

Aspekty projektowania rozjazdów na łukach i krzywych przejściowych w świetle przepisów krajowych

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2019.163

Data zgłoszenia: 05.04.2019 Data akceptacji: 26.06.2019

Artykuł omawia kwestię projektowania rozjazdów kolejowych na łukach i krzywych przejściowych. W artykule opisano obecny stan prawny oraz genezę przepisów krajowych. Ponadto przedstawiono zasady projektowania połączeń rozjazdowych na łukach kołowych i krzywych przejściowych, obliczenia promieni łuków oraz prędkości na poszczególnych kierunkach zgodnie z normą PN-EN 13803 „Kolejnictwo – Tor – Parametry projektowania toru w planie – Tor o szerokości 1435 mm i większej”, a także „Standardami Technicznymi – 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) „ST-T1-A6 Układy geometryczne to-rów”.

Słowa kluczowe: rozjazd, kolej, łuk, krzywa przejściowa.

Wstęp

Od kilku lat główny Zarządca Infrastruktury – PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. prowadzi liczne modernizacje i rewitalizacje linii kolejowych. Wiąże się to z koniecznością wykonywania projektów, które coraz częściej są bardziej skomplikowane i wymagają zmierzania się z problemami kształtowania geometrycznego układów stacyjnych.

Dążenie do uzyskania wyższych prędkości, istniejące elementy obcej infrastruktury na głowicach stacyjnych, a przede wszystkim ograniczona zajętość terenu, wymuszają stosowanie nietypowych rozwiązań. Coraz częściej takim rozwiązaniem stają się rozjazdy łukowe, a w bardziej skomplikowanych przypadkach rozjazdy na krzywych przejściowych. Pozwalają one przede wszystkim na zabudowę połączeń rozjazdowych na łukach przy trudnych warunkach terenowych.

1. Synteza przepisów projektowych

1.1. Geneza

Rozjazdy łukowe nie są nowym rozwiązaniem. Ich początki projektowania i zastosowania wypadają na pierwszą połowę XX wieku. W Polsce, przez ostatnie 50 lat podstawową literaturą w tym zakresie była książka W. Rzepki „Rozjazdy łukowe w planie i profilu” [1]. Pozycja ta tłumaczyła różne możliwe do zastosowania przypadki w sposób bardzo obszerny, również te bardziej skomplikowane. Jednocześnie nie należała ona do prostych do zrozumienia i późniejszego zastosowania. Trudność ta wynikała głównie z przyjętego układu odniesienia.

W ostatnim czasie projektowanie oraz zabudowa rozjazdów łukowych (w tym również rozjazdów na krzywych przejściowych) zyskuje w Polsce na popularności. Jednym z pierwszych czynników, które spowodowały jej wzrost było uproszczenie obliczeń i ich konstruowania poprzez przyjęcie nowego układu odniesienia [2]. Kolejnym czynnikiem, który w znaczny sposób poszerzył możliwości ich stosowania było wprowadzenie nowych Standardów Technicznych (ST) [3] wykorzystujących wspomniane uproszczenie. Ponadto ST zdefiniowały w sposób bardziej dokładny w jakich

przypadkach należy używać rozjazdów łukowych, regulując tym samym zasadność ich użycia na sieci PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Dokładnie również opisano metodę projektowania, wzory oraz graniczne parametry.

1.2. Rozporządzenie

Obowiązujące od 1998 roku *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać linie kolejowe i ich usytuowanie* [4] praktycznie nie zawierało żadnych wytycznych na temat stosowania rozjazdów łukowych oraz metody ich projektowania. Jedyny zapis na ten temat jaki można było znaleźć w całym dokumencie to dopuszczenie ich stosowania tylko w przypadkach konieczności ułożenia rozjazdu w łuku oraz wytycznych na temat wstawki prostej pomiędzy takimi rozjazdami.

Dopiero nowelizacja wspomnianego rozporządzenia (*Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 5 czerwca 2014r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie*) [5] wprowadziły nieco dokładniejsze zapisy. Wśród nich znalazło się zezwolenie na stosowanie takich rozjazdów:

- kiedy ograniczenia terenowe w projektowanym układzie torowym uniemożliwiają zastosowanie rozjazdu zwyczajnego, lub
- w celu uzyskania większej prędkości niż w układzie torowym z zastosowaniem rozjazdów zwyczajnych, lub
- w celu ograniczenia zakresu przebudowy torowiska linii kolejowej, lub
- w celu ułożenia rozjazdu w torze położonym w łuku.

Zapisy te znacznie rozszerzyły spektrum możliwości zastosowania rozjazdów łukowych, dając tym samym większe możliwości projektowe przy stosunkowo niewielkich zmianach układu torowego oraz ograniczonych wyjściach poza teren kolejowy.

1.3. Standardy Techniczne

Wprowadzone wraz z początkiem 2018r. nowe *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)* oraz ich załącznik do tomu I *ST-T1-A6 Układy geometryczne torów* [3] zainplementowały europejskie standardy projektowania układów geometrycznych torów. Dokument ten opraty został o europejską normę PN-EN 13803 „Kolejnictwo – Tor – Parametry projektowania toru w planie – Tor o szerokości 1435 mm i większej” [6]. Nowe wewnętrzne wytyczne Zarządcy w sposób znaczący uściśliły kiedy oraz w jaki sposób należy projektować rozjazdy łukowe.

W dokumencie tym znalazł się oddzielny podrozdział dotyczący projektowania takich rozjazdów. Zawarto w nim podstawowe wymagania, w tym informacje na temat dozwolonych sytuacji, w których należy je projektować, wymagania jakie powinny spełniać ich poszczególne elementy, a także wskazano metodę projektowania w prostszym niż dotychczas układzie współrzędnych.

Zezwolono również na projektowanie rozjazdów łukowych w przechylce. Co więcej, zawarto zapisy, które w wyjątkowych

sytuacjach zezwalają również na projektowanie rozjazdów na krzywych przejściowych.

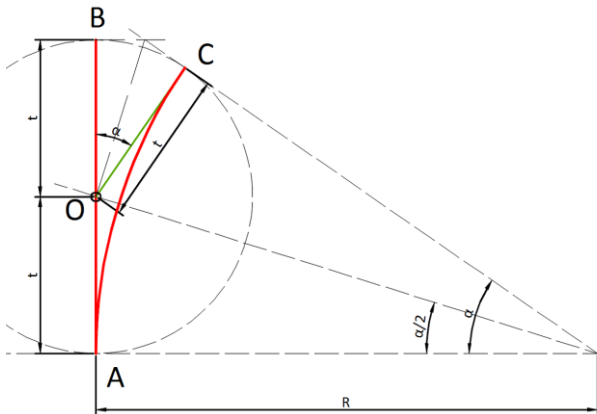
2. Metoda projektowania rozjazdów w łukach kołowych

2.1. Pojęcia podstawowe

Rozjazd łukowy to taki, który powstaje z rozjazdu zwyczajnego poprzez odpowiednie jego wygięcie. Konstrukcjami podstawowymi najczęściej stosowanymi do utworzenia rozjazdów łukowych są:

- Rz 300-1:9;
- Rz 500-1:12;
- Rz 760-1:14;
- Rz 1200-1:18,5.

Poniżej przedstawiono rysunki z geometryczną konstrukcją rozjazdu zwyczajnego wraz z wybranymi zależnościami geometrycznymi w niej zachodzącymi. [7]

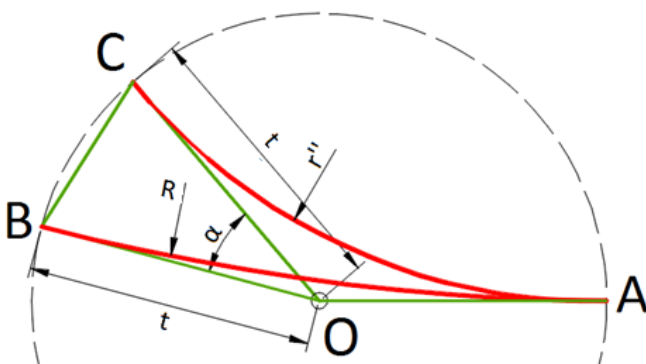


Rys. 1 – Geometria rozjazdu zwyczajnego - opracowanie własne na podstawie [7]

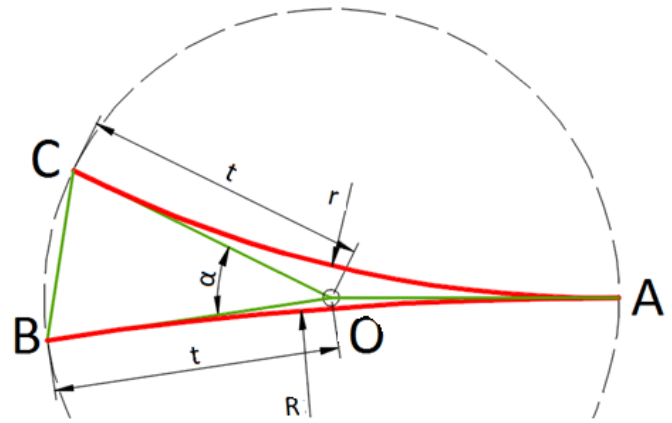
$$AO = OB = OC = t \quad (1)$$

$$t = R * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2)$$

Niezmiennym elementem rozjazdu zostaje jego skos rozjazdu – trójkąt OBC zachowuje takie same wymiary (długości oraz kąty). Zniekształcenie polega jedynie na zmianie położenia (obrocie) trójkąta OBC względem punktu O – środka geometrycznego rozjazdu. Kierunek w którym zostanie on obrócony definiuje czy uzyskujemy rozjazd łukowy jednostronny czy dwustronny. Pierwszy z nich to taki, w którym oba łuki w rozjeździe skierowane są w jedną stronę (Rys. 2). natomiast drugi posiada tory skierowane w przeciwnych kierunkach (Rys. 3). [7]

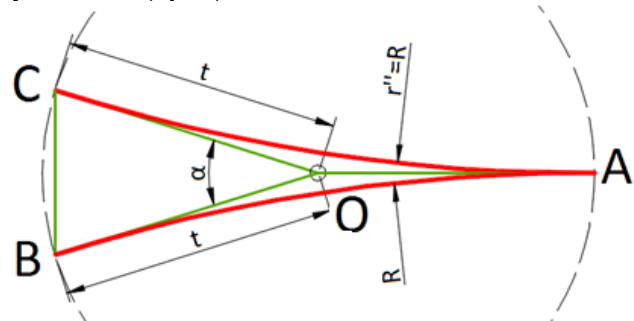


Rys. 2 – Geometria rozjazdu łukowego jednostronnego - opracowanie własne na podstawie [7]



Rys. 3 – Geometria rozjazdu łukowego dwustronnego - opracowanie własne na podstawie [7]

Szczególnym przypadkiem rozjazdu dwustronnego jest rozjazd symetryczny, w którym oba promienie łuków (zasadniczy i zwrotny) są sobie równe (Rys. 4).



Rys. 4 – Geometria rozjazdu łukowego dwustronnego symetrycznego - opracowanie własne na podstawie [7]

Dla każdego typu rozjazdu ograniczona jest wartość minimalna promienia toru zwrotnego. Jest to wartość, która zapewnia brak konieczności wykonania jego toru. Przykładowo dla rozjazdów podstawowych o promieniu 300 m i 500 m, tor zwrotny może zostać wygięty do wartości promienia nie mniejszej niż 214 m. W przypadku rozjazdu Rz 1200 dozwolone jest wygięcie toru zwrotnego do wartości nie mniejszej niż 461 m – dzięki temu zapewniony jest brak ingerencji w konstrukcję opornic, iglic i krzyżownic. [7]

Tab. 1 – Minimalne promienie w rozjazdach łukowych

Promień rozjazdu podstawowego	Krzywiżna graniczna kierunku odgaleźnego	Minimalny dopuszczalny promień kierunku odgaleźnego	Minimalny dopuszczalny promień kierunku zasadniczego
[m]	[1000/m]	[m]	[m]
300 ¹⁾	4,000 (4.673)	250 (214)	1505,522 (749,722)
500 ¹⁾	4,000 (4.673)	250 (214)	501,730 (375,638)
760	3,333	300	497,250
1200	2,169	461	750,001
2500	1,063	941	1510

1) wartości w nawiasach dopuszczone wyjątkowo po uzgodnieniu z właściwym terenowo Zakładem Linii Kolejowych.

Źródło: Tabela 11.9 Standardów Technicznych PKP PLK [3]

Warto zauważyć, że w tabeli brak jest wartości dla rozjazdu łukowego powstałego z rozjazdu podstawowego R190-1:9. Powyższe wskazuje na fakt, iż rozjazdów takich nie należy łukować.

2.2. Dobór parametrów geometrycznych

Projektowanie rozjazdu łukowego rozpoczyna się od doboru wartości promieni łuków na kierunku zasadniczym i zwrotnym. Wartości promieni łuków dla rozjazdu łukowego powstającego na podstawie układu geometrycznego rozjazdu zwyczajnego można obliczyć za pomocą następujących wzorów:

Tab. 2 – Wzory do obliczenia promienia toru zwrotnego

a) Rozjazdy łukowane dwustronne:		$r'' = \frac{(R \cdot r) + t^2}{R - r}$
b) Rozjazdy łukowane jednostronne:		$r'' = \frac{(R \cdot r) - t^2}{R + r}$
– gdy tor zasadniczy rozjazdu podstawowego wyginany jest do promienia R:		
– gdy tor odgałęźny rozjazdu podstawowego wyginany jest do promienia R:		$r'' = \frac{(R \cdot r) + t^2}{r - R}$

gdzie: R – promień łuku w torze zasadniczym (po wylukowaniu),
 r'' – promień łuku w torze odgałęźnym (po wylukowaniu),
 r – promień łuku w torze odgałęźnym rozjazdu podstawowego,
 t – długość stycznej do toru zwrotnego rozjazdu podstawowego.

Źródło: Tabela 11.8 Standardów Technicznych PKP PLK [3]

Wskazana we wzorach „t”, czyli długość stycznej dla toru zwrotnego rozjazdu podstawowego (czyli połowa nominalnej długości rozjazdu zwyczajnego) wynosi odpowiednio:

Tab. 3 – Długość stycznej dla poszczególnych typów rozjazdów podstawowych

Typ rozjazdu podstawowego	Długość stycznej [m]
R300	16,615
R500	20,797
R760	27,110
R1200	32,409

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [8]

W tym miejscu należy zwrócić uwagę na wspomnianą wcześniej tabelę 11.9 Standardów Technicznych z wartościami minimalnych promieni łuków na kierunku zasadniczym oraz zwrotnym.

2.3. Sprawdzenie parametrów kinematycznych

Podstawowymi parametrami sprawdzanymi dla projektowanych rozjazdów łukowych są: niedomiar przechyłki, nadmiar przechyłki oraz naglej zmiana niedomiaru przechyłki. Wskazane parametry ograniczone są przez odpowiednie tabele Standardów Technicznych [3].

Dopuszczalne wartości niedomiaru przechyłki zostały określone w tabeli 9.7 Standardów Technicznych [3].

Tab.4 – Dopuszczalne wartości niedomiaru przechyłki

Wartości dopuszczalne niedomiaru przechyłki (I)			
Uwarunkowania	Zalecane wartości dopuszczalne	Normalne wartości dopuszczalne	Rozszerzone wartości dopuszczalne ³⁾
	P0 [mm]	P1 [mm]	P2 [mm]
1	2	3	4
tory szlakowe oraz główne zasadnicze i dodatkowe	110	130	150 ^{1) 2)}
tory boczne	80	100	100
łuki o promieniach 200 m < R ≤ 250 m	80	100	100
łuki o promieniach R ≤ 200 m	50	70	70
rozjazdy ze stałą krzywizną	V ≤ 160 160 < V ≤ 200	90 60	110 90
rozjazdy z ruchomym dziobem krzywizny	V ≤ 230 230 < V ≤ 250	100 80	130 110
skrzyżowania torów, rozjazdy krzyżowe	V ≤ 120	0	80
przyrządy wyrównawcze	V ≤ 160 160 < V ≤ 200 200 < V ≤ 250	80 0 0	100 80 60

1) w przypadku pojazdów wyposażonych w system kompensacji niedomiaru przechyłki zarządcą infrastruktury dopuszcza zwiększenie wartości dopuszczalnych, po przeprowadzeniu odpowiednich badań
 2) wartość l=150 mm dopuszcza się stosować tylko dla wybranych typów pojazdów pasażerskich
 3) zgody w drodze odstępstwa udziela Zarząd PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. na zasadach określonych w rozdziale 7

Źródło: Tabela 9.7 Standardów Technicznych PKP PLK [3]

Dla typowego rozjazdu łukowego przystosowanego do prędkości 160 km/h z stałą krzywizną dopuszczalne wartości niedomiaru przechyłki wynoszą odpowiednio dla poziomów P0, P1 i P2: 90, 110 i 110 mm.

Nadmiar przechyłki opisany w tabeli 9.8 [3] dopuszcza wartości odpowiednie dla prognozowanego natężenia przewozów (q).

Tab. 5 – Dopuszczalne wartości nadmiaru przechyłki

Wartości dopuszczalne nadmiaru przechyłki (E)			
Prognozowane natężenie przewozów dla toru „q”	Zalecane wartości dopuszczalne	Normalne wartości dopuszczalne	Rozszerzone wartości dopuszczalne ¹⁾
	P0 [mm]	P1 [mm]	P2 [mm]
[Tg/rok]			
1	2	3	4
q ≤ 5	90	110	110
5 < q ≤ 10	95	95	110
10 < q ≤ 15	80	95	110
15 < q ≤ 20	65	80	110
q > 20	50	80	110

1) zgody udziela właściwy terenowo Zakład Linii Kolejowych

Źródło: Tabela 9.8 Standardów Technicznych PKP PLK [3]

Przy projektowaniu rozjazdów należy dobrać prędkość na połączeniu rozjazdowym, tak aby nie przekroczyć mniejszej z pary wartości dopuszczalnych wskazanych w tabelach 9.7 i 9.8.

Parametr naglej zmiany niedomiaru przechyłki występuje w układach geometrycznych torów, gdzie następuje nieciągła zmiana krzywizny. W przypadku rozjazdów łukowych sytuacja taka ma miejsce na przejściu z prostej w łuk bądź na połączeniu łuków odwrotnych. Wartości dopuszczalne naglej zmiany niedomiaru przechyłki określa tabela 9.15 Standardów Technicznych [3].

Tab.6 – Dopuszczalne wart. naglej zmiany niedomiaru przechyłki

Wartości dopuszczalne naglej zmiany niedomiaru przechyłki (Δl)			
Zakres prędkości maksymalnych	Zalecane wartości dopuszczalne	Normalne wartości dopuszczalne	Rozszerzone wartości dopuszczalne ¹⁾
	P0 [mm]	P1 [mm]	P2 [mm]
[km/h]			
Połączenia torów			
V ≤ 60	130		
60 < V ≤ 100	100		125
100 < V ≤ 160	80		160 - (0,35 · V _{max})
160 < V ≤ 200	60		160 - (0,35 · V _{max})
Tory szlakowe oraz tory główne zasadnicze i dodatkowe			
V ≤ 70	50		60
70 < V ≤ 160	0	64 - (0,2 · V _{max})	50
160 < V ≤ 200	0	30	50
200 < V ≤ 250	0	25	25
Tory boczne			
V ≤ 40	50	100	100

1) zgody udziela właściwy terenowo Zakład Linii Kolejowych

Źródło: Tabela 9.15 Standardów Technicznych PKP PLK [3]

2.4. Przykład obliczeniowy

Poniżej przedstawiono przykład obliczeń dla rozjazdu dwustronnego. Aby zaprojektować rozjazd łukowy dwustronny (z rozjazdu podstawowego R300) w torze o promieniu wynoszącym 1 000 m (na kierunku zasadniczym) należy do wzoru:

$$r'' = \frac{(R \cdot r) + t^2}{R - r} \quad (3)$$

podstawić następujące wartości: R = 1 000 m, r = 300 m, t = 16,615 m.

$$r'' = \frac{(1\,000\text{m} \cdot 300\text{m}) + 16,615\text{m}^2}{1\,000\text{m} - 300\text{m}} = 428,966\text{m} \quad (4)$$

Na podstawie powyższego wzoru otrzymujemy wartość promienia łuku na torze zwrotnym równą 428,966 m. W dalszej kolejności należy przyjąć wstępnie prędkość na kierunku odgałęźnym rozjazdu równą prędkości na rozjeździe podstawowym (w tym przypadku dla R300 – 50 km/h). Na kierunku zasadniczym ograniczenie prędkości wynika z parametrów toru zasadniczego. Następnie należy obliczyć parametry kinematyczne i sprawdzić ich zgodność z dopuszczalnymi wartościami.

a) Niedomiar przechyłki na torze zasadniczym na długości rozjazdu dla prędkości 90 km/h:

$$I_{1z} = 11,8 * \frac{V_{max}^2}{R} - D = 11,8 * \frac{90^2}{1\ 000} - 0 = 95,58\ mm \quad (5)$$

$$95,58\ mm < 110\ mm \text{ (wartość zakresu P1, tabela 9.7)} [2] \quad (6)$$

b) Niedomiar przechyłki na torze zasadniczym przed rozjazdem dla prędkości 50 km/h:

$$I_{1o} = 11,8 * \frac{V_{max}^2}{R} - D = 11,8 * \frac{50^2}{1\ 000} - 0 = 29,50\ mm \quad (7)$$

$$29,50\ mm < 110\ mm \text{ (wartość zakresu P0, tabela 9.7)} [2] \quad (8)$$

c) Niedomiar przechyłki na torze odgałęzonym na długości rozjazdu dla prędkości 50 km/h:

$$I_{2o} = 11,8 * \frac{V_{max}^2}{R} - D = 11,8 * \frac{50^2}{428,966} - 0 = 68,77\ mm \quad (9)$$

$$68,77\ mm < 90\ mm \text{ (wartość zakresu P0, tabela 9.7)} [2] \quad (10)$$

d) Nagła zmiana niedomiaru przechyłki w punkcie początku rozjazdu dla prędkości 50 km/h:

$$\Delta I = |I_{1o}| + |I_{2o}| = 29,50\ mm + 68,77\ mm = 98,27\ mm \quad (11)$$

$$98,27\ mm < 130\ mm \text{ (wartość zakresu P0, tabela 9.15)} [2] \quad (12)$$

Przedstawione powyżej obliczenia pokazują, iż założone prędkości są odpowiednie dla danego połączenia torów i spełniają wszystkie warunki przedstawione w Standardach Technicznych [3], a także wspomnianej wcześniej normie PN-EN 13803 „Kolejnictwo – Tor – Parametry projektowania toru w planie – Tor o szerokości 1435 mm i większej” [6].

3. Metoda projektowania rozjazdów na krzywych przejściowych

Rozjazdy kolejowe na krzywych przejściowych są bardzo rzadko spotykane na sieci PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Z powodu skomplikowanej geometrii rozjazdu oraz jego położenia na rampie przechyłkowej są to elementy układów torowych, które wymagają szczególnej uwagi przy budowie oraz utrzymaniu infrastruktury i są dopuszczone wyjątkowo do stosowania po zgodzie właściwego Zakładu Linii Kolejowych zgodnie z punktem 9.7.12 Standardów Technicznych [3]. Do tej pory tylko na jednej stacji – Gdynia Wielki Kack zabudowano rozjazd typu R500-1:12 na krzywej przejściowej (i rampie przechyłkowej).

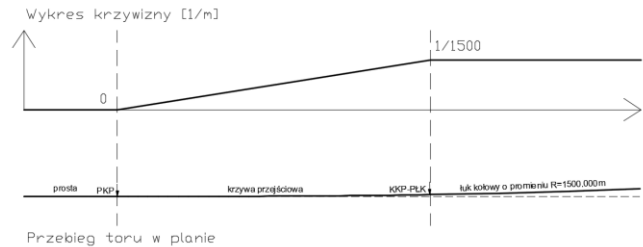
3.1. Podstawowe aspekty projektowania rozjazdów na krzywych przejściowych

Projektowanie rozjazdów na krzywych przejściowych jest zbliżone do projektowania rozjazdów na łukach. Rozjazdy na krzywych wykonuje się z rozjazdów podstawowych typu R300-1:9, R500-1:12, R760-1:14, R1200-1:18,5, R2500-1:26,5. Można wykonać rozjazd paraboliczny jednostronny (odgańlenie do wewnątrz krzywej przejściowej) lub dwustronny (odgańlenie na zewnątrz krzywej przejściowej). W obu przypadkach tor na kierunku odgałęzonym, będzie miał krzywiznę w postaci analogicznej jak krzywa przejściowa w torze zasadniczym (parabola 3-stopnia, kłotoida). Ponadto jej krzywizna będzie ściśle powiązana z krzywizną toru zasadniczego. Rozjazd na krzywej przejściowej opisuje się podając: numer rozjazdu, typ rozjazdu podstawowego, z którego powstał dany rozjazd oraz promienie łuków na początku i końcu rozjazdu na obu kierunkach (zwrotnym i zasadniczym).

W celu ułatwienia procesu projektowania rozjazdu na krzywej przejściowej warto wprowadzić pojęcie krzywizny, zamiast posługiwać się promieniami toru. Zgodnie z definicją krzywa przejściowa

(paraboli 3-stopnia lub kłotoidy) jest to ciągła zmiana wartości krzywizny toru od nieskończoności (prostej) do zadanego promienia łuku poziomego (R) i odwrotnie lub między dwoma łukami kołowymi ($R1$ do $R2$). Dla dowolnego punktu na krzywej przejściowej można wyznaczyć jej krzywiznę, czyli znaleźć jaki w danym punkcie jest promień łuku poziomego. Krzywizna jest to odwrotność promienia łuku, więc krzywą przejściową można opisać jako zmianę krzywizny toru od zera (prostej) do zadanej wartości krzywizny:

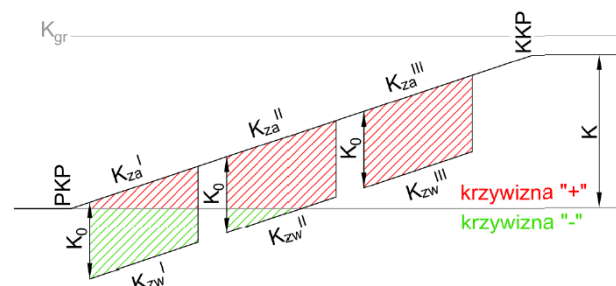
$$K = 0 \xrightarrow{\text{Krzywa przejściowa}} K = \frac{1}{R} \quad (13)$$



Rys. 5 – Wykres krzywizny i przebieg toru w planie dla typowej krzywej przejściowej - opracowanie własne

Aby sprawdzić czy jest możliwe wykonanie rozjazdu na krzywej przejściowej należy przeprowadzić analizę krzywizn torów – obliczyć krzywiznę (i promień) toru zasadniczego i zwrotnego na początku i na końcu rozjazdu, a następnie sprawdzić czy krzywizna toru odgałęzłego jest dodatnia, czy ujemna. Problem znaku krzywizny toru zwrotnego występuje tylko dla projektowanych rozjazdów, które odgałęzają się na zewnątrz krzywej przejściowej.

Zgodnie z punktem 9.7.12 Standardów Technicznych [3] należy ustalić położenie rozjazdu w taki sposób, aby krzywizna toru odgałęzłego na całej długości projektowanego rozjazdu była dodatnia (K_{zw}) lub ujemna (K_{zw}). Niedozwolone jest stosowanie rozjazdów, w których krzywizna toru zwrotnego będzie częściowo dodatnia, a częściowo ujemna (K_{zw}). Wynika to z prostego założenia, że nie da się wykonać rozjazdu będącego rozjazdem parabolicznym (na krzywej przejściowej) częściowo jednostronnym i dwustronnym. Tor odgałęzły w takim rozjeździe składałby się z dwóch odwrotnych krzywych przejściowych.



Rys. 6 – Przypadki krzywizn torów w rozjazdach położonych na krzywych przejściowych – rys 9.6 [3]

Pierwszy przypadek opisuje rozjazd zaprojektowany na początku krzywej przejściowej. W tej sytuacji krzywizna toru zasadniczego będzie mniejsza niż krzywizna rozjazdu podstawowego K_0 . Dla tego przypadku krzywizna toru zwrotnego będzie ujemna, tzn. że będzie to rozjazd dwustronny. Drugi przypadek przedstawia niedozwoloną konstrukcję rozjazdu – krzywizna toru zasadniczego jest częściowo mniejsza, a częściowo większa od krzywizny rozjazdu podstawowego K_0 . Byłby to teoretyczny rozjazd paraboliczny częściowo jednostronny i dwustronny. Przypadek trzeci jest to rozjazd, dla którego krzywizna toru zasadniczego jest większa niż krzywizna rozjazdu podstawowego K_0 . W tej sytuacji krzywizna toru zwrotnego będzie

dotadnia, tzn. że będzie to rozjazd na krzywej przejściowej jednostronny, w którym tor zasadniczy powstaje z toru zwrotnego rozjazdu zwyczajnego (odgałęzienie na zewnątrz) [1]. Podobnie jak dla rozjazdów łukowych, w rozjazdach na krzywych przejściowych występują graniczne wartości krzywizny toru odgałęźnego, które zostały opisane w tabeli 1. Przy projektowaniu rozjazdu na krzywej przejściowej należy sprawdzić obliczone krzywizny torów na początku i końcu rozjazdu na obu kierunkach.

3.2. Dobór parametrów geometrycznych rozjazdu

Aby obliczyć niezbędne parametry geometryczne rozjazdu należy zestawić następujące dane:

- Długość krzywej przejściowej – L_{kp} [m],
- Promień łuku kołowego na końcu krzywej – R [m],
- Punkt położenia początku rozjazdu od początku lub końca krzywej – x_1 [m],
- Punkt położenia końca rozjazdu od początku lub końca krzywej – x_2 [m],
- Typ rozjazdu – $R300/500/760/1200/2500$,
- Długość stycznicy rozjazdu – t [m],
- Krzywizna łuku rozjazdu podstawowego – K_0 [1/m],
- Krzywizna graniczna kierunku odgałęźnego (lub minimalny dopuszczalny promień kierunku odgałęźnego) – K_{gr} (R_{gr}) [1/m] lub [m].

Pierwszym elementem doboru parametrów geometrycznych rozjazdu jest obliczenie krzywizny toru zasadniczego oraz promienia na początku i końcu rozjazdu. Ważne jest, aby przyjąć taki sam punkt odniesienia (początek lub koniec krzywej) dla odległości x_1 i x_2 . Dla krzywej przejściowej o liniowo zmiennej krzywiznie promienie krzywizny takiej krzywej przejściowej są odwrotnie proporcjonalne do jej długości. Jeżeli krzywa przejściowa długości L_{kp} w punkcie styczności z łukiem kołowym o promieniu R wykazuje taką samą krzywiznę jak łuk kołowy, to w dowolnym punkcie tej krzywej o odciętej x promień krzywej można wyznaczyć z zależności [1]:

$$R_x : R = L_{kp} : x \quad (14)$$

,co za tym idzie:

$$R_{zas1} = \frac{R * L_{kp}}{x_1} ; R_{zas2} = \frac{R * L_{kp}}{x_2} \quad (15)$$

,gdzie: R_{zas1} i R_{zas2} to promienie łuków kołowych na początku i końcu rozjazdu na kierunku zasadniczym. Dla krzywizny łuku będą to następujące wartości:

$$K_{zas1} = \frac{x_1}{R * L_{kp}} ; K_{zas2} = \frac{x_2}{R * L_{kp}} \quad (16)$$

Kolejnym etapem obliczeń dla rozjazdów odgałęziających się na zewnątrz krzywej jest sprawdzenie znaku krzywizny toru zwrotnego. Można to sprawdzić poprzez wykonanie wykresu krzywizn jak na rysunku 6 lub jedynie za pomocą obliczeń. Jeżeli:

$$K_{zas1} \wedge K_{zas2} < K_0 \Rightarrow K_{zwrI} \quad (17)$$

,to znaczy że jest to przypadek I – rozjazd jest możliwy do projektowania.

$$(K_{zas1} < K_0 \wedge K_{zas2} \geq K_0) \Rightarrow K_{zwrII} \quad (18)$$

,to znaczy że jest to przypadek II – rozjazd jest niedozwolony do stosowania.

$$K_{zas1} \wedge K_{zas2} \geq K_0 \Rightarrow K_{zwrIII} \quad (19)$$

,to znaczy że jest to przypadek III – rozjazd jest możliwy do projektowania.

Następnym etapem obliczeń jest wyznaczenie promienia na początku i końcu rozjazdu dla toru odgałęźnego (R_{zwr1} oraz R_{zwr2}). Obliczenia wykonujemy analogicznie jak dla rozjazdu łukowego zgodnie z wzorami przedstawionymi w tabeli 2. Na początku rozjazdu (w punkcie x_1) jako promień łuku w torze zasadniczym (po wyłukowaniu) należy przyjąć obliczony promień łuku na kierunku zasadniczym na początku rozjazdu R_{x1} , natomiast na końcu rozjazdu (w punkcie x_2) promień łuku na kierunku zasadniczym będzie wynosił R_{x2} . Pozostałe elementy wzorów pozostają takie same.

Jako końcowy etap należy sprawdzić, czy obliczone promienie na początku i końcu rozjazdów są większe niż minimalny dopuszczalny promień kierunku odgałęźnego R_{gr} .

Ostatecznie, na podstawie obliczeń otrzyma się następujące dane niezbędne do narysowania rozjazdu oraz wykonania obliczeń kinematycznych na kierunku zasadniczym i odgałęźnym:

- Promień łuku na początku rozjazdu na kierunku zasadniczym – R_{zas1} [m],
- Promień łuku na końcu rozjazdu na kierunku zasadniczym – R_{zas2} [m],
- Promień łuku na początku rozjazdu na kierunku zwrotnym – R_{zwr1} [m],
- Promień łuku na końcu rozjazdu na kierunku zwrotnym – R_{zwr2} [m],

3.3. Przykład projektowy

Poniżej przedstawiono przykład obliczeń dla rozjazdu jednostronnego (do wewnątrz krzywej) z rozjazdu podstawowego $R760$ zaprojektowanego na krzywej przejściowej o długości 150 m łączącej prostą z łukiem kołowym o promieniu 1700 m i przechyłce 90 mm. Rozjazd znajduje się 10 metrów od początku krzywej przejściowej i jest skierowany w stronę łuku. Na długości krzywej przejściowej zaprojektowano prostoliniową rampę przechyłkową. Prędkość maksymalna na kierunku zasadniczym – 160 km/h, na kierunku zwrotnym 80 km/h. Długość stycznicy dla rozjazdu $R760$ wynosi 27,11 m.

Aby zaprojektować taki rozjazd należy obliczyć najpierw promienie łuków na początku i końcu rozjazdu dla kierunku zasadniczego i odgałęźnego. Sprawdzenie znaku krzywizny można pominąć z uwagi na lokalizację rozjazdu do wewnątrz krzywej.

$$R_{zas1} = \frac{1700m * 150m}{10m} = 25\,500\,m \quad (20)$$

$$R_{zas2} = \frac{10m * 150m}{10m + (2 * 27,11m)} = 3970,726m \quad (21)$$

$$R_{zwr1} = \frac{(25\,500m * 760m) - (27,11m)^2}{25\,500m + 760m} = 737,977\,m \quad (22)$$

$$R_{zwr2} = \frac{(3970,726m * 760m) - (27,11m)^2}{3970,726m + 760m} = 637,749\,m \quad (23)$$

Obliczone promienie na początku i końcu rozjazdu dla kierunku zasadniczego i odgałęźnego są większe od minimalnych dopuszczalnych promieni wskazanych w tabeli 1, które dla rozjazdu typu $R760$ wynoszą 497,250 m i 300 m odpowiednio dla kierunku zasadniczego i odgałęźnego.



Rys.7 – Zaprojektowany rozjazd jednostronny na krzywej przejściowej z odpowiednimi opisami – opracowanie własne

Po zaprojektowaniu parametrów geometrycznych rozjazdu należy sprawdzić parametry kinematyczne rozjazdu. Dla kierunku zasadniczego należy sprawdzić czy niedomiar przechyłki na rozjeździe nie przekracza dopuszczalnych wartości wskazanych w tabeli 4, natomiast dla kierunku zasadniczego należy sprawdzić niedomiar przechyłki na rozjeździe oraz nagłą zmianę niedomiaru przechyłki, która występuje na początku rozjazdu. Dopuszczalna wartość nagłej zmiany niedomiaru przechyłki została przedstawiona w tabeli 6. Jeżeli projektowany rozjazd znajduje się w przechyłce należy ponadto sprawdzić czy przechyłka w obrębie rozjazdu nie przekracza dopuszczalnych wartości wskazanych w tabeli 9.6 Standardów Technicznych [3].

Sprawdzenie parametrów kinematycznych projektowanego rozjazdu:

– Dopuszczalna przechyłka na rozjeździe:

$$D_1 = \frac{10 * 90mm}{150} = 6mm \quad (24)$$

$$D_2 = \frac{[10 + (2 * 27,11)] * 90mm}{150} = 39mm \quad (25)$$

$$6mm, 39mm < 100mm \text{ (wartość zakresu P1, tabela 9.6)} [3] \quad (26)$$

– Niedomiar przechyłki na kierunku zasadniczym na początku i końcu rozjazdu:

$$I_{zas1} = 11,8 * \frac{160^2}{25500} - 6 = 5,82mm \quad (27)$$

$$I_{zas2} = 11,8 * \frac{160^2}{3970,726} - 39 = 37,08mm \quad (28)$$

$$5,82mm, 37,08mm < 110mm \text{ (wartość zakresu P1, tabela 9.7)} [3] \quad (29)$$

– Niedomiar przechyłki na kierunku odgałęzonym na początku i końcu rozjazdu:

$$I_{zwr1} = 11,8 * \frac{80^2}{737,977} - 6 = 96,33mm \quad (30)$$

$$I_{zwr2} = 11,8 * \frac{80^2}{637,749} - 39 = 79,42mm \quad (31)$$

$$96,33mm < 110mm \text{ (wartość zakresu P1, tabela 9.7)} [3] \quad (32)$$

$$79,42mm < 110mm \text{ (wartość zakresu P1, tabela 9.7)} [3] \quad (33)$$

– Nagła zmiana niedomiaru przechyłki na początku rozjazdu przy jeździe na kierunek zwrotny:

$$\Delta I = |I_{zwr1} - I_{zas1}| = 96,33 - 5,82 = 90,51mm \quad (34)$$

$$90,51mm < 100mm \text{ (wartość zakresu P1, tabela 9.15)} [3] \quad (35)$$

Przedstawione powyżej obliczenia wskazują, że rozjazd został zaprojektowany poprawnie i spełnia wszystkie wymagania określone dla połączeń torów w Standardach Technicznych [3], a także wspomnianej wcześniej normie PN-EN 13803 „Kolejnictwo – Tor – Parametry projektowania toru w planie – Tor o szerokości 1435 mm i większej” [6]. Omówiony przykład projektowy został przygotowany zadaną prędkością projektową dla połączenia torowego, odmiennie niż przykład przedstawiony w punkcie 2.4. Jest to rozwiązanie dopuszczalne, istnieją różne podejścia projektowe do konstruowania połączeń rozjazdowych.

Podsumowanie

Rozjazdy łukowe są sprawdzonym rozwiązaniem w trudnych warunkach terenowych – przy ograniczonej zajętości terenu, dużej ilości elementów obcej infrastruktury, lokalizacji głowicy stacji na łuku zabudowa rozjazdów łukowych umożliwiła uzyskanie lepszych parametrów geometrycznych torów oraz wyższych prędkości.

Pod względem projektowym stosowanie rozjazdów łukowych stało się łatwiejsze – uproszczono obliczenia i zasady konstruowania rozjazdów łukowych poprzez przyjęcie nowego układu odniesienia. [2] Wydane w 2017 roku Standardy Techniczne [3] w sposób przejrzysty i czytelny określają zasady zabudowy rozjazdów łuko-

wych, a także prezentują jak należy dobierać promienie łuków oraz obliczać prędkości na połączeniach rozjazdowych. Dopuszczono, także stosowanie w uzasadnionych przypadkach rozjazdów na krzywych przejściowych.

Z uwagi na konieczność wykonania dokumentacji dla danego typu rozjazdu oraz trudności w zamówieniach rozjazdy łukowe mogą być to elementy problematyczne w wykonaniu, jednak można stwierdzić, że w najbliższych latach projektowanie i zabudowa rozjazdów łukowych stanie się coraz bardziej powszechne na sieci PKP PLK S.A. szczególnie podczas licznych modernizacji i rewitalizacji linii kolejowych, gdzie nacisk kładzie się na maksymalizację efektów i minimalizację kosztów.

Bibliografia:

1. W. Rzepka, „Rozjazdy łukowe w planie i profilu”, WKiŁ, Warszawa 1966
2. W. Koc, „Analityczne podejście do problematyki łukowania rozjazdów kolejowych”, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, nr 25, Politechnika Poznańska, 2017
3. M. Migdał, D. Szczepiński, J. Karliński, R. Frączek, „Standardy Techniczne – szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 120$ km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem)”, Tom I – Złączenie ST-T1-A6 „Układy geometryczne torów”, wersja 1, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa, 2017
4. Rozporządzenie Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie
5. Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 5 czerwca 2014 r., zmieniającego rozporządzenie w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie
6. PN-EN 13803 „Kolejnictwo – Tor – Parametry projektowania toru w planie – Tor o szerokości 1435 mm i większej”.
7. S. Grulkowski, Z. Kędra, W. Koc, M. J. Nowakowski, „Drogi szynowe”, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2013;
8. Instrukcja o oględzinach, badaniach technicznych i utrzymaniu rozjazdów Id-4, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A, Warszawa 2015r.

Aspects of designing railway turnouts on curves and transition curves in the light of national regulations

Paper discussed the design of railway turnouts on curves and transition curves. The article describes the current legal status and the origin of national regulations. In addition, the rules for the design of turnout connections on curves and transition curves, calculations of curves in turnout and speeds in turnout directions are presented in accordance with PN-EN 13803 "Railway - Track - Track design parameters in the plan - Track with a width of 1435 mm and larger" as well as „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) „ ST-T1-A6 Układy geometryczne torów”.

Keywords: turnout, railway, curve, transition curve.

Autorzy:

mgr inż. **Paulina Szablowska** – Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Drogowej, Kolejowej i Transportu, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, e-mail: paulinaszablowska@gmail.com

mgr inż. **Maciej Rochel** – Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Drogowej, Kolejowej i Transportu, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, e-mail: maciek.rochel@gmail.com