tzw. zrywu (ang. jerk):

$$FC_3 = L_C^{-1} \int_0^{L_C} |\dot{\ddot{y}}_b| dl, \quad (3)$$

- znormalizowaną po długości drogi wartość całki z wartości bezwzględnej przyspieszenia kątownego nadwozia wokół osi x:

$$FC_4 = L_C^{-1} \int_0^{L_C} \ddot{\phi}_b dl, \quad (4)$$

We wzorach (1) – (4) przyjęto następujące oznaczenia:

$L_C$  – długość drogi uwzględnianej w obliczeniu funkcji celu [m],

$\ddot{y}_b$  – przyspieszenie poprzeczne środka masy [ $m/s^2$ ],

$\dot{\ddot{y}}_b$  – zmiana przyspieszenia poprzecznego środka masy [ $m/s^3$ ],

$\ddot{\phi}_b$  – przyspieszenie kątowe nadwozia wokół osi x [ $rad/s^2$ ],

$F_1$  – wzdłużna styczna siła kontaktowa w układzie koło-szyna [N],  
 $F_2$  – poprzeczna styczna siła kontaktowa w układzie koło-szyna [N],  
 $v_1$  – poślizg względny wzdłużny w układzie koło-szyna [-],  
 $v_2$  – poślizg względny poprzeczny w układzie koło-szyna [-].  
 Indeksy  $l, r, p, k$  oraz  $b$  oznaczają: stronę lewą, stronę prawą, przedni (atakujący) zestaw kołowy, końcowy (wleczony) zestaw kołowy oraz nadwozie pojazdu.

Wspomnieć należy, że autorzy pracy nie oczekiwali tego, aby krzywizny optymalnych KP posiadały styczność w skrajnych punktach krzywej.

### 3. TYP KRZYWEJ PRZEJŚCIOWEJ, MODEL POJAZDU SZYNOWEGO ORAZ SCHEMAT OPROGRAMOWANIA PRZYJĘTY DO ANALIZY

Jak do tej pory (np. w [6]), tak i w tej pracy KP przedstawiono w postaci następującego równania:

$$y(l) = \frac{1}{R} \left( \frac{A_n l^n}{l_0^{n-2}} + \frac{A_{n-1} l^{n-1}}{l_0^{n-3}} + \frac{A_{n-2} l^{n-2}}{l_0^{n-4}} + \frac{A_{n-3} l^{n-3}}{l_0^{n-5}} + \dots + \frac{A_4 l^4}{l_0^2} + \frac{A_3 l^3}{l_0^1} \right), \quad (5)$$

gdzie oznaczenia:  $y, R, l_0$  oraz  $l$  określają: współrzędną poprzeczną krzywej, promień łuku kołowego, całkowitą długość krzywej oraz bieżącą długość krzywej. Symbole  $A_i$  są współczynnikami wielomianu ( $i = n, n-1, \dots, 4, 3$ ), gdzie  $n$  jest stopniem wielomianu. Na funkcję krzywizny krzywej przejściowej nałożono podstawowy warunek, jaki musi spełniać funkcja krzywizny w punktach początkowym i końcowym, tj.  $k(0) = 1/R$  i  $k(l_0) = 0$ . Analogiczny warunek spełnia też rampa przechyłkowa, tzn.  $h(0) = H$  i  $h(l_0) = 0$ .

Jak wspomniano, w badaniach wykorzystano jeden model wagonu 2-osowego z jednym stopniem usprężynowania. Model ten wykorzystywany był w wielu poprzednich pracach autorów i szczegółowo opisany np. w [6]. Jak każdy wagon tego rodzaju posiada on nadwozie (pudło) połączone z dwoma zestawami kołowymi za pomocą elementów sprężysto – tłumiących. Struktura modelu i jego parametry swoim zakresem odpowiadają typowemu 2-osowemu wagonowi rzeczywistemu.

Schemat oprogramowania składa się z dwóch pętli iteracyjnych. Pierwsza jest pętlą całkowania równań (symulacji). Jest ona przerywana, gdy długość  $l_{lim}$ , będąca długością bieżącą drogi, osiągnie założoną wartość. Druga zaś jest pętlą procesu optymalizacji. Jest przerywana, gdy liczba iteracji osiągnie wartość  $i_{lim}$ . Wartość ta oznacza, że  $i_{lim}$  symulacji musi zostać wykonywanych, aby proces optymalizacyjny został zakończony. Jeśli optymalne rozwiązanie zostanie znalezione wcześniej ( $i < i_{lim}$ ), wtedy proces optymalizacyjny zostanie automatycznie zatrzymany.

#### 4. KRZYWE PRZEJŚCIOWE POCZĄTKOWE ORAZ PRZYJĘTE WARUNKI BADAŃ

W badaniach wykorzystano dwie KP początkowe stopnia 9. Pierwszą jest KP o krzywiznie przedstawionej za pomocą wzoru (6):

$$k(l) = \frac{l}{R} \left( l + 20 \left( \frac{l}{l_0} \right)^7 - 70 \left( \frac{l}{l_0} \right)^6 + 84 \left( \frac{l}{l_0} \right)^5 - 35 \left( \frac{l}{l_0} \right)^4 \right), \quad (6)$$

Krzywiznę powyższą otrzymano wykonując symetrię środkową krzywizny  $k_{stand}$  standardowej KP stopnia 9. [2] względem punktu  $(l_0/2, 1/(2R))$ . Zatem  $k(l) = k_{stand}(l_0 - l)$ . Graficznie przedstawiono ją jako krzywiznę numer 1 na rys. 1a. Drugą jest krzywa o krzywiznie (7):

$$k(l) = \frac{1}{R} \left( 1 - 1,5339 \cdot \left( \frac{1}{l_0} \right)^7 + 0,1978 \cdot \left( \frac{1}{l_0} \right)^6 + \right. \\ \left. + 0,5246 \cdot \left( \frac{1}{l_0} \right)^5 - 0,1684 \cdot \left( \frac{1}{l_0} \right)^4 \right). \quad (7)$$

W badaniach przedstawionych w pracy przyjęto 3 wartości promienia łuku kołowego – 600 m, 1200 m i 2000 m oraz różne wartości przechyłki z zakresu 45–150 mm. Przyjęto także różne prędkości  $v$  (tab. 1 – 3 rozdział 5) pojazdu. Różne promienie, przechyłki oraz prędkości skutkowały różnymi niezrównoważonymi przyspieszeniami poprzecznymi w łuku  $a_{dop}$ . Każda krzywa przejściowa miała długość  $l_0$ , która liczona była zgodnie z metodą przedstawioną w [1].

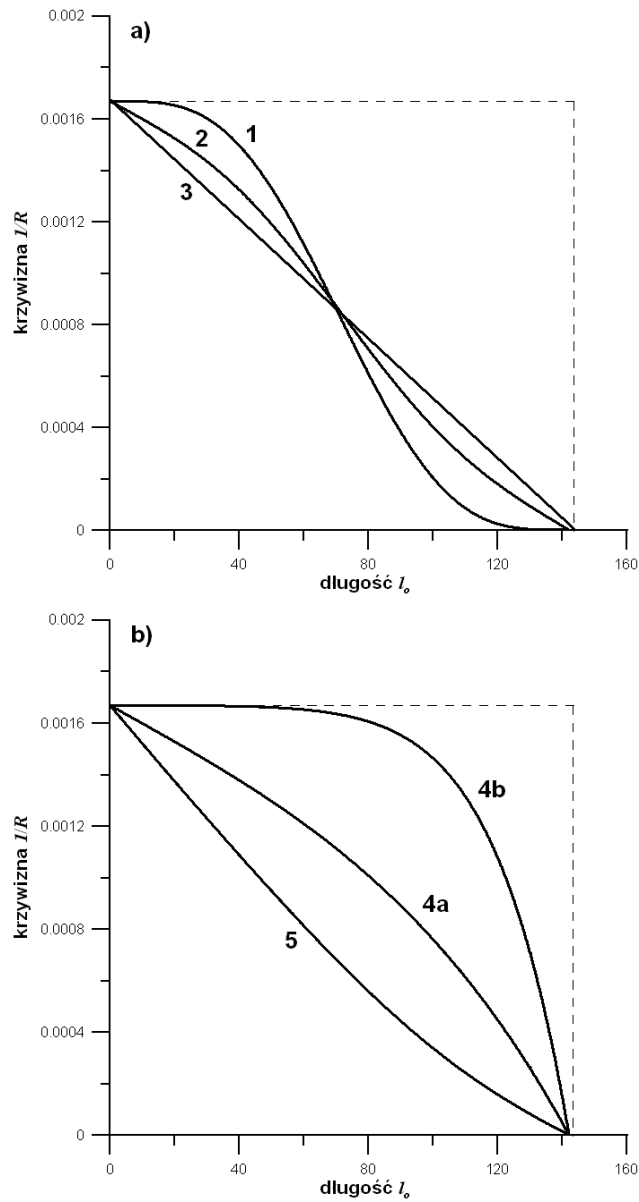
Każda pojedyncza symulacja wchodząca w skład optymalizacji polegała na przejeździe pojazdu po trasie składającej z: łuku kołowego ŁK (długość – 150 m), KP ( $l_0$ ) i toru prostego TP (150 m). Funkcję celu liczono dopiero od początku KP.

Tradycyjnie na wyniki z poszczególnych procesów optymalizacji kształtu KP składały się: optymalne współczynniki wielomianu, wartości funkcji celu, graficzna reprezentacja krzywej i krzywizny oraz przemieszczeń i przyspieszeń (poprzecznych i pionowych) środka masy nadwozia.

Założono, że każda KP uzyskana w pracy ma krzywiznę (rampę przechyłkową), która zostanie zakwalifikowana do jednej z 5 grup. Te 5 grup (typów) to:

- typ 1 – krzywizna jest w praktyce zbliżona do krzywizny (6),
- typ 2 – krzywizna ma kształt pośredni pomiędzy krzywizną (6), a parabolą 3. stopnia, krzywizna ta ma styczność typu  $G^1$  w początkowym punkcie,
- typ 3 – krzywizna quasi-liniowa, bardzo zbliżona do krzywizny paraboli 3. stopnia,
- typ 4 – krzywizna ma wklęsły charakter, jest ostra (4a) lub ma ciągłość typu  $G^1$  (4b) na początku KP i zawsze ostra na końcu KP (typu 4b jest krzywizna (7)),

- typ 5 – krzywizna ma wypukły charakter i styczność typu  $G^0$  na początku i końcu KP.



Rys. 1. Krzywizny typu: a) 1, 2 i 3, b) 4, 5

## 5. WYNIKI OPTYMALIZACJI KSZTAŁTU KRZYWYCH PRZEJŚCIOWYCH

Celem niniejszego rozdziału jest zaprezentowanie wyników badań dotyczących optymalizacji kształtu krzywych przejściowych wyjazdowych z wykorzystaniem modelu pojazdu oraz kryteriów  $FC_1 - FC_4$ . Na potrzeby niniejszego rozdziału wykonano 96 optymalizacji. Liczba ta wynikała z iloczynu:

- 3 promieni łuku kołowego  $R$ ,
- 4 prędkości pojazdu (dla każdego promienia)  $v$ ,
- 4 funkcji celu,
- 2 punktów startowych w procesie optymalizacji (krzywe (6) i (7)).

Dla każdego promienia, każdej prędkości i funkcji celu zawsze wykonywano dwie optymalizacje. Ostatecznie jako krzywą optymalną brano tą, która dawała mniejszą wartość funkcji celu.

W tabelach 1–3 przedstawiono wyniki optymalizacji – typy krzywizn otrzymanych podczas optymalizacji kształtu.

Tab. 1. Typy krzywizn dla promienia łuku 600 m

nr	$a_{dop}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$v$ [m/s]	$H$ [mm]	$l_0$ [m]	$FC_1$	$FC_2$	$FC_3$	$FC_4$
1.	0,6	30,79	150	180,46	2	4b	4b	4b
2.	0,3	27,71	150	162,36	4b	4b	4b	4b
3.	0	24,26	150	142,15	2	4b	1	1
4.	-0,3	20,20	150	118,35	1	4b	1	1

Tab. 2. Typy krzywizn dla promienia łuku 1200 m

nr	$a_{dop}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$v$ [m/s]	$H$ [mm]	$l_0$ [m]	$FC_1$	$FC_2$	$FC_3$	$FC_4$
1.	0,6	36,17	75	105,98	1	2	1	1
2.	0,3	30,14	70	82,41	4b	4b	1	2
3.	0	24,26	75	71,07	2	4b	1	2
4.	-0,3	28,57	150	167,4	1	4b	1	1

Tab. 3. Typy krzywizn dla promienia łuku 2000 m

nr	$a_{dop}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$v$ [m/s]	$H$ [mm]	$l_0$ [m]	$FC_1$	$FC_2$	$FC_3$	$FC_4$
1.	0,3	34,47	45	60,6	2	2	2	2
2.	0,15	30,87	50	60,29	2	4b	2	2
3.	0	24,26	45	42,64	2	4b	4b	4b
4.	-0,3	30,05	115	134,99	1	2	2	2

Liczba poszczególnych typów krzywizn KP kształtowała się więc następująco:

- typ 1 – 14,
- typ 2 – 17,

- typ 3 – 0,
- typ 4 – 17,
- typ 5 – 0.

Analizując liczby poszczególnych typów krzywizn widać, że procedura optymalizacyjna nie znalazła ani jednej krzywej przejściowej o krzywiznach typu 3 (parabola 3. stopnia) oraz 5. Zatem pierwszym ważnym wnioskiem z badań jest, że powszechnie stosowana krzywa przejściowa w inżynierii kolejowej, a taką jest parabola 3. stopnia, nie nadaje się na krzywą wyjazdową.

Drugim ważnym spostrzeżeniem jest to, że krzywizny wszystkich znalezionych optymalnych krzywych przejściowych w punkcie początkowym krzywej (końcowym łuku kołowego) posiadają styczność krzywizn. Krzywe z załomami krzywizn nie są preferowane mimo tego, że wspomniany załom istnieje tylko w funkcji krzywizny, a nie trajektorii ruchu (współrzędnej  $y$ ).

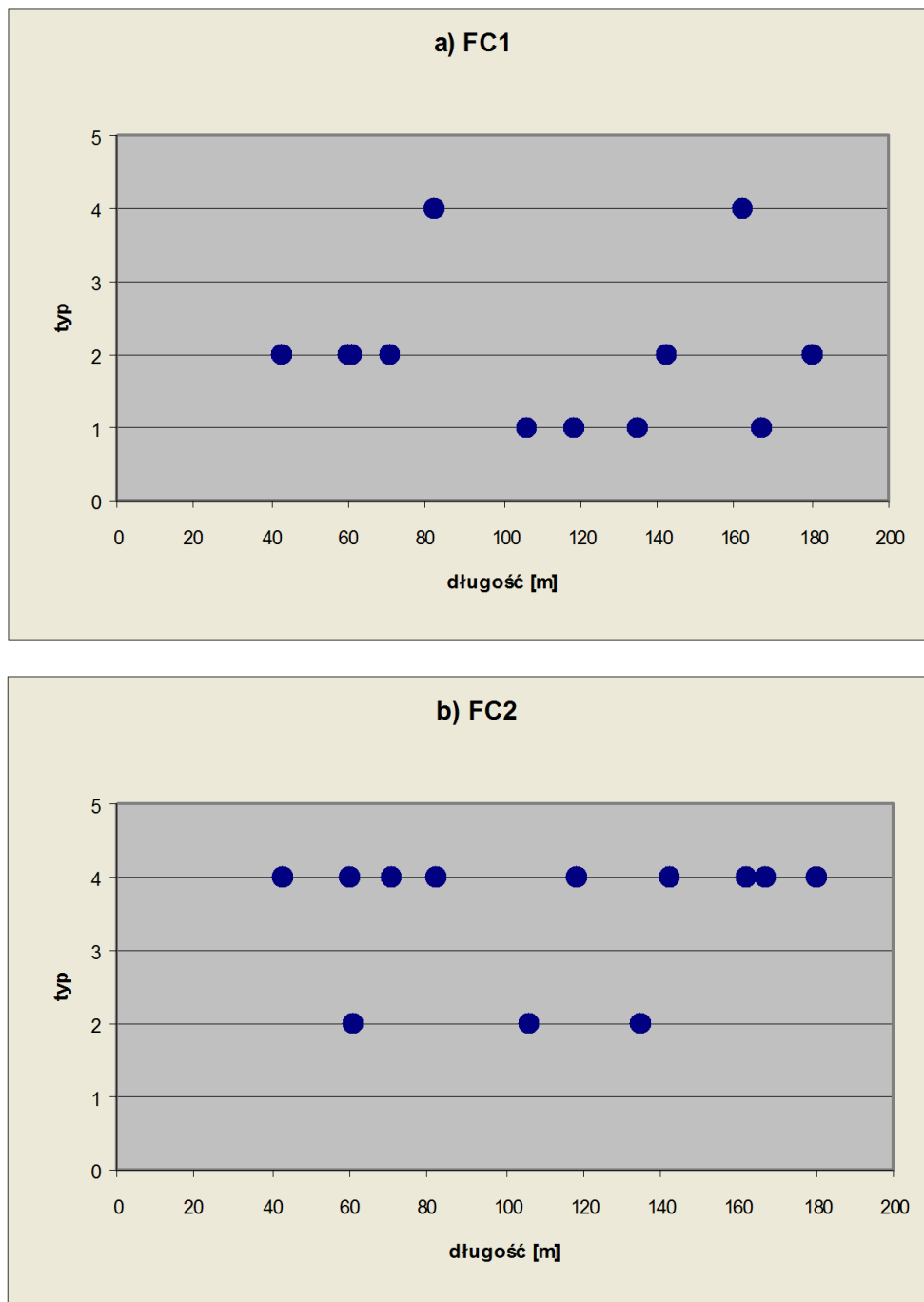
Jeśli chodzi o punkt końcowy krzywej (początkowy toru prostego), to tu sytuacja nie była jednoznaczna. Procedura optymalizacyjna znajdowała także krzywe, których krzywizny wspomnianej styczności (ciągłości typu  $G^1$ ) nie posiadały. Zatem z punktu widzenia dynamiki pojazdu w punktach – początkowym i końcowym – krzywej ważne jest zachowanie warunków: nowego  $k'(0)=0$  i zawsze zakładanego (podstawowego)  $k(l_0)=0$ .

Warto także dodać, że dla przyjętego konkretnego kryterium oceny tylko w jednym przypadku – kryterium zużyciowe  $FC_2$  – jeden typ krzywizny – 4 – dominował nad pozostałymi. Sytuacja taka miała miejsce w 9 na 12 analizowanych przypadków. Pokazuje to, że kryteria zużyciowe stanowią odmienną od dynamicznych grupę kryteriów oceny.

Na rys. 2 – 3 przedstawiono typy otrzymanych krzywizn w funkcji długości krzywej dla kryteriów  $FC_1$ – $FC_4$ . Z rysunków tych widać, że typy te w funkcji długości ogólnie mają nieregularny charakter dla każdego z kryteriów. Pewnym wyjątkiem jest wspomniane kryterium  $FC_2$ . Zatem założona z góry długość krzywej nie narzuca nam przy doborze krzywej w układzie torowym konkretnego rozwiązania.

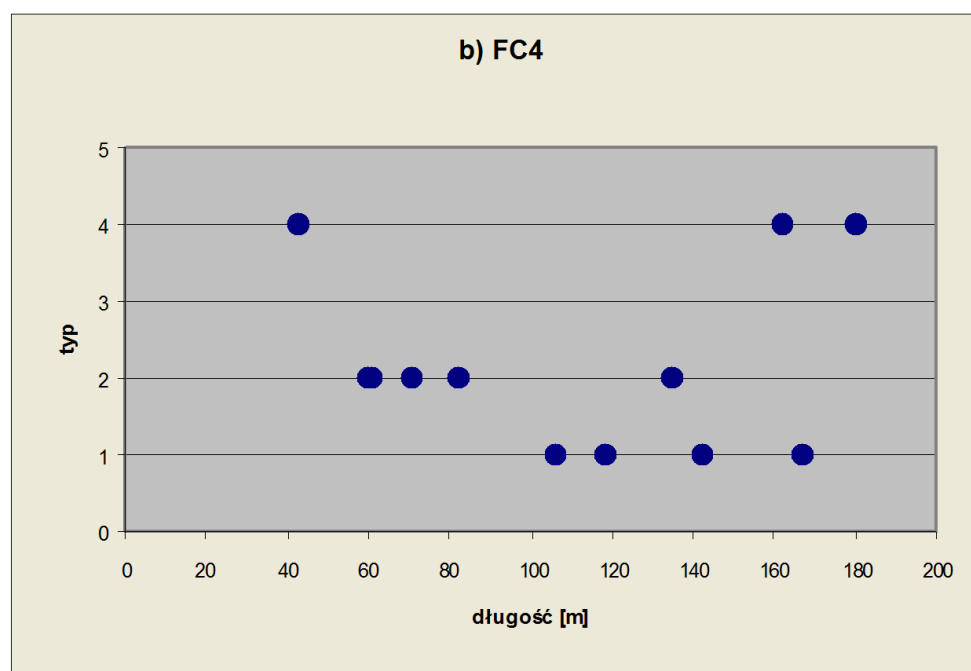
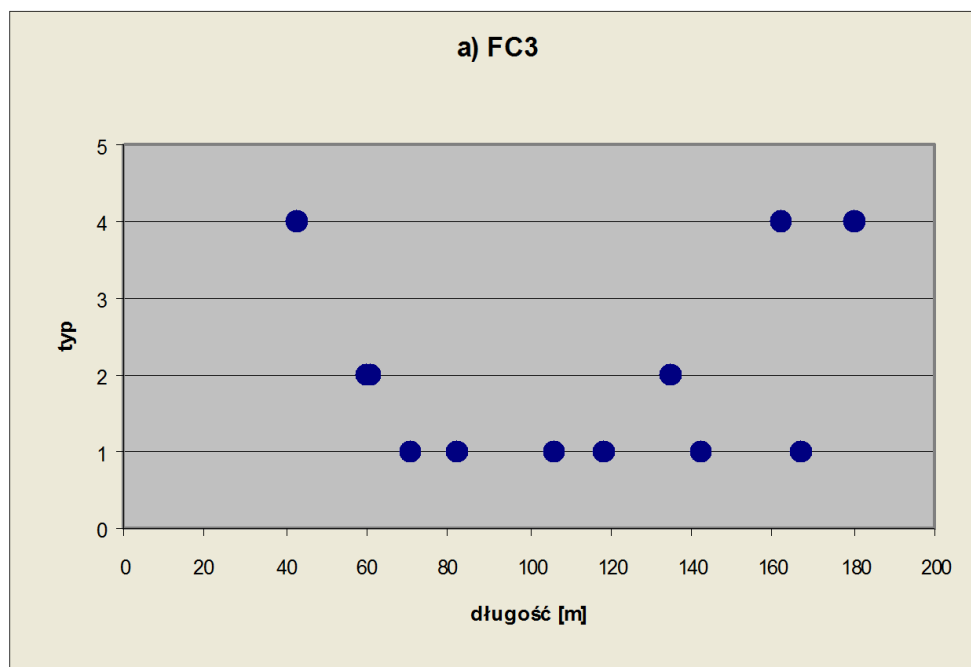
W niniejszej pracy przedstawiono również charakterystyki geometryczne krzywych przejściowych wyjazdowych oraz przebiegi dynamiczne dla dwóch przypadków: przypadek nr 2 z tab. 1 ( $R=600$  m) oraz przypadek nr 3 z tab. 2 ( $R=1200$  m). Oba analizowane przypadki dotyczyły funkcji celu  $FC_1$ . Konkretnie były to:

- krzywizny optymalnych KP (rys. 4),
- przemieszczenia i przyspieszenia poprzeczne środka masy nadwozia pojazdu (rys. 5 i 8),
- przemieszczenia i przyspieszenia pionowe środka masy nadwozia (rys. 6 i 9),
- przemieszczenia i przyspieszenia kątowe nadwozia wokół osi  $x$  (rys. 7 i 10).

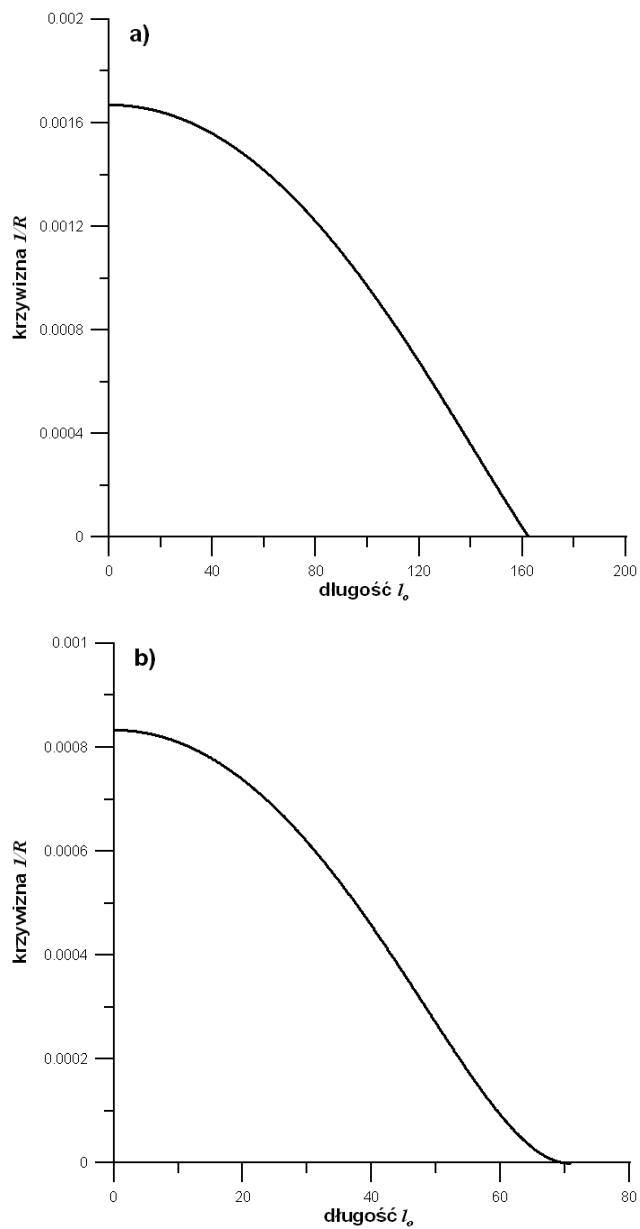


Rys. 2. Typy otrzymanych krzywizn w funkcji długości dla kryterium: a)  $FC_1$ , b)  $FC_2$

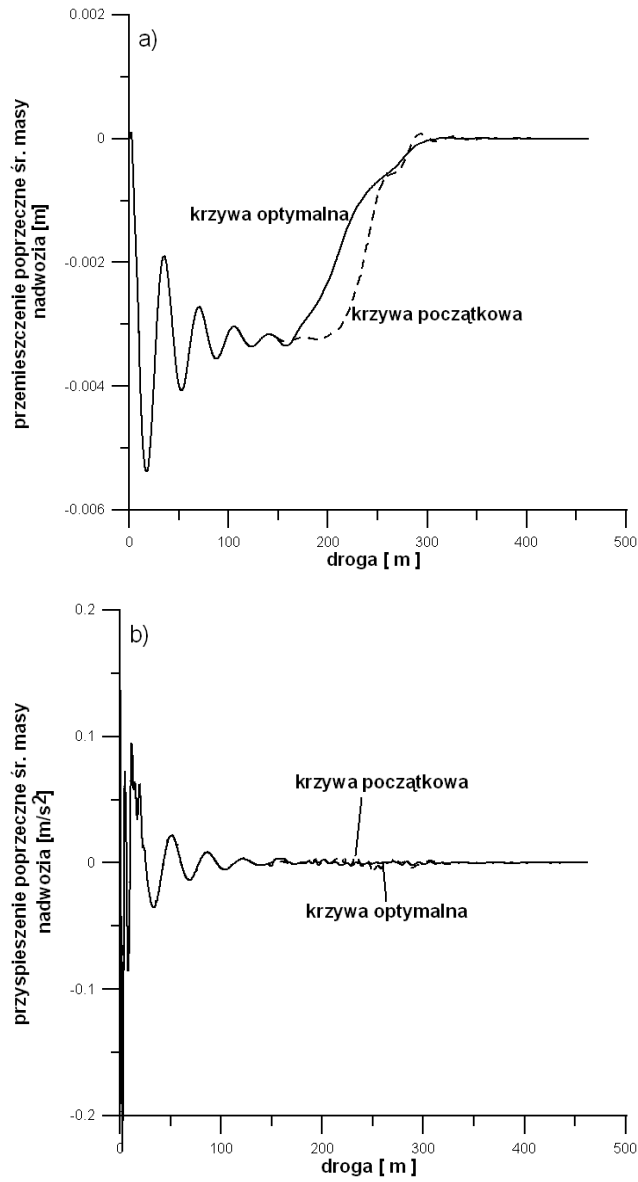




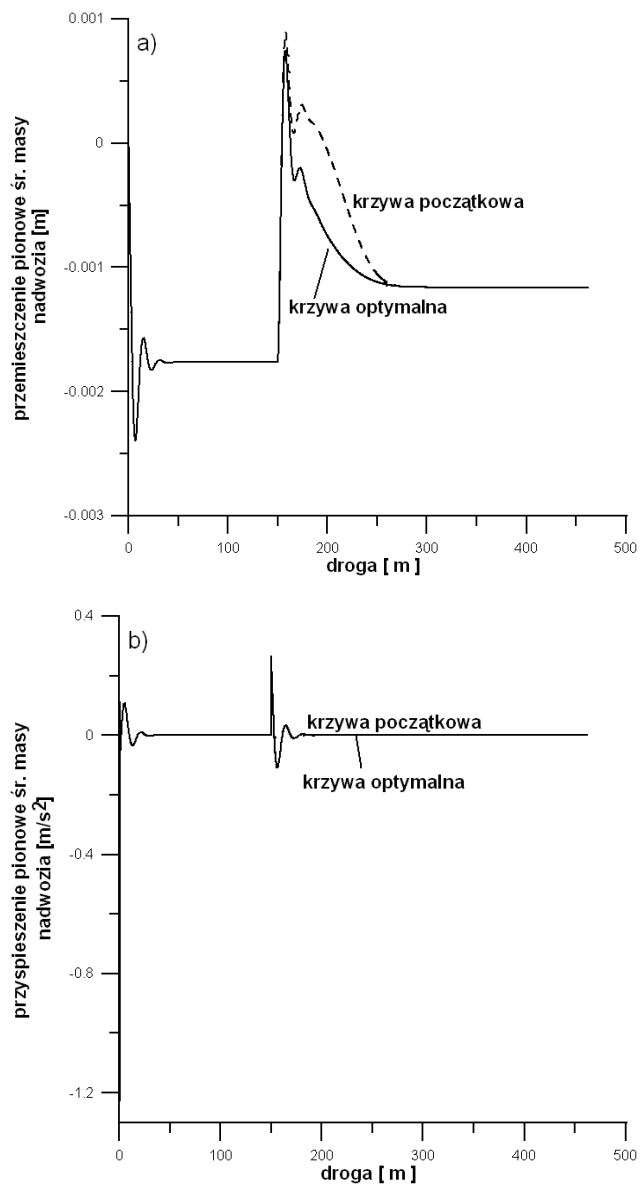
Rys. 3. Typy otrzymanych krzywizn w funkcji długości dla kryterium: a)  $FC_3$ , b)  $FC_4$



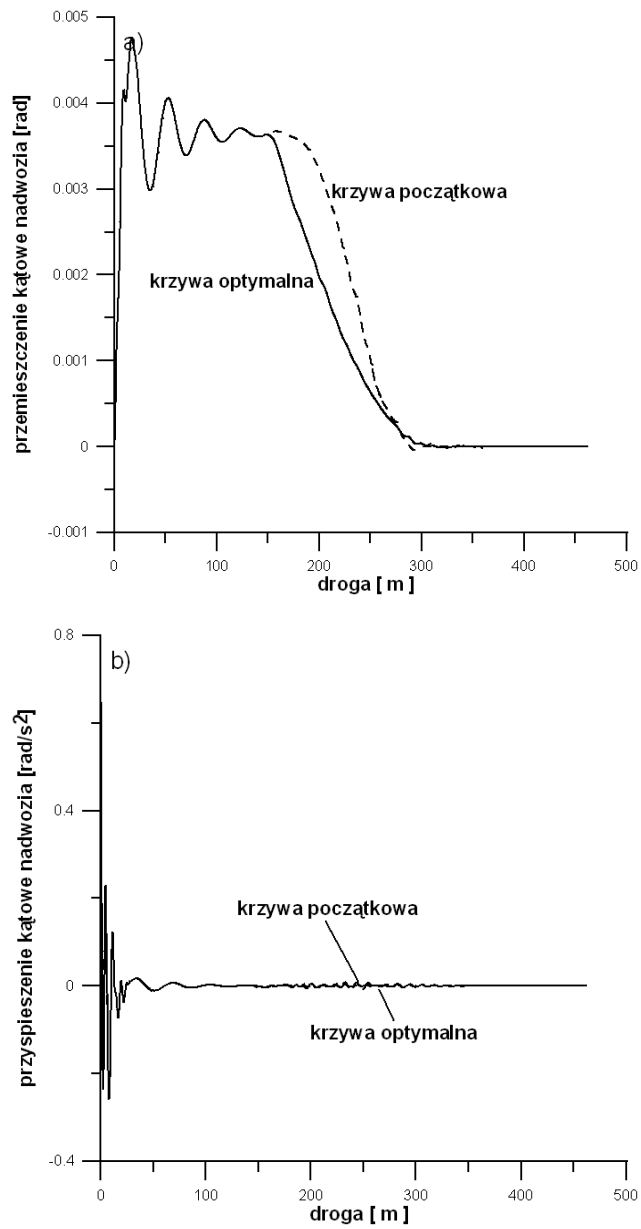
Rys. 4. Krzywizny optymalnych KP: a) przypadek nr 2 z tabeli 1 – typ 4b,  
b) przypadek nr 3 z tabeli 2 – typ 2



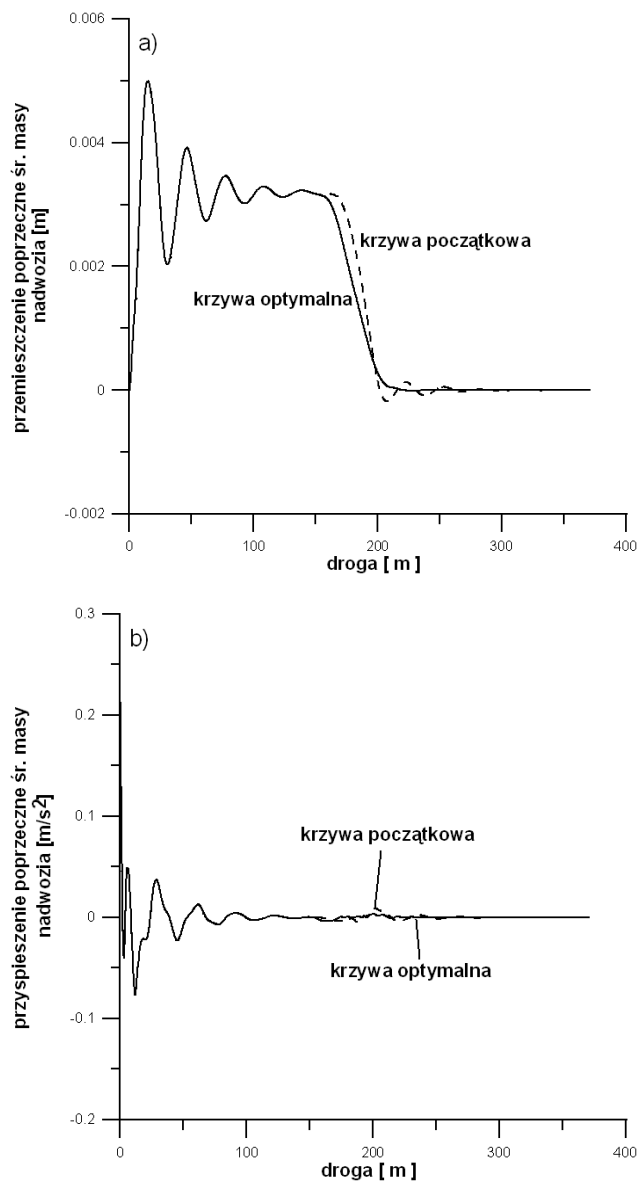
Rys. 5. Przebiegi dynamiczne: a) przemieszczenia, b) przyspieszenia poprzeczne środka masy nadwozia – przypadek nr 2 z tabeli 1



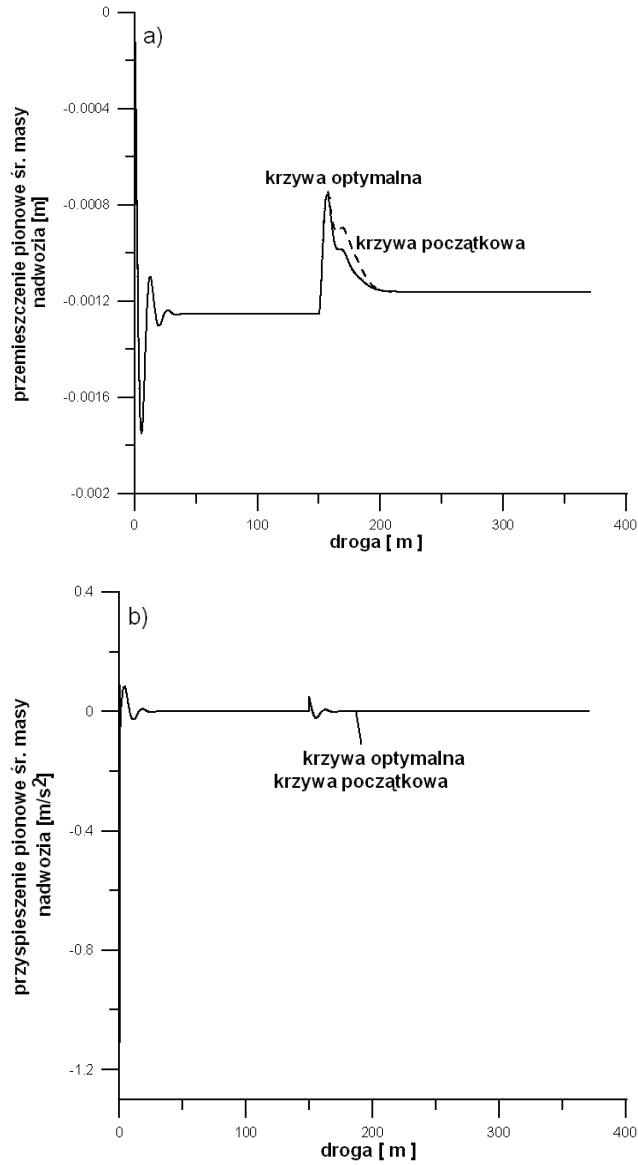
Rys. 6. Przebiegi dynamiczne: a) przemieszczenia, b) przyspieszenia pionowe środka masy nadwozia – przypadek nr 2 z tabeli 1



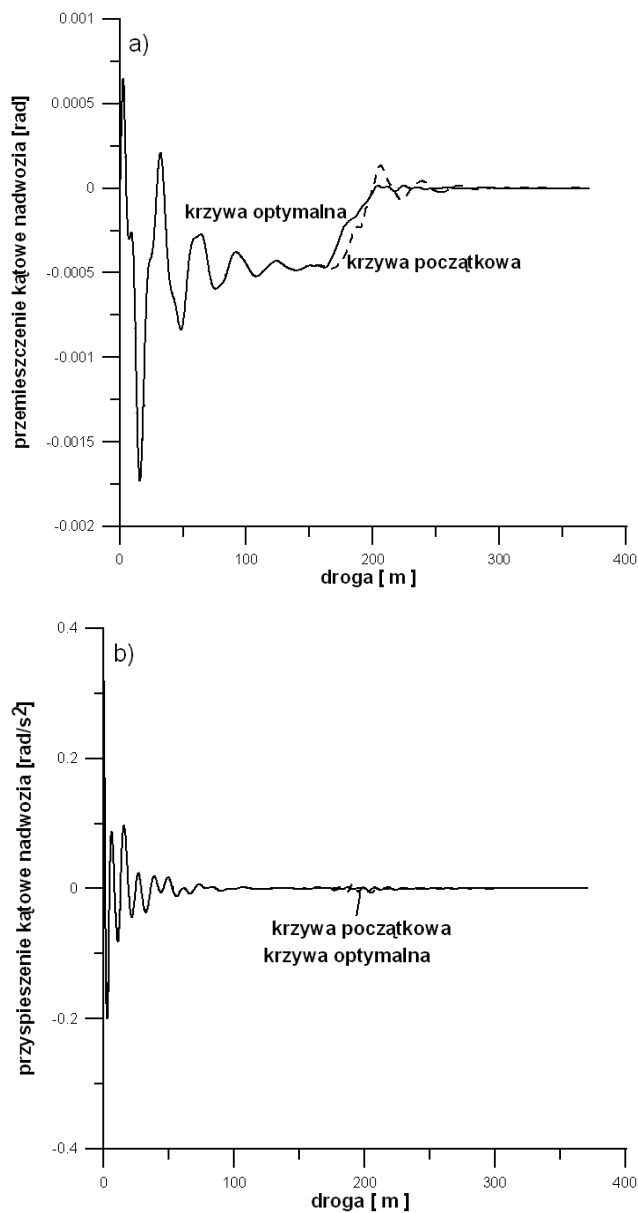
Rys. 7. Przebiegi dynamiczne: a) przemieszczenia, b) przyspieszenia pionowe środka masy nadwozia – przypadek nr 2 z tabeli 1



Rys. 8. Przebiegi dynamiczne: a) przemieszczenia, b) przyspieszenia poprzeczne środka masy nadwozia – przypadek nr 3 z tabeli 2



Rys. 9. Przebiegi dynamiczne: a) przemieszczenia, b) przyspieszenia pionowe środka masy nadwozia – przypadek nr 3 z tabeli 2



Rys. 10. Przebiegi dynamiczne: a) przemieszczenia, b) przyspieszenia kątowe nadwozia – przypadek nr 3 z tabeli 2

Analizując przebiegi dynamiczne z rysunków 5 – 10 widać, że optymalizacja kształtu KP wyjazdowych przyniosła założone efekty. Jest to szczególnie widoczne dla łagodniejszych przemieszczeń – tak poprzecznych, jak i pionowych środka masy nadwozia, jak i przemieszczeń kątowych nadwozia (rys. 5a – 10a). Trzeba



także przypomnieć fakt, że trasa przejazdu pojazdu składała się z łuku kołowego, krzywej przejściowej, a dopiero na końcu z toru prostego. Stąd przebiegi dynamiczne w pierwszym etapie trasy (łuku) miały, w stosunku do przebiegów w krzywej przejściowej, dużo bardziej gwałtowny charakter. Przedstawione wyniki dotyczyły kryterium  $FC_I$  (dynamika poprzeczna), ale (analizując rys. 6, 7, 9 i 10) widać, że zastosowanie tego kryterium poprawiało też dynamikę pionową pojazdu.

Warto też zwrócić uwagę na fakt, że wszystkie przebiegi dążą do ustalonej wartości w torze prostym. Były to zawsze:

- 0 [m/s<sup>2</sup>] dla wszystkich przyspieszeń,
- 0 [m] dla przemieszczeń poprzecznych środka masy nadwozia,
- 0 [rad] dla przemieszczeń kątowych nadwozia wokół osi x,
- niezerowa wartość [m] dla przemieszczeń pionowych środka masy nadwozia.

Wspomniana niezerowa wartość dla przemieszczeń pionowych środka masy nadwozia wynikała z przyjętych zerowych warunków początkowych przemieszczeń pionowych dla początku trasy.

W tabeli 4. autorzy pracy przedstawili dodatkowo wartości funkcji celu dla kryterium  $FC_I$  oraz typy krzywizn optymalnych krzywych przejściowych otrzymanych dla danego:

- promienia łuku  $R$ ,
- niezrównoważonego przyspieszenia poprzecznego w łuku  $a_{dop}$ ,
- prędkości  $v$ ,
- przechyłki w łuku  $H$ ,
- długości krzywej  $l_0$ ,
- dwu krzywych początkowych (6) i (7).

Minimalne wartości funkcji celu  $FC_I$  i odpowiadające im typy krzywizn we wspomnianej tabeli wytluczono. Są te same typy krzywizn przedstawione już w szóstych kolumnach tab. 1 – 3. Jeśli krzywizna optymalnej krzywej przejściowej posiadała, oprócz założonej na wstępie styczności typu  $G^1$  w początkowym punkcie, także taką styczność w punkcie końcowym, to oznaczono to jako (st2).

Ogólnie rzecz biorąc, w 8 z 12 analizowanych przypadków optymalne krzywe przejściowe zostały znalezione, gdy krzywą początkową była krzywa (6). W 4 przypadkach, gdy krzywą początkową była krzywa (7), optymalną krzywą zawsze była krzywa typu 2. Warto także zauważyć, że przy przyjętej krzywej (7) jako krzywej początkowej w 7 analizowanych przypadkach krzywizny optymalnych krzywych wyjazdowych posiadały ten sam typ, co krzywa (7) – 4b. Tu zatem po raz kolejny pojawia się problem (przedstawiony np. w [6]) właściwego wyboru krzywej początkowej – ile i jakie krzywe wybrać?

Tab. 4. Typy krzywizn optymalnych krzywych przejściowych

Nr	$R$ [m]	$a_{dop}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$v$ [m/s]	$H$ [mm]	$l_0$ [m]	KP początk. (6) [m/s <sup>2</sup> ]	KP początk. (7) [m/s <sup>2</sup> ]
1.	600	0,6	30,79	150	180,46	1 0,89829E-02	2 <b>0,57337E-02</b>
2.	600	0,3	27,71	150	162,36	4b <b>0,25761E-02</b>	4b 0,14859E-01
3.	600	0	24,26	150	142,15	2 <b>0,38914E-02</b>	4b 0,16724E-01
4.	600	-0,3	20,20	150	118,35	1 <b>0,60079E-02</b>	4b 0,60943E-02
5.	1200	0,6	36,17	75	105,98	1 <b>0,27409E-01</b>	2 (st2) 0,31988E-01
6.	1200	0,3	30,14	70	82,41	4b <b>0,85485E-02</b>	4b 0,52868E-01
7.	1200	0	24,26	75	71,07	2 (st2) <b>0,25112E-02</b>	4b 0,15340E-01
8.	1200	-0,3	28,57	150	167,40	1 <b>0,66865E-02</b>	4b 0,36135E-01
9.	2000	0,3	34,47	45	60,60	2 (st2) 0,19933E-01	2 <b>0,19917E-01</b>
10.	2000	0,15	30,87	50	60,29	2 (st2) 0,63771E-02	2 (st2) <b>0,63082E-02</b>
11.	2000	0	24,26	45	42,64	2 0,36686E-02	2 <b>0,32364E-02</b>
12.	2000	-0,3	30,05	115	134,99	1 <b>0,81670E-02</b>	4b 0,29614E-01

## 6. WNIOSKI

Autorzy niniejszej pracy pokazali, że optymalizacja kształtu krzywych przejściowych wyjazdowych z wykorzystaniem kryteriów  $FC_1 - FC_4$  jest możliwa. Przyjęte kryteria oceny przydatności krzywej dotyczące tak dynamiki pojazdu, jak i zużycia w kontakcie koło-szyna poprawiały funkcje celu z jednoczesną poprawą właściwości dynamicznych układu – przemieszczeń i przyspieszeń (poprzecznych oraz pionowych) – nadwozia.

W pracy otrzymano krzywe o krzywiznach typu 1, 2 i 4 dające mniejsze wartości funkcji celu niż krzywe początkowe (6) i (7). Krzywizny otrzymanych krzywych optymalnych zawsze posiadały styczność w początkowym punkcie krzywej, a styczność w punkcie końcowym tylko w wybranych przypadkach.

Niniejsza praca potwierdziła powszechny w dynamice pojazdów szynowych pogląd, że dynamika poprzeczna pojazdu nie jest sprzężona z dynamiką pionową pojazdu. Ogólnie rzecz biorąc nie da się, znając przebiegi poprzeczne elementów

pojazdu (nadwozia i zestawów kołowych), wyznaczyć analogicznych przebiegów pionowych. W niniejszej pracy zarówno dla kryteriów oceny dotyczących dynamiki poprzecznej, jak i pionowej wyniki – typy optymalnych krzywych przejściowych wyjazdowych – otrzymane dla różnych warunków optymalizacji w ogólnym przypadku były różne. Jedynie dla przypadku pierwszego z tabeli 3. otrzymane typy KP dla każdego z czterech kryteriów były takie same.

W swych dalszych pracach autorzy myślą o wielokryterialnej optymalizacji kształtu krzywych przejściowych wyjazdowych.

## LITERATURA

- [1] Koc W., Radomski R. Analiza krzywych przejściowych z nieliniowymi rampami przechyłkowymi. *Drogi Kolejowe*, 11, str. 261-267, 1985.
- [2] Long X.Y., Wei Q.C., Zheng F.Y. Dynamical analysis of railway transition curves. *Proc. IMechE part F Journal of Rail and Rapid Transit*, 224(1), str. 1-14, 2010.
- [3] Rozporządzenie MTiGM w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie - Dz.U. nr 151 poz. 987, 1998 r. z późn. zm. - Dz.U. poz. 867, 2014.
- [4] Sysak J. *Drogi Kolejowe*. PWN, Warszawa, 1982.
- [5] Woźnica P. Kształtowanie i ocena własności kolejowych krzywych przejściowych z wykorzystaniem metod optymalizacji i symulacji. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Warszawa 2012.
- [6] Zboiński K. Nieliniowa dynamika pojazdów szynowych w łuku. WNITE, Warszawa-Radom 2012.
- [7] Zboiński K., Woźnica P. Optimisation of railway polynomial transition curves: a method and results. In J. Pombo, (Editor), *Proceedings of the First International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, Civil-Comp Press, Stirlingshire, 2012.
- [8] Zboiński K., Woźnica P. Optimisation of the railway transition curves' shape with use of vehicle-track dynamical model. *Archives of Transport*, 22(3), str. 387-407, 2010.

## OPTIMIZATION OF RAILWAY EXIT TRANSITION CURVES

### Summary

This paper concerns the optimization of the shape of railway exit transition curves (TCs). Exit TCs meant TCs being directly behind the circular arc, and directly before the straight track. As transition curves, the authors used the polynomial of 9<sup>th</sup> degree. In the optimization of the shape of the curves, the model of 2-axle rail vehicle was used. The research was performed for three circular arc values and four objective functions. The paper presents the results of the optimization - the types of curvatures of the optimum reverse transition curves and the dynamical courses - the displacements and the accelerations both lateral and vertical of the vehicle body mass centres.

Keywords: railway exit transition curves, rail vehicle dynamics, computer simulation

## Dane autorów:

Dr inż. Piotr Woźnica

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Zakład Infrastruktury Transportu

e-mail: pwoznica@wt.pw.edu.pl

telefon: +48 22 234 7020

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Zboński

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Zakład Infrastruktury Transportu

e-mail: kzb@wt.pw.edu.pl

telefon: +48 22 234 7078