

**Piotr Chrostowski**

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

## **MODELOWANIE KRZYWYCH PRZEJŚCIOWYCH MODERNIZOWANYCH LINII KOLEJOWYCH**

Rękopis dostarczono: kwiecień 2016

**Streszczenie:** W pracy skupiono się na prezentacji problemu modelowania układów geometrycznych modernizowanych linii kolejowych w warunkach ograniczeń terenowych. Wskazano na możliwości poszerzenia modeli krzywych przejściowych o krzywe gładkie z odpowiednio ukształtowaną rampą przechyłkową. Przedstawiono podstawowe charakterystyki geometryczne i kinematyczne najpopularniejszych ze stosowanych na świecie krzywych przejściowych dokonując porównania ich do kłotoidy i paraboli 3go stopnia. W pracy podjęto także dyskusję nad sposobem doboru dopuszczalnych wartości parametrów kinematycznych wykorzystywanych do wymiarowania krzywych przejściowych. Wskazano na konieczność racjonalnego przyjmowania owych parametrów wskazując na obowiązujące przepisy oraz wytyczne do projektowania układów geometrycznych linii kolejowych.

**Słowa kluczowe:** modernizacja linii kolejowych, gładkie krzywe przejściowe, parametry kinematyczne

### **1. WPROWADZENIE**

Projektowanie układów geometrycznych linii kolejowych w obecnych czasach dotyczy przede wszystkim modernizacji czy też rewitalizacji linii kolejowych. W ostatnich latach można zaobserwować dynamiczny rozwój techniki kolejowej w budowie, utrzymaniu u eksploatacji modernizowanych linii kolejowych. Wszystko to sprawia, że również na układ geometryczny należy spojrzeć z punktu widzenia nowoczesnych technik projektowania, oraz wykonania i utrzymania w procesie eksploatacji. Zatem należy również podjąć dyskusję nad możliwością wprowadzenia do praktyki inżynierskiej krzywych przejściowych o nieliniowym rozkładzie krzywizny, jak ma to miejsce w wielu krajach Europy zachodniej oraz USA i Japonii. W pracy przedstawiono podstawowe zasady wymiarowania takich krzywych zgodnie z obowiązującymi przepisami. Wskazano również na procesy, determinujące możliwości stosowania krzywych gładkich w praktyce inżynierskiej.

## 2. KRYTERIA PROJEKTOWANIA UKŁADÓW GEOMETRYCZNYCH

Krzywe przejściowe w układzie drogi kolejowej służą do łączenia elementów geometrycznych o różnych krzywiznach krańcowych. Krzywymi tymi łączy się odcinki proste i łuki kołowe, ale również łuki kołowe o różnych promieniach w układzie zgodnym i odwrotnym ([1], [5], [6]).

Układy geometryczne w płaszczyźnie poziomej powinny spełniać trzy podstawowe kryteria: kryterium bezpiecznego i komfortowego prowadzenia ruchu kolejowego, możliwości wykonania układu geometrycznego oraz kryterium możliwości utrzymania danego układu geometrycznego. Poniżej kryteria te zostaną scharakteryzowane.

Bezpieczeństwo i komfort jazdy po łuku związane są z przebiegiem siły dośrodkowej oddziałującej na pojazd szynowy poprzez kontakt koła pojazdu z szyną. Siła ta przekazuje się przez elementy zawieszenia na nadwozie pojazdu i odczuwana jest przez pasażera w postaci siły bezwładności. Modelowanie przyspieszenia nierównoważonego oraz zmiany przechyłki na rampie odbywa się poprzez modelowanie krzywizny toru oraz rampy przechyłkowej. Zakłada się przy tym, że monotoniczność oddziaływań bocznych uzyskuje się poprzez ograniczenie wyboru modeli geometrycznych do pewnej puli dobrze zdefiniowanych krzywych spełniających określone warunki brzegowe. Konieczne jest również, aby metoda łączenia elementów układu była poprawna, tj. spełniała warunki ciągłości. Wymiarowanie układu geometrycznego determinują parametry kinematyczne dopuszczone w eksploatacji takie jak przyspieszenie boczne, przyrost przyspieszenia oraz prędkość unoszenia koła na rampie przechyłkowej. Projekt musi spełniać wartości graniczne parametrów kinematycznych podczas ruchu pojazdu szynowego z maksymalną prędkością.

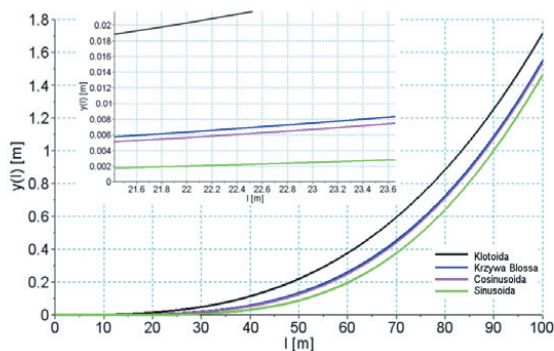
Oprócz wyznaczania długości krzywych przejściowych w celu spełnienia warunków nałożonych na gradienty  $\psi_{dop} = \max(da(t)/dt)$  i  $f_{dop} = \max(dh(t)/dt)$  istotne znaczenie ma rozkład owych pochodnych w czasie przejazdu pociągu. Przede wszystkim warto zauważyć, że rozkład gradientów determinuje warunki brzegowe krzywych przejściowych. Przykładowo jeśli założy się stałą wartość gradientu przyspieszenia to warunki brzegowe równania różniczkowego krzywizny ograniczają się do wartości krzywizny na krańcach krzywej, przez co otrzymuje się niezerową pochodną krzywizny w miejscach łączenia z prostą i łukiem. Jest to oczywiście przypadek klotoidy, która jest krzywą rekomendowaną [3] i najczęściej stosowaną na kolejach całego świata. Dopiero zmienne rozkłady gradientów przyspieszenia i przechyłki wymuszają większą liczbę warunków brzegowych, przez co miejsca łączenia krzywych są z dynamicznego punktu widzenia korzystniejsze ([2], [3], [11]). W praktyce inżynierskiej, ograniczono szeroką gamę krzywych przejściowych do paraboli 3go stopnia  $y = x^3/6RL$  będącej odpowiednikiem klotoidy w postaci funkcji jawnej  $f(x)$ . Ograniczenie to z jednej strony znacznie uprościło pracę projektantom i wykonawcom, z drugiej zaś strony spowodowało brak doświadczenia na PKP z licznymi modelami krzywych przejściowych znanych z literatury [1], [3], [5]-[7], [9], [11], [13], [14] oraz stosowanych w wielu krajach na świecie wg pozycji [2], [10], [11].

Kryterium drugie dotyczy problemów związanych z wykonaniem krzywej w procesie regulacji osi toru. Problemy te rozpoczynają się na obliczeniach układu geometrycznego



uwzględniającego stan wyjściowy zdeformowanego toru, a kończą się na dokładności tyżenia oraz dokładności z jakimi maszyny wykonują regulację osi (nasuwanie). Problemy obliczeniowe stają się coraz mniej istotne z uwagi na nowoczesne urządzenia pomiarowe identyfikujące układ geometryczny (precyzyjna tachimetria, pomiary GNSS, skaning laserowy), ale przede wszystkim z uwagi na dostępne oprogramowanie wspomagające projektowanie. Zatem istotnym problemem w dalszym ciągu pozostaje technologia i technika samego podbijania toru, w wyniku których na PKP nie stosowano właściwie żadnej innej krzywej przejściowej jak tylko parabolę 3go stopnia z nielicznymi wyjątkami.

Z praktycznego punktu widzenia przy modelowaniu krzywych gładkich występuje stosunkowo długa strefa bardzo małych rzędnych względem kierunku prostego [1] – co jest wynikiem spełniania warunku brzegowego  $\dot{y}(0) = 0$ . W istocie rzędne te wynoszą ułamki milimetra na znacznych długościach względem całej długości krzywej. Na rysunku 1 pokazano usytuowanie różnych typów krzywych przejściowych w układzie lokalnym. Wszystkie krzywe są 200 metrowej długości, a ich postaci to klotoida, krzywa Blossa, cosinusoida i sinusoida. Widać wyraźnie różnice w przyroście rzędnych analizowanych krzywych. Dla zobrazowania problemu ukazano okolicę dwudziestego metra, gdzie krzywe gładkie osiągną dopiero pojedyncze milimetry natomiast klotoida oddalona jest od stycznej już o ok. 2 cm. Zatem pierwsze 10% długości krzywej gładkiej wykonane z błędem poprzecznym do osi  $\pm 5$  mm sprawia, że krzywa ta jest w rzeczywistości o taką długość skrócona. Z tego względu jakość wykonania prac torowych w przypadku krzywych gładkich ma kluczowe znaczenie.



Rys. 1. Rozkład rzędnych  $y(l)$  na długości krzywej przejściowej

Trzecie kryterium związane jest z utrzymaniem układów torowych. Rozważać je można jedynie przez pryzmat doświadczenia. Z pewnych przesłanek wynika, że trajektoria ruchu pojazdu o łagodniejszych zmianach krzywizny powinna mieć korzystny wpływ na trwałość tegoż układu głównie poprzez zredukowane oddziaływania dynamiczne w systemie pojazd-tor. Również problem wpisywania się zestawu kołowego powinny być mniej znaczący w przypadku krzywych gładkich. Jednak tego typu hipotezy wymagają, jeśli nie doświadczenia to przynajmniej wielu skomplikowanych analiz i symulacji współpracy pojazdu szynowego z torem ([4], [6], [13], [14]). Zatem poza studiami teoretycznymi kluczową wydaje się być również kwestia wprowadzania tych krzywych do standardów wykonawczych - jak



ma to miejsce w innych krajach, głównie tam, gdzie wprowadzono kolej dużych prędkości. Przykładowo, koleje francuskie (SNCF) wprowadziły krzywe przejściowe w postaci kłotoidy wygładzanej w krańcowych strefach odcinkami nieliniowymi tak, aby przebieg krzywizny spełniał warunki styczności (jak ma to miejsce w krzywych gładkich). Gładkie krzywe przejściowej stosuje się również w innych krajach jak Niemcy, Wielka Brytania, Japonia, USA, a próg prędkości od którego zaleca się rozwiązania nieliniowe oscyluje pomiędzy 130 km/h (Japonia Shinkansen) a 160 km/h [10]. Zatem krzywe gładkie stosowane są już w kolejach konwencjonalnych niezależnie od typu konstrukcji nawierzchni – podsypkowej czy toru na płycie.

### 3. WYMIAROWANIE KRZYWYCH PRZEJŚCIOWYCH W KONTEKŚCIE MODERNIZACJI LINII

Z elementarnych równań kinematyki oraz dynamiki wynika proporcjonalność przyspieszenia oraz oddziaływań dynamicznych do wartości krzywizny i jej rozkładu. Z tego względu krzywe gładkie, w stosunku do kłotoidy (oraz paraboli 3go stopnia) charakteryzują się pozytywnymi właściwościami w miejscach łączenia ich końców, jednak strefa środkowa może wykazać wzmożone oddziaływania dynamiczne [13], za które odpowiedzialne są nieliniowe rozkłady gradientu przyspieszenia nie zrównoważonego.

Rozkład niezrównoważonego przyspieszenia odpowiada monotonicznością (z pewną dokładnością) rozkładowi krzywizny pod warunkiem, że rampa przechyłkowa jest zaprojektowana zgodnie z regułą podaną w poniższych równaniach:

$$\rho(l) = \rho_0 \cdot f(l) \quad (1)$$

$$h(l) = h_0 \cdot f(l) \quad (2)$$

gdzie:

$\rho(l), h(l)$  - funkcje krzywizny i przechyłki,

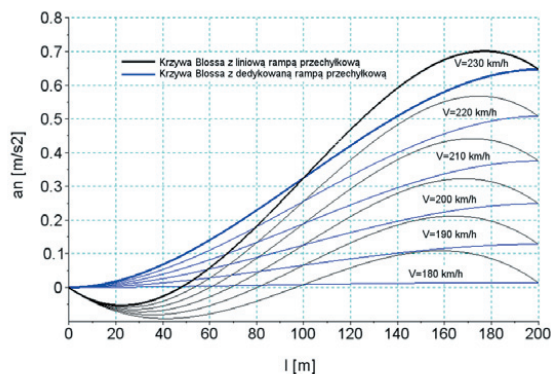
$\rho_0$  - krzywizna na łuku kołowym,

$h_0$  - przechyłka na łuku kołowym,

$f(l)$  - funkcja kształtu rozkładu krzywizny i przechyłki na długości krzywej przejściowej i rampy przechyłkowej.

Niedopełnienie warunku zgodności funkcji kształtu krzywej przejściowej i rampy przechyłkowej skutkuje niekorzystnym przebiegiem niezrównoważonego przyspieszenia bocznego podczas przejazdu pojazdów szynowych ze stałą prędkością. Sytuację taką dla prędkości z przedziału 180 – 230 km/h pokazuje rys. 2.





Rys. 2. Niezrównoważone przyspieszenie dla przypadku dopasowanej i niedopasowanej rampy przechyłkowej; wykresy dla prędkości z zakresu 180 – 230 km/h

Z powyższego faktu wynika, że chcąc przekształcić krzywą przejściową z paraboli 3go stopnia lub kłotoidy na dowolną krzywą gładką w procesie regulacji osi toru należy wcześniej usunąć przechyłkę na długości rampy, gdyż niemożliwe jest z praktycznego punktu widzenia ukształtowanie pierwszej połowy rampy krzywoliniowej na bazie pierwotnej prostoliniowej. W przypadku inwestycji takich jak modernizacja nie stanowi to problemu z uwagi na zazwyczaj szeroki zakres prac torowych włącznie z przebudową podtorza i całkowitą wymianą nawierzchni.

### 3.1. PARAMETRY KINEMATYCZNE W OBOWIĄZUJĄCYCH AKTACH PRAWNYCH

Głównym celem modernizacji linii kolejowej jest zwiększenie prędkości pociągów w znaczeniu prędkości maksymalnej oraz jej kompletnego profilu na długości linii. Niestety w większości przypadków podnoszenie prędkości wymaga wydłużania krzywych przejściowych. Wiąże się to ze znacznymi przesunięciami osi toru determinującymi dodatkowy wykup terenu pod inwestycję. Fakt ten skutecznie ogranicza możliwości projektowania układów niosących istotne zmiany w prędkości. Mniejszy zakres zmian położenia osi toru zapewnić mogą wyższe dopuszczalne parametry kinematyczne wykorzystywane do wymiarowania łuków poziomych. Czynność ta musi mieć jednak umocowanie prawne. Norma [3] określa dwa progi parametrów *normal* i *exceptional*. Progi te należy wiązać z komfortem oraz bezpieczeństwem prowadzenia ruchu kolejowego, tak więc próg drugi nie jest rekomendowany jako typowy sposób zwiększania prędkości pociągów dla danego układu geometrycznego. Przyjmowanie wartości granicznych z górnego progu musi być uwarunkowane aktualnym stanem technicznym i geometrycznym linii oraz stanem kursującego taboru. W związku z powyższym limit *exceptional* należy traktować jako zdecydowaną granicę dostępną jedynie w wyselekcjonowanych i dobrze uzasadnionych przypadkach, kiedy

to przyjęcie niższych wartości zdecydowanie obniża parametry eksploatacyjne danej linii. Norma wskazuje również na ryzyko koincydencji czynników związanych z bezpieczeństwem prowadzenia ruchu.

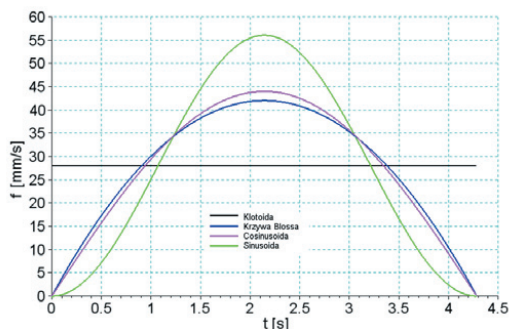
Podobną zasadę przyjęło PKP PLK definiując w instrukcji [12] progi  $P1$ ,  $P2$  i  $P3$  oznaczające odpowiednio zawężone, normalne i rozszerzone wartości dopuszczalne. Stanowią one granice związane bezpośrednio z czynnikami takimi jak stan techniczny i geometryczny toru oraz sposób utrzymania i eksploataowania linii (tabor). Porównując wartości parametrów kinematycznych i geometrycznych obydwu dokumentów widać wyraźnie, że instrukcja kolejowa objęła progami  $P1$  i  $P2$  próg *normal limit*, natomiast  $P3$  jest odpowiednikiem *exceptional limit* i przyjmuje wartości zgodne z przytoczoną normą. W ten sposób na liniach PKP PLK rekomendowane są parametry graniczne z progu  $P1$ , które odpowiadają wartościom dotychczas używanym przez projektantów w Polsce. Pojawienie się progu  $P2$  otwiera zatem pewne możliwości w kontekście modernizacji linii. Umożliwia on podniesienie prędkości na modernizowanych liniach, których stan techniczny i geometryczny ulega istotnej poprawie w wyniku prowadzonych prac budowlanych. Instrukcja [12] określa dodatkowo warunki, na jakich można przejść na próg  $P2$ . Wymagane tu jest przedstawienie obliczeń wariantów z zastosowaniem wartości z progu  $P1$  i wykazanie, że przy tych wartościach nie ma możliwości poprawnego zaprojektowania układu geometrycznego.

### 3.2. WYMIAROWANIE GŁADKICH KRZYWYCH PRZEJŚCIOWYCH

Przedstawiona w normie [3] metoda wyznaczania długości krzywych jest w pełni uniwersalna. Analogicznie jak to ma miejsce w przypadku kłotoidy, o długości decydują wartości gradientów przechyłki oraz przyspieszeń niezrównoważonych a także stromość rampy przechyłkowej. Istotną różnicą jest fakt, że maksymalne wartości tych gradientów w przypadku krzywych gładkich występują jedynie w połowie krzywej. Analiza pochodnej funkcji pozwala na dobranie długości krzywej gładkiej względem długości kłotoidy w celu zachowania identycznych wartości gradientów. Różnice w wartościach gradientów omawianych krzywych przy tej samej długości krzywej pokazuje rys 3.

Norma [3] podaje mnożniki wydłużające krzywe przejściowe gładkie względem długości kłotoidy co wynika z przytoczonych właściwości dowolnej krzywej gładkiej. Fakt ten stanowi pewne ograniczenie w projektowaniu krzywych gładkich zwłaszcza w tych miejscach, gdzie kolejne łuki są usytuowane w niewielkich już odległościach. Wówczas chcąc zastosować krzywą gładką projektant musi przeanalizować wszystkie możliwości sprawiające, że początek krzywej przejściowej zmieści się w dostępnej odległości. Odtwarzanie i przeprojektowywanie złożonych układów geometrycznych zmusza do podejścia opartego na optymalizacji, gdyż niemożliwym staje się kontrolowanie wielu parametrów geometrycznych, które mają wpływ na ostateczną jakość zaproponowanego wariantu geometrycznego [8].





Rys. 3. Rozkład parametru  $f(t)$  przy  $V = const$ . dla różnych typów krzywych przejściowych

Jeśli zatem nie przyjmie się racjonalnego doboru istotnych parametrów geometrycznych i kinematycznych, to stosowanie krzywych gładkich może nie wprowadzić korzyści w postaci zwiększenia prędkości względem układu z klotoidą ([1], [9]), który zawsze będzie krótszy, a dodatkowo wykaże mniejsze przesunięcie łuku do wewnątrz układu [9]. Z pewnością zniechęci to projektantów do stosowania krzywych gładkich. Przykładową funkcję celu podano w równaniu (3). Funkcja ta określa wpływ szukanych parametrów geometrycznych i kinematycznych na przesunięcia osi toru oraz na wynikającą ze zmian geometrycznych prędkość maksymalną związaną z  $i$ -tym łukiem poziomym.:

$$F = \left\{ w^{V_{max}} \cdot V_{max} \left( R_i, L1_i, L2_i, TK, w_i^{kin}(TK) \right) + w^\Delta \cdot \left( \frac{1}{Wsk_{\Delta}(R_i, L1_i, L2_i, TK)} \right) \right\} \rightarrow \max \quad (3)$$

Gdzie:

$w^{V_{max}}$  – współczynnik wagi prędkości maksymalnej,

$V_{max}$  – prędkość maksymalna  $i$ -tego łuku poziomego,

$R_i, L1_i, L2_i$  – szukane parametry geometryczne  $i$ -tego łuku poziomego (promień i krzywe przejściowe),

$TK$  – wskaźnik typu krzywej przejściowej,

$w_i^{kin}(TK)$  – funkcja wagi parametrów kinematycznych zależna od typu krzywej przejściowej,

$w^\Delta$  – współczynnik wagi wskaźnika oceny przesunięcia osi toru modernizowanej linii kolejowej,

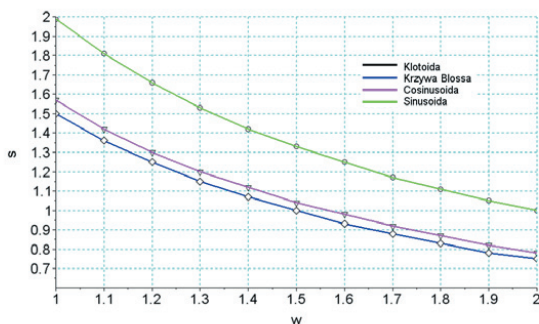
$Wsk_{\Delta}(R_i, L1_i, L2_i, TK)$  – wskaźnik oceny przesunięć osi toru zależny od parametrów geometrycznych i kinematycznych  $i$ -tych łuków poziomych.

Podejście to jest zgodne z instrukcją [12], gdzie w module A.3 §3 Ust.1. znajduje się zapis o wielokryterialnym spojrzeniu na proces projektowania oraz o iteracyjnym sposobie dobierania wartości projektowych. Przyjęcie standardów europejskich prowadzi do możliwości rozszerzenia wartości parametrów kinematycznych po odpowiednim uzasadnieniu danej potrzeby. Zwłaszcza krzywe gładkie są w pewien sposób faworyzowane poprzez niewielkie zwiększenie granic parametrów kinematycznych. Również wytyczne do projektowania [11] bezpośrednio wskazują na możliwość zwiększenia parametru jakim jest gradient nieodmiaru przechyłki nawet do 1,5x jeśli krzywa przejściowa ma postać krzywej Blossa.





Z powyższych faktów wypływa wniosek, że operowanie na progach granicznych wartości parametrów kinematycznych nie jest racjonalnym sposobem wymiarowania krzywych przejściowych. Racjonalne jest projektowanie układów zorientowane na wybór konkretnych wartości granicznych parametrów z przedziałów określonych progami, a wybór nastąpić powinien na drodze optymalizacji ([8], [13], [14]). W tym celu niezbędne jest określenie precyzyjnych kryteriów stosowalności danych wartości parametrów oraz określenia czynników, które są konieczne do spełnienia (utrzymanie jakości toru, tabor). Wynika z tego również, że dany układ geometryczny nie charakteryzuje się już jedną wartością prędkości maksymalnej, gdyż ta wynikać powinna chociażby z różnej klasy taboru. Na rysunku 4 pokazano zależności parametru  $s$  wydłużającego krzywą przejściową w postaci klotoidy od parametru  $w$  zwiększającego wartość gradientów krzywej przejściowej i rampy przechyłkowej.



Rys. 4. Zależność współczynnika wydłużenia krzywej gładkiej względem klotoidy w funkcji współczynnika zwiększającego dopuszczalny gradient parametrów kinematycznych

Analizując wpływ długości krzywej na wartość parametru  $f = dh(t)/dt$ , w prosty sposób wyznaczyć można współczynnik wydłużający dowolną krzywą względem klotoidy. Do wyniku dochodzi się wprost z pochodnej funkcji  $dh(t)/dt$  [9] bądź poprzez iterację wydłużania klotoidy i przyrównania otrzymanych wartości parametru  $f(t)$  w połowie czasu  $t = T/2$ . Technika iteracyjna jest korzystna do implementacji w programach komputerowych, natomiast analiza równań krzywej prowadzi do dokładnej postaci zależności  $s(w)$ . Dla dowolnej krzywej zależność ta wynosi:

$$w = q_n/s \quad (4)$$

gdzie  $q_n$  jest stałą właściwą dla modelu krzywej przejściowej i wynosi odpowiednio dla krzywej Blossa, cosinusoidy i sinusoidy:  $q_n^{Bloss} = 1,5$ ,  $q_n^{cos} = \pi/2$ ,  $q_n^{sin} = 2$  ([3], [9]). Sposób wyznaczenia współczynnika  $q_n$  na przykładzie sinusoidy przedstawiono za pomocą równań (5)-(9). Indeksy *sin* i *klot* oznaczają parametry sinusoidy i klotoidy.

$$h_{sin}(l) = h \left( \frac{1}{L_{sin}} l - \frac{1}{2\pi} \sin \left( \frac{2\pi}{L_{sin}} l \right) \right) \quad (5)$$





$$h_{sin}(t) = h \cdot \left( \frac{v}{3,6} t - \frac{1}{2\pi} \sin \left( \frac{2\pi}{L_{sin}} \frac{v}{3,6} t \right) \right) \quad (6)$$

$$f_{sin}(t) = \frac{dh_{sin}(t)}{dt} = h \cdot \left( \frac{v}{3,6 \cdot L_{sin}} - \frac{v}{3,6 \cdot L_{sin}} \cos \left( \frac{2\pi}{L_{sin}} \frac{v}{3,6} t \right) \right) \quad (7)$$

$$f_{sin} \left( \frac{T}{2} \right) = f_{sin_{max}} = h \cdot \left( \frac{v}{3,6 \cdot L_{sin}} - \frac{v}{3,6 \cdot L_{sin}} \cos(2\pi) \right) = 2 \cdot \left( h \frac{v}{3,6 \cdot L_{sin}} \right) \quad (8)$$

$$L_{sin} = 2 \cdot \left( h \frac{v}{3,6 \cdot f_{sin_{max}}} \right) = 2 \cdot L_{klot} \Leftrightarrow f_{sin_{max}} = f_{klot_{max}} \quad (9)$$

Analizując wykres z rys. 4 oraz równanie (4) dochodzi się do wniosku, że przykładowo krzywa Blossa powinna być 1,5x dłuższa od klotoidy, jednak zakładając zwiększenie gradientu ograniczającego długość krzywej poprzez przyjęcie  $w = 1,36$  powoduje, że wydłużenie krzywej Blossa wynosi już jedynie  $s = 1,1$  co w połączeniu z normowym zwiększeniem parametrów kinematycznych pierwszego progu dla krzywych gładkich oraz z możliwością niewielkiego zmniejszenia promienia łuku da projektantowi istotne zwiększenie prędkości maksymalnej przy zredukowanej ingerencji w pierwotne położenie modernizowanej linii.

Dzięki optymalizacji możliwe jest pełniejsze wykorzystanie możliwości, które wnoszą gładkie krzywe przejściowe co z kolei może podnieść jakość modernizacji w trudnych warunkach terenowych.

## 4. PODSUMOWANIE

Projektowanie układów geometrycznych modernizowanych linii kolejowych zorientowane jest głównie na poprawę w profilu prędkości. Bardzo często wymusza to konieczność wykupu dodatkowego terenu. W związku z tym, projekt zmian powinien uwzględniać jak najszersze spektrum środków prowadzących do tego celu. W Polsce jak dotąd nie wykorzystuje się możliwości, które niosą gładkie krzywe przejściowe, tymczasem modernizacja linii kolejowej jest właściwą okazją do wdrażania nowych praktyk projektowych i wykonawczych. Jak wykazano, dokumenty prawne i wytyczne do projektowania układów geometrycznych wskazują na krzywe gładkie jako na szczególnie środek poprawy układów, nadając im zwiększone wartości dopuszczalnych parametrów kinematycznych. Analiza właściwości geometrycznych i kinematycznych takich układów sugeruje ich korzystny wpływ na komfort jazdy i na skutki oddziaływań w systemie pojazd-tor. Trudności w projektowaniu i wykonaniu krzywych gładkich są stopniowo eliminowane poprzez rozwój techniki obliczeniowej, pomiarowej a także przez coraz nowocześniejsze podbijarki torowe.



### Bibliografia

1. Bałuch H.: Optymalizacja układów geometrycznych toru. WKŁ, Warszawa 1983.
2. Ciobanu C.: Bloss transition a short design guide. Permanent Way Institution - The Journal, Volume 133-Part 2, UK 2015.
3. EN 13803-1 (2010) Railway Applications – Track – Track alignment parameters – Track gauges 1435 and wider – Part 1: Plain Line.
4. Kisilowski J. (praca zbiorowa): Dynamika układu mechanicznego pojazd szynowy – tor. PWN, Warszawa 1991.
5. Koc W.: Analytical method of modelling the geometric system of communication route. Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2014, article 679817.
6. Koc W.: Elementy teorii projektowania układów torowych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2004.
7. Koc W.: Parametryczna krzywa przejściowa dla dróg kolejowych. Przegląd Komunikacyjny, 9-10/2011, strona 52-56.
8. Koc W., Specht C., Palikowska K., Chrostowski P.: Computer-aided identification of the railway track axis geometrical shape. Journal of Civil Engineering and Architecture Research, Vol. 3, No. 4, 2016 pp. 1379-1389.
9. Koc W., Radomski R.: Analiza celowości stosowania krzywych przejściowych z nieliniowymi rampami przechyłkowymi na liniach kolejowych w Polsce. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 406, Budownictwo lądowe XLIII, Gdańsk 1987.
10. Parsons Brinckerhoff, Alignment Standards for High-Speed Train Operations, California High-Speed Train Project, 2009.
11. Track Design Handbook, NR/L2/TRK/2049 (2010) Network Rail.
12. Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych ID-1, PKP PLK, Warszawa 24 marca 2015.
13. Woźnica P.: Kształtowanie i ocena własności dynamicznych kolejowych krzywych przejściowych z wykorzystaniem metod optymalizacji i symulacji. Rozprawa Doktorska, WUT, Warszawa 2012.
14. Zboiński K., Woźnica P.: Optimisation of polynomial railway transition curves of even degrees. Archives of Transport, Polska Akademia Nauk - Komitet Transportu, vol. 35, nr 3, 2015, ss. 71-86.

### MODELLING OF TRANSITION CURVES OF THE RAILWAY LINES DURING MODERNIZATION

**Summary:** The study focuses on the problem of modelling the geometric layouts of modernized railway lines in the conditions of terrain limitations. The possibilities of expanding the common models of transitions curves by the curves of nonlinear curvature with nonlinear superelevation ramp have been indicated. The paper presents the basic both geometric and kinematic characteristics of the most popular in the world transition curves by comparing them to the clothoid and cubic parabola. Moreover, in the paper the problem of the selection of limit values of kinematic parameters used for dimensioning of transition curves has been discussed. The paper points the need for rational acceptance of these parameters by indicating the applicable regulations and guidelines for the design of geometric rail lines.

**Keywords:** lines modernization, non-linear transitions, kinematic parameters

