

Kolejowe wyjazdowe krzywe przejściowe, a dynamika poprzeczna pojazdu

Piotr WOŹNICA¹, Krzysztof ZBOIŃSKI²

Streszczenie

Artykuł dotyczy optymalizacji kształtu kolejowych krzywych przejściowych (KP) wyjazdowych. Określenie „wyjazdowa” w stosunku do krzywej przejściowej odnosi się do zasadniczego kierunku jazdy pojazdów szynowych, tj. od łuku kołowego do prostej. Kształt krzywych przejściowych wyjazdowych opisano wielomianem 9. stopnia. W optymalizacji kształtu krzywych wykorzystano model dwuosioowego pojazdu szynowego. Jako funkcje celu, przyjęto znormalizowaną po długości drogi wartość całki z wartości bezwzględnej zarówno przyspieszenia poprzecznego nadwozia, jak i jego zmiany. W artykule przedstawiono wyniki optymalizacji kształtu krzywych wyjazdowych: typy optymalnych krzywizn krzywych przejściowych wyjazdowych oraz przebiegi dynamiczne – przemieszczenia i przyspieszenia poprzeczne, i pionowe środka masy nadwozia.

Słowa kluczowe: kolejowe krzywe przejściowe wyjazdowe, dynamika pojazdów szynowych, optymalizacja

1. Wstęp

Tematyką kolejowych krzywych przejściowych zajmują się badacze zarówno w kraju, np. [2, 11, 12], jak i za granicą [1, 3–5, 10]. Przyczynkiem do niniejszego artykułu jest praca [9], poświęcona badaniom właściwości dynamicznych kolejowych wielomianowych krzywych przejściowych (KP) wyjazdowych. Określenie „wyjazdowa” w stosunku do KP odnosi się do zasadniczego kierunku jazdy pojazdów szynowych, tj. od łuku kołowego do toru prostego. W badaniach do oceny właściwości kształtu KP wykorzystano model, opracowany przez jednego z autorów artykułu, dwuosioowego pojazdu szynowego towarowego. Model ten wybrano dlatego, że w porównaniu do modelu wagonu czterosioowego, charakteryzuje się dużo krótszymi czasami obliczeń [12]. Jako kryteria oceny, zastosowano funkcje celu zawierające wielkości dynamiczne (przyspieszenia środka masy nadwozia pojazdu), jak i zużyciowe (poślizgi w kontakcie koło – szyna).

Przyjęte kryteria oceny przydatności krzywej poprawiały funkcje celu z jednoczesną poprawą właściwości dynamicznych układu – przemieszczeń i przyspieszeń (poprzecznych oraz pionowych) nadwozia pojazdu. W pracy [9] pokazano, że optymalizacja kształtu KP wyjazdowych z wykorzystaniem wspomnianych kryteriów jest możliwa. Otrzymano kolejowe KP o krzywiznach dających mniejsze wartości

funkcji celu niż początkowe zastosowane KP. Krzywizny otrzymanych optymalnych KP wyjazdowych zawsze miały gładkość (styczność typu G^1) w początkowym punkcie krzywej i tylko w części badanych przypadków gładkość w punkcie końcowym.

2. Cel artykułu

Celem niniejszego artykułu jest zbadanie, dlaczego część krzywizn optymalnych krzywych przejściowych otrzymanych w pracy [9] miała gładkość w punkcie końcowym krzywej, a część nie. W artykule dokonano optymalizacji krzywych przejściowych wyjazdowych o postaci wielomianu stopnia 9. z wykorzystaniem modelu pojazdu szynowego oraz kryteriów dynamicznych. Dążono do tego, aby minimalizować wartości dwóch funkcji celu, które spośród 4 funkcji użytych w [9], jawiły się autorom artykułu jako najważniejsze. Jako wspomniane kryteria oceny (funkcje celu) zastosowano:

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

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

¹ Dr inż.; Politechnika Warszawska, Wydział Transportu; e-mail: pwoznica@wt.pw.edu.pl.

² Prof. dr hab. inż.; Politechnika Warszawska, Wydział Transportu; e-mail: kzb@wt.pw.edu.pl.

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

$$FC_2 = L_C^{-1} \int_0^{L_C} |\ddot{y}_b| dl. \quad (2)$$

We wzorach (1) i (2) przyjęto następujące oznaczenia:

- L_C – długość drogi uwzględnianej w obliczeniu funkcji celu [m],
- \ddot{y}_b – przyspieszenie poprzeczne środka masy nadwozia pojazdu [m/s²],
- \ddot{y}_b – zmiana przyspieszenia poprzecznego środka masy pojazdu [m/s³].

Każda pojedyncza symulacja wchodząca w skład optymalizacji polegała na przejeździe pojazdu po trasie składającej się z:

- łuku kołowego ŁK (długość 150 m),
- KP (długość l_0),
- toru prostego TP (długość 150 m).

Zaznaczyć należy, że w pracy [9] na długość drogi L_C niezbędną do obliczenia funkcji celu składały się: długość krzywej przejściowej i długość toru prostego. W artykule funkcja celu była liczona tylko podczas przejazdu po torze prostym. Rozróżnienie to miało pokazać, jaka będzie w torze prostym odpowiedź dynamiczna pojazdu na załom krzywizny w punkcie końcowym krzywej (w punkcie początkowym toru prostego).

3. Hipoteza badawcza

W artykule postawiono hipotezę badawczą, dotyczącą zasadności stosowania krzywych przejściowych niespełniających warunku styczności krzywizny w skrajnych punktach KP. Warto zwrócić uwagę na fakt, że kształt funkcji krzywizny nie odwzorowuje trajektorii ruchu pojazdu w płaszczyźnie poziomej. Odwzorowuje go współrzędna y KP. Inaczej mówiąc załom krzywizny, w odróżnieniu od załomu w funkcji przechyłki, nie oznacza bezpośredniego załomu w trajektorii ruchu. Pomimo faktu, że załom krzywizny nie dotyczy w sposób bezpośredni trajektorii pojazdu, to spełnia on istotną rolę w procesie dynamicznej odpowiedzi pojazdu podczas zjazdu z krzywej przejściowej bądź wjazdu na nią. Wielkość ta ma ważną interpretację fizyczną i może mieć wpływ na zachowanie dynamiczne, jednak wydaje się on mniejszy niż w przypadku załomów bezpośrednio w trajektorii ruchu (torze). Stąd większe znaczenie powinny mieć raczej załomy związane z kształto-

waniem krzywej przejściowej i rampy przechyłkowej. Wydaje się, że potwierdzeniem tego rozumowania są wyniki badań i komentarze w pracy [5]. Autorzy stwierdzają ponadto, że zwłaszcza dla kolei dużych prędkości, ukształtowanie KP w płaszczyźnie pionowej wymaga spełnienia wyższych wymagań niż w kierunku poprzecznym. W konsekwencji dla rampy przechyłkowej proponują oni krzywą o 2 stopnie wyższą niż dla krzywizny. Niezależnie od tego, dla kolei konwencjonalnej, autorzy [5] konkludują na podstawie symulacji dynamiki pojazdu, że KP wielomianowe wzorcowe i KP trygonometryczne nie wykazują wyższości nad parabolą 3. stopnia o liniowej rampie przechyłkowej.

4. Typ krzywej przejściowej, model pojazdu szynowego oraz schemat programu przyjętego do analizy

Jak na przykład w pracach [8, 11, 12], tak i w artykule, KP przedstawiono w postaci następującego równania:

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

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.

Jak wspomniano, w badaniach wykorzystano jeden model wagonu dwuosowego z jednym stopniem usprężynowania. Model ten był wykorzystywany w wielu poprzednich pracach autorów i jest szczegółowo opisany, np. w [12]. Jak każdy wagon tego rodzaju, ma 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. Pierwszą jest pętla całkowania równań (symulacji). Jest ona przerywana, gdy długość l_{lim} , będąca długością bieżącą drogi, osiągnie założoną wartość. Drugą zaś jest pętla procesu optymalizacji, przerywana, gdy liczba iteracji osiągnie wartość i_{lim} . Wartość ta oznacza, że aby zakończyć proces optymalizacji, należy

wykonać i_{lim} symulacji. Jeśli optymalne rozwiązanie będzie znalezione wcześniej ($i < i_{lim}$), wtedy proces optymalizacyjny zostanie automatycznie zatrzymany.

5. Krzywe przejściowe początkowe

W poprzednich badaniach [9], wykorzystano dwie KP początkowe stopnia 9. Pierwszą jest KP o krzywiznie przedstawionej za pomocą wzoru (4):

$$k(l) = \frac{1}{R} \left(1 + 20 \left(\frac{l}{l_0} \right)^7 - 70 \left(\frac{l}{l_0} \right)^6 + 84 \left(\frac{l}{l_0} \right)^5 - 35 \left(\frac{l}{l_0} \right)^4 \right). \quad (4)$$

Krzywiznę tę otrzymano, wykonując symetrię środkową krzywizny k_{stand} standardowej KP stopnia 9 [5] względem punktu $l_0/2, 1/(2R)$.

Zatem $k(l) = k_{stand}(l_0 - l)$. Graficznie przedstawiono ją na rysunku 1a jako krzywiznę 1. Drugą jest krzywa o krzywiznie przedstawionej za pomocą wzoru (5):

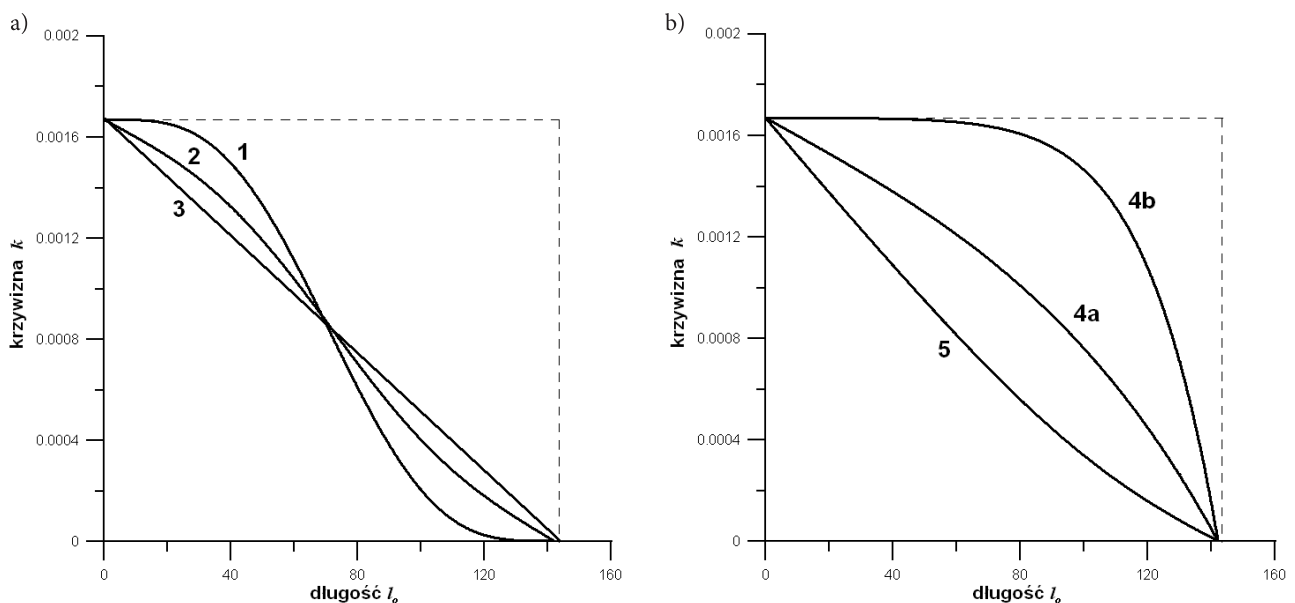
$$k(l) = \frac{1}{R} \left(1 - 1,5339 \times \left(\frac{l}{l_0} \right)^7 + 0,1978 \times \left(\frac{l}{l_0} \right)^6 + 0,5246 \times \left(\frac{l}{l_0} \right)^5 - 0,1684 \times \left(\frac{l}{l_0} \right)^4 \right). \quad (5)$$

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 $h(l_0) = 0$.

Tradycyjnie, na wyniki z poszczególnych procesów optymalizacji kształtu KP składały się: optymalne współczynniki wielomianu, wartości funkcji celu, graficzna reprezentacja krzywej i dynamika środka masy nadwozia.

Założono, że każda KP uzyskana w badaniu ma krzywiznę oraz rampę przechyłkową, która będzie zakwalifikowana do jednej z 5 grup. Rozróżnienie miało charakter jakościowy, tzn. wybrano krzywizny z i bez styczności w skrajnych punktach oraz z punktami przegięcia. Wspomniane 5 grup (typów) to (rys. 1a, b):

- typ 1 – krzywizna jest w praktyce zbliżona do krzywizny (4),
- typ 2 – krzywizna ma kształt pośredni pomiędzy krzywizną wzorcową [5], 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, krzywizna typu 4b jest krzywizną ze wzoru (5),
- 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 [opracowanie własne]

6. Wyniki badań

Celem niniejszego rozdziału jest zaprezentowanie wyników badań dotyczących optymalizacji kształtu krzywych przejściowych wyjazdowych z wykorzystaniem modelu pojazdu szynowego oraz kryteriów FC_1 i FC_2 . Wykonano 48 procesów optymalizacji. Liczba ta wynikała z iloczynu:

- 3 promieni łuku kołowego R – 600 m, 1200 m i 2000 m,
- 4 prędkości pojazdu (dla każdego promienia) v ,
- 2 funkcji celu,
- 2 punktów startowych w procesie optymalizacji, krzywe (4) i (5).

Dla każdego promienia, każdej prędkości i funkcji celu zawsze wykonywano dwie optymalizacje. W tabelicy 1 przedstawiono wyniki optymalizacji – typy krzywizn optymalnych KP otrzymanych podczas optymalizacji kształtu. Dla danego kryterium, krzywe o mniejszej wartości FC pogrubiono. W sześciu przypadkach, dla danej FC oraz warunków symulacji, program znalazł KP z innymi typami krzywizn. Jeśli krzywizna była styczna tylko w punkcie początkowym, oznaczano to jako st1. Jeśli była styczna w obu skrajnych punktach, oznaczano to jako st2.

Liczba poszczególnych typów krzywizn KP kształtowała się następująco: typ 1 – 0, typ 2 – 11, typ 3 – 0, typ 4 – 13, typ 5 – 0. Zatem procedura optymaliza-

cyjna nie znalazła ani jednej KP o krzywiznach typu 1, 3 (parabola 3. stopnia) oraz 5. Już na początku badań zauważono, że parabola 3. stopnia, powszechnie stosowana w inżynierii kolejowej krzywa przejściowa [6, 7], nie wykazała korzystnych własności względem innych typów krzywych przejściowych.

Innym ważnym spostrzeżeniem jest to, że krzywizny wszystkich znalezionych optymalnych krzywych przejściowych w punkcie początkowym krzywej (końcowym łuku kołowego) miały styczność typu G^1 (typy 1, 2 i 4b). Krzywe z załomami krzywizn w punkcie końcowym nie były preferowane mimo tego, że wspomniany załom istnieje tylko w funkcji krzywizny, a nie współrzędnej y .

W punkcie końcowym krzywej (początkowym toru prostego) sytuacja nie była jednoznaczna. Procedura optymalizacyjna znajdowała zarówno krzywe, których krzywizny miały wspomnianą styczność (ciągłość typu G^1), jak i krzywe, które tej styczności nie miały. W 16 przypadkach (z 24), styczność krzywizn miała miejsce tylko w początkowym punkcie krzywej.

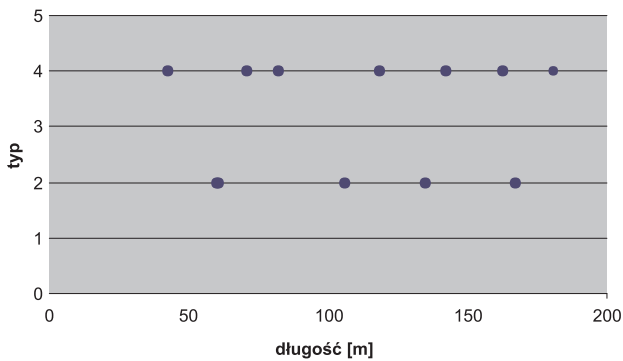
Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono typy otrzymanych optymalnych krzywizn w funkcji długości krzywej dla kryteriów FC_1 oraz FC_2 . Z rysunków widać, że typy te w funkcji długości ogólnie mają nieregularny charakter dla każdego z kryteriów i nie da się przypisać konkretnego typu krzywizny, na przykład do KP długich.

Tablica 1

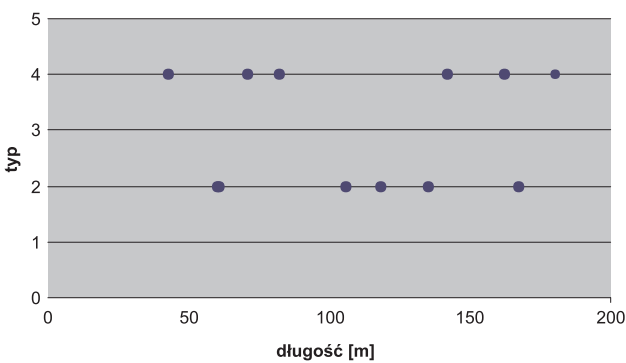
Typy krzywizn optymalnych krzywych przejściowych

Nr	R [m]	a_{dop} [m/s ²]	v [m/s]	H [mm]	l_0 [m]	FC_1		FC_2	
						KP początk. (1)	KP początk. (2)	KP początk. (1)	KP początk. (2)
1	600	0,6	30,79	150	180,46	4st1	4st1	4st1	4st1
2	600	0,3	27,71	150	162,36	4st1	4st1	4st1	4st1
3	600	0	24,26	150	142,15	4st1	4st1	4st1	4st1
4	600	-0,3	20,20	150	118,35	2st1	4st1	4st1	2st2
5	1200	0,6	36,17	75	105,98	2st1	2st1	2st1	2st2
6	1200	0,3	30,14	70	82,41	4st1	4st1	4st1	4st1
7	1200	0	24,26	75	71,07	4st1	4st1	4st1	4st1
8	1200	-0,3	28,57	150	167,40	nieregul.	2st2	4st1	2st1
9	2000	0,3	34,47	45	60,60	2st2	2st2	2st2	2st2
10	2000	0,15	30,87	50	60,29	2st2	2st2	2st2	2st2
11	2000	0	24,26	45	42,64	4st1	4st1	4st1	4st1
12	2000	-0,3	30,05	115	134,99	4st1	2st2	1	2st2

[Opracowanie własne]



Rys. 2. Typy otrzymanych krzywizn w funkcji długości dla kryterium FC_1 [opracowanie własne]



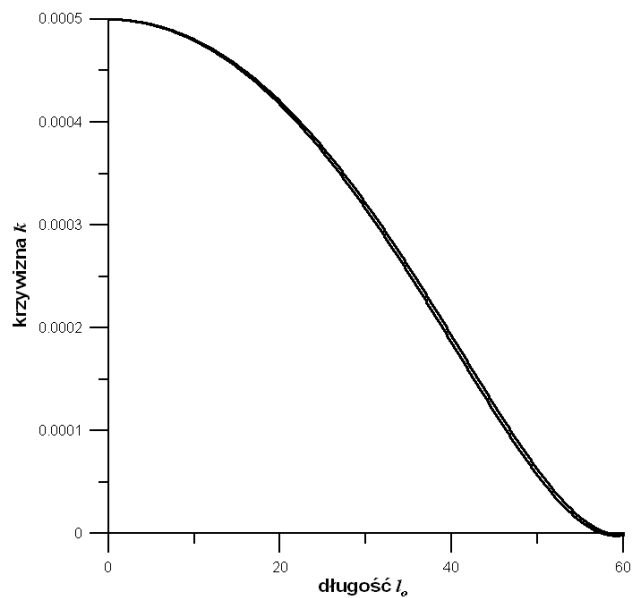
Rys. 3. Typy otrzymanych krzywizn w funkcji długości dla kryterium FC_2 [opracowanie własne]

W artykule przedstawiono również krzywizny optymalnych KP wyjazdowych i przebiegi dynamiczne dla dwóch funkcji celu dla przypadku nr 9 z tablicy 1. Były to:

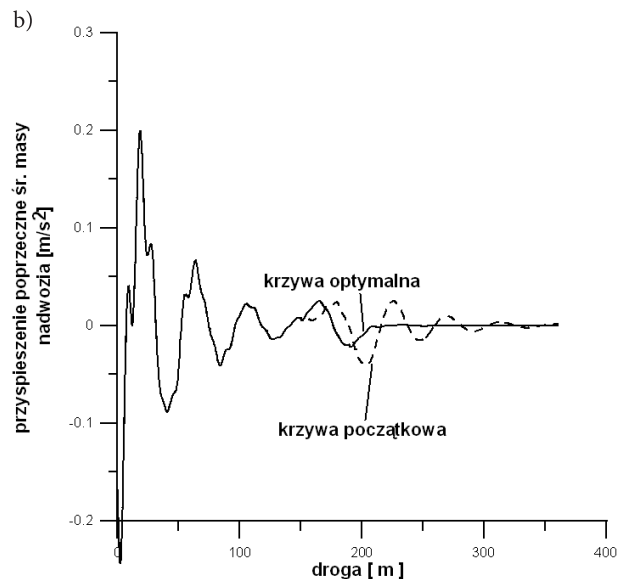
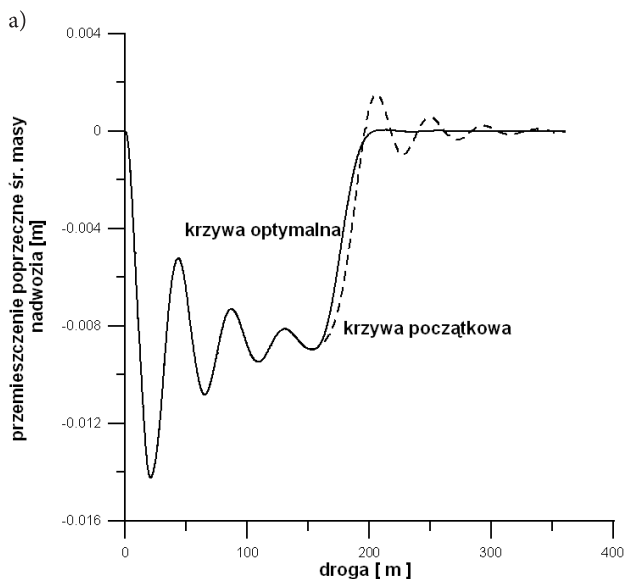
- krzywizny optymalnych KP (rys. 4),

- przemieszczenia i przyspieszenia poprzeczne środka masy nadwozia (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).

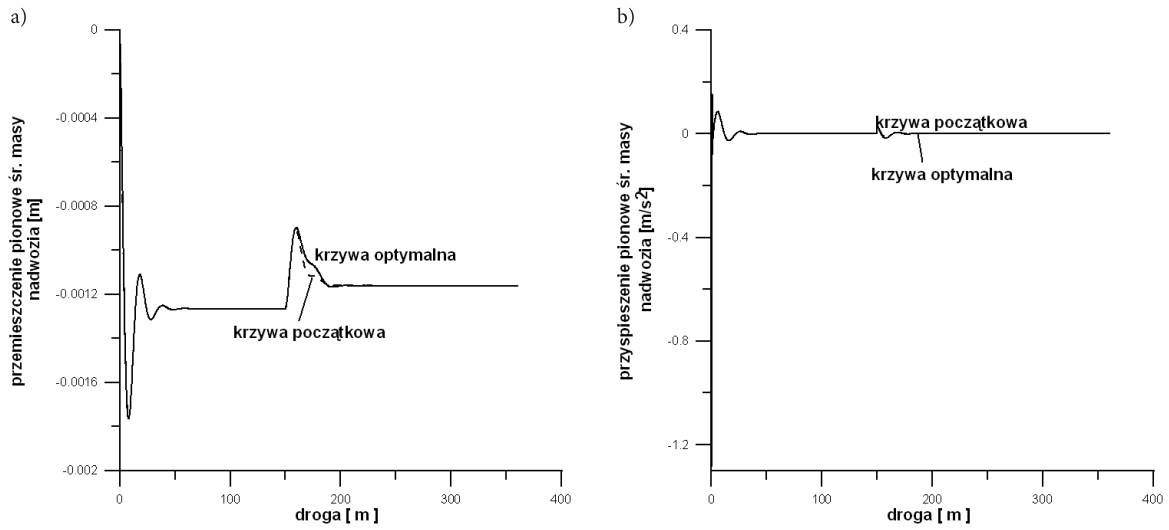
Przypadek ten wybrano dlatego, że kształty optymalnych KP dla dwóch różnych kryteriów (rys. 4) były w praktyce bardzo do siebie zbliżone.



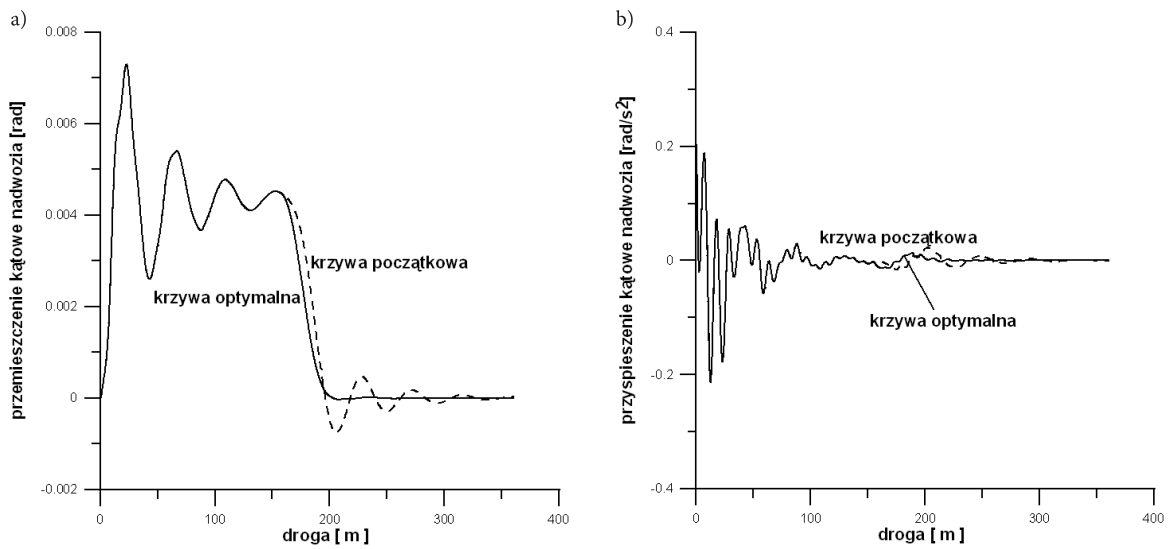
Rys. 4. Krzywizny optymalnych KP dla przypadku nr 9 z tablicy 1 [opracowanie własne]



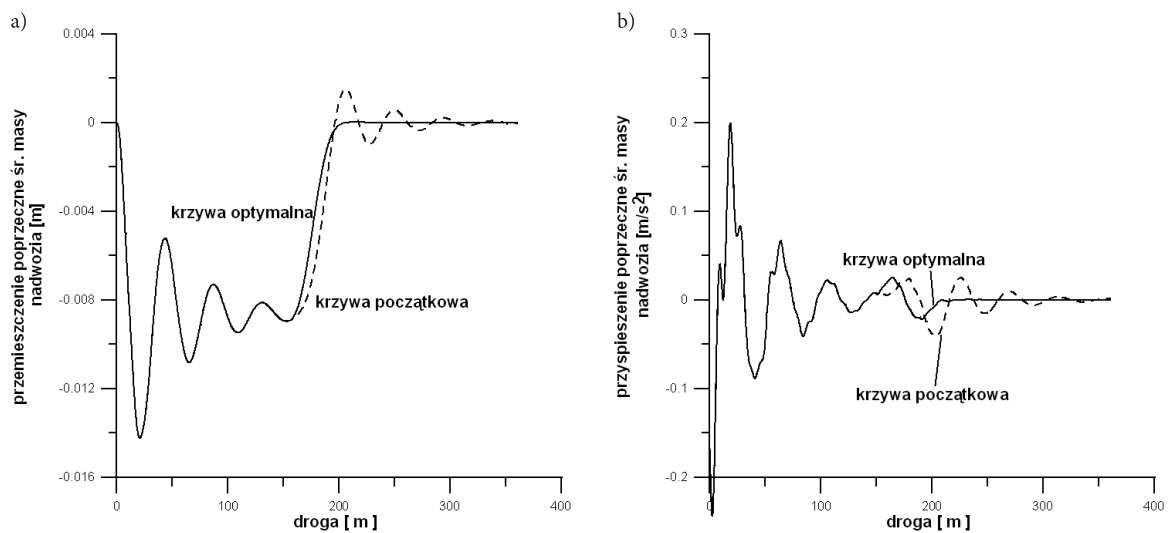
Rys. 5. Przebiegi dynamiczne: a) przemieszczenia, b) przyspieszenia poprzeczne środka masy nadwozia – FC_1 [opracowanie własne]



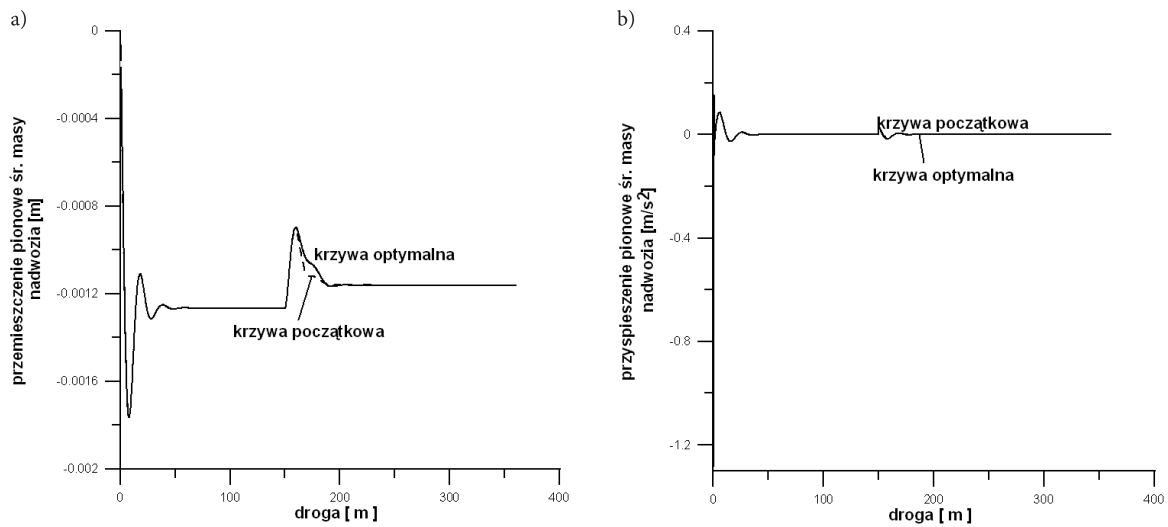
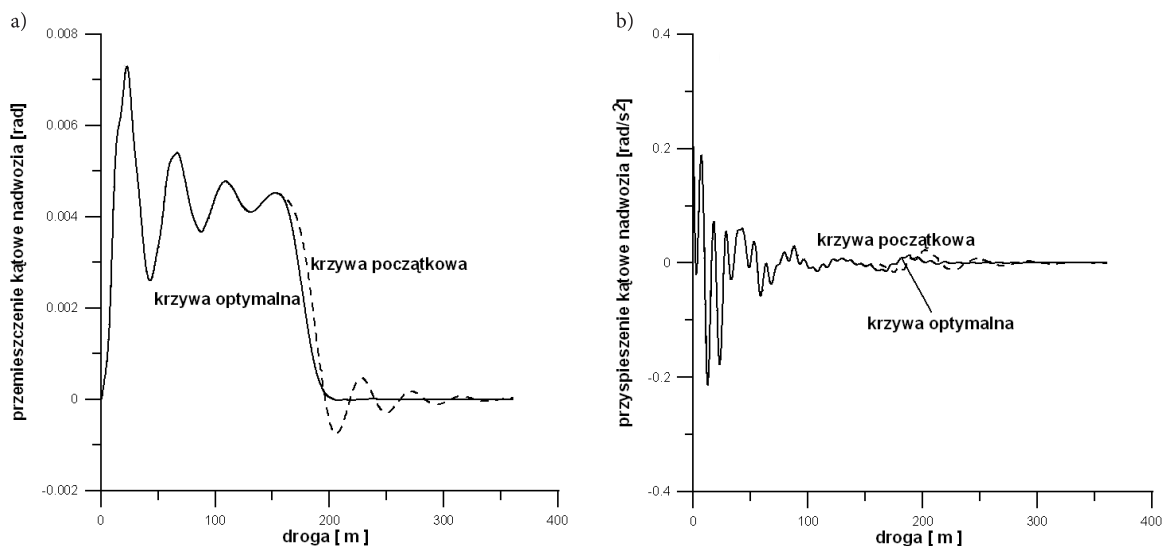
Rys. 6. Przebiegi dynamiczne: a) przemieszczenia, b) przyspieszenia pionowe środka masy nadwozia – FC_1 [opracowanie własne]



Rys. 7. Przebiegi dynamiczne: a) przemieszczenia, b) przyspieszenia kątowe nadwozia – FC_1 [opracowanie własne]



Rys. 8. Przebiegi dynamiczne: a) przemieszczenia, b) przyspieszenia poprzeczne środka masy nadwozia – FC_2 [opracowanie własne]

Rys. 9. Przebiegi dynamiczne: a) przemieszczenia, b) przyspieszenia pionowe środka masy nadwozia – FC_2 [opracowanie własne]Rys. 10. Przebiegi dynamiczne: a) przemieszczenia, b) przyspieszenia kątowe nadwozia – FC_2 [opracowanie własne]

Analizując przebiegi dynamiczne z rysunków 5–10 dostrzec należy, że optymalizacja kształtu KP wyjazdowych przyniosła założone efekty. Jest to szczególnie widoczne dla łagodniejszych przemieszczeń zarówno poprzecznych, jak i pionowych środka masy nadwozia oraz dla przemieszczeń kątowych nadwozia (rys. 5a–10a). Warto pamiętać, że trasa przejazdu pojazdu składała się z łuku kołowego, krzywej przejściowej, a dopiero na końcu z toru prostego. Przebiegi dynamiczne w pierwszym etapie trasy (łuk kołowy) miały, w stosunku do przebiegów w krzywej przejściowej, dużo bardziej gwałtowny charakter. Wzmoczona amplituda na łuku kołowym pochodziła od warunku brzegowego, nie zaś z samego faktu stałej krzywizny łuku. Przedstawione wyniki dotyczyły kryteriów FC_1 oraz FC_2 (dotyczące dynamiki poprzecznej), ale z analiz rysunków 6, 7, 9 i 10 wynika, że zastosowanie

tych kryteriów poprawiało także dynamikę pionową pojazdu.

Należy także zwrócić uwagę na fakt, że wszystkie przebiegi dynamiczne dążyły zawsze do ustalonej wartości w torze prostym. Były to zawsze:

- 0 [m/s²] 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.

7. Wnioski

Autorzy artykułu wykazali, że optymalizacja kształtu krzywych przejściowych wyjazdowych z wykorzystaniem kryteriów FC_1 i FC_2 dała oczekiwane rezultaty. Przyjęte kryteria oceny przydatności krzywej, dotyczące dynamiki poprzecznej pojazdu, poprawiały funkcje celu z jednoczesną poprawą właściwości dynamicznych układu – przemieszczeń i przyspieszeń (poprzecznych oraz pionowych) nadwozia.

Otrzymano krzywe o krzywiznach typu 2 i 4b dające mniejsze wartości funkcji celu niż krzywe początkowe (4) i (5). Krzywizny otrzymanych krzywych optymalnych zawsze miały styczność w początkowym punkcie krzywej, a styczność w punkcie końcowym krzywej tylko w wybranych przypadkach. Zatem istnienie załomu krzywizny w punkcie końcowym krzywej nie pogarszało dynamiki pojazdu w torze prostym.

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki, uzyskane zarówno dla kryteriów oceny dotyczącej przyspieszeń poprzecznych, jak i zmian tego przyspieszenia, w postaci typów optymalnych krzywych przejściowych wyjazdowych, otrzymane dla różnych warunków optymalizacji, w ogólnym przypadku były różne. Nie udało się znaleźć jednej konkretnej krzywej przejściowej, która by minimalizowała wartości przyjętych funkcji celu FC .

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

Literatura

1. Eliou N., Kaliabetsos G.: *A new, simple and accurate transition curve type, for use in road and railway alignment design*, European Transport Research Review, 6(2), str. 171–179, 2014.
2. Koc W., Radomski R.: *Analiza krzywych przejściowych z nieliniowymi rampami przechyłkowymi*, Drogi Kolejowe, nr 11/1985, str. 261–267.
3. Li, X., Li, M., Bu, J., Shang, Y., and Chen, M.: *A general method for designing railway transition curve algebraic equations*, Proc. of ICCTP 2010, pp. 3340–3348, 2010.
4. Li X., Li M., Bu J., Wang H.: *Comparative analysis on the linetype mechanical performances of two railway transition curves*, China Railway Sciences, issue 6, 2009.
5. 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), 2010, str. 1–14.
6. 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.
7. Sysak J.: *Drogi Kolejowe*, PWN, Warszawa 1982.
8. Woźnica P.: *Kształtowanie i ocena własności kolejowych krzywych przejściowych z wykorzystaniem metod optymalizacji i symulacji*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Warszawa 2012.
9. Woźnica P., Zboiński K.: *Optymalizacja kolejowych krzywych przejściowych wyjazdowych*, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, nr 25/2017, str. 433–452.
10. Zhang J.Q., Huang Y.H., Li F.: *Influence of transition curves on dynamics performance of railway vehicle*, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 10(4), str. 39–44, 2010.
11. Zboiński K.: *Nieliniowa dynamika pojazdów szynowych w łuku*, WNITE, Warszawa-Radom 2012.
12. Zboiński K., Woźnica P.: *Combined use of dynamical simulation and optimisation to form railway transition curves*, Vehicle System Dynamics, DOI: 10.1080/00423114.2017.1421315, 2018.

Optimization of Railway Exit Transition Curves and Lateral Railway Vehicle Dynamics

Summary

The current 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 9th degree. In the optimization of the shape of the TCs, the model of 2-axle rail vehicle was used. The mentioned objective functions concerned the normalised value of the integral of the lateral acceleration of vehicle body along the route and its change. The paper presents the results of the optimization – the types of curvatures of the optimum exit 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, optimization

Железнодорожные выездные переходные кривые а поперечная динамика единицы подвижного состава

Резюме

Настоящая работа касается оптимизации формы переходных кривых выездных. Определение выездная по отнесении к переходной кривой касается основного направления движения рельсового транспортного средства, т.е. от дуги окружности до прямой линии. В работе как выездные переходные кривые был принят многочлен 9 степени. В оптимизации формы кривых была использована модель двухосной единицы подвижного состава. Упомянутые функции цели касались стандартизированного по длине пути значения интеграла с абсолютным значением поперечного ускорения кузова и его изменений. В работе были представлены результаты оптимизации формы кривых выездных – типы оптимальных переходных кривых выездных и динамические пробеги – смещения и ускорения так поперечные, как и вертикальные по отношению к середине массы кузова.

Ключевые слова: железнодорожные выездные переходные кривые, динамика единиц подвижного состава, оптимизация