

Wpływ zmian dopuszczalnych wartości parametrów geometrycznych i kinematycznych na podatność modernizacyjną układów torowych

Mirosław Jan NOWAKOWSKI¹

Streszczenie

Podatnością modernizacyjną nazywamy stopień przystosowania analizowanego odcinka linii kolejowej do zmiany prędkości eksploatacyjnej. Skala możliwych zmian prędkości (w sensie jej zwiększenia) jest wypadkową istniejącego układu geometrycznego linii w płaszyźnie poziomej, ograniczeń lokalizacyjnych oraz dopuszczalnych wartości parametrów geometrycznych i kinematycznych. Jakikolwiek zmiany tych ostatnich wpływają bezpośrednio na obliczenie najważniejszych charakterystyk geometrycznych toru: promienia minimalnego, przechyłki, długości krzywej przejściowej. W ostatnich latach wartości ograniczeń geometrycznych i kinematycznych zdefiniowano w normie PN-EN 13803-1:2010 oraz znowelizowano w rozporządzeniu zawartym w Dzienniku Ustaw 2014 poz. 867 i instrukcji Id-1. Zakres przewidywanych na sieci PKP prac modernizacyjnych i rewitalizacyjnych skłonił do szczegółowej analizy wpływu tych zmian na podatność modernizacyjną. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że w kontekście pojedynczego łuku wprowadzone zmiany dają zyski mniejsze od spodziewanych. Wynika to z obniżenia dopuszczalnej wartości przyrostu przyspieszenia. W skali odcinka linii decydujący wpływ na czas przejazdu ma rozmieszczenie łuków o zerowej podatności modernizacyjnej. W węzłach torów zmiany dopuszczalnych przyspieszeń przeważnie nie wpływają na zwiększenie prędkości przejazdu, z uwagi na ograniczenia sygnalizacji kolejowej oraz wymagane szerokości międzytorzy.

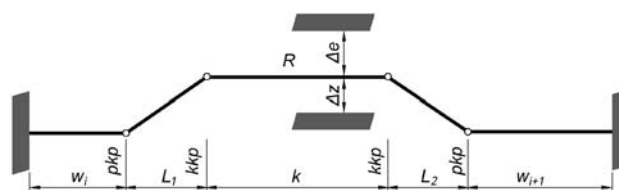
Słowa kluczowe: podatność modernizacyjna, geometria toru, parametry kinematyczne

1. Wstęp

Pojęcie podatności modernizacyjnej wprowadzono w [3]. Oznacza ono stopień przystosowania analizowanego odcinka linii kolejowej do zmiany prędkości eksploatacyjnej. Wymagania gospodarcze i społeczne, ukierunkowane na zwiększenie przewozów oraz skrócenie czasów przejazdu, determinują zwiększenie wspomnianej prędkości powyżej wartości ustalonych podczas projektowania i budowy funkcjonujących linii.

Możliwości zmiany profilu podłużnego linii podczas modernizacji są niezwykle ograniczone. Dlatego przyjmuje się, że prędkość obowiązująca na szlaku jest przede wszystkim determinowana przez parametry łuków poziomych: promień R , przechyłkę h , długości krzywej przejściowej L oraz długość części kołowej łuku k . Możliwość jej zwiększenia jest wypadkową tych parametrów, ograniczeń lokalizacyjnych – długości odcinków prostych między sąsiednimi łukami w i dopuszczalnych poprzecznych przesunięć łuku Δe

oraz Δz (rys. 1), a także dopuszczalnych wartości parametrów kinematycznych i geometrycznych.



Rys. 1. Parametry geometryczne determinujące możliwość przebudowy łuku poziomego [3]; R – promień łuku; k – długość części kołowej łuku; L_1, L_2 – długości krzywych przejściowych; w_i, w_{i+1} – długości przyległych odcinków prostych; $\Delta e, \Delta z$ – możliwe poprzeczne przesunięcia łuku [rys. autora]

Przy ustalaniu podatności szlaku linii kolejowej na modernizację, można dla każdego zlokalizowanego na nim łuku określić trzy różne prędkości i związane z nimi zakresy niezbędnych prac modernizacyjnych:

- maksymalną prędkość eksploatacyjną V_e , jaką można osiągnąć w istniejącym stanie geometrycz-

¹ Dr inż.; Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów; e-mail: nowam@pg.gda.pl.

nym toru — jej uzyskanie wymaga jedynie prac związanych z regulacją przechyłki w trakcie bieżącego utrzymania,

- maksymalną prędkość V_k , jaką można uzyskać przez zwiększenie przechyłki i odpowiednie wydłużenie krzywych przejściowych i ramp przechyłkowych – te prace wymagają niewielkich przesunięć poprzecznych toru na długości łuku i krzywych przejściowych, mieszczących się w istniejącym pasie kolejowym,
- maksymalną prędkość V_R , jaką można uzyskać, przebudowując łuk do uzyskania największego możliwego w danych warunkach terenowych promienia i odpowiadających mu krzywych przejściowych i ramp przechyłkowych – w tym wypadku zakres prac modernizacyjnych jest największy i wiąże się z koniecznością wyjścia poza istniejący pas kolejowy.

Porównując te wartości z prędkością V_{mod} , do jakiej zamierza się przystosować linię w trakcie jej modernizacji (również traktowaną jako zmienną), otrzymuje się zgodnie z metodyką przedstawioną w [3, 4] cztery zbiory łuków:

- przystosowanych do prędkości V_{mod} dla których $V_{mod} \leq V_e$,
- wymagających wydłużenia krzywych przejściowych i ramp przechyłkowych, dla których $V_e \leq V_{mod} \leq V_k$,
- wymagających przebudowy łuków z uwagi na konieczność zwiększenia ich promienia, dla których $V_k \leq V_{mod} \leq V_R$,
- niemożliwych do dostosowania do zakładanej prędkości V_{mod} (niepodatnych na modernizację), wymagających nowego wytrasowania dłuższego fragmentu linii lub wprowadzenia stałego ograniczenia prędkości.

Podobną metodykę należy stosować przy nowocześnie rozumianej rewitalizacji linii kolejowych, przedstawionej obszernie w [6]. Ponieważ przy pracach rewitalizacyjnych zakłada się niewychodzenie linii poza istniejący pas kolejowy, nie rozważa się przebudowy łuków w celu zwiększenia ich promienia, co eliminuje trzeci z wymienionego zbioru łuków.

Na prędkości V_e , V_k i V_R wpływają bezpośrednio dopuszczalne wartości parametrów kinematycznych i geometrycznych. W ostatnich latach wartości te zdefiniowano w normie [8] oraz znowelizowano w rozporządzeniu [10] i instrukcji [11] zmienionej zarządzeniem Nr 19/2015 Zarządu PKP PLK S.A. z dnia 30 kwietnia 2015 r. Zakres przewidywanych na sieci PKP prac modernizacyjnych i rewitalizacyjnych skłania do szczegółowej analizy wpływu tych zmian na podatność modernizacyjną. Specyfika modernizacji i rewitalizacji linii kolejowych eliminuje z rozważań,

występującą w Module A3 warunków [11], grupę tzw. zawężonych wartości dopuszczalnych (P1), ograniczając zakres badań do tzw. normalnych wartości dopuszczalnych (P2), odpowiadających występującym w [10] wartościom dla dogodnych warunków terenowych.

2. Zmiany parametrów kinematycznych i geometrycznych

Podstawowymi parametrami kinematycznymi analizowanymi przy projektowaniu linii kolejowej w płaszczyźnie poziomej są przyspieszenia niezrównoważone, występujące podczas ruchu pojazdu po łuku poziomym oraz ich dopuszczalne wartości. Determinują one bezpośrednio dopuszczalną prędkość na łuku oraz niezbędną przechyłkę, a pośrednio, jak i pośrednio długości krzywej przejściowej i rampy przechyłkowej. Zarówno w obowiązującym przed rokiem 2014 rozporządzeniu [9], jak i w nowych [10] i [11] tablice dopuszczalnych wartości przyspieszeń odśrodkowych uwzględniają wiele szczegółowych przypadków. Najważniejsze różnice z punktu widzenia modernizacji szlaków zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Najważniejsze zmiany w wartościach dopuszczalnych przyspieszenia odśrodkowego a_{dop} [m/s²] dotyczące szlaków

Typ układu lub ruchu	a_{dop} [9]	a_{dop} [10]
Ruch pasażerski	0,80 lub 0,60	0,85
Ruch towarowy	–	0,72
Poszerzenia międzytorza, warunki dogodne	0,30	–
Poszerzenie międzytorza, warunki trudne	0,45	–

Generalnie nowe przepisy dopuszczają większe wartości przyspieszeń odśrodkowych, likwidując przy tym warunki szczególne dla poszerzeń międzytorza oraz różnicowanie a_{dop} w zależności od prędkości. Wprowadzają także ograniczenie w ruchu pociągów towarowych (z uwagi na linię typu T40 przeznaczone wyłącznie dla ruchu towarowego). Wartości dla torów bocznych na stacjach oraz łuków dla promieni $R < 250$ m pozostają bez zmian. Jednoznaczna jest sytuacja w przypadku przyspieszenia dośrodkowego a_p , którego wartości dopuszczalne uległy zwiększeniu o stałą wartość. Ilustruje to tablica 2.



Tablica 2
Zmiany wartości dopuszczalnych przyspieszenia dośrodkowego a_t [m/s^2]

Przewozy Q [Tg/rok]	a_t [9]	a_t [10]	a_t [11], wg P2
$0 \leq Q < 5$	0,60	0,72	0,72
$5 \leq Q < 10$	0,50	0,62	0,62
$10 \leq Q < 15$	0,40	0,52	0,52
$15 \leq Q < 20$	0,30	0,42	0,42
$Q \geq 20$	0,20	0,32	0,32

Inne parametry kinematyczne, prędkość przyrostu przyspieszenia ψ_{dop} oraz prędkość podnoszenia się koła na rampie przechyłkowej f_{dop} , wpływają bezpośrednio na projektowanie długości krzywizy przejściowych oraz ramp przechyłkowych. Zmiany ich wartości przedstawiono w tablicach 3 i 4.

Tablica 3
Zmiany wartości dopuszczalnych prędkości przyrostu przyspieszenia ψ_{dop} [m/s^3]

Rodzaj układu torowego	ψ_{dop} [9]	ψ_{dop} [10]	ψ_{dop} [11], wg P2
Tory szlakowe, warunki dogodne	0,50	0,30	0,36
Tory szlakowe, warunki trudne	0,50	0,50	0,49–0,65
Tory boczne, rozjazdy, połączenia torów	1,00	1,00	0,49–0,65

Tablica 4
Zmiany wartości dopuszczalnych prędkości podnoszenia koła na rampie przechyłkowej f_{dop} [mm/s]

Warunki terenowe	f_{dop} [9]	f_{dop} [10]	f_{dop} , wg P2
Dogodne	28	28	28–56
Trudne	35	50	28–56

Wyjaśnienia w tablicach 3 i 4 wymaga kolumna „P2”:

- przepisy [11] nie definiują bezpośrednio wartości ψ_{dop} , odsyłając czytelnika do normy [8], której interpretacja zgodna z [2, 5] prowadzi do uzyskania wartości przedstawionych w tablicy 3,
- przepisy [11] operują pojęciem dopuszczalnego pochylenia rampy przechyłkowej, zamiast prędkości podnoszenia koła, różnicując tę wartość w zależności od prędkości pociągu – wartości te są od siebie zależne w sposób przedstawiony m.in. w [1], a wyniki obliczeń przedstawiono w tablicy 4.

Oprócz granicznych wartości parametrów kinematycznych, przepisy definiują także ograniczenia dwóch parametrów geometrycznych: wyrażanej w metrach minimalnej długości części kołowej łuku k_{min} oraz minimalnej długości wstawki prostej między łukami w_{min} . Wartości te również uległy zmianie, co ilustrują tablice 5 i 6. Także w tym przypadku przepisy [11] odsyłają projektanta do normy [8].

Tablica 5
Zmiany minimalnej długości wstawki prostej między łukami w_{min} [m]

Warunki terenowe	w_{min} [9]	w_{min} [10]	w_{min} [11], wg P2
Dogodne	$\max\left(\frac{V_{max}}{1,8}; 30\right)$	$\max\left(\frac{V_{max}}{2,5}; 20\right)$	$\max\left(\frac{V_{max}}{3,0}; 20\right)$
Trudne	$\max\left(\frac{V_{max}}{2,5}; 30\right)$	$\max\left(\frac{V_{max}}{3,0}; 20\right)$	$\max\left(\frac{V_{max}}{5,0}; 20\right)$

Tablica 6
Zmiany minimalnej długości części kołowej łuku k_{min} [m]

Warunki terenowe	w_{min} [9]	w_{min} [10]	w_{min} [11], wg P2
Dogodne	$\max\left(\frac{V_{max}}{2,5}; 30\right)$	$\max\left(\frac{V_{max}}{2,5}; 30\right)$	$\max\left(\frac{V_{max}}{3,0}; 20\right)$
Trudne	$\max\left(\frac{V_{max}}{2,5}; 30\right)$	$\max\left(\frac{V_{max}}{2,5}; 30\right)$	$\max\left(\frac{V_{max}}{5,0}; 20\right)$

Podsumowując przedstawione zmiany należy zauważyć, że prowadzą one do:

- zwiększenia dopuszczalnych wartości przyspieszeń nierównoważonych,
- zachowania lub zmniejszenia dopuszczalnej wartości przyrostu przyspieszenia,
- zachowania lub zwiększenia dopuszczalnej wartości prędkości podnoszenia koła na rampie przechyłkowej,
- zmniejszenia minimalnej długości wstawki prostej między łukami, a w trudnych warunkach terenowych – także części kołowej łuku.

3. Determinanty prędkości na szlakach

W dalszej części artykułu przeanalizowano wpływ zmian dopuszczalnych wartości parametrów kinematycznych na kluczowe, przy ustalaniu podatności modernizacyjnej na szlakach prędkości V_p , V_k i V_R . Prędkość maksymalna możliwa do uzyskania pod-



czas przejazdu przez łuk o danym promieniu zależy od możliwej do zastosowania na nim przechyłki maksymalnej. Wartość tej przechyłki jest wypadkową kilku czynników:

- przechyłki granicznej maksymalnej $h_{\downarrow \max}^{\uparrow gr}$, która generalnie wynosi 150 mm, jednak sytuacja terenowa może ją dodatkowo ograniczać (np. lokalizacja na łuku rozjazdu łukowanego jednostronnie limituje jej wartość do 100 mm, rozjazdu łukowanego dwustronnie – do 40 mm, przejazdu – do 35 mm),
- przechyłki możliwej do zastosowania z uwagi na istniejącą długość krzywej przejściowej (rampy przechyłkowej),
- przechyłki możliwej do zastosowania z uwagi na możliwą do uzyskania długość krzywej przejściowej (rampy przechyłkowej),
- przyjętych założeń modernizacyjnych (np. parametry ruchu towarowego, dopuszczalny koszt modernizacji).

Zazwyczaj przyjmuje się założenie, że maksymalna przechyłka możliwa do uzyskania w ruchu pociągów pasażerskich wynosi $h_{\downarrow \max}^{\uparrow gr}$ i tę wartość podstawia się w miejsce h_{\min} do podstawowego wzoru na dopuszczalne przyspieszenie odśrodkowe, uzyskując zależność:

$$a_{\downarrow dop} = \frac{v_{\downarrow \max}^{\uparrow 2}}{R} - \frac{gh_{\downarrow \max}^{\uparrow gr}}{s} \quad (1)$$

gdzie:

- $a_{\downarrow dop}$ – dopuszczalne przyspieszenie odśrodkowe [m/s²],
- v_{\max} – maksymalna prędkość pociągów [m/s],
- R_{\max} – promień łuku kołowego [m],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s²],
- h_{\max}^{gr} – przechyłka maksymalna graniczna [mm],
- s – rozstaw szyn [mm].

Po przekształceniu wzoru (1) względem v_{\max} , wyrażeniu prędkości w [km/h], podstawieniu $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ i $s = 1500 \text{ mm}$ otrzymuje się wzór na maksymalną prędkość z uwagi na istniejącą promień łuku:

$$v_{\downarrow \max}^{\uparrow} R = 3,6 \sqrt{R(a_{\downarrow dop} + 0,00654h_{\downarrow \max}^{\uparrow gr})}. \quad (2)$$

Prędkość możliwa do uzyskania na krzywej przejściowej o istniejącej długości L jest wypadkową dwóch czynników: prędkości podnoszenia koła na rampie przechyłkowej f i szybkości przyrostu przyspieszenia na krzywej przejściowej ψ . Pierwsza z tych zależności ma postać:

$$f = \frac{v \cdot h}{L} \leq f_{dop}. \quad (3)$$

gdzie:

- v – prędkość pociągów [m/s],
- L – istniejąca długość krzywej przejściowej (rampy przechyłkowej) [m],
- h – przechyłka [mm],
- f_{dop} – dopuszczalna prędkość podnoszenia koła na rampie przechyłkowej [mm/s].

Sytuacja graniczna ma miejsce wtedy, gdy:

$$f_{dop} = \frac{v_{\max} \cdot h}{L}. \quad (4)$$

Po wyrażeniu prędkości w km/h i odpowiednim przekształceniu wzoru otrzymuje się wzór na maksymalną prędkość możliwą do uzyskania na rampie przechyłkowej o znanej długości oraz przechyłce z uwagi na dopuszczalną prędkość podnoszenia koła:

$$V_{\downarrow \max}^{\uparrow} f = \frac{3,6L f_{\downarrow dop}}{h}. \quad (5)$$

Czynnik drugi – przyrost przyspieszenia na długości krzywej przejściowej (z prostoliniową rampą przechyłkową) – musi spełniać warunek:

$$\psi = \frac{v^2}{R \cdot L} \leq \psi_{dop}. \quad (6)$$

gdzie:

- ψ_{dop} – dopuszczalny przyrost przyspieszenia na krzywej przejściowej [m/s³].

Po podstawieniu $R = v^2/a$, wyrażeniu prędkości w km/h i podstawieniu dopuszczalnych wartości parametrów kinematycznych otrzymuje się wyrażenie na prędkość możliwą do uzyskania na krzywej przejściowej o danej długości przy zachowaniu wartości ψ_{dop} :

$$V_{\downarrow \max}^{\uparrow} \psi = \frac{3,6\psi_{\downarrow dop} \cdot L}{a_{\downarrow dop}}. \quad (7)$$

Najmniejsza z wartości obliczonych za pomocą wzorów (2), (5) i (7) definiuje prędkość V_{ψ} możliwą do uzyskania minimalnym kosztem, wyłącznie w drodze regulacji przechyłki. Porównując te wzory z wprowadzonymi zmianami wartości dopuszczalnych parametrów kinematycznych, można wyciągnąć następujące wnioski:

- zmiany dopuszczalnych wartości $a_{\downarrow dop}$ i a_t pozwalają na uzyskanie nieco większej niż dotychczas wartości $V_{\downarrow \max}^{\uparrow} R$,
- zmiana dopuszczalnej prędkości f pozwala na uzyskanie większej wartości $V_{\downarrow \max}^{\uparrow} f$ jedynie przy zastosowaniu wartości dla trudnych warunków terenowych,

- zmiana dopuszczalnej wartości ψ_{dop} , w powiązaniu ze zwiększeniem a_{dop} , powoduje zmniejszenie $V_{\downarrow \max} \uparrow \psi$ (w dogodnych warunkach terenowych - radykalnie).

Ponieważ wpływ zmian wartości parametrów na prędkość możliwą do uzyskania na krzywej przejściowej nie jest jednoznaczny, dokładniej zbadano związane z tym zależności. Minimalna długość krzywej przejściowej wynika z zależności:

$$L_{\downarrow \min} = (L_{\downarrow \min} \uparrow f; L_{\downarrow \min} \uparrow \psi) = \left(\frac{V_{\downarrow \max} \cdot h}{3,6 \cdot f_{\downarrow dop}}; \frac{a_{\downarrow \max} \cdot V_{\downarrow \max}}{3,6 \cdot \psi_{\downarrow dop}} \right) \quad (8)$$

W rozważaniach pominięto minimalną długość krzywej przejściowej ze względu na dokładność tyczenia, gdyż nie zależy ona od parametrów kinematycznych, a stosowane współcześnie przy modernizacji linii prędkości powodują, że warunek ten nie ma praktycznego znaczenia [1].

W dotychczasowej praktyce, podczas modernizacji linii kolejowych, była powszechna sytuacja, że wartość $L_{\downarrow \min} \uparrow f$ była zdecydowanie większa od $L_{\downarrow \min} \uparrow \psi$. Prosty zabieg zastosowania wartości f_{dop} dla trudnych warunków terenowych często umożliwia wprowadzenie większej prędkości bez konieczności wydłużania krzywych przejściowych [1]. Obecnie jednak te możliwości mogą ulec ograniczeniu z uwagi na zwiększenie wartości $L_{\downarrow \min} \uparrow \psi$ w konsekwencji zwiększenia a_{dop} i równoczesnego zmniejszenia ψ_{dop} . Aby wyznaczyć obszar, w którym o długości krzywej przejściowej decyduje każdy z warunków występujących we wzorze (8), wystarczy je porównać:

$$\frac{V_{\max} \cdot h}{3,6 \cdot f_{dop}} = \frac{a_{dop} \cdot V_{\max}}{3,6 \cdot \psi_{dop}} \quad (9)$$

Po przekształceniu otrzymuje się:

$$h = \frac{a_{dop} \cdot f_{dop}}{\psi_{dop}} \quad (10)$$

Zastosowanie na łuku przechyłki większej niż wynikającej z zależności (10) powoduje, że o długości krzywej przejściowej decyduje warunek na $L_{\downarrow \min} \uparrow f$. Zastosowanie wartości mniejszej preferuje warunek $L_{\downarrow \min} \uparrow \psi$. Po podstawieniu do wzoru (10) wartości dopuszczalnych otrzymuje się:

- dla parametrów według [9]:
 - $h = 35$ mm dla $V \geq 160$ km/h,
 - $h = 45$ mm dla $V < 160$ km/h,

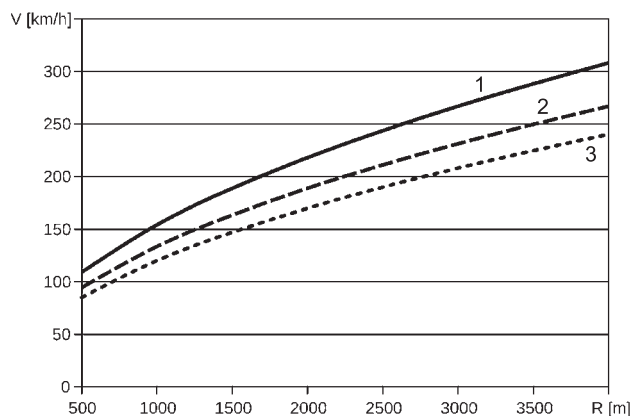
- dla parametrów według [10]:

- $h = 80$ mm;
- dla parametrów P2 z [11]:
 - $h = 65$ mm dla km/h,
 - $h = 105$ mm dla km/h,
 - $h = 130$ mm dla $V \leq 120$ km/h.

Podstawiając uzyskane wartości przechyłek do zależności:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{R(h + 153a_{dop})}{11,8}} \quad (11)$$

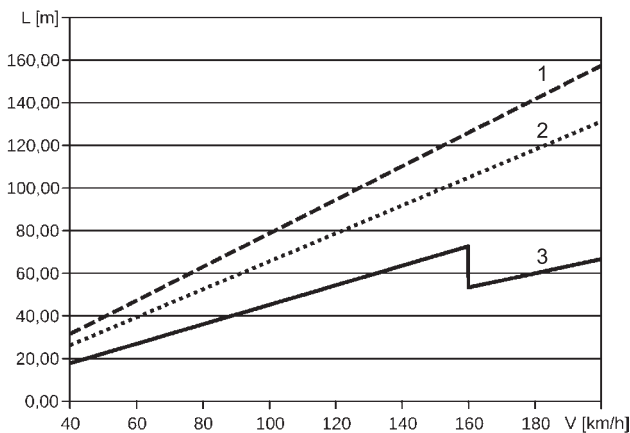
będącej przekształconym wzorem na przechyłkę minimalną, uzyskuje się możliwość graficznej prezentacji obszarów, w których długość krzywej przejściowej jest determinowana przez f_{dop} oraz ψ_{dop} . Przedstawiono to na rysunku 2, który został uzupełniony o wykres prędkości dla $h = h_{\downarrow \min} \uparrow gr = 150$ mm.



Rys. 2. Długość krzywej przejściowej w zależności od warunków $L_{\downarrow \min} \uparrow \psi$ i $L_{\downarrow \min} \uparrow f$: 1) $h = 150$ mm, 2) $h = 80$ mm, $h = 40$ mm [rys. autora]

Obszar między krzywymi dla $h = 40$ mm i $h = 150$ mm wyznacza decydującą rolę warunku $L_{\downarrow \min} \uparrow f$ dla starych wartości parametrów kinematycznych, natomiast obszar między krzywymi dla $h = 80$ mm oraz $h = 150$ mm - dla wartości zdefiniowanych w [10]. Nawet przy przyjętym uproszczeniu (dla starych wartości parametrów kinematycznych przyjęto do obliczeń przechyłkę stanowiącą wartość średnią z 35 i 45 mm) widać, że obszar, w którym o długości krzywej przejściowej decyduje rampa przechyłkowa zmniejszył się o ok. 40%. W przypadku prędkości stosowanych podczas rewitalizacji linii lokalnych (najczęściej nie przekraczających 120 km/h) należy stwierdzić, że stosowanie parametrów z grupy P2 przepisów [11] powoduje, że różnica między $L_{\downarrow \min} \uparrow f$ i $L_{\downarrow \min} \uparrow \psi$ jest minimalna, co oznacza w praktyce brak możliwości zwiększenia prędkości bez przesunięć toru w płaszczyźnie poziomej.

Dokładne różnice między długościami $L_{\downarrow} \min^{\uparrow} \psi$ obliczanymi dla różnych wartości parametrów kinematycznych przedstawiono na rysunku 3. Wykres dla wartości zgodnych z [9] uwzględnia zmianę a_{dop} w zależności od prędkości V_{max} .



Rys. 3. Wartość $L_{\downarrow} \min^{\uparrow} \psi$ w zależności od przyjętych wartości dopuszczalnych parametrów kinematycznych: 1) wg [9], 2) wg [10], 3) wg [11], P2 [rys. autora]

4. Determinanty prędkości na stacjach

Analizując parametry kinematyczne i geometryczne determinujące maksymalne prędkości możliwe do uzyskania podczas przejazdu przez stacje kolejowe należy uwzględnić:

- przyrosty przyspieszeń generowane podczas przejazdu przez rozgałęzienia lub połączenia torów;
- przyspieszenia niezrównoważone powstające podczas przejazdu przez tory zwrotne rozjazdów.

Pierwszy warunek nie wymaga analizy, gdyż wartość ψ_{dop} dla połączeń torów w nowych przepisach nie uległa zmianie. Odmienna sytuacja występuje w drugim przypadku, gdyż obowiązująca wcześniej jednolita dla wszystkich typów rozjazdów wartość $a_{dop} = 0,65 \text{ m/s}^2$ została znacznie zróżnicowana (tabl. 7).

Pozornie skomplikowana sytuacja przy modernizacji i rewitalizacji linii na sieci PKP ulega znacznemu uproszczeniu, gdyż w zdecydowanej większości przypadków $V_{max} \leq 160 \text{ km/h}$. Oznacza to zwiększenie wartości parametru a_{dop} z na rozjazdach zwyczajnych z 0,65 do 0,72 m/s^2 . Nie ma to żadnego wpływu na dopuszczalną prędkość w torach zwrotnych tych rozjazdów. W praktyce uzyskanie możliwych prędkości na niektórych rozjazdach (50 km/h na Rz 300-1:9 i 80 km/h na Rz 760-1:14) nadal zależy od modernizacji sygnalizacji kolejowej.

Tablica 7
Wartości dopuszczalne przyspieszenia odśrodkowego a_{dop} na rozjazdach według [10, 11]

Rodzaj rozjazdu	a_{dop} [m/s ²]
Tory zwrotne rozjazdów zwyczajnych ze stałą krzyżownicą:	
• $V \leq 160 \text{ km/h}$	0,72
• $160 < V \leq 200 \text{ km/h}$.	0,58
Tory zwrotne rozjazdów zwyczajnych z krzyżownicą ruchomą	0,85
Rozjazdy łukowe ze stałą krzyżownicą w toku zewnętrznym:	
• $V \leq 160 \text{ km/h}$	0,72
• $160 < V \leq 200 \text{ km/h}$	0,58
Rozjazdy łukowe ze stałą krzyżownicą w toku wewnętrznym	0,72
Rozjazdy łukowe z ruchomą krzyżownicą	0,85
Skrzyżowania torów i rozjazdy krzyżowe ($V \leq 100 \text{ km/h}$)	0,65

5. Studium modernizacji i rewitalizacji

W celu zilustrowania konsekwencji zmian parametrów, wprowadzonych przez [10,11], na podatność modernizacyjną szlaków, przeanalizowano przypadek typowy przy modernizacji linii magistralnych. Dotyczy on wyznaczenia charakterystyki prędkościowej pojedynczego łuku o promieniu $R = 1600 \text{ m}$, długości części kołowej łuku $k = 120 \text{ m}$, z krzywymi przejściowymi o długości $L_1 = L_2 = 100 \text{ m}$. W analizie przyjęto dopuszczalne wartości parametrów kinematycznych i geometrycznych dla dogodnych warunków terenowych. Zgodnie z obowiązującymi przed 2014 r. przepisami [9] należy przyjąć:

a_{dop} – w zależności od prędkości V_{max} równą
0,6 m/s^2 dla $V_{max} \geq 160 \text{ km/h}$ lub 0,8 m/s^2
dla $V_{max} < 160 \text{ km/h}$,

$f_{dop} = 28 \text{ mm/s}$,

$\psi_{dop} = 0,5 \text{ m/s}^3$,

$h_{max}^g = 150 \text{ mm}$.

Analizę rozpoczęto od sprawdzenia części kołowej łuku. Podstawiając do wzoru (2) przechyłkę $h_{\downarrow} \max^{\uparrow} g = 150 \text{ mm}$ otrzymano:

$$V_{max} = 3,6 \sqrt{R(a_{dop} + 0,981)}.$$

Zakładając prędkość nie mniejszą niż 160 km/h otrzymano:

$$V_{max} = 3,6 \sqrt{R(a_{dop} + 0,981)} = 4,52 \sqrt{R} = 4,52 \sqrt{1600} = 180,8 \approx 180 \text{ [km/h]}.$$

Wynik jest większy niż 160 km/h, co świadczy o właściwie przyjętej wartości a_{dop} i nie wymaga powtórzenia obliczeń. Wymagane było natomiast sprawdzenie warunku minimalnej długości części kołowej łuku, która przy obliczonej prędkości wynosi:

$$k_{\min} = \max \left\{ \frac{V_{\max}}{2,5}; 30 \right\} = \max \left\{ \frac{180}{2,5}; 30 \right\} = \\ = \max \{72; 30\} = 72 \text{ m.}$$

Ponieważ obliczona wartość jest mniejsza od istniejącej długości części kołowej łuku k , stwierdzono, że promień łuku umożliwi ruch pociągów pasażerskich z prędkością $V_{\downarrow \max} R = 180 \text{ km/h}$.

Spośród zależności wyznaczających minimalną długość krzywej przejściowej na łuku z przechyłką, jedynie minimalna długość krzywej przejściowej z uwagi na dokładność tyczenia zależy wyłącznie od parametrów geometrycznych. Wynosi ona:

$$L_{\downarrow \min} n = 0,7\sqrt{R} = 0,7\sqrt{1600} = 28 \text{ m}$$

i jest mniejsza od istniejącej długości krzywej przejściowej, zatem nie stanowiła żadnego ograniczenia w dalszych rozważaniach. Prędkość możliwą do uzyskania na krzywej przejściowej o danej długości z uwagi na dopuszczalny przyrost przyspieszenia obliczono ze wzoru (7). Wynosi ona:

$$V_{\downarrow \max} \psi = \frac{3,6 \cdot \psi_{\downarrow dop} \cdot L}{a_{\downarrow dop}} = \frac{3,6 \cdot 0,5 \cdot 100}{0,6} = 300 \text{ km/h.}$$

Jak widać, $V > \psi_{\max} R_{V_{\max}}$, czyli przyrost przyspieszenia na krzywej przejściowej w badanym przypadku również nie stanowił ograniczenia. Ostatnim ograniczeniem, które przeanalizowano, jest dopuszczalna szybkość podnoszenia koła po szynie na rampie przechyłkowej. Wynosi ona:

$$f_{dop} = \frac{V \cdot h}{3,6 \cdot L} [\text{mm/s}],$$

skąd wywodzi się znany wzór na minimalną długość rampy przechyłkowej:

$$L_{\downarrow \min} f = \frac{V_{\downarrow \max} f \cdot h}{3,6 \cdot f_{\downarrow dop}} [\text{m}].$$

We wzorze tym występują dwie niewiadome: $V_{\downarrow \max} f$ oraz h , przy czym h zależy także od $V_{\downarrow \max} f$. Nie można zatem w prosty sposób obliczyć prędkości możliwej do uzyskania na rampie przechyłkowej o danej długości. Wobec tego posłużono się iteracją, którą rozpoczęto od warto-

ści granicznych obliczonych dla łuku kołowego, tzn. $V_{\downarrow \max} f = 180 \text{ km/h}$ i odpowiadającej jej $h = 150 \text{ mm}$. Otrzymano:

$$L_{\downarrow \min} f = \frac{V_{\downarrow \max} f \cdot h}{m} = \frac{180 \cdot 150}{3,6 \cdot 28} = 268 \geq 100.$$

Wymagana długość $L_{\downarrow \min} f$ jest wyraźnie większa od długości istniejącej L . Zatem to rampa przechyłkowa stanowi istotne ograniczenie przy modernizacji analizowanego łuku. Dodatkowo analizując możliwość uzyskania takiej długości otrzymano:

$$k \approx 120 - (268 - 100) < 0 \text{ m},$$

czyli układ geometrycznie sprzeczny.

W kolejnej iteracji zmniejszono prędkość o 10 km/h i dla tak otrzymanej $V_{\downarrow \max} f = 170 \text{ km/h}$ obliczono wymaganą przechyłkę oraz długość rampy przechyłkowej:

$$h_{\min} = \frac{11,8 \cdot 170^2}{1600} - 153 \cdot 0,6 = 121 \approx 125 \text{ mm},$$

$$L_{\downarrow \min} f = \frac{170 \cdot 125}{3,6 \cdot 28} = 210,8 \text{ m},$$

$$k_{\min} = \sup \left\{ \frac{170}{2,5}; 30 \right\} = 68 \text{ m},$$

$$k \approx 120 - (210,8 - 100) = 9,2 \text{ m}.$$

Wynika stąd, że wprowadzenie na łuku prędkości $V_{\downarrow \max} f = 170 \text{ km/h}$ wymaga przebudowy układu do łuku parabolicznego. Podobną sytuację otrzymano dla $V_{\downarrow \max} f = 160 \text{ km/h}$.

Powtarzając obliczenia dla $V_{\downarrow \max} f = 150 \text{ km/h}$ pamiętano o zmianie przyjmowanej dotychczas wartości a_{dop} . Otrzymano:

$$h_{\min} = \frac{11,8 \cdot 150^2}{1600} - 153 \cdot 0,8 = 43,5 \approx 45 \text{ mm},$$

$$L_{\downarrow \min} f = \frac{150 \cdot 45}{3,6 \cdot 28} = 67,0 \text{ m},$$

$$L_{\downarrow \min} \psi = \frac{0,8 \cdot 150}{3,6 \cdot 0,5} = 66,7 \text{ m}.$$

Zatem dla prędkości $V_{\downarrow \max} f = 150 \text{ km/h}$ wymagana długość krzywej przejściowej jest mniejszą od istniejącej. Ponieważ jest także mniejsza od $V_{\downarrow \max} R$, jej wprowadzenie w analizowanym układzie nie wy-

maga żadnych przesunięć toru w płaszczyźnie poziomej. Wystarczająca jest regulacja przechyłki.

Powtarzając opisaną analizę tego łuku dla wartości parametrów zgodnych z [10] przyjęto:

$$\begin{aligned} a_{dop} & - \text{dla pociągów pasażerskich} = 0,85 \text{ m/s}^2, \\ f & = 28 \text{ mm/s}, \\ \psi_{dop} & = 0,3 \text{ m/s}^3, \\ h_{max}^g & = 150 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Wykonując według wcześniejszego schematu obliczenia dla łuku kołowego otrzymano:

$$V_{max} = 3,6\sqrt{1600(0,85 + 0,981)} = 194,85 \approx 190 \text{ km/h}$$

oraz

$$\begin{aligned} k_{min} & = \sup\left\{\frac{V_{max}}{2,5}; 30\right\} = \sup\left\{\frac{190}{2,5}; 30\right\} = \\ & = \sup\{76; 30\} = 76 \text{ m}. \end{aligned}$$

Oznacza to, że $V_{\downarrow} \max^{\uparrow} R = 190 \text{ km/h}$.

We wzorze na $L_{\downarrow} \min^{\uparrow} n$ nie występują żadne parametry kinematyczne, zatem wartość ta nie ulegnie zmianie i także w świetle [10] nie stanowi ograniczenia. Inaczej jest w przypadku $V_{\downarrow} \max^{\uparrow} \psi$, której wartość wynosi

$$\begin{aligned} V_{\downarrow} \max^{\uparrow} \psi & = \frac{3,6 \cdot \psi_{dop} \cdot L}{a_{\downarrow} dop} = \frac{3,6 \cdot 0,3 \cdot 100}{0,85} = \\ & = 127,06 \approx 120 \text{ km/h}. \end{aligned}$$

Jak widać, $V < \psi_{max} R_{V_{max}}$, czyli to istniejąca długość krzywej przejściowej jest istotnym ograniczeniem przy modernizacji łuku. W konsekwencji w dalszej analizie należało brać pod uwagę zarówno dopuszczalny przyrost przyspieszenia, jak i dopuszczalną prędkość podnoszenia koła na rampie przechyłkowej. Analizę rozpoczęto od wartości granicznych określonych dla łuku kołowego, tzn. $V_{max} = 190 \text{ km/h}$ i $h = 150 \text{ mm}$:

$$L_{\downarrow} \min^{\uparrow} f = \frac{V_{\downarrow} \max^{\uparrow} \cdot h}{3,6 \cdot F} = \frac{190 \cdot 150}{3,6 \cdot 28} = 282,74 \geq 100,$$

$$L_{\downarrow} \min^{\uparrow} \psi = \frac{a_{\downarrow} dop \cdot V_{\downarrow} \max}{3,6 \cdot \psi_{\downarrow} dop} = \frac{0,85 \cdot 190}{3,6 \cdot 0,3} = 149,54 \geq 100,$$

$$L_{min} = \sup\{282,74; 149,54\} = 285 \text{ m},$$

$$k \approx 120 - (285 - 100) = -65 < 0.$$

Wymagana dla tych parametrów długość krzywej przejściowej nie jest możliwa do wprowadzenia

z uwagi na istniejącą długość części kołowej łuku. Kontynuując iterację, zmniejszono w kolejnym kroku V_{max} o 10 km/h. Dla $V_{max} = 180 \text{ km/h}$ otrzymano:

$$h_{min} = \frac{11,8 \cdot 180^2}{1600} - 153 \cdot 0,85 = 108,9 \approx 110 \text{ mm},$$

$$L_{\downarrow} \min^{\uparrow} f = \frac{180 \cdot 110}{3,6 \cdot 28} = 196,42 \text{ m},$$

$$L_{\downarrow} \min^{\uparrow} \psi = \frac{0,85 \cdot 180}{3,6 \cdot 0,3} = 141,67,$$

$$L_{min} = \sup\{196,42; 141,67\} = 200 \text{ m},$$

$$k_{min} = \sup\left\{\frac{180}{2,5}; 30\right\} = 72 \text{ m},$$

$$k \approx 120 - (200 - 100) = 20 \text{ m}.$$

Zatem dla uzyskania prędkości $V_{max} = 180 \text{ km/h}$ wymagane jest wprowadzenie łuku parabolicznego. Dla $V_{max} = 170 \text{ km/h}$ uzyskano:

$$h_{min} = \frac{11,8 \cdot 170^2}{1600} - 153 \cdot 0,85 = 83,09 \approx 85 \text{ mm},$$

$$L_{\downarrow} \min^{\uparrow} f = \frac{170 \cdot 85}{3,6 \cdot 28} = 143,35 \text{ m},$$

$$L_{\downarrow} \min^{\uparrow} \psi = \frac{0,85 \cdot 170}{3,6 \cdot 0,3} = 133,80,$$

$$L_{min} = \sup\{143,35; 133,80\} = 145 \text{ m},$$

$$k_{min} = \sup\left\{\frac{170}{2,5}; 30\right\} = 68 \text{ m},$$

$$k \approx 120 - (145 - 100) = 75 \text{ m}.$$

Dla uzyskania prędkości $V_{max} = 170 \text{ km/h}$ wymagane jest wydłużenie krzywych przejściowych. Na koniec sprawdzono prędkość $V_{max} = 120 \text{ km/h}$, przy której - z uwagi na dopuszczalny przyrost przyspieszenia, nie jest wymagana zmiana długości krzywej przejściowej. Otrzymano wtedy:

$$h_{min} = \frac{11,8 \cdot 120^2}{1600} - 153 \cdot 0,85 = -24 \approx 0 \text{ mm},$$



$$L_{\downarrow} \min^{\uparrow} \psi = \frac{0,0214 \cdot (120^{\uparrow 3})}{1600 \cdot 0,3} = 77,04,$$

$$L_{\min} = \sup\{77,04; 28\} = 78 < 100 \text{ m}.$$

Oznacza to, że prędkość $V_{\max} = 120$ km/h można uzyskać minimalnym kosztem, wykonując regulację łuku, po której przechyłka $h = 0$ mm.

Z analizy wynika, że zmiana wartości parametrów z określonych w [9] na zdefiniowane w [10] spowodowała zmniejszenie prędkości V_e ze 150 do 120 km/h, natomiast prędkość V_k wzrosła ze 170 do 180 km/h.

Podobną metodykę zastosowano do analizy łuków położonych na odcinku rewitalizowanej linii o znaczeniu drugorzędym. Obliczenia są w takim przypadku mniej skomplikowane, gdyż typowy zakres prac wykonywanych przy rewitalizacji linii eliminuje zmiany położenia linii w płaszczyźnie poziomej (niezbędne, np. przy wydłużaniu krzywych przejściowych) [6]. Wyniki analizy przedstawiono w tablicy 8. Należy zwrócić uwagę, że w takim przypadku nowe przepisy często ograniczają możliwą do uzyskania prędkość maksymalną.

Konsekwencje wprowadzonych zmian w dopuszczalnych wartościach parametrów kinematycznych i geometrycznych dla bardziej skomplikowanych układów geometrycznych toru są trudne do oszacowania. Przykładem może być projekt optymalnego poszerzenia międzytorza na prostej, którego szczegółową analizę zawarto w pracy [7]. Dla przebadanych

wartości poszerzeń z zakresu $\langle 0,30; 13,00 \rangle$ m oraz dla typów linii o $V_{\max} \in \langle 80; 160 \rangle$ km/h stwierdzono, że nowe wartości parametrów kinematycznych dla dogodnych warunków terenowych jednoznacznie preferują poszerzenia wykonane za pomocą czterech krzywych przejściowych bez przechyłki, eliminując pozostałe znane modele matematyczne.

6. Wnioski

1. Wprowadzone zmiany dopuszczalnych wartości parametrów kinematycznych znacznie ograniczyły możliwości podwyższania prędkości na linii wyłącznie w drodze regulacji przechyłki, bez wykonywania robót związanych z przesuwaniem toru. Na liniach rewitalizowanych, obniżenie dopuszczalnej wartości ψ_{dop} często powoduje zmniejszenie możliwości podwyższenia prędkości pociągów.
2. Na liniach modernizowanych istnieje możliwość niewielkiego podwyższenia (ok. 6%) prędkości V_k , a więc prędkości możliwej do uzyskania w wyniku wydłużenia krzywych przejściowych. Związane to jest w dużej mierze ze złagodzeniem warunków na minimalne długości wstawek prostych między łukami oraz z nieznacznym zwiększeniem prędkości $V_{\downarrow} \max^{\uparrow} R$.
3. Uzależnienie dopuszczalnej wartości niektórych parametrów od prędkości zmusza projektanta do większej uwagi i szerszego wykorzystania w obliczeniach metod iteracyjnych.

Tablica 8

Prędkości możliwe do uzyskania na łukach rewitalizowanego odcinka linii o znaczeniu lokalnym

Parametry łuku			Obliczenia wg [9]		Obliczenia wg [10]	
R [m]	L [m]	k [m]	V_{\max} [km/h]	Determinant	V_{\max} [km/h]	Determinant
930	40	61	90	ψ_{dop}	50	ψ_{dop}
950	90	100	120	f_{dop}	110	ψ_{dop}
960	120	275	130	f_{dop}	130	f_{dop}
1370	90	47	110	k_{\min}	110	k_{\min}
650	120	189	110	f_{dop}	110	f_{dop}
700	80	135	100	f_{dop}	100	ψ_{dop}
1950	60	207	160	f_{dop}	70	ψ_{dop}
1425	70	482	140	f_{dop}	80	ψ_{dop}
1245	70	49	120	k_{\min}	80	ψ_{dop}
520	80	121	90	f_{dop}	90	f_{dop}
1790	60	135	150	f_{dop}	70	ψ_{dop}

Literatura

1. Bałuch H.: *Optymalizacja układów geometrycznych toru*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1983.
2. Bałuch H.: *Wielkości kinematyczne w projektowaniu układów geometrycznych toru na kolejach dużych prędkości*, Problemy Kolejnictwa, zeszyt 152, Warszawa 2011, s. 23–32.
3. Bogdaniuk B.: *Modernizacja dróg kolejowych przy ich elektryfikacji*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1988.
4. Bogdaniuk B., Towpik K.: *Budowa, modernizacja i naprawy dróg kolejowych*. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2010.
5. Koc W.: *Uwagi do metodyki projektowania układów geometrycznych toru*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym” INFRA-SZYN 2011, Zakopane 2011, s. 93–110.
6. Massel A., Wołek M.: *Podręcznik rewitalizacji linii kolejowych*, Urząd Marszałkowski Województwa Pomorskiego, Gdańsk 2007.
7. Nowakowski M.J.: *Projektowanie poszerzeń międzytorzy w aspekcie zmian dopuszczalnych wartości parametrów geometrycznych i kinematycznych*, Przegląd Komunikacyjny, nr 9/2015, str. 15–18.
8. PN-EN 13803–1:2010: *Kolejnictwo - Tor - Parametry projektowania toru w planie - Tor o szerokości 1435 mm i większej - Część 1: Szlak*, PKN 2010.
9. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie, Dziennik Ustaw 1998 nr 151 poz. 987.
10. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 5 czerwca 2014 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie, Dziennik Ustaw 2014 poz. 867.
11. Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1 (D-1), PKP PLK S.A., Warszawa 2005.

Influence of Changes in Allowable Values of Geometric and Kinematic Parameters on Modernization Flexibility of Track Layouts

Summary

Adaptability of a given railway line section to change of service speed is known as its modernization flexibility. Any speed increase potential stems from a combination of existing geometrical layout plan, space constraints and limit values of geometric and kinematic parameters. Changes of these limits directly influence calculations of vital geometric track characteristics: minimal radius, cant and transition curve length (of gradient due to cant). In recent years, geometric and kinematic limit values were defined in PN-EN 13803–1:2010 norm and updated in an ordinance published in Dziennik Ustaw 2014 pos. 867 and in Id-1 Technical Conditions. It was revealed that in context of single curves, changes in regulations offer less gains than expected. This is because of decreased limit value of acceleration change. For given section, the deciding factor for shortening travel time is localization of curves with no modernization flexibility. For track connections, changes in limit values of accelerations usually do not effect in increased travel speed, because of constraints imposed by railway signalization and required width of space between running tracks.

Keywords: flexibility of modernization, track geometry, kinematic parameters



Влияние изменений допускаемых значений геометрических и кинематических параметров на восприимчивость к модернизации путевой схемы

Резюме

Восприимчивостью к модернизации называем уровень адаптации проанализированного участка железнодорожной линии к изменению скорости движения. Диапазон возможных изменений скорости (с смысле увеличения ее) является результатом существующей геометрической системы линий на плане, ограничений местоположения и допускаемых значений геометрических и кинематических параметров. Любые изменения последних непосредственно влияют на вычисление элементарных геометрических характеристик пути: минимального радиуса, возвышения наружного рельса, длины переходной кривой. В последнее время значения геометрических и кинематических ограничений определены в норме PN-EN 13803-1:2010 и пересмотрено в распоряжении Вестника законов РП от 2014 поз. 867 и инструкции Id-1. Диапазон прогнозируемых на сети РКР модернизаций и ревитализаций побудил к подробному анализу влияния этих изменений на восприимчивость к модернизации. В результате проведенных исследований было установлено, что в контексте одиночной дуги введенные изменения генерируют прибыль ниже ожидаемой. Это возникает из понижения допускаемого значения роста ускорения. На уровне участка линии решающее значение для времени проезда имеет размещение дуг с нулевой восприимчивостью к модернизации. Для путевых узлов изменения допускаемых изменений в основном не влияют на увеличение скорости проезда, учитывая ограничения системы сигнализации и необходимую ширину междупутья.

Ключевые слова: восприимчивость к модернизации, геометрия пути, кинематические параметры