

Henryk Bałuch, Maria Bałuch

Kształtowanie układów geometrycznych toru z uwzględnieniem trwałości nawierzchni

W całości zagadnień dróg kolejowych układy geometryczne wyróżniają się następującymi cechami:

- 1) mają decydujący wpływ na parametry eksploatacyjne linii kolejowych, wśród których najważniejszymi są: prędkość maksymalna pociągów, opory ruchu związane bezpośrednio z zużyciem energii, koszty utrzymania nawierzchni i pojazdów szynowych oraz spokojność jazdy;
- 2) wywierają istotny wpływ na koszty budowy nowych linii;
- 3) oznaczają się małą podatnością na zmiany, które zwykle wymagają przebudowy nawierzchni i podtorza, konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej oraz nierzadko zmian granic władania gruntów (wywłaszczeń).

Cechy te sprawiają, że projektowanie układów geometrycznych jest jednym z najbardziej odpowiedzialnych zadań w twórczości inżynierów dróg kolejowych. Znajomość kształtowania układów geometrycznych powinni opanować nie tylko ci inżynierowie, którzy zamierzają zająć się projektowaniem, lecz również i ci, którzy będą sprawdzać dokumentację, począwszy od studiów wykonalności bądź eksploatować tory o zaprojektowanych układach.

Zwrócenie uwagi na znaczenie dokładnego sprawdzania zaprojektowanych układów wynika z obserwowanego w ostatnich latach niepokojącego zjawiska, którym są błędy merytoryczne w doskonale opracowanej pod względem graficznym dokumentacji projektowej z użyciem profesjonalnych pakietów wspomaganie komputerowego. Są to zarówno błędy polegające na niepełnym uwzględnieniu zagadnień ruchowo-przewozowych [4], jak i konstrukcyjnych. Nawet najdoskonalszy system komputerowy nie jest w stanie ostrzec projektanta, który na załomie profilu podłużnego 7,5‰ zaprojektował rozjazd, ani inżyniera, który kierując wymianą rozjazdu o promieniu 190 m na rozjazd o promieniu 300 m polecił wyciąć szyny nie przed stykiem przedglicowym, lecz za krzyżownicą.

Rozwiązania optymalne i oparte na heurystyce

Obliczenia układów geometrycznych toru wykonuje się obecnie przy zastosowaniu techniki komputerowej. W najprostszym przypadku można się posłużyć kalkulatorami wielofunkcyjnymi, w bardziej złożonych – opracowanymi do tego celu aplikacjami, a w ciągłej działalności projektowej – dużymi systemami komputerowego wspomaganie.

Zastosowanie techniki komputerowej w projektowaniu układów geometrycznych toru to nie tylko oszczędność czasu przy obliczeniach i przygotowaniu dokumentacji, lecz również filozofia projektowania dająca możliwość wyboru wariantu rozwiązania najlepszego spośród kilku wariantów poprawnych. W przypadku,

gdy wybór taki odbywa się przy zastosowaniu funkcji celu, lub inaczej kryterium, można mówić o optymalizacji układu geometrycznego. Optymalizacja polega więc na znalezieniu maksimum funkcji

$$\omega(x_m; y_n) \quad (1)$$

przy kryteriach oceny $\{x_m, y_n\} = \{k_j\}$.

Do optymalizacji układu geometrycznego dochodzi się przez kolejne etapy, którymi są formułowanie zadania, jego analiza, opracowanie modelu optymalizacji i zbioru warunków ograniczających [1].

W przypadku, gdy wybór wariantu rozwiązania następuje bez zastosowania funkcji (1), należy mówić o wyborze heurystycznym i nie używać określeń wybór lub wariant optymalny. Wybór heurystyczny nie musi oznaczać wcale wyboru gorszego. Istnieje też pewna grupa układów geometrycznych toru, których rozwiązania, przy założonych wielkościach, są jednoznaczne. I tak np. przyjęcie rozstawu torów głównych zasadniczych i skosów rozjazdów określa jednoznacznie wszystkie wymiary pojedynczego połączenia torów. Na optymalizację jest natomiast miejsce wówczas, gdy będzie się rozważać jaki przyjąć rozstaw i skosy (a co za tym idzie – promienie) rozjazdów.

Modelowanie układów geometrycznych toru jest działalnością na pograniczu teorii oraz praktyki i wymaga przede wszystkim znajomości fizycznych skutków zastosowania przyjętych zmiennych decyzyjnych. Przyjmując konkretne wartości tych zmiennych nie powinno się ograniczać jedynie do sprawdzenia ich zgodności z danymi normatywnymi, lecz trzeba ocenić ich wpływ na późniejsze utrzymanie nawierzchni. Dość często bowiem przyjęcie granicznych wartości normatywnych umożliwia uzyskanie oszczędności w budowie torów, lecz z biegiem czasu lub rosnącego obciążenia może to wpłynąć na zwiększenie kosztów utrzymania nawierzchni na tak zaprojektowanych układach. W sumie więc zwiększą się koszty cyklu życia określonego obiektu (*Life Cycle Cost*) [7].

Zakres zastosowań obliczeń i analiz układów geometrycznych toru

Obliczenia i analizy układów geometrycznych toru znajdują zastosowanie w czterech zakresach.

1. Przy sprawdzaniu istniejących układów, które może mieć dwa cele:
 - a) zbadanie czy istnieje możliwość poprawy parametrów eksploatacyjnych bez zmiany tych układów lub przy zmianach nie wymagających większych robót,
 - b) ustalenie przyczyn błędnego ukształtowania pewnych układów i znalezienie sposobu ich poprawy.

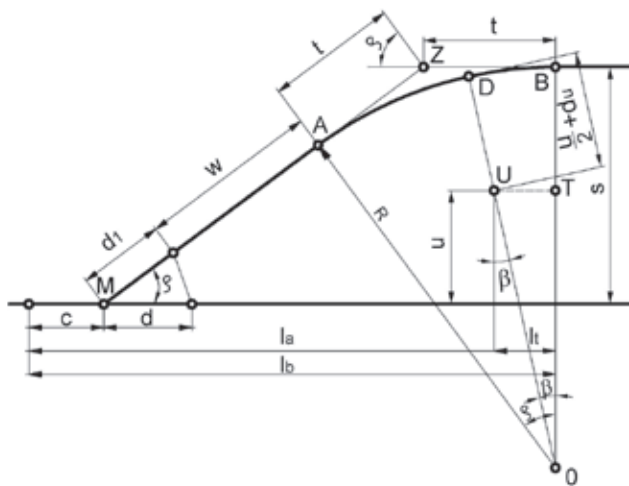
2. W modernizacji linii kolejowych, tj. w badaniu możliwości osiągnięcia założonych warunków, przede wszystkim zaś zakładanej maksymalnej prędkości pociągów. W tym celu, w ramach studium wykonalności opracowuje się kilka wariantów, różniących się czasami jazdy między skrajnymi stacjami,
3. Przy projektowaniu nowych linii kolejowych, poczynwszy od analiz podstawowych założeń, poprzez prace na mapach, aż do szczegółowych i zwykle wielowariantowych podejść do punktów stycznych z istniejącymi liniami,
4. W sprawdzaniu dokumentacji projektowej.

Wybór wariantów układów z uwzględnieniem trwałości szyn

Jednym z najprostszych układów geometrycznych powszechnie stosowanych jest układ rozgałęzienia torów rozjazdem zwyczajnym z zachowaniem ich równoległości (rys. 1). Układ ten stwarza dobrą okazję do pokazania na czym polega twórcze podejście do rozwiązywania zadań z uwzględnieniem cech geometrycznych, kinematycznych oraz eksploatacyjnych z myślą o uzyskaniu możliwie największej trwałości rozjazdu i przyległych do niego torów. Przyjęty skos i promień rozjazdu oraz rozstaw torów wyznaczają jednoznacznie odległość od punktu matematycznego rozjazdu, który nazywany jest też środkiem geometrycznym rozjazdu (nie we wszystkich rozjazdach jednak dzieli on całą długość na dwie równe części)

$$ZM = \frac{s}{\sin \rho} \quad (2)$$

Na tym odcinku musi się zmieścić długość toru zwrotnego od punktu matematycznego do końca rozjazdu d_1 , wstawka prosta w oraz styczna t łuku zaokrąglającego. Od doboru stosunku w/t zależy trafność zaprojektowanego układu.



Rys. 1. Schemat rozgałęzienia torów

Promień łuku jest funkcją przyjętej wstawki, gdyż przy $t = ZM - d_1 - w$ zachodzi zależność

$$R = \frac{ZM - d_1 - w}{\operatorname{tg}\left(\frac{\rho}{2}\right)} \quad (3)$$

Na rysunku 2 przedstawiono długości wstawek prostych w rozgałęzieniu torów rozjazdem 60E1-500-1:12, przy rozstawie torów 4,50 m, w funkcji promienia łuku zaokrąglającego R . Z rysunku tego wynika, że istnieje pewien przedział racjonalnego

wyboru wstawek prostych. I tak np. można wyjść z założenia, że wstawka ta może mieć długość

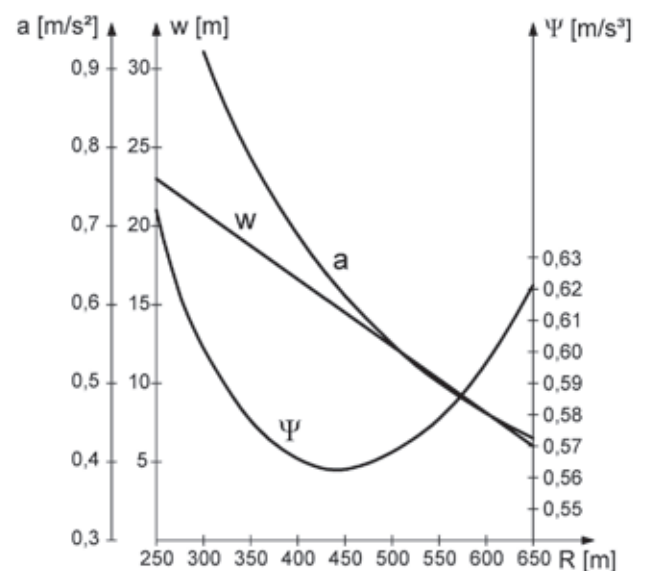
$$w = \frac{V}{6} \quad (4)$$

a więc przy prędkości $V = 60$ km/h na torze zwrotnym rozjazdu $w = 10$ m. W tym przypadku, jak wynika z rysunku 2, promień R byłby równy ok. 560 m (dokładnie 562,327 m).

W rozpatrywanym układzie geometrycznym, zgodnie z warunkami [6], należy sprawdzić przyrost przyspieszenia (chodzi o wzór w § 24.2.10, w którym korekta nie zauważyła błędu polegającego na braku liczby 3,6 w mianowniku). Najpierw jednak warto wyznaczyć przyspieszenie niezrównoważone a na łuku zaokrąglającym, obliczane według wzoru

$$a = \frac{V^2}{12,96 R} \quad (5)$$

kóre przy prędkości $V = 60$ km/h jest również przedstawione na rysunku 2.



Rys. 2. Długość wstawek prostych w i wielkości kinematyczne a oraz ψ

Na rysunku tym widoczny jest również przebieg zmian przyrostu przyspieszeń między łukiem toru zwrotnego i łukiem zaokrąglającym. Łatwo wykazać, że przyrost ten może być obliczany ze wzoru

$$\psi = \frac{V^3}{3,6} \cdot \frac{1}{R_z} - \frac{1}{R} \quad (6)$$

gdzie

b – baza sztywne wagonu przyjmowana jako 20 m.

Na podstawie rysunku 2 można wyciągnąć kilka wniosków. I tak, nie chcąc przekroczyć przyspieszenia w łuku za rozjazdem 0,6 m/s² należy odrzucić wszystkie promienie poniżej 463 m. Pod względem geometrycznym, jako układ optymalny można by uznać przyjęcie promienia łuku, przy którym przyrost przyspieszenia ψ osiąga minimum. Taką właśnie funkcję celu przyjęto w pracach [1,2]. Warunkowi temu odpowiada promień $R \approx 450$ m.

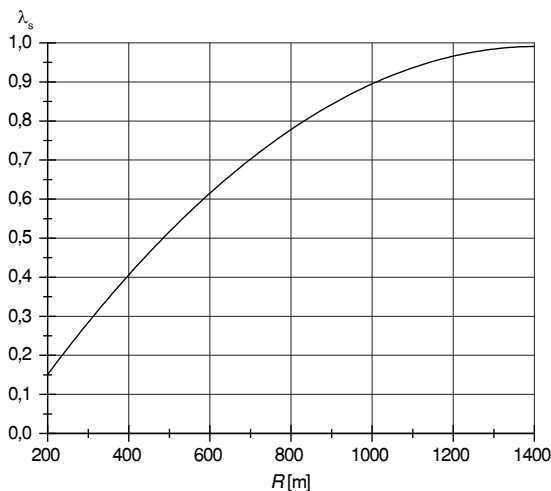
Zauważmy jednak, że różnice wartości ψ są niewielkie, np. różnica między wartością minimalną ψ przy promieniu $R = 463$ m ($0,564$ m/s³) i wartością przy promieniu $R = 600$ m, ($0,597$ m/s³) wynosi tylko $0,033$ m/s³. Warto również wziąć pod uwagę, że w przypadku podkładów drewnianych w torze głównym dodatkowym o promieniu mniejszym niż 500 m nie można by zastosować konstrukcji bezстыkowej. Ograniczając się tylko do analizy kinematycznej trzeba dodać, że przy zastosowaniu promienia 600 m niezrównoważone przyspieszenie zmniejszy się do $0,46$ m/s².

Niemniej ważna, niż zmniejszenie niezrównoważonego przyspieszenia, jest możliwość spowolnienia zużycia szyn zależnego od promienia łuku. Biorąc to pod uwagę autorzy zaproponowali w pracy [5], aby przy rozpatrywaniu układów geometrycznych torów, w których są łuki o małych i średnich promieniach, połączyć dotychczasową analizę kinematyczną z oceną trwałości szyn.

Wpływ promienia łuku na trwałość szyn można wyrazić za pomocą wzoru zaproponowanego w cytowanej pracy, który ma następującą postać (rys. 3)

$$\lambda_s = -5,75 \cdot 10^{-7} R^2 + 1,62 \cdot 10^{-3} R - 0,15 \quad (7)$$

Z tego wzoru wynika, że przy założeniu trwałości szyn 60E1 (UIC 60) na prostej, wynoszącej 500 Tg, trwałość szyn w łuku o promieniu 463 m zmniejszy się do 238 Tg, a przy promieniu 600 m – do 308 Tg. Różnica 70 Tg jest więc znacząca.



Rys. 3. Wpływ łuków na zmniejszenie trwałości szyn

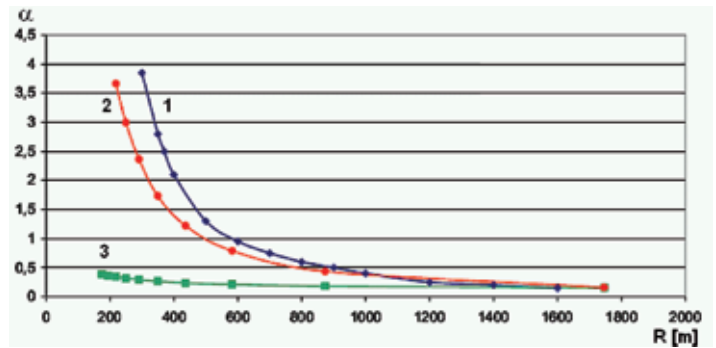
Dla porównania warto przytoczyć współczynniki zmniejszające trwałość szyn w łukach na innych kolejach (rys. 4). Krzywa 3 (rys. 4), przedstawiająca wyniki zużycia szyn dobrze smarowanych, jest nad wyraz optymistyczna (są to wyniki podane przez firmę badawczą ZETA – TECH w USA). Wyniki szwedzkie w przedziale promieni 300 – 600 m są bardzo zbliżone do przedstawionych na rysunku 3.

Jednoczesne uwzględnienie trwałości szyn i wielkości kinematycznych prowadzi do funkcji celu wyrażonej wzorem:

$$\omega(\lambda_s, \alpha) = \frac{\lambda_s}{\alpha} = \text{maximum} \quad (8)$$

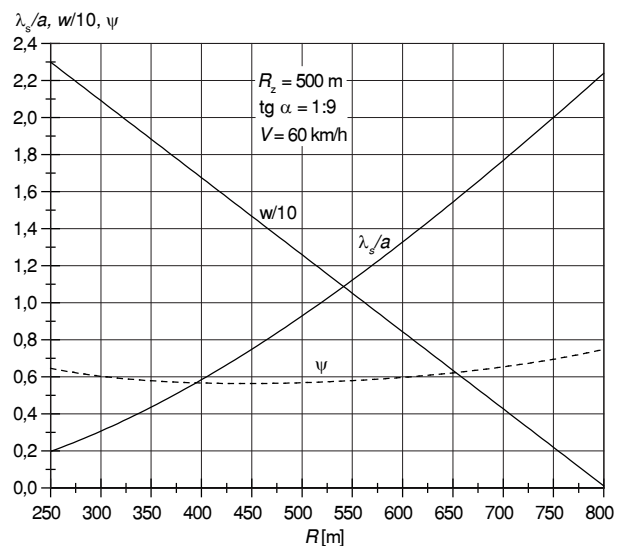
przy ograniczeniach

$$\left. \begin{aligned} \alpha &\leq \alpha_g \\ \psi &\leq \psi_g \\ w &\geq w_{min} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$



Rys. 4. Wskaźniki zużycia szyn w łukach
1- dane AREMA, 2 – dane szwedzkie, 3 – dane USA dla szyn dobrze smarowanych [3]

Funkcja (8) jest funkcją rosnącą w całym rozpatrywanym przedziale promieni łuku zaokrąglającego (rys. 5).



Rys. 5. Przebieg funkcji celu na tle długości wstawki (w skali 1:10) oraz przyrostu przyspieszenia

Przyrost przyspieszenia, przedstawiony również na rysunku 5, jest znacznie mniejszy od przyrostu granicznego $\psi_g = 1,0$ m/s³ [6]. Warunkiem ograniczającym staje się więc w tym przypadku długość wstawki prostej. Według [6] długość ta w torach stacyjnych (a w tym przypadku tor odgałęziający jest torem stacyjnym) powinna odpowiadać wzorowi (4), lecz nie może być mniejsza niż 6 m. Na podstawie rysunku 5 można by więc przy wstawce minimalnej zastosować promień $R_z \approx 650$ m.

Zgodnie z podanym już zaleceniem by nie przyjmować wartości granicznych bez ich oceny, warto przeanalizować pewne przypadki, w których wstawki proste są krótsze niż 6 m. Przypadek przedstawiony na rysunku 6 to pojedyncze połączenie torów o rozstawie $4,0$ m rozjazdami 60E1–300–1:9. Przy prawidłowym ukształtowaniu takiego układu długość wstawki prostej wynosi $2,992$ m.

Chcąc ocenić poprawność ukształtowania wstawki prostej na podstawie fotografii trzeba je wykonać z dwóch stanowisk, tak aby można było obejrzeć oba toki. Lewa część rysunku 6 uwidacznia wyraźnie tok zewnętrzny, który od strony kierownicy rozjazdu na drugim planie jest przesunięty w kierunku międzytorza. W prawej części widać dokładnie położenie toku wewnętrznego, w którym



Rys. 6. Niedokładne wytyczenie pojedynczego połączenia torów równoległych, skutkujące skróceniem wstawki prostej do ok. 1,8 m

jest brak łagodnego przejścia od strony krzyżownicy rozjazdu na drugim planie. Wskutek niedokładnego wytyczenia tego połączenia, wstawka prosta jest krótsza o ok. 1,2 m od możliwej do użycia.

Sytuacja przedstawiona na rysunku 7 nie wymaga fotografowania z dwóch stanowisk. Dostrzegany na pierwszy rzut oka błąd popełniony przy układaniu tego rozjazdu polega nie tylko na braku wstawki prostej, lecz nawet na niewielkim wygięciu toru zasadniczego rozjazdu znajdującego się na drugim planie. Genezą tego błędu było nieuwzględnienie nierównoległego położenia torów.



Rys. 7. Łuki odwrotne zamiast wstawki prostej

Na podstawie rysunków 6 i 7 można by wyciągnąć wniosek, że skoro w torach głównych zasadniczych (rys. 7) i na połączeniach między nimi (rys. 6) może być wstawka rzędu 2 m lub może nawet – zamiast odcinka prostego – łuk odwrotny, to tym bardziej nie ma żadnych przeszkód by w rozpatrywanym rozgałęzieniu torów równoległych zastosować wstawkę 6 m. W niedługim czasie wejdzie w życie zalecenie, aby w torach stacyjnych stosować wstawki nie krótsze niż 7 m. Biorąc pod uwagę tę możliwość oraz bardziej wyraziste ukształtowanie całego układu warto zastosować promień łuku zaokrąglającego $R_z = 600$ m, a zatem o 100 m większy niż promień toru zwrotnego, przy którym długość wstawki prostej wyniesie 8,433 m (długość tę obliczono przekształcając wzór (3)).

Omawiając zagadnienia związane z przyrostem przyspieszeń warto odnotować nowy parametr kinematyczny, jaki wprowadza

projekt normy prEN 13803-1 (2008). Jest nim prędkość zmian niedoboru przechyłki na krzywych przejściowych, która nie powinna przekraczać 90 mm/s przy niedoborze mniejszym lub równym 163 mm i 100 mm/s, gdy niedobór jest większy. Kryterium to nie może być jednak stosowane na połączeniach torów rozjazdami, gdyż np. w rozpatrywanym przez nas układzie stosunek niedoboru przechytek na obu rozjazdach do czasu przejazdu przez wstawkę prostą przekracza 500 mm/s.

Wnioski

Analizowanie wariantów układów geometrycznych toru przy zastosowaniu funkcji celu, obejmującej nie tylko parametry kinematyczne, lecz również trwałość szyn rozwija metodę projektowania połączeń torów, w których występują łuki o małych i średnich promieniach. Zwiększenie trwałości szyn w łukach ma związek z trwałością pozostałych części nawierzchni kolejowej, a pośrednio wpływa również na spowolnienie degradacji całej drogi kolejowej.

Dążenie do uzyskania możliwie największej trwałości nawierzchni nie odnosi się tylko do przypadków, w których można zastosować funkcje celu, lecz i do tych układów geometrycznych, w których wybór wariantów odbywa się przy wykorzystaniu intuicji i doświadczenia.



Literatura

- [1] Bałuch M.: *Kształtowanie krzywizn za torami zwrotnymi rozjazdów*. Drogi Kolejowe 8/1985.
- [2] Larsson D.: *A study of the track degradation process related to the changes in railway traffic*. Lulea University of Technology 2004.
- [3] Massel A.: *Błędy w projektowaniu modernizacji dróg kolejowych*. II Konferencja NT „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym INFRASZYN 2009”, Zakopane 2009.
- [4] Bałuch H.: *Optymalizacja układów geometrycznych toru*. WKŁ, Warszawa 1983.
- [5] Projekt badawczy nr N509 001 31/0045 *Zwiększenie trwałości rozjazdów w drogach szynowych metodami eksploatacyjnymi*, realizowany w latach 2006–2009 pod kier. Marii Bałuch.
- [6] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie.
- [7] Wełnic P.: *Szacowanie kosztu cyklu życia według Polskiej Normy PN-EN 60300-3-3*. Technika Transportu Szynowego 6/2009.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006–2009 jako projekt badawczy nr N 509 001 31/0045 „Zwiększenie trwałości rozjazdów w drogach szynowych metodami eksploatacyjnymi”.

Autorzy

prof. dr hab. inż. Henryk Bałuch

doc. dr hab. inż. Maria Bałuch

Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa w Warszawie