

PROJEKT OPTIMALNEGO ŁUKU POZIOMEGO JAKO ELEMENT NAUCZANIA KSZTAŁTOWANIA UKŁADÓW GEOMETRYCZNYCH TORU

Streszczenie

Aspekt geometryczny stanowi ważny element w nauczaniu projektowania dróg szynowych na studiach 1-go i 2-go stopnia na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej. Podstawowym, najczęściej spotykanym w praktyce elementem linii kolejowej w planie jest łuk poziomy z krzywymi przejściowymi. Z tego względu na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej wdrożono ćwiczenie projektowe ujmujące to zagadnienie w sposób kompleksowy. Zastosowano formułę zgodną z zasadami nauczania problemowego. Na bazie możliwie najbardziej skomplikowanego przypadku student nabywa umiejętność uzyskania rozwiązania poprawnego geometrycznie, spełniającego ograniczenia kinematyczne i zarazem optymalnego, zgodnie z przyjętym kryterium. Opanowanie zawartego w ćwiczeniu materiału daje solidne podstawy do realizacji projektów wykonywanych na kolejnych semestrach studiów (także 2-go stopnia) oraz w praktyce zawodowej. Ćwiczenie, po niewielkich modyfikacjach i uzupełnieniach, można wykorzystać na kierunkach związanych z geodezją kolejową oraz na studiach niestacjonarnych.

WSTĘP

Zagadnienia związane z kształtowaniem geometrycznym toru w planie na szlakach i stacjach linii kolejowych stanowią ważny element nauczania projektowania dróg szynowych na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej. Podstawowym, najczęściej spotykanym w praktyce elementem linii kolejowej w planie, jest łuk poziomy (z krzywymi przejściowymi lub bez nich). Może on występować samodzielnie, jako pojedynczy łuk na szlaku linii kolejowej, lub być fragmentem bardziej skomplikowanego układu torowego — poszerzenia międzytorza na prostej, łuku kosztowego, połączenia torów nierównoległych lub położonych w łuku itp. Każdy z tych bardziej skomplikowanych układów można zdekomponować do zespołu połączonych ze sobą łuków poziomych. Zatem umiejętność rozwiązania układu podstawowego ma fundamentalne znaczenie, gdyż jest wykorzystywana do rozwiązywania układów bardziej złożonych.

Z powyższych względów na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej wdrożono ćwiczenie projektowe ujmujące zagadnienie projektowania łuku poziomego w sposób kompleksowy, z uwzględnieniem możliwie najbardziej skomplikowanego przypadku. Przyjęto założenie, że umiejętność rozwiązania zadania o znacznym stopniu trudności będzie procentować w przyszłości, na kolejnych semestrach studiów oraz w praktyce zawodowej. Postanowiono także wykorzystać niejednoznaczność wyznaczania niektórych parametrów układu (przede wszystkim przechyłki) do wprowadzenia elementów optymalizacji, mającej na celu wybranie najlepszego rozwiązania ze zbioru rozwiązań poprawnych. W trakcie poszukiwania tego rozwiązania studenci posługują się metodami iteracyjnymi.

1. PROJEKTOWANIE UKŁADÓW TOROWYCH W PLANACH STUDIÓW

Spośród pięciu kierunków realizowanych na Wydziale Inżynierii i Środowiska Politechniki Gdańskiej, zagadnienia związane z projektowaniem dróg szynowych występują na kierunkach: *Budownictwo*, *Geodezja i Kartografia* oraz *Transport*. W najszerszym zakresie są one realizowane na kierunku *Budownictwo*. Bezpośrednie odniesie-

nia do układów geometrycznych toru występują w efektach kształcenia oraz treściach następujących przedmiotów [10]:

- Drogi szynowe — semestr 5 i 6, studia stacjonarne 1-go stopnia (wykład i ćwiczenia);
- Podstawy projektowania dróg szynowych — semestr 6, studia stacjonarne 1-go stopnia (projektowanie);
- Projektowanie układów torowych — semestr 7, studia stacjonarne 1-go stopnia (wykład i projektowanie);
- Projektowanie dróg szynowych — semestr 7, studia stacjonarne 1-go stopnia (wykład i projektowanie);
- Drogi szynowe — semestr 1 studia stacjonarne 2-go stopnia (wykład i ćwiczenia)
- Drogi szynowe II — semestr 2, studia stacjonarne 2-go stopnia (wykład, ćwiczenia i projektowanie);
- Koleje dużych prędkości — semestr 2, studia stacjonarne 2-go stopnia (wykład, ćwiczenia i projektowanie);
- Modernizacja dróg szynowych — semestr 2, studia stacjonarne 2-go stopnia (wykład i projektowanie).

Elementarnym układem geometrycznym toru szlakowego linii kolejowej w planie jest łuk kołowy z krzywymi przejściowymi, który w praktyce występuje najczęściej w postaci symetrycznej, tzn. z krzywymi przejściowymi o jednakowej długości po obu stronach łuku. Dlatego na ćwiczeniach z pierwszego w planie studiów przedmiotu związanego z drogami szynowymi realizowane jest całosemestralne ćwiczenie projektowe dotyczące kompleksowo tego tematu. Zdobyta wiedza i umiejętności są w toku dalszego nauczania wymagane i wykorzystywane na wszystkich wymienionych wyżej przedmiotach przez cały tok studiów 1-go i 2-go stopnia.

2. TEKSTY ŹRÓDŁOWE POLECANE STUDENTOM I UWAGI DO NICH

Zagadnienia związane z projektowaniem układów geometrycznych toru są tematem wielu dostępnych pozycji w literaturze krajowej i zagranicznej. Przy realizacji omawianego zadania studentom rekomendowane są przede wszystkim pozycje książkowe [1, 2, 4], rozporządzenia i przepisy [3, 11, 12] oraz norma [9]. Jednak wymienione źródła mają szereg wad, do których należy zaliczyć przede wszystkim:

- trudności w dotarciu do pozycji książkowych w uwagi na rok ich wydania oraz niewielkie nakłady;
- nieścisłości w obowiązujących przepisach, ich nowelizacje wprowadzone w latach 2014–2015 i brak tekstów ujednoczonych, co nawet doświadczonym projektantom stwarza duże trudności interpretacyjne;
- wybiórcze (fragmentaryczne) potraktowanie zagadnienia — w książce [1] w sposób kompleksowy potraktowano ograniczenia kinematyczne kosztem zagadnień geometrycznych (łuk kołowy z krzywymi przejściowymi jako całość uwzględniono jedynie w jednym z rozdziałów dotyczących wydłużania krzywych przejściowych), natomiast w [2, 4] nacisk położono na rozwiązanie geometrii układu kosztem zagadnień kinematycznych;
- powszechne stosowanie wzorów przybliżonych w obliczeniach krzywej przejściowej w postaci paraboli trzeciego stopnia, co prowadzi do niedokładności przedstawionych w licznych publikacjach, między innymi w [1, 5, 6].

Z tego względu wymienione wyżej pozycje książkowe są studentom rekomendowane jako literatura uzupełniająca, a na potrzeby zajęć prowadzonych na Politechnice Gdańskiej opracowano obszerny materiał wprowadzający [8], udostępniane studentom w formie pliku PDF i w miarę potrzeb aktualizowane. Aktualizacje są efektem wniosków wyciąganych przez prowadzących zajęcia na podstawie obserwacji procesu dydaktycznego, oraz są wymuszane zmianami obowiązujących przepisów. I tak ostatnio:

- w związku z opublikowaniem nowelizacji [12], w roku akademickim 2014/2015 zmieniono wartości dopuszczalne parametrów kinematycznych i geometrycznych oraz usunięto część ćwiczenia, związaną z wykonywaniem poszerzenia międzytorza w łukach o promieniach $R \leq 4000$ m;

- w związku z opublikowaniem w marcu 2015 r. znowelizowanej instrukcji [3], w bieżącym roku akademickim przebieg ćwiczenia uzupełniono o elementy optymalizacji wielowariantowej, wykorzystującej zawężone i normalne wartości dopuszczalne parametrów kinematycznych.

3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU I SPOSÓB JEGO ROZWIĄZANIA

Rozwiązanie łuku poziomego z krzywymi przejściowymi w sensie geometrycznym jest zagadnieniem banalnym. Krzywą przejściową o długości L , łączącą prostą z łukiem kołowym o promieniu R , przedstawiono na rysunku 1. Definiuje ją równanie

$$y = \frac{x^3}{6 \cdot R \cdot L} \quad (1)$$

Mając dane L i R można wyznaczyć jej podstawowe charakterystyki katowe i liniowe:

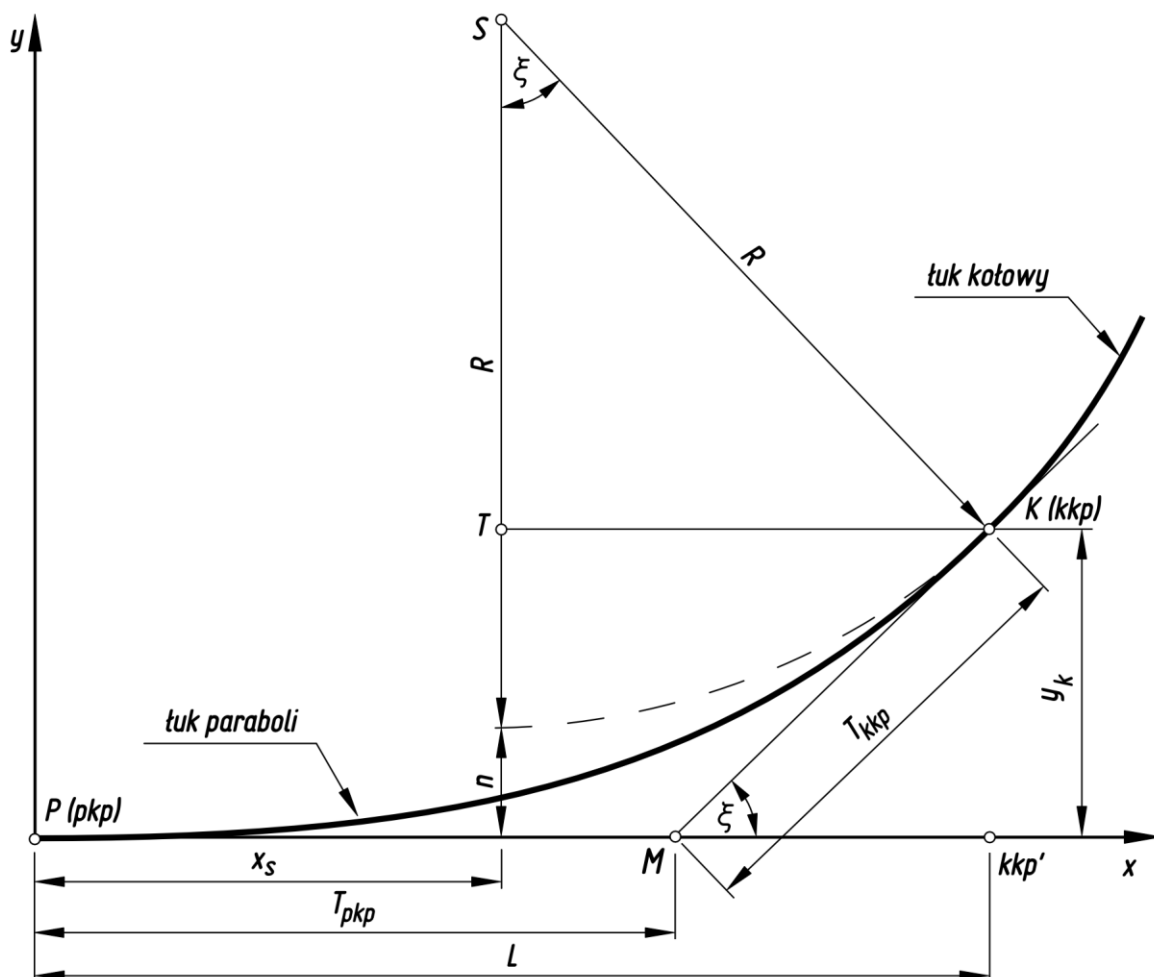
- kąt nachylenia stycznej do krzywej ξ w końcu krzywej przejściowej k_{kp} , obliczany ze wzoru

$$\tan \xi = \frac{d}{dx} \left(\frac{x^3}{6 \cdot R \cdot L} \right)_{x=L} = \frac{x^2}{2 \cdot R \cdot L} \Big|_{x=L} = \frac{L}{2 \cdot R} \quad (2)$$

- odciętą środka łuku kołowego S obliczaną ze wzoru

$$x_s = L - R \cdot \sin \xi \quad (3)$$

- rzędną końca krzywej przejściowej obliczaną ze wzoru



Rys. 1. Krzywa przejściowa w postaci paraboli trzeciego stopnia. Źródło: opracowanie własne

$$y_k = \frac{x^3}{6 \cdot R \cdot L} \Big|_{x=L} = \frac{L^2}{6 \cdot R} \quad (4)$$

– przesunięcie łuku do wewnątrz wyrażane wzorem

$$n = y_k - R \cdot (1 - \cos \xi) \quad (5)$$

– długość stycznej do krzywej w jej początku, tzn. w *pkp*, obliczaną ze wzoru

$$T_{pkp} = L - \frac{y_k}{\tan \xi} = L - \frac{\frac{L^2}{6 \cdot R}}{\frac{L}{2 \cdot R}} = L - \frac{L}{3} = \frac{2}{3} \cdot L \quad (6)$$

– długość stycznej do krzywej w jej końcu, tzn. w *kkp*, obliczaną ze wzoru

$$T_{kkp} = \frac{L}{3 \cdot \cos \xi} \quad (7)$$

Szczególną uwagę należy zwrócić na stosowanie dokładnych wzorów (3) i (5) w miejsce wzorów przybliżonych, powszechnie występujących w literaturze.

Schemat łuku z symetrycznymi krzywymi przejściowymi przedstawiono na rysunku 2. Do jego geometrycznego rozwiązania potrzebna jest znajomość promienia łuku R , kąta zwrotu trasy γ oraz długości krzywej przejściowej L . Po obliczeniu charakterystyk kątowych i liniowych krzywej przejściowej zgodnie z wzorami (3) – (7), można przystąpić do obliczenia pozostałych parametrów, tzn. kąta α , na którym oparta jest część kołowa łuku zawarta między końcami krzywych przejściowych, strzałki łuku Z oraz długości stycznych T_s ,

T_0 i T_k :

$$\alpha = \gamma - 2 \cdot \xi \quad (8)$$

$$Z = (R + n) \cdot \left(\sec \frac{\gamma}{2} - 1 \right) + n \quad (9)$$

$$T_s = (R + n) \cdot \tan \frac{\gamma}{2} \quad (10)$$

$$T_0 = x_s + T_s \quad (11)$$

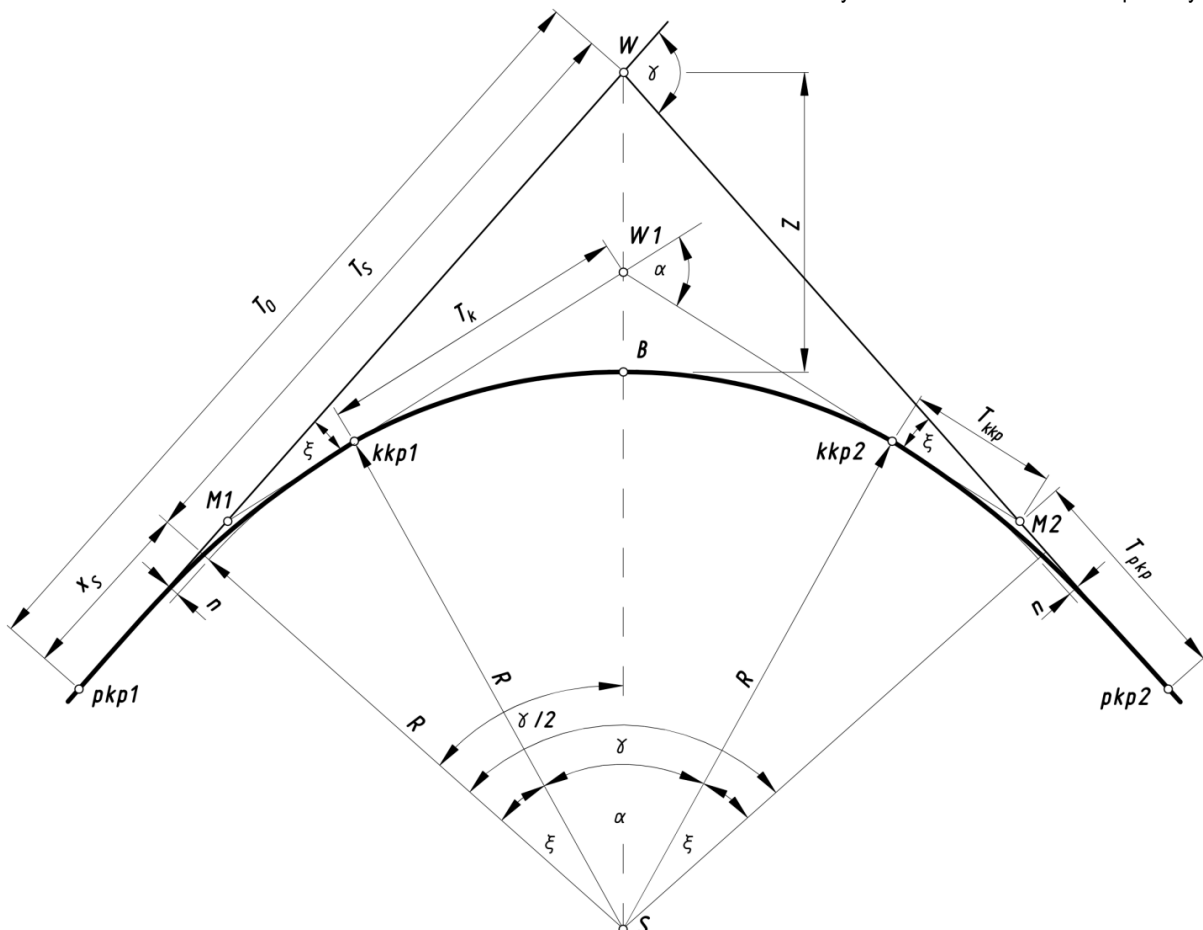
$$T_k = R \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (12)$$

Ostatni parametr (długość części kołowej łuku) — w zależności od jednostek, w jakich podany jest kąt α — należy wyznaczyć z jednego z poniższych wzorów:

$$k = R \cdot \alpha^{RAD} = \frac{\pi \cdot R \cdot \alpha^{GRAD}}{200^{GRAD}} = \frac{\pi \cdot R \cdot \alpha^\circ}{180^\circ} \quad (13)$$

Możliwość rozwiązania przedstawionych zależności geometrycznych zależy ściśle od odpowiedniego zestawu danych (R , L oraz γ). Jednak w praktyce projektant dysponuje jedynie dwiema z wymaganych wartości: promieniem łuku R oraz kątem zwrotu trasy γ . Obliczanie parametrów układu należy wtedy rozpocząć od wyznaczenia brakującego parametru geometrycznego, to znaczy długości krzywej przejściowej L . Rozwiązanie tego problemu, przy odpowiednim sformułowaniu zadania, zawiera w sobie duże możliwości dydaktyczne, gdyż:

– na liniach o niejednorodnym ruchu pociągów do wyznaczenia minimalnej długości rampy przechyłkowej L_{min}^{f} dysponujemy zakresem możliwych do zastosowania przechyłek toru



Rys. 2. Symetryczny łuk kołowy z krzywymi przejściowymi. Źródło: opracowanie własne

$h_{min} \leq h \leq h_{max}$, z których każda wartość (podzielna przez 5) jest poprawna, ale przy ustalonym kryterium optymalizacji — tylko jedna osiąga wartość optymalną;

- przepisy zawierają jedynie wzory na minimalną długość krzywej przejściowej i pomijają — występujący w przepisach drogowych — aspekt minimalnej długości części kołowej łuku ($k \geq k_{min}$) oraz poprawności geometrycznej układu ($k \geq 0$), co pozwala na sformułowanie ścieżki postępowania wymagającej kontroli tych parametrów i poszukiwania poprawnego rozwiązania z zakresu rozwiązań możliwych.

W celu wykorzystania tych możliwości sformułowano funkcję celu optymalnego rozwiązania łuku poziomego o promieniu R z symetrycznymi krzywymi przejściowymi o długości L , która wyrażona jest wzorem

$$Z = \frac{L}{R} \quad (14)$$

Funkcja ta powinna osiągnąć wartość maksymalną przy spełnieniu ograniczenia geometrycznego, wynikającego z danego kąta zwrotu trasy γ . Oznacza to zaprojektowanie łuku z krzywymi przejściowymi o największej możliwej długości (w dostępnym obszarze poprawnych rozwiązań).

Zadaniem studentów jest zaprojektowanie łuku poziomego zlokalizowanego na szlaku nowo budowanej dwutorowej linii kolejowej przy kryterium optymalizacji sformułowanym za pomocą warunku (14). Dane jakie otrzymują studenci to:

- promień projektowanego łuku R [m];
- szerokość międzytorza w torach prostych na szlaku d [m];
- dane do równania kierunkowego stycznej początkowej (na rysunku 2 przebiegającej przez punkty pkp1 i W) w osi torowiska: współrzędne dowolnego punktu P (X_p, Y_p) na tej prostej oraz jej azymut Az_1 [°] w stronę od punktu pkp1 do wierzchołka W;
- dane do równania kierunkowego stycznej końcowej (na rysunku 2 przebiegającej przez punkty W i pkp2) w osi torowiska: współrzędne dowolnego punktu P (X_k, Y_k) na tej prostej oraz jej azymut Az_2 [°] w stronę od wierzchołka W do pkp2;
- maksymalną prędkość pociągów V_{max} [km/h];
- minimalną prędkość pociągów towarowych V_t [km/h];
- obciążenie linii przewozami Q [Tg/rok];

Poprawne rozwiązanie zadania wymaga postępowania w ściśle określonej, niżej przedstawionej kolejności.

Po pierwsze należy ustalić zbiór ograniczeń geometrycznych i kinematycznych, a więc następujące wartości:

- minimalną i maksymalną wartość przechyłki, jakie można zastosować ze względów utrzymaniowych: h_{min} oraz h_{max} [mm];
- minimalną długość części kołowej łuku k_{min} [m];
- dopuszczalną wartość przyspieszenia odśrodkowego a_{dop} [m/s^2] (dla ruchu pociągów najszybszych, tj. pasażerskich);
- dopuszczalną wartość przyspieszenia dośrodkowego a_t [m/s^2] (dla ruchu najwolniejszych pociągów towarowych);
- dopuszczalną prędkość przyrostu przyspieszenia na krzywej przejściowej ψ_{dop} [m/s^3];
- dopuszczalną prędkość podnoszenia się koła na rampie przechyłkowej f_{dop} [mm/s].

Źródłem tych wartości są obowiązujące przepisy. W bieżącej wersji ćwiczenia, zgodnie z zaleceniami zawartymi w znowelizowanej instrukcji [3], studenci ustalają wartości rozszerzone P1 i normalne P2. W praktyce oznacza to uzyskanie dwóch zestawów parametrów, różniących się wartościami przyspieszeń a_{dop} i a_t . Wartości dopuszczalne ψ_{dop} i f_{dop} w instrukcji [3] nie występują i należy je przyjąć na podstawie [12], jak dla dogodnych warunków

terenowych. Sposób wyznaczania minimalnej długości części kołowej łuku nie został znowelizowany, zatem wartość tę należy przyjąć na podstawie [11].

Brakujący kąt zwrotu trasy γ oraz niezbędny przy obliczaniu współrzędnych punktów głównych układu kierunek zakrętu studenci obliczają, analizując azymuty stycznych.

Etap drugi jest najbardziej skomplikowany. Jego celem jest znalezienie optymalnej (w sensie zadanej funkcji celu) długości krzywej przejściowej. Rozpoczyna się on od wyznaczenia przechyłki minimalnej h_{min} zależnej od a_{dop} oraz maksymalnej h_{max} zależnej od a_t . Analiza rozpoczyna się od wartości przyspieszeń, należących do zbioru wartości rozszerzonych P1. Kolejna czynność to przyjęcie $h_{obl} = h_{max}$ i wyznaczenie długości krzywej przejściowej z warunku

$$L_{min} = \max \left(\frac{V_{max} \cdot h_{obl}}{3,6 \cdot f_{dop}}; \frac{a_{dop} \cdot V_{max}}{3,6 \cdot \psi_{dop}}; 0,7 \cdot \sqrt{R} \right) \quad (15)$$

oraz sprawdzenie, czy dla obliczonej długości krzywej zachowana jest minimalna długość części kołowej łuku. Sprawdzenie wykonywane jest w torze wewnętrznym o promieniu $R_{ww} = R$, czyli sprawdzana jest wartość logiczna wyrażenia $k_{ww} \geq k_{min}$. Niespełnienie warunku implikuje konieczność skrócenia krzywej przejściowej. Jest to możliwe wtedy, gdy z trzech warunków wymienionych we wzorze (15) największą wartość daje warunek pierwszy (na minimalną długość rampy przechyłkowej). Należy wtedy zmniejszyć przechyłkę i powtórzyć obliczenia L_{min} oraz sprawdzenie warunku na k_{min} . Z uwagi na przyjęte kryterium optymalizacji należy znaleźć największą wartość h_{obl} z przedziału $\langle h_{min}; h_{max} \rangle$, dla której spełniony jest warunek $k_{ww} \geq k_{min}$. Jego niespełnienie przy maksymalnym możliwym skróceniu krzywej przejściowej oznacza konieczność wprowadzenia łuku parabolicznego.

Po wprowadzeniu nowelizacji [3] etap ten rozbudowano. Wymagane jest poszukiwanie optymalnej długości krzywej przejściowej najpierw dla wartości rozszerzonych parametrów kinematycznych P1. Niemożność spełnienia warunku $k_{ww} \geq k_{min}$ wymaga powtórzenia obliczeń dla wartości normalnych P2. Jeżeli także dla nich nie można uzyskać wymaganej wartości k_{ww} , należy zaprojektować łuk paraboliczny.

Etap trzeci to wyznaczanie charakterystyk kątowych i liniowych krzywej przejściowej oraz łuku poziomego, zgodnie z wzorami (3) – (13). Obliczenia należy przeprowadzić dla obu torów: wewnętrznego o promieniu $R_{ww} = R$ i zewnętrznego o promieniu $R_{zw} = R + d$.

Ostatni etap obliczeniowy zadania polega na wyznaczeniu współrzędnych punktów głównych układu (wszystkich punktów oznaczonych na rysunku 2) w geodezyjnym kartezjańskim płaskim układzie współrzędnych prostokątnych, w obu torach. Zgodnie z metodyką przedstawioną w [8], obliczenia należy rozpocząć od wyznaczenia współrzędnych wierzchołków głównych łuku w obu torach (punktów W_{ww} oraz W_{zw}).

W roku akademickim 2011/2012 ćwiczenie rozbudowano o część rysunkową, polegającą na zaprojektowaniu dla obliczonego łuku przekroju normalnego nawierzchni i podtorza dla określonego standardu konstrukcyjnego nawierzchni.

4. WSKAZÓWKI METODYCZNE DLA PROWADZĄCEGO ZAJĘCIA

Uzyskanie maksymalnych korzyści dydaktycznych wymaga od prowadzącego zajęcia odpowiedniego przygotowania zarówno teoretycznego wprowadzenia do zagadnienia, jak i samych tematów. Omawiane zagadnienie jest realizowane przy okazji pierwszego zetknięcia studentów z tematyką dróg szynowych. Ponieważ

ćwiczenia nie są poprzedzane wykładami, które rozpoczynają się równoległe na tym samym semestrze, zadaniem prowadzącego jest przeprowadzenie szczegółowego wprowadzenia teoretycznego. Nie można się ograniczyć jedynie do przedstawienia wzorów, czyli do odpowiedzi „jak to się robi”, ale należy udzielić studentom dokładnej odpowiedzi na pytanie „dlaczego tak się robi”, ze szczególnym uwzględnieniem analizy przyspieszeń nierównoważonych. Z praktyki wynika, że szczególnie nacisk należy położyć na niżej wymienione zagadnienia.

- Duże rozproszenie przepisów i istniejące w nich nieścisłości powodują trudności interpretacyjne, co skutkuje błędnym dobieraniem dopuszczalnych wartości parametrów kinematycznych oraz geometrycznych. Dlatego na pierwszym etapie należy zwerifikować prawidłowość dobrania tych parametrów przez poszczególnych studentów.
- Należy szczegółowo wyjaśnić sposób zaokrąglania niektórych z obliczanych wartości, przede wszystkim h_{min} i h_{max} oraz długości krzywej przejściowej L_{min} . Przepisy nie precyzują tego w żaden sposób, a wynikająca z arytmetyki konieczność zaokrąglania h_{min} w górę oraz h_{max} w dół dla większości studentów nie jest jasna. Trudność stanowi także zaokrąglanie L_{min} do 1 m w górę wtedy, gdy wynika to z parametrów kinematycznych, i brak możliwości zaokrąglania, gdy długość wynika wyłącznie z zależności geometrycznych, co ma miejsce w łuku parabolicznym.
- Dla zapewnienia jednakowego obciążenia wszystkich studentów należy starannie przygotować tematy zadań, które z jednej strony powinny być odpowiednio zróżnicowane, a z drugiej — mają wymagać zbliżonej pracochłonności przy ich rozwiązywaniu. Jest to możliwe przy niewielkich kątach zwrotu trasy. Podczas przygotowania tematów wygodnie jest posłużyć się metodą przedstawioną w [7]. Studentom do przeszukiwania przedziału poprawnych przechyłek potrzebnych do wyznaczenia optymalnej długości krzywej przejściowej należy polecić metodę dekrementacji przechyłki co 5 mm lub bisekcji przedziału $< h_{min} ; h_{max} >$.
- Azymuty stycznych są w temacie zadania podawane w stopniach. W praktyce większość studentów do obliczeń wykorzystuje arkusz kalkulacyjny, który domyślnie posługuje się miarą łukową kąta. Dlatego należy zwrócić uwagę na ten fakt i na wynikającą stąd konieczność konwersji miar kąta przy obliczeniach.
- Omawiając obliczanie współrzędnych punktów głównych układu należy szczegółowo przedstawić możliwości samokontroli przy wyznaczaniu poszczególnych punktów, a szczególnie kontrolę końcową współrzędnych punktu $W1$, które można obliczyć wykonując wcięcie wprzód zarówno od punktu $pkp1$ jak i $pkp2$.
- Dane do części rysunkowej zadania (projekt przekroju normalnego nawierzchni i podtorza na projektowanym łuku) należy tak sformułować, aby studenci sami musieli ustalić standard konstrukcyjny nawierzchni. Wzorcowe przekroje zamieszczone w przepisach są mało czytelne, dlatego sposób wykonania rysunku wymaga przedstawienia szczegółowej instrukcji „krok po kroku”. Dla łatwiejszej i jednoznacznej weryfikacji rysunku (zwłaszcza pod kątem wymiarowania) należy wymagać dostarczenia rozwiązania w postaci elektronicznej, np. DWG.

WNIOSKI

1. Analizując najbardziej skomplikowany przypadek rozwiązania łuku poziomego, studenci uzyskują solidne podstawy do projektowania bardziej złożonych układów torowych, analizowanych w toku studiów na kolejnych semestrach.

2. Metodyka rozwiązania łuku poziomego, wykorzystująca optymalizację długości krzywej przejściowej zgodnie z zasadami przedstawionymi w [7], w połączeniu z wymaganiami rozpatrywania dopuszczalnych wartości rozszerzonych i normalnych parametrów kinematycznych zawartych w [3], umożliwia praktyczne zapoznanie studentów z podstawami optymalizacji wieloparametrowej.
3. Zastosowanie dokładnych wzorów (3) i (5) dla krzywej przejściowej w postaci paraboli trzeciego stopnia powoduje, że metodyka rozwiązywania łuku poziomego z rysunku 2 jest taka sama, jak przy wykorzystaniu krzywej przejściowej w postaci klotoidy lub paraboli korygowanej metodą prof. H. Bałucha, przedstawionej w [1]. Umożliwia to łatwą modyfikację materiałów wprowadzających [8] (przez wymianę punktów 1.3 – 1.4). Można to wykorzystać do różnicowania prowadzonych zajęć, np. w cyklu trzyletnim, co utrudnia niesolidnym studentom wykorzystywanie „podkładek” z lat poprzednich, a zarazem ułatwia prowadzącemu zajęcia wykrywanie takich przypadków nieuczciwości i ich odpowiednie rozliczenie.

Modułowa struktura przedstawionego zadania umożliwia łatwą modyfikację w celu rozszerzenia lub zawężenia jego zakresu. Pozwala to na wykorzystanie ćwiczenia na innych specjalnościach lub rodzajach studiów. Chcąc je wykorzystać na studiach niestacjonarnych (przy mniejszej liczbie godzin dydaktycznych) można zamienić szlak linii dwutorowej na jednotorową. Dodanie do ćwiczenia modułu związanego z obliczaniem kilometrażu i współrzędnych punktów pośrednich na krzywej przejściowej i łuku poziomym, umożliwia wykorzystanie ćwiczenia na przedmiocie „Geodezja kolejowa i drogi kolejowe” na kierunku *Geodezja i Kartografia*. Wymiana modułu związanego z analizą przyspieszeń, obliczaniem długości krzywej przejściowej oraz postacią krzywej przejściowej umożliwia także wykorzystanie ćwiczenia w nauczaniu projektowania dróg samochodowych.

BIBLIOGRAFIA

1. Bałuch H.: Optymalizacja układów geometrycznych toru. WKiŁ, Warszawa, 1983.
2. Grodzicki S.: Geometria tras — algorytmy obliczeń, komputerowo wspomagane projektowanie. WKiŁ, Warszawa, 1987.
3. Id-1 (D-1) Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych. Tekst ujednolicony. PKP PLK S.A., Warszawa, 2015.
4. Lipiński M.: Tablice do tyczenia krzywych. Cz. II. Klotoida. PPWK, Warszawa, 7 edition, 1978.
5. Nowakowski M.J.: Korygowanie krzywych przejściowych metodą Helmera. Drogi Kolejowe, 1985, nr 12.
6. Nowakowski M.J.: Modelowanie poszerzeń międzytorzy. Przegląd Komunikacyjny, 2009, nr 11-12.
7. Nowakowski M.J.: Optymalizacja długości krzywych przejściowych przy budowie i modernizacji linii kolejowych. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, 2014.
8. Nowakowski M.J.: Projekt kolejowego łuku poziomego. Dostępny w postaci pliku PDF pod adresem http://www.pg.gda.pl/~nowam/zaobud_sem2mgr/pliki/B02126_luk_poziomy_kiss.pdf, dostęp 2015-09-15.
9. PN-EN 13803-1:2010. Kolejnictwo — Tor — Parametry projektowania toru w planie — Tor o szerokości 1435 mm i większej — Część 1: Szlak. PKN, 2010.
10. Politechnika Gdańska. Katalog informacyjny ECTS. Strona internetowa <http://ects.pg.edu.pl/wydzial-inzynierii-ladowej-i-srodowiska>, dostęp 2015-09-15.
11. 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.

12. 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.

PROJECT OF OPTIMUM HORIZONTAL CURVE AS AN ELEMENT OF TEACHING TO SHAPE THE GEOMETRY OF RAILWAY TRACK

Abstract

Geometrical aspect is an important element in teaching of railway track design in first and second degree studies at the Faculty of Civil and Environmental Engineering at Gdańsk University of Technology. Curve with transition curves is a basic element in horizontal geometry of railway track, and most common in practice. Because of this, a design exercise that treats this issue comprehensively was implemented. The formula used complies with principles of problem based learning. On the basis of most complicated case feasible, students acquires skill to obtain solution that is geometrically correct, complies with kinematic limits and is optimal according to given criteria. Mastering the material gives solid foundation for doing projects on next semesters (including second-degree studies) and in professional practice. After small modifications and extensions, the exercise can be used in fields associated with the railway geodesy and in non-stationary studies.

Autor:

Nowakowski Mirosław Jan - Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów, 80-233 Gdańsk, ul. G. Narutowicza 11/12. Tel: +48 58 448-60-90, nowam@pg.gda.pl