

Prędkość jazdy pociągów na połączeniach torów równoległych z wykorzystaniem rozjazdów łukowych

Władysław KOC¹

Streszczenie

W artykule opisano problem łączenia równoległych torów szlakowych położonych w łuku kołowym za pomocą rozjazdów łukowych. Szczególną uwagę zwrócono na wyznaczenie możliwej do uzyskania prędkości jazdy pociągów. W przeprowadzonej analizie wykorzystano wybrane przypadki układów geometrycznych. Określono wartości promieni torów zwrotnych rozjazdów łukowych i wyznaczono odpowiednie prędkości jazdy pociągów. Wykorzystano przy tym zapis analityczny, który stwarza większe możliwości aplikacyjne w konkretnych zastosowaniach. Wykazano, że prędkość jazdy pociągów na połączeniach torów równoległych zależy od typu rozjazdu podstawowego poddanego łukowaniu (czyli przede wszystkim od promienia tego rozjazdu), drugim bardzo istotnym czynnikiem zaś jest wartość zastosowanej przechyłki toru. W każdym przypadku wyznaczona prędkość, wynikająca z promienia toru zwrotnego, jest mniejsza niż prędkość na torach szlakowych. Opisując ogólne zasady konstruowania połączeń torów równoległych w łuku kołowym z wykorzystaniem rozjazdów łukowych podkreślono, że w niektórych sytuacjach prędkość jazdy musi ulec dalszemu ograniczeniu na skutek konieczności połączenia końców torów zwrotnych za pomocą łuku kołowego.

Słowa kluczowe: rozjazdy kolejowe, łukowanie rozjazdów, analiza prędkości, łączenie torów zwrotnych

1. Wprowadzenie

W opisaney w wielu publikacjach, np. [1–2, 17, 20, 22, 24] problematyce rozjazdów kolejowych, zazwyczaj mniej uwagi poświęca się zagadnieniom związanym z łukowaniem rozjazdów i zastosowaniem rozjazdów łukowych do łączenia ze sobą torów położonych w łuku kołowym. Temat ten jest przedstawiony jedynie w niektórych publikacjach [3, 10, 15, 19, 21]. Obowiązujące normy i przepisy kolejowe [4, 8, 26] wprowadzają dla rozjazdów łukowych istotne ograniczenia aplikacyjne. Dopuszcza się ich stosowanie jedynie w przypadkach mających ekonomiczne uzasadnienie, tj. wtedy gdy zastosowanie rozjazdów podstawowych spowodowałoby m.in. wprowadzenie lokalnego ograniczenia prędkości, nadmierne wydłużenie lub przesunięcie głowicy rozjazdowej lub posterunku ruchu, wykonanie dodatkowych robót ziemnych lub konieczność uzyskania nowego terenu (wynikająca z potrzeby przesunięcia lub zmiany przebiegu układu torowego) oraz kolizję z istniejącymi elementami infrastruktury (np. obiektami inżynieryjnymi).

Pomimo wymienionych ograniczeń aplikacyjnych, problematyka rozjazdów łukowych jest ważnym

zagadnieniem z zakresu nawierzchni kolejowej. Ma ona charakter uniwersalny i w każdym zarządzie kolejowym musi być traktowana w identyczny sposób. Oczywiście dotyczy to również kwestii dotyczących podstaw teoretycznych opisanego zagadnienia.

W Polsce, przez kilkadziesiąt lat, podstawowym, powszechnie uznanym opracowaniem traktującym o problematyce rozjazdów łukowych była książka Władysława Rzepki pt. „Rozjazdy łukowe w planie i profilu” [23]. Jest to w istocie dzieło wyjątkowe, podejmujące opisany problem w sposób kompleksowy, z analizą licznych rozpatrywanych przypadków. Każda rozpatrywana sytuacja ma swój schemat geometryczny, który jest podstawą do wyznaczania odpowiedniego zapisu symbolicznego. Należy zauważyć, że pojawiające się w następnych latach publikacje, które zawierały elementy poruszanego zagadnienia, nie wносиły już w zasadzie nic nowego, lecz traktowały publikację [23] jako wzorcową i tylko na nią powoływały się. Odnosi się to zarówno do ostatniego wydania książki [16], jak również na przykład publikacji [27] z 2015 roku.

Obszerność wymienionego opracowania, w którym poddano analizie wiele różnych przypadków,

¹ Prof. dr hab. inż.; Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów; e-mail: kocwl@pg.edu.pl.

skłania do postawienia pytania, w jakim zakresie jego autor wykorzystał własne przemyślenia, a w jakim skorzystał z rozwiązań innych autorów. Po upływie tylu lat nie otrzymamy już na nie odpowiedzi, jednak jak należy sądzić na podstawie załączonych pozycji bibliograficznych, przedstawiono w nim aktualny wówczas stan wiedzy, będący w dużej mierze prezentacją osiągnięć z lat 30. i 40. XX wieku. Autor książki przytoczył konkretne, niemieckojęzyczne prace [5–7, 9, 18, 25] i powołał się na nieokreślone artykuły w czasopiśmie: „Bahningenieur”, „Eisenbahnbau”, „Eisenbahn” i „Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens”.

W dotychczasowych osiągnięciach przejawia się jedna, charakterystyczna prawidłowość. Odpowiednie zależności teoretyczne są wyznaczane na podstawie schematów geometrycznych, przy wykorzystaniu ich podstawowych właściwości (okręgi, trójkąty prostokątne, podobieństwa trójkątów). Brakuje w nich jednak elementów geometrii analitycznej, w uzyskanych wzorach unika się nawet stosowania funkcji trygonometrycznych. W związku z tym nasuwa się nieodparty wniosek, że opracowana teoria została dostosowana do ówczesnych możliwości obliczeniowych.

Radykalną zmianę podejścia do opisanego zagadnienia przedstawiono w pracach [12–14]. Zastosowano w nich zapis analityczny do wyznaczania odpowiednich parametrów geometrycznych łukowanego rozjazdu. W szczególowy sposób rozpatrzono trzy możliwe warianty łukowania rozjazdu:

- 1) łukowanie jednostronne, w którym łuk toru zasadniczego rozjazdu o promieniu R jest zgodny z łukiem toru zwrotnego o promieniu R_0 w rozjeździe podstawowym (wariant I),
- 2) łukowanie dwustronne, w którym łuk toru zasadniczego rozjazdu o promieniu R jest skierowany przeciwnie względem łuku toru zwrotnego o promieniu R_0 w rozjeździe podstawowym, przy czym występuje warunek $R > R_0$ (wariant II),
- 3) łukowanie jednostronne, w którym łuk toru zasadniczego rozjazdu o promieniu R jest skierowany przeciwnie względem łuku toru zwrotnego o promieniu R_0 w rozjeździe podstawowym, przy czym występuje warunek $R < R_0$ (wariant III).

2. Ogólne zasady łączenia torów szlakowych położonych w łuku kołowym

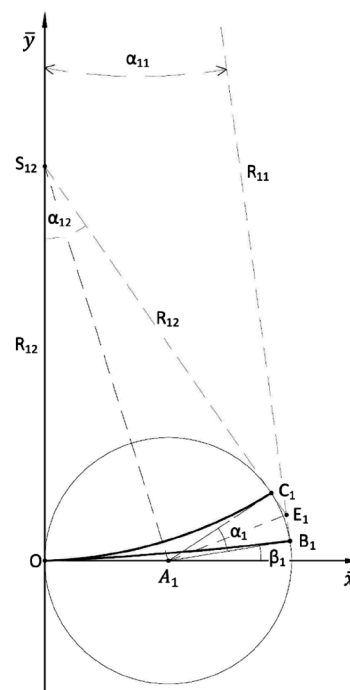
Rozjazdy łukowe powstają przez wyłukowanie obydwu torów takiego rozjazdu zwyczajnego, którego konstrukcja umożliwia przeprowadzenie tej operacji (określa się go mianem rozjazdu podstawowego). Głównym zastosowaniem rozjazdów łukowych jest łączenie za ich pomocą równoległych torów szlakowych położo-

nych w łuku kołowym. Proces konstruowania takiego układu geometrycznego obejmuje następujące fazy:

- dobór rozjazdów podstawowych do łukowania dla obydwu torów szlakowych (zewnętrznego i wewnętrznego),
- odpowiednie łukowanie wybranych rozjazdów,
- określenie właściwej lokalizacji obydwu rozjazdów łukowych w torach zewnętrznym i wewnętrznym,
- połączenie ze sobą torów zwrotnych rozjazdów łukowych za pomocą odcinków prostych i łukowych.

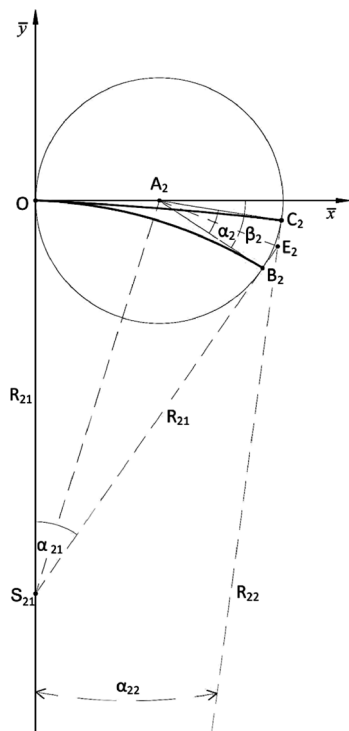
Podczas łukowania, trójkąt skosu rozjazdu ($A_1B_1C_1$ na rysunku 1 i $A_2B_2C_2$ na rysunku 2) zachowuje takie same wymiary jak w rozjeździe podstawowym, lecz zmienia się jego położenie (zostaje obrócony wokół wierzchołka A_1 lub A_2). Końce toru zasadniczego i toru zwrotnego muszą znajdować się na kole prowadzącym rozjazdu, którego środek pokrywa się ze środkiem łukowanego rozjazdu podstawowego (tj. punktem A_1 lub A_2).

W torze zewnętrznym (o nieco większej wartości promienia łuku kołowego R_z) stosuje się rozjazd wyłukowany zgodnie z kierunkiem jego toru zwrotnego – wariant I łukowania (rys. 1) [13]. Promień toru zwrotnego ulega przy tym zmniejszeniu i to właśnie on w dużym stopniu determinuje możliwą do uzyskania prędkość jazdy pociągów na połączeniu obydwu torów szlakowych. Z tego powodu, najbardziej korzystne w tym przypadku, będzie wykorzystywanie do łukowania rozjazdu podstawowego o jak największym promieniu w torze zwrotnym.



Rys. 1. Schemat łukowania rozjazdu podstawowego – wariant I: O – początek rozjazdu, A_1 – środek rozjazdu podstawowego, B_1 – koniec toru zasadniczego, C_1 – koniec toru zwrotnego, S_{12} – środek łuku toru zwrotnego [opracowanie własne]

W torze wewnętrznym (o mniejszej wartości promienia łuku kołowego R_w) stosuje się rozjazd wyłukowany w kierunku przeciwnym do jego toru zwrotnego – wariant III łukowania (rys. 2) [13]. Promień toru zwrotnego ulega przy tym istotnemu zwiększeniu. Taki sposób łukowania gwarantuje zachowanie położenia toru zasadniczego rozjazdu w torze szlakowym. Ze względu na uwarunkowania procesu łukowania, w tym przypadku można zastosować jedynie rozjazd o takim promieniu R_0 , dla którego $R_w \leq R_0$ (dla $R_w = R_0$ jego tor zwrotny stanie się torem prostym).



Rys. 2. Schemat łukowania rozjazdu podstawowego – wariant III: O – początek rozjazdu, A_2 – środek rozjazdu podstawowego, B_2 – koniec toru zasadniczego, C_2 – koniec toru zwrotnego, S_{21} – środek łuku toru zasadniczego [opracowanie własne]

Cechą, która odróżnia rozjazdy łukowe od typowych rozjazdów jest to, że mają one przechyłkę h_0 zarówno w torze zasadniczym, jak i w torze zwrotnym. Z tego względu dla jazdy po torze zasadniczym rozjazdu obowiązują takie same zasady jak dla jazdy po każdym torze położonym w łuku kołowym.

3. Określenie promieni torów zwrotnych rozjazdów łukowych

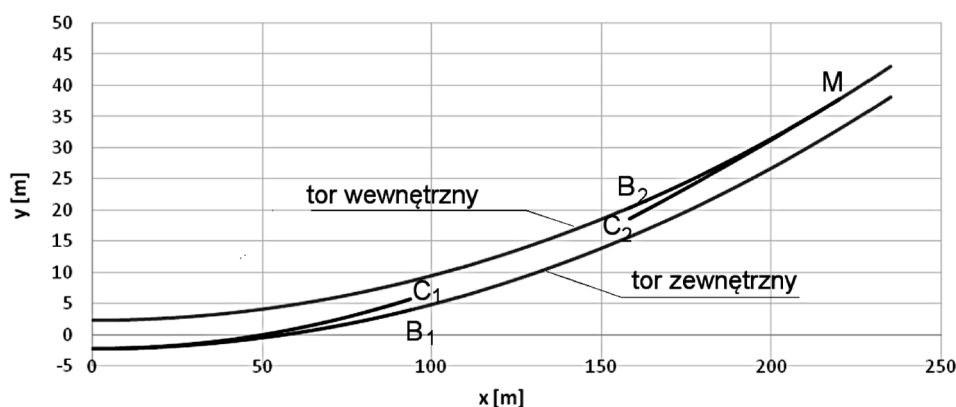
W celu wyznaczenia prędkości pojazdów dla połączenia torów szlakowych, trzeba najpierw określić promienie torów zwrotnych w odpowiednich rozjazdach łukowych. Sytuację geometryczną przedstawiono na rysunku 3.

W przyjętym układzie współrzędnych prostokątnych, początek rozjazdu łukowego w torze zewnętrznym ma odciętą równą zero, koniec jego toru zasadniczego znajduje się w punkcie B_1 , koniec toru zwrotnego zaś w punkcie C_1 . Wyznaczenia wymaga promień jego toru zwrotnego R_{12} . Początek rozjazdu łukowego w torze wewnętrznym znajduje się w punkcie M , koniec jego toru zasadniczego w punkcie B_2 , a koniec toru zwrotnego w punkcie C_2 . Należy wyznaczyć promień jego toru zwrotnego R_{22} . Promienie torów zwrotnych R_{12} (w wariantcie I łukowania) i R_{22} (w wariantcie III łukowania) określa się z następujących wzorów [13]:

Rozjazd łukowy w torze zewnętrznym

$$R_{12} = \frac{\bar{x}_{C1}^2 + \bar{y}_{C1}^2}{2\bar{y}_{C1}} \quad (1)$$

$$\bar{x}_{C1} = t_1 + \frac{t_1}{\sqrt{1 + [\tan(\alpha_1 + \alpha_{11})]^2}} \quad (2)$$



Rys. 3. Ideowy układ geometryczny torów równoległych ze wstawionymi rozjazdami łukowymi (w skali skażonej): B_1 – koniec toru zasadniczego rozjazdu w torze zewnętrznym, C_1 – koniec toru zwrotnego rozjazdu w torze zewnętrznym, B_2 – koniec toru zasadniczego rozjazdu w torze wewnętrznym, C_2 – koniec toru zwrotnego rozjazdu w torze wewnętrznym, M – początek rozjazdu w torze wewnętrznym [opracowanie własne]

$$\bar{y}_{C1} = \frac{\tan(\alpha_1 + \alpha_{11})}{\sqrt{1 + [\tan(\alpha_1 + \alpha_{11})]^2}} t_1, \quad (3)$$

$$t_1 = R_1 \tan \frac{\alpha_1}{2}, \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \arctan \frac{1}{n_1}, \quad (5)$$

$$\alpha_{11} = 2 \arctan \frac{t_1}{R_z}, \quad (6)$$

gdzie:

- R_z – promień łuku toru zewnętrznego [m],
- R_1 – promień łuku toru zwrotnego w rozjeździe podstawowym przewidzianym do wstawienia w torze zewnętrznym [m],
- R_{12} – promień łuku toru zwrotnego w rozjeździe łukowym dla toru zewnętrznego [m],
- n_1 – wartość określająca skos rozjazdu podstawowego przewidzianego do wstawienia w torze zewnętrznym,
- \bar{x}_{C1} – odcięta końca toru zwrotnego rozjazdu łukowego w torze zewnętrznym (w lokalnym układzie współrzędnych rozjazdu) [m],
- \bar{y}_{C1} – rzędna końca toru zwrotnego rozjazdu łukowego w torze zewnętrznym (w lokalnym układzie współrzędnych rozjazdu) [m],
- t_1 – długość stycznnej rozjazdu podstawowego przewidzianego do wstawienia w torze zewnętrznym [m],
- α_1 – kąt rozjazdu podstawowego przewidzianego do wstawienia w torze zewnętrznym w [rad],
- α_{11} – kąt środkowy łuku toru zasadniczego w rozjeździe łukowym dla toru zewnętrznego [rad].

Rozjazd łukowy w torze wewnętrznym

$$R_{22} = -\frac{\bar{x}_{C2}^2 + \bar{y}_{C2}^2}{2\bar{y}_{C2}}, \quad (7)$$

$$\bar{x}_{C2} = t_2 + \frac{t_2}{\sqrt{1 + [\tan(\alpha_2 + \alpha_{21})]^2}}, \quad (8)$$

$$\bar{y}_{C2} = \frac{\tan(\alpha_2 + \alpha_{21})}{\sqrt{1 + [\tan(\alpha_2 + \alpha_{21})]^2}} t_2, \quad (9)$$

$$t_2 = R_2 \tan \frac{\alpha_2}{2}, \quad (10)$$

$$\alpha_2 = \arctan \frac{1}{n_2}, \quad (11)$$

$$\alpha_{21} = 2 \arctan \frac{t_2}{R_w}, \quad (12)$$

gdzie:

- R_w – promień łuku toru wewnętrznego [m],
- R_2 – promień łuku toru zwrotnego w rozjeździe podstawowym przewidzianym do wstawienia w torze wewnętrznym [m],
- R_{22} – promień łuku toru zwrotnego w rozjeździe łukowym dla toru wewnętrznego [m],
- n_2 – wartość określająca skos rozjazdu podstawowego przewidzianego do wstawienia w torze wewnętrznym,
- \bar{x}_{C2} – odcięta końca toru zwrotnego rozjazdu łukowego w torze wewnętrznym (w lokalnym układzie współrzędnych rozjazdu) [m],
- \bar{y}_{C2} – rzędna końca toru zwrotnego rozjazdu łukowego w torze wewnętrznym (w lokalnym układzie współrzędnych rozjazdu) [m],
- t_2 – długość stycznnej rozjazdu podstawowego przewidzianego do wstawienia w torze wewnętrznym [m],
- α_2 – kąt rozjazdu podstawowego przewidzianego do wstawienia w torze wewnętrznym [rad],
- α_{21} – kąt środkowy łuku toru zasadniczego w rozjeździe łukowym dla toru wewnętrznego [rad].

4. Dobór układów geometrycznych do analizy prędkości jazdy pociągów

W analizie wykorzystano wybrane przypadki układów geometrycznych oraz następujące podstawowe wzory:

- dla łuku kołowego:

$$a_m = \frac{V^2}{(3,6)^2 R} - g \frac{h_0}{s} \leq a_{dop}, \quad (13)$$

- dla krzywej przejściowej (w postaci klotoidy):

$$\psi = \frac{a_m V}{3,6l} \leq \psi_{dop}, \quad (14)$$

$$f = \frac{h_0 V}{3,6l} \leq f_{dop}, \quad (15)$$

gdzie:

- V – prędkość jazdy pociągów [km/h],
- R – promień łuku kołowego [m],
- h_0 – wartość przechyłki na łuku kołowym [mm],

- s – rozstaw toków szynowych ($s = 1500$ mm),
 g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
 a_m – przyspieszenie niezrównoważone na łuku kołowym [m/s^2],
 a_{dop} – wartość dopuszczalna przyspieszenia [m/s^2],
 l – długość krzywej przejściowej [m],
 ψ – prędkość zmiany przyspieszenia [m/s^3],
 ψ_{dop} – wartość dopuszczalna prędkości zmiany przyspieszenia [m/s^3],
 f – prędkość podnoszenia koła taboru na rampie przechyłkowej [mm/s],
 f_{dop} – wartość dopuszczalna prędkości podnoszenia koła taboru na rampie przechyłkowej [mm/s].

W tablicy 1 przedstawiono zestawienie wybranych przypadków geometrycznych, uzyskanych dla dopuszczalnych wartości parametrów kinematycznych: $a_{dop} = 0,85$ m/s^2 , $\psi_{dop} = 0,3$ m/s^3 i $f_{dop} = 28$ mm/s. Wartości podane w tablicy 1 umożliwiają oszacowanie prędkości jazdy pociągów, jaka będzie obowiązywać w torze zasadniczym rozjazdu łukowego po jego ułożeniu w łuku kołowym. Oczywiście, liczba istniejących możliwości jest bardzo duża, a zadaną prędkość można uzyskać dla różnych kombinacji promienia łuku kołowego i przechyłki. Obowiązuje przy tym prosta zasada: im mniejszy promień łuku, tym większa wartość przechyłki i większa długość krzywej przejściowej (rampy przechyłkowej).

Rozpatrując omawiane zagadnienie należy zauważyć, że liczba typów rozjazdów podstawowych, jakie mogą być łukowane, jest bardzo ograniczona. W tablicy 2 zestawiono wartości wyznaczonych promieni torów zwrotnych

R_{12} i R_{22} dla czterech typów rozjazdów podstawowych: 1:26,5-2500, 1:18,5-1200, 1:14-760 i 1:12-500.

Z tablicy 2 wynika, że wszystkie typy rozpatrywanych rozjazdów mogą być łukowane zgodnie z kierunkiem ich toru zwrotnego (wariant I łukowania). Wyznaczone wartości R_{12} są w każdym przypadku mniejsze niż odpowiednie wartości $R_{11} = R_z$ dla ich toru zasadniczego zlokalizowanego w szlakowym torze zewnętrznym. Jednocześnie jednak są one tym większe, im większy jest promień rozjazdu podstawowego. Ponieważ promień R_{12} najczęściej decyduje o prędkości uzyskiwanej na połączeniu torów, wynika stąd wniosek, że w torze zewnętrznym należy stosować rozjazdy łukowe, wygięte z rozjazdów podstawowych o jak największym promieniu.

Tablica 2 pokazuje również, że możliwości zastosowania rozpatrywanych rozjazdów w torze wewnętrznym (w wariantcie III łukowania) są ograniczone wartościami promienia tegoż rozjazdu. Ze względu na uwarunkowania procesu łukowania, rozjazd 1:26,5-2500 może znaleźć zastosowanie dla $R_w \leq 2500$ m, przy czym dla $R_w = 2500$ m jego tor zwrotny stanie się torem prostym. Analogicznie, rozjazd 1:18,5-1200 może znaleźć zastosowanie dla $R_w \leq 1200$ m, rozjazd 1:12-760 dla $R_w \leq 760$ m, zaś rozjazd 1:12-500 dla $R_w \leq 500$ m.

Kolejnym wnioskiem wynikającym z tablicy 2 jest stwierdzenie, że wyłukowanie rozjazdu według wariantu III (o ile jest ono celowe) w każdym przypadku daje większy promień toru zwrotnego niż ma to miejsce w wariantcie I (przy takim samym promieniu rozjazdu podstawowego). Oznacza to, że promień R_{22} nie wyznacza największej prędkości możliwej do uzyskania na danym połączeniu torów.

Tablica 1

Zestawienie wybranych przypadków geometrycznych

Prędkość V [km/h]	Promień łuku R [m]	Przechyłka h_0 [mm]	Przyspieszenie a_m [m/s^2]	Długość krzywej przejściowej l [m]
200	2500	70	0,777	144
	2000	110	0,824	219
160	1500	75	0,826	123
	1200	125	0,829	199
120	1000	60	0,719	80
	700	120	0,803	143
80	600	50	0,496	40
	400	100	0,581	80

[Opracowanie własne].

Tablica 2

Zestawienie wartości wyznaczonych promieni torów zwrotnych R_{12} i R_{22} dla różnych promieni R torów szlakowych

R_0 [m]	n	R [m]	R_{12} [m]	R_{22} [m]	R_0 [m]	n	R [m]	R_{12} [m]	R_{22} [m]
2500	26,5	3000	1363	–	1200	18,5	3000	857	–
		2500	1250	∞			2500	811	–
		2000	1111	10004			2000	750	–
		1800	1046	6432			1800	720	–
		1600	975	4447			1600	685	–
		1400	897	3184			1400	646	–
		1200	810	2309			1200	600	∞
		1000	714	1668			1000	545	6005
		900	661	1408			900	514	3604
		800	605	1178			800	479	2403
		700	546	973			700	442	1682
		600	483	791			600	399	1202
		500	416	626			500	352	859
		400	344	477			400	299	601
760	14	3000	606	–	500	12	3000	428	–
		2500	583	–			2500	417	–
		2000	550	–			2000	400	–
		1800	534	–			1800	391	–
		1600	515	–			1600	381	–
		1400	492	–			1400	368	–
		1200	465	–			1200	353	–
		1000	431	–			1000	333	–
		900	411	–			900	321	–
		800	389	–			800	307	–
		700	364	8883			700	291	–
		600	335	2856			600	272	–
		500	301	1465			500	250	∞
		400	261	847			400	222	2004

[Opracowanie własne].

5. Wyznaczenie prędkości jazdy pociągów na połączeniach torów równoległych położonych w łuku kołowym

Znając przedstawione uwarunkowania, można teraz określić możliwą do uzyskania prędkość jazdy pociągów na połączeniach torów równoległych, których parametry geometryczne podano w tablicy 1. Wyznaczone prędkości jazdy zawiera tablica 3. Prędkość V_{zwr} wynika z następującego wzoru, uzyskanego z przekształcenia wzoru (13):

$$V_{zwr} = 3,6 \sqrt{\left(a_{dop} + g \frac{h_0}{s} \right) R_{12}}. \quad (16)$$

Z tablicy 3 wynika, że prędkość jazdy pociągów na połączeniach torów równoległych zależy od typu rozjazdu podstawowego poddanego łukowaniu (czyli w głównym stopniu od promienia tego rozjazdu). Drugim bardzo istotnym czynnikiem jest wartość zastosowanej przechyłki. W każdym przypadku wyznaczona prędkość V_{zwr} jest mniejsza niż prędkość na torach szlakowych.

Interesującym spostrzeżeniem jest znaczenie, jakie odgrywa tutaj przechyłka toru. Jak się okazuje, zastosowanie wyłukowanego rozjazdu podstawowego danego typu w torach szlakowych o mniejszym promieniu i odpowiednio zwiększonej przechyłce może dać lepszy efekt (tj. większą prędkość V_{zwr}) niż w przypadku wykorzystania takiego rozjazdu w torach szlakowych o promieniu większym i mniejszej

Tablica 3

Wyznaczone prędkości jazdy pociągów na połączeniach torów równoległych

Prędkość V [km/h]	Promień łuku R [m]	Przechyłka h_0 [mm]	Typ rozjazdu	Promień łuku R_{12} [m]	Prędkość V_{zwr} [km/h]
200	2500	70	1:26,5-2500	1250	145,555
			1:18,5-1200	811	117,242
			1:14-760	583	99,405
			1:12-500	417	84,070
	2000	110	1:26,5-2500	1111	150,323
			1:18,5-1200	750	123,509
			1:14-760	550	105,767
			1:12-500	400	90,198
160	1500	75	1:26,5-2500	937	127,587
			1:18,5-1200	667	107,646
			1:14-760	504	93,573
			1:12-500	375	80,715
	1200	125	1:26,5-2500	810	132,306
			1:18,5-1200	600	113,871
			1:14-760	465	100,245
			1:12-500	353	87,342
120	1000	60	1:26,5-2500	714	107,222
			1:18,5-1200	545	93,677
			1:14-760	431	83,305
			1:12-500	333	73,224
	700	120	1:26,5-2500	546	107,555
			1:18,5-1200	442	96,771
			1:14-760	364	87,818
			1:12-500	291	78,520
80	600	50	1:26,5-2500	483	85,835
			1:18,5-1200	399	78,015
			1:14-760	335	71,485
			1:12-500	272	64,413
	400	100	1:26,5-2500	344	81,885
			1:18,5-1200	299	76,342
			1:14-760	261	71,826
			1:12-500	222	65,781

[Opracowanie własne].

przechyłce. I tak dla prędkości $V = 200$ km/h rozjazd łukowy utworzony na bazie rozjazdu podstawowego 1:26,5-2500 na układzie geometrycznym $R = 2500$ m, $h_0 = 70$ mm daje możliwość jazdy na połączeniu torów równoległych z prędkością 145,555 km/h, podczas gdy na układzie $R = 2000$ m, $h_0 = 110$ mm jest to prędkość 150,323 km/h. Oczywiście trzeba mieć na względzie to, że zastosowanie większej przechyłki oznacza konieczność wprowadzenia dłuższych (i to często znacznie) krzywych przejściowych; w pierwszym przypadku będzie to $l = 144$ m, w drugim zaś $l = 219$ m. Może to stanowić istotny problem w przy-

padku układu geometrycznego, dla którego trzeba będzie wykonać wydłużenie istniejących krzywych przejściowych.

Wartości liczbowe zamieszczone w tablicy 3 umożliwiają ocenę zmniejszenia prędkości na połączeniach torów równoległych położonych w łuku. Spadek ten jest tym większy, im mniejszy jest promień rozjazdu podstawowego poddanego łukowaniu. W przeprowadzonych obliczeniach, przy prędkości na torach szlakowych $V = 200$ km/h, dla rozjazdu 1:26,5-2500 wynosi on 25÷27%, dla rozjazdu 1:18,5-1200 – 38÷41%, dla rozjazdu 1:14-760 – 47÷50%, a dla rozjazdu 1:12-500 – 55÷58%.

Nie ulega zatem wątpliwości, że w danej sytuacji najbardziej korzystne byłoby zastosowanie rozjazdu podstawowego 1:26,5-2500.

Dla mniejszych prędkości jazdy na torach szlakowych podana tendencja dalej obowiązuje, przy czym spadki prędkości są coraz mniejsze. Dla rozjazdu 1:26,5-2500 i prędkości $V = 160$ km/h spadek wynosi $17 \div 20\%$, dla $V = 120$ km/h – około 10% , a $V = 80$ km/h spadek prędkości nie występuje. W przypadku pozostałych rozpatrywanych typów rozjazdów, spadek prędkości wynosi $29 \div 50\%$ dla $V = 160$ km/h, $19 \div 39\%$ dla $V = 120$ km/h oraz $3 \div 20\%$ dla $V = 80$ km/h.

Przedstawiony tok postępowania, odnoszący się do analizy uzyskiwanej prędkości jazdy pociągów, umożliwi dobór typu rozjazdu podstawowego, którego wyłukowanie będzie najkorzystniejsze dla danej sytuacji geometrycznej.

6. Dalsze ograniczenia prędkości wynikające z zasad konstruowania połączeń torów

Ogólne zasady połączenia torów równoległych położonych w łuku kołowym – w zapisie analitycznym – zostały przedstawione w pracy [13]. Idea połączenia polega na wstawieniu dwóch rozjazdów łukowych – w torze zewnętrznym (wariant I łukowania) oraz w torze wewnętrznym (wariant III łukowania). Uzyskany efekt obrazuje rysunek 3, z którego wynika, że kluczowym zadaniem podczas tych operacji staje się połączenie ze sobą torów zwrotnych obydwu rozjazdów łukowych (czyli punktów C_1 i C_2). Kształt tego połączenia powinien odpowiadać zakładanym warunkom kinematycznym, zapewniającym płynny przejazd pociągów, bez niekorzystnych oddziaływań zewnętrznych. W pierwszym rzędzie nie powinny w nim występować łuki odwrotne.

W przyjętym układzie współrzędnych prostokątnych x, y położenie rozjazdu łukowego w torze zewnętrznym jest określone jednoznacznie. Oznacza to, że współrzędne punktu C_1 oraz wartość stycznej w tym punkcie nie ulegają zmianie podczas całego procesu wyznaczania krzywej łączącej tory zwrotne. Wielkości te korespondują bezpośrednio z efektami łukowania rozjazdu, a ściślej – z wzorami (1)÷(3).

Kluczową kwestię omawianego procesu stanowi właściwa lokalizacja rozjazdu łukowego w torze wewnętrznym, czyli znalezienie najbardziej korzystnego położenia początku tego rozjazdu (tj. punktu M). W pracy [13] podano zależności teoretyczne, umożliwiające wyznaczenie współrzędnych końca toru zwrotnego (tj. punktu C_2) oraz wartości stycznej w tym punkcie dla przyjętego dowolnego punktu M .

W takiej sytuacji postawione zadanie polega na połączeniu punktu C_1 o współrzędnych x_{C_1}, y_{C_1} i na-

chyleniu stycznej s_{C_1} z punktem C_2 o współrzędnych x_{C_2}, y_{C_2} i nachyleniu stycznej s_{C_2} . Przykładowy układ geometryczny pokazany na rysunku 3 powstał na podstawie zależności teoretycznych z pracy [13] i dotyczył dwóch równoległych torów szlakowych o promieniach $R_z = 702,295$ m i $R_w = 697,705$ m, z wyłukownym rozjazdem 1:26,5-2500 w torze zewnętrznym i rozjazdem 1:18,5-1200 w torze wewnętrznym. Wartości promieni R_z i R_w wynikają z założonego promienia łuku kołowego przebiegającego środkiem międzytorza ($R = 700$ m) i szerokości międzytorza powiększonej z tytułu położenia torów szlakowych w łuku ($d = 4,59$ m). Przyjęte współrzędne początku rozjazdu łukowego w torze wewnętrznym są następujące: $x_M = 220$ m, $y_M = 37,893$ m.

Podstawowy warunek dotyczący właściwego połączenia torów zwrotnych rozjazdów łukowych jest związany z relacją wartości nachyleń stycznych s_{C_1} i s_{C_2} . Powinna ona mieć postać $s_{C_2} \geq s_{C_1}$. W przypadku $s_{C_2} < s_{C_1}$ w układzie geometrycznym pojawia się krzywizna odwrotna, której z założenia nie można akceptować. Dla $s_{C_2} > s_{C_1}$ charakter krzywizny występujący na połączeniu jest zgodny z krzywizną torów zwrotnych rozjazdów. Przy $s_{C_2} = s_{C_1}$ pojawia się możliwość połączenia torów za pomocą wstawki prostej, jeżeli tylko uda się wzajemnie dostosować rzędne y_{C_1} i y_{C_2} .

Przeprowadzona w pracy [11] analiza skuteczności metod łączenia torów na liniach kolejowych położonych w łuku kołowym wykazała, że najbardziej korzystnym rozwiązaniem jest połączenie końców torów zwrotnych za pomocą łuku kołowego. W przypadku wykorzystywania dwóch wyłukowanych rozjazdów podstawowych tego samego typu, wymagany promień R_{13} łuku kołowego, który łączy końce obydwu torów zwrotnych, jest większy od promienia R_{12} i stąd nie powoduje konieczności ograniczenia prędkości jazdy pociągów. Natomiast przy wykorzystywaniu w torze zewnętrznym innego typu rozjazdu podstawowego niż w torze wewnętrznym, wymagany promień R_{13} okazuje się mniejszy od promienia R_{12} ; pojawia się zatem potrzeba dalszego ograniczenia prędkości jazdy.

Prosta styczna na końcu toru zwrotnego rozjazdu łukowego w zewnętrznym torze szlakowym ma być w założeniu również prostą styczną do wprowadzanego łuku kołowego o promieniu R_{13} . Promień tego łuku leży na prostej o równaniu:

$$y(x) = y_{C_1} - \frac{1}{s_{C_1}}(x - x_{C_1}), \quad (17)$$

w odległości R_{13} od punktu C_1 . Wynikają stąd współrzędne środka łuku:

$$x_{S_{13}} = x_{C_1} - \frac{s_{C_1}}{\sqrt{1 + s_{C_1}^2}} R_{13}, \quad (18)$$

$$y_{S13} = y_{C1} + \frac{1}{\sqrt{1+s_{C1}^2}} R_{13}. \quad (19)$$

Łuk kołowy jest opisany wzorem:

$$y(x) = y_{S13} - \sqrt{R_{S13}^2 - (x - x_{S13})^2}, \quad x \in \langle x_{C1}, x_{K13} \rangle. \quad (20)$$

Z warunku, że wartość stycznicy dla nieznaney jeszcze w tej fazie odciętej końca łuku kołowego x_{K13} wynosi s_{C2} , wynikają wzory na współrzędne punktu K_{13} :

$$x_{K13} = x_{C1} + \left(\frac{s_{C2}}{\sqrt{1+s_{C2}^2}} - \frac{s_{C1}}{\sqrt{1+s_{C1}^2}} \right) R_{13}, \quad (21)$$

$$y_{K13} = y_{C1} + \left(\frac{1}{\sqrt{1+s_{C1}^2}} - \frac{1}{\sqrt{1+s_{C2}^2}} \right) R_{13}. \quad (22)$$

W przedstawionym rozwiązaniu połączenie punktu K_{13} z punktem C_2 odbywa się za pomocą wstawki prostej. Jednak jak się okazuje, wartość promienia R_{13} jest tym większa, im krótszy jest odcinek tej wstawki. Wynika stąd wniosek, że najkorzystniejszym rozwiązaniem, dającym największy promień R_{13} , byłoby całkowite wyeliminowanie wstawki prostej i bezpośrednie połączenie końców obydwu torów zwrotnych za pomocą łuku kołowego (czyli zastosowanie łuku koszowego na całej długości połączenia). Prowadziłoby to do konieczności spełnienia dwóch warunków: $x_{K13} = x_{C2}$ oraz $y_{K13} = y_{C2}$, z których na podstawie równań (21) i (22) wynikają dwa odrębne wzory na promień R_{13} :

$$R_{13} = \frac{\sqrt{1+s_{C1}^2} \sqrt{1+s_{C2}^2}}{s_{C2} \sqrt{1+s_{C1}^2} - s_{C1} \sqrt{1+s_{C2}^2}} (x_{C2} - x_{C1}), \quad (23)$$

$$R_{13} = \frac{\sqrt{1+s_{C1}^2} \sqrt{1+s_{C2}^2}}{\sqrt{1+s_{C2}^2} - \sqrt{1+s_{C1}^2}} (y_{C2} - y_{C1}). \quad (24)$$

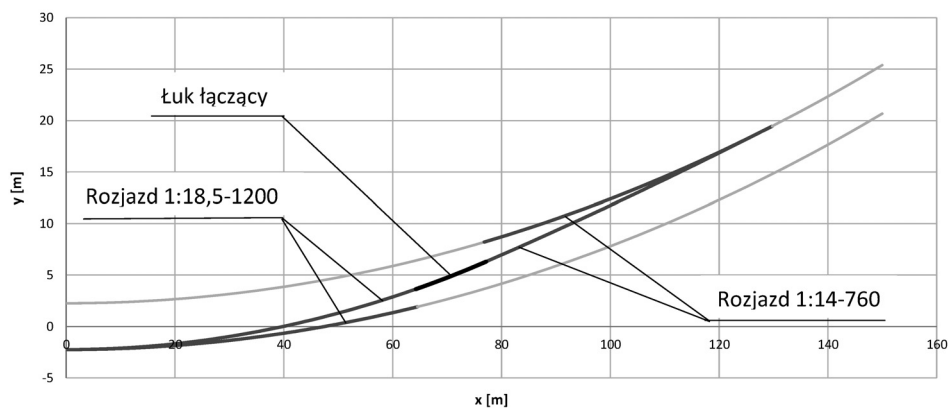
Zatem w tej sytuacji obowiązuje ogólny warunek:

$$\frac{x_{C2} - x_{C1}}{s_{C2} \sqrt{1+s_{C1}^2} - s_{C1} \sqrt{1+s_{C2}^2}} - \frac{y_{C2} - y_{C1}}{\sqrt{1+s_{C2}^2} - \sqrt{1+s_{C1}^2}} = 0. \quad (25)$$

Warunek (25) jest spełniony dla pewnej wartości x_M , gdyż to ona wyznacza występujące wartości x_{C2} , y_{C2} i s_{C2} , związane z rozjazdem łukowym w torze wewnętrznym. Wartość odciętej x_M wyznacza się w sposób iteracyjny. Na rysunku 4 pokazano widok przykładowego połączenia rozjazdów łukowych przez zastosowanie łuku kołowego w przypadku wykorzystania rozjazdów podstawowych 1:18,5-1200 w torze zewnętrznym i 1:14-760 w torze wewnętrznym.

W tabelicy 4 przedstawiono wyniki obliczeń prędkości jazdy pociągów na połączeniach torów równoległych, przeprowadzonych dla szerokiego zakresu promienia łuku kołowego w torach szlakowych, w przypadku stosowania wyłukowanych rozjazdów podstawowych różnego typu. Prędkość ta jest limitowana wartością promienia R_{13} oraz występującej przechyłki h_0 . Należy zaznaczyć, że dla $R > 1200$ m jedyną możliwością rozwiązania problemu jest zastosowanie dwóch wyłukowanych rozjazdów podstawowych 1:26,5-2500.

Z danych zawartych w tabelicy 4 wynika, że zastosowanie dwóch rozjazdów podstawowych różnego typu prowadzi do dalszego ograniczenia prędkości jazdy pociągów – o kilkanaście procent w stosunku do prędkości wynikającej z promienia łuku toru zwrotnego w rozjeździe łukowym zlokalizowanym w zewnętrznym torze szlakowym.



Rys. 4. Widok połączenia rozjazdów łukowych poprzez zastosowanie łuku kołowego ($n_1 = 18,5$, $R_1 = 1200$ m, $R_2 = 502,25$ m, $R_{12} = 353,444$ m, $n_2 = 14$, $R_2 = 760$ m, $R_w = 497,75$ m, $x_M = 129,759$ m, $R_{13} = 303,766$ m; w skali skazonej) [opracowanie własne]

Tablica 4

Prędkości jazdy pociągów przyłączeniu torów położonych w łuku poprzez zastosowanie łuku koszowego w przypadku zastosowania rozjazdów podstawowych różnego typu

V [km/h]	R [m]	h_0 [mm]	n_1	R_1 [m]	R_{12} [m]	V_{zwr} [km/h]	n_2	R_2 [m]	R_{13} [m]	V_{13} [km/h]
160	1200	125	26,5	2500	811,232	132,232	18,5	1200	618,493	115,612
	1000	60	26,5	2500	714,780	107,280	18,5	1200	547,557	93,896
120	900	80	26,5	2500	662,276	108,565	18,5	1200	485,829	92,985
	800	100	26,5	2500	606,643	108,741	18,5	1200	472,016	95,919
	700	120	26,5	2500	547,550	107,708	18,5	1200	455,196	98,205
	800	50	26,5	2500	606,643	96,196	18,5	1200	472,016	84,853
100	700	70	26,5	2500	547,550	96,335	18,5	1200	455,196	87,836
	600	90	18,5	1200	400,387	86,400	14	760	309,760	75,995
	500	120	18,5	1200	353,444	86,536	14	760	303,765	80,224
80	600	50	18,5	1200	400,387	78,150	14	760	309,760	68,739
	500	70	18,5	1200	353,444	77,399	14	760	303,765	71,753

[Opracowanie własne].

7. Podsumowanie

Chociaż obowiązujące przepisy kolejowe wprowadzają dla rozjazdów łukowych istotne ograniczenia aplikacyjne, nie oznacza to, że należy dążyć do ich całkowitego wyeliminowania. Skoro stosowanie tych rozjazdów na drogach kolejowych dopuszcza się w przypadkach mających ekonomiczne uzasadnienie, istnieje wystarczający argument, aby je wykorzystywać. Jak należy sądzić, istotną rolę odgrywają w tym wszystkim obawy wynikające z braku odpowiedniej wiedzy oraz prób unikania odpowiedzialności. Zaprezentowane w niniejszym artykule analityczne podejście do zagadnienia powinno w znacznym stopniu te obawy rozproszyć.

Ogólne zasady połączenia torów równoległych położonych w łuku kołowym (w zapisie analitycznym) przedstawiono w pracy [13]. Idea połączenia polega na wstawieniu dwóch rozjazdów łukowych: wyłukowanego w torze zewnętrznym zgodnie z kierunkiem jego toru zwrotnego oraz w torze wewnętrznym w kierunku przeciwnym do toru zwrotnego. Kluczowym zadaniem podczas tych operacji staje się połączenie ze sobą torów zwrotnych obydwu rozjazdów łukowych. Kształt tego połączenia powinien odpowiadać zakładanym warunkom kinematycznym, zapewniającym płynny przejazd pociągów, bez niekorzystnych oddziaływań zewnętrznych. W pierwszym rzędzie nie powinny w nim występować łuki odwrotne.

Konieczność zastosowania rozjazdów łukowych, występująca przy łączeniu ze sobą torów równoległych położonych w łuku kołowym, prowadzi do zmniejszenia możliwej do uzyskania prędkości jazdy pociągów. O wartości tego ograniczenia w większości przypadków decyduje promień łuku toru zwrotnego rozjazdu łukowego zlokalizowanego w zewnętrznym torze szlakowym. Wartość tego promienia wynika z promienia

łuku kołowego występującego w torze szlakowym oraz typu przyjętego do łukowania rozjazdu podstawowego. Z tego powodu, najbardziej korzystne do łukowania będzie stosowanie rozjazdu podstawowego o jak największym promieniu w torze zwrotnym.

Przeprowadzona w pracy [11] analiza skuteczności metod łączenia torów na liniach kolejowych położonych w łuku kołowym wykazała, że najbardziej korzystnym rozwiązaniem jest połączenie końców torów zwrotnych za pomocą łuku kołowego (bez wstawki prostej). W przypadku wykorzystywania dwóch wyłukowanych rozjazdów podstawowych tego samego typu, wymagany promień łuku kołowego, który łączy końce obydwu torów zwrotnych, jest większy od promienia łuku toru zwrotnego rozjazdu łukowego w zewnętrznym torze szlakowym i dlatego nie powoduje konieczności dalszego ograniczenia prędkości jazdy pociągów.

Przy wykorzystywaniu w torze zewnętrznym, innego niż w torze wewnętrznym typu rozjazdu podstawowego, wymagany promień łuku łączącego końce obydwu torów zwrotnych, jest mniejszy od promienia łuku toru zwrotnego rozjazdu łukowego w torze zewnętrznym, co prowadzi do dalszego ograniczenia o kilkanaście procent prędkości jazdy. W tym przypadku taki sposób łączenia torów nie powinien być zalecany.

Literatura

1. Alfi S., Bruni S.: *Mathematical modelling of train – turnout interaction*, Vehicle System Dynamics, vol. 47, no. 5/2009, Taylor & Francis Online, pp. 551–574.
2. Bugarin M., Orro A., Novales M.: *Geometry of high speed turnouts*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, no. 2261/2011, SAGE Journals, pp. 64–72.

3. Cervi G.E.: *Basic French technology for crossing, switches and special track work*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, no. 1071/1986, SAGE Journals, pp. 57–63.
4. Code of Federal Regulations, Title 49, Transportation, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration – Office of Safety, The Railway Educational Bureau, Omaha, NE, USA, 2008.
5. *Das Einrechnen von Bogenweichen und Bogenkreuzungsweichen*, Deutsche Reichsbahn, Leipzig, 1943.
6. Elsners Taschenbuch für den bautechnischen Eisenbahndienst, No. 14, 1942.
7. Elsners Taschenbuch für den bautechnischen Eisenbahndienst, No. 26, 1954.
8. European Standard EN 13232-2: *Railway applications – Track – Switches and crossings – Part 2: Requirements for geometric design*, In harmonized standards under Directive 2008/57/EC for interoperability of the rail system, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2003.
9. Hartmann R.: *Reichsbahnweichen und Reichsbahnbogenweichen*, Otto Elsner Verlags Gesellschaft, Berlin, 1940.
10. Honner D.: *Guide to using the curved turnout & crossover template designer by David Honner* © 2016 [dostęp: 11 lipca 2020], WWW.proto87.com/media/CTnCTD/Guide_to_CTnCT_designer.pdf.
11. Koc W., Szwaczkiewicz K.: *Analysis of the effectiveness of track joining methods on railway lines located in a circular arc* [artykuł przygotowany do złożenia w czasopiśmie naukowym].
12. Koc W.: *Analityczne podejście do problematyki łukowania rozjazdów kolejowych*, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, nr 25/2017, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, s. 165–180.
13. Koc W.: *Analytical method of connecting parallel tracks located in a circular arc using curved turnouts*, Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, vol. 146, iss. 3/2020, ASCE, 04019081.
14. Koc W.: *Arching of railway turnouts by analytical design method*, Current Journal of Applied Science and Technology, vol. 25, iss. 4/2017, Article no. CJA39093, SCIENCE DOMAIN International, pp. 1–12.
15. Lovejoy L.G., Martyn G.W.: *Track design handbook for Light Rail Transit, Second edition*, Chapter 6 – Special track work, Transportation Research Board, The National Academies Press, Washington 2012, WWW <https://www.academia.edu/read/22800/chapter/7> [dostęp: 11 lipca 2020].
16. Łączyński J.: *Rozjazdy kolejowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1976.
17. Nicklisch D. i in.: *Geometry and stiffness optimization for switches and crossings, and simulation of material degradation*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 224, no. 4/2010, SAGE Journals, pp. 279–292.
18. Niemann W.: *Merkbuch für das Entwerfen und Abstecken von Gleisen und Weichen*, Hachbuch Verlag, Leipzig, 1953.
19. North P.D., Jr. P.E., Whiton B.C.: *'X-W-C' – Rated – Guidelines for turnouts in horizontal curves*, Proceedings of the 2011 Annual Conference: AREMA 2011 Annual Conference, Minneapolis, September 18–21, American Railway Engineering & Maintenance of Way Association, 2011, https://www.arena.org/files/library/2011_Conference_Proceedings/X-W-C-Rated_Guidelines_for_Turnouts_in_Horizontal_Curves.pdf [dostęp: 11 lipca 2020].
20. Palsson B.A.: *Design of optimisation of switchrails in railway turnouts*, Vehicle System Dynamics, vol. 51, no. 10/2013, Taylor & Francis Online, pp. 1610–1639.
21. Patlasov O.M., Tokariyev S.O., Patlasov Ye.O.: *Establishment of the permissible trainspeed on the curved turnouts*, Zaliznična kolija (Vistnik Dnipropetrovskogo Nacionalnogo Universitetu Zalizničnogo Transportu), vol. 62, no. 2/2016, pp. 98–108, WWW.cyberleninka.ru/article/v/establishment-of-the-permissible-train-speed-on-the-curved-turnouts [dostęp: 11 lipca 2020].
22. Ping W.: *Design of high-speed railway turnouts. Theory and Applications*, Elsevier Science & Technology, Oxford 2015.
23. Rzepka W.: *Rozjazdy łukowe w planie i profilu*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1966.
24. Sadeghi J., Masnabadi A., Mazraeh A.: *Correlations among railway track geometry, safety and speeds*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport, vol. 169, no. 4/2016, ICE Publishing, pp. 219–229.
25. Schramm G.: *Der Gleisbogen. Seine geometrische und bauliche Gestaltung*, Otto Elsner, Darmstadt, 1958.
26. Standardy Techniczne – Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200$ km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem) – TOM I – DROGA SZYNOWA – Załącznik ST-T1_A6: Układy geometryczne torów, PKP Polskie Linie Kolejowe, Warszawa, 2018.
27. Wojtczak R.: *Konstrukcja geometryczna rozjazdów stosowanych na sieci Network Rail w Wielkiej Brytanii*, Przegląd Komunikacyjny, nr 7/2015, s. 8–10.