

ROZWÓJ KONSTRUKCJI I UKŁADU GEOMETRYCZNEGO TOROWISK TRAMWAJOWYCH, JAKO ISTOTNY ELEMENT POSTĘPU W MIEJSKIM TRANSPORCIE SZYNOWYM¹

Wojciech Oleksiewicz

dr inż.; Zakład Inżynierii Komunikacyjnej, Instytut
Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki
Warszawskiej; Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa;
tel.: 512 477 968; e-mail: w.oleksiewicz@il.pw.edu.pl

Cezary Kraśkiewicz

mgr inż.; Zakład Inżynierii Komunikacyjnej, Instytut
Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki
Warszawskiej; Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa;

Streszczenie. Artykuł prezentuje specyfikę konstrukcji i układu geometrycznego oraz wybranych zagadnień utrzymania torowisk tramwajowych w odniesieniu do nawierzchni kolejowej. Przedstawiono w nim uwarunkowania formalno-prawne i funkcjonalne wpływające na występowanie różnic w porównaniu do warunków kolejowych oraz tendencje w rozwoju konstrukcji i kształtowania układu geometrycznego torowisk tramwajowych. W artykule przedstawiono również ogólne informacje na temat kształcenia w Politechnice Warszawskiej inżynierów w dziedzinie budownictwa komunikacyjnego, o specjalności Drogi Szynowe.

Słowa kluczowe: tramwaj, kolej, konstrukcja tramwajowej nawierzchni torowej, kształtowanie toru kolejowego i tramwajowego.

1. Wstęp

W dziedzinie dróg szynowych można wyróżnić trzy podstawowe rodzaje tych dróg powiązane z odpowiadającymi im podsystemami transportu szynowego: kolejowego, tramwajowego i metra. Pomimo wielu podobieństw związanych z podstawową, wspólną cechą, jaką jest prowadzenie pojazdu przez układ toru, drogi szynowe w transporcie kolejowym i tramwajowym wykazują istotne różnice, które wynikają z uwarunkowań formalno-prawnych, odmiennego taboru i warunków eksploatacyjnych. Celowość przedstawienia tych różnic oraz tendencji rozwojowych dotyczących konstrukcji i układu geometrycznego torowisk tramwajowych w środowisku specjalistów z dziedziny dróg kolejowych wynika ze zmian w drogach szynowych jakie zachodzą na współczesnym rynku usług projektowych i wykonawczych oraz działalności badawczej – rynek ten charakteryzuje się zanikaniem wąskich specjalizacji i potrzebą uniwersalnego podejścia do szerokiego spek-

¹ Wkład autorów w publikację: Oleksiewicz W. 70%, Kraśkiewicz C. 30%

trum zagadnień dotyczących infrastruktury torowej w dziedzinie dróg szynowych, w tym również do kształcenia inżynierów dla tej dziedziny. Ze względu na różne podstawy formalno-prawne dotyczące wymagań technicznych dla konstrukcji torowisk tramwajowych i dla konstrukcji dróg kolejowych występują różnice terminologiczne w określaniu i w systematyce elementów składowych każdego z tych rodzajów dróg, co skłania do ich bliższego przedstawienia w środowisku specjalistów działających w tych pokrewnych sobie branżach

2. Podstawy formalno-prawne wymagań dla torowisk tramwajowych

Podstawowym dokumentem, który określa wymagania techniczne dla torowisk tramwajowych jest Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie [1]. W dokumencie tym torowisko tramwajowe jest określone jako element pasa drogowego, a zawarte tam wymagania techniczne mają bardzo ograniczony zakres dotyczący głównie wybranych zagadnień kształtowania układu geometrycznego trasy tramwajowej i relacji geometrycznych torowiska tramwajowego względem innych elementów pasa drogowego.

Bardziej szczegółowe wymagania techniczne są zawarte w „Wytycznych technicznych projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych” [2], które opracowano w latach 1978-79, a ostatnia wersja tego dokumentu została wydana w 1983 r. Wytyczne te, nie mając statusu Rozporządzenia, nie stanowią już obecnie podstawy prawnej dla określania warunków technicznych w dziedzinie torowisk tramwajowych, ale pomimo tego są one w praktyce stosowane i powoływane w specyfikacjach istotnych warunków zamówienia (SIWZ) przy opracowywaniu dokumentacji projektowych oraz przy realizacji robót torowych zarówno procesach inwestycyjnych, jak i modernizacyjno-remontowych dotyczących torowisk tramwajowych. Ostatnio zostały podjęte przez Izbę Gospodarczą Komunikacji Miejskiej prace nad aktualizacją tych wytycznych, planowanych docelowo jako projekt rozporządzenia Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać torowiska tramwajowe i ich usytuowanie. Rozporządzenie takie powinno być wydane na podstawie uregulowań w ustawie Prawo Budowlane [3].

Przedstawiając stan formalno-prawny wymagań technicznych dotyczących torowisk tramwajowych należy wskazać, że Rozporządzenie ministra transportu i gospodarki morskiej w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie [4] w § 1.1 pkt. 2, ust. 1 jednoznacznie ustala, że „... przepisów rozporządzenia nie stosuje się do linii tramwajowych ..”

Jednym ze skutków tej regulacji są stosowane w Polsce zasady udzielania uprawnień do pełnienia samodzielnych funkcji w budownictwie, zgodnie z którymi uprawnienia do projektowania torowisk tramwajowych i prowadzenia robót torowych w tych torowiskach są udzielane inżynierom specjalności drogowej, a nie kolejowej.

3. Podstawowe pojęcia dotyczące torowisk tramwajowych

Z faktu formalnego przypisania dróg szynowych, jakimi są torowiska tramwajowe, do branży drogowej, a nie kolejowej wynikają m.in. różnice w terminologii i w systematyce elementów składowych ich konstrukcji. Wspomniane już znaczne ograniczenie w przepisach drogowych zakresu uregulowań dotyczących torowisk tramwajowych sprawiło, że stosowana w tej dziedzinie terminologia techniczna stanowi pewien kompromis pomiędzy pojęciami stosowanymi w kolejnictwie i w drogownictwie. Brak w odniesieniu do torowisk tramwajowych typowych dla kolejnictwa centralnie ustanawianych szczegółowych przepisów technicznych powoduje, że pojęcia stosowane w tej dziedzinie są mieszanką pojęć z drogownictwa i kolejnictwa przyjmowaną zwyczajowo, wykazującą różnice regionalne i nie zawsze pokrywającą się z pojęciami stosowanymi w drogach kolejowych. Dla ich ujednoczenia i doprecyzowania zostały podjęte ostatnio prace nad projektem wytycznych Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej na temat warunków technicznych jakim powinny odpowiadać torowiska tramwajowe i ich usytuowanie [5]. Zgodnie z tym opracowaniem i terminologią stosowaną przez wielu zarządców tramwajowej infrastruktury torowej podstawowe pojęcia w tej dziedzinie są następujące:

- 1) **torowisko tramwajowe** - rozumie się przez to element trasy tramwajowej stanowiący pas drogi szynowej przeznaczonej głównie do ruchu pojazdów szynowych określanych jako tramwaje²; usytuowanej w liniach rozgraniczających drogę publiczną lub niezależnie od tych linii. W zależności od usytuowania względem linii rozgraniczających drogę i od przeznaczenia do ruchu określonych pojazdów są rozróżniane następujące rodzaje torowisk tramwajowych:
 - a) **torowiska tramwajowe wydzielone z jezdni** - torowiska usytuowane w liniach rozgraniczających drogę i przeznaczone tylko do ruchu tramwajów,
 - b) **torowiska tramwajowe wspólne z jezdnią** - torowiska usytuowane w liniach rozgraniczających drogę i przeznaczone do ruchu tramwajów oraz ruchu innych pojazdów lub pieszych,
 - c) **torowiska tramwajowe niezależne** - torowiska usytuowane niezależnie od linii rozgraniczających drogę, zwykle poza obszarami o miejskich zasadach zagospodarowania i przeznaczone tylko do ruchu tramwajów;
- 2) **szerokość torowiska tramwajowego** – rozumie się przez to odległość pomiędzy zewnętrznymi krawędziami elementów separujących torowisko od przyległych obszarów pasa drogowego, a w przypadku braku takich elementów w torowisku wspólnym z jezdnią jest to odległość pomiędzy liniami odległymi o 0,50 m od zewnętrznych krawędzi skrajnych szyn. W odniesieniu do torowiska niezależnego, w którym elementy separujące nie muszą

2 Pojecie tramwaju jest tu stosowane zgodnie z jego definicją określoną w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 2 marca 2011 r. w sprawie warunków technicznych tramwajów i trolejbusów oraz ich niezbędnego wyposażenia. (Dz. U. nr 65, poz. 344, § 2, ust. 2)

- występować, jest to odległość pomiędzy krańcami budowli ziemnej wraz z powiązanymi z nią elementami odwodnienia (rowami bocznymi, itp.);
- 3) **tor tramwajowy** – rozumie się przez to element torowiska tramwajowego stanowiący zespół dwóch toków szynowych przystosowany pod względem konstrukcji i układu geometrycznego do ruchu tramwajów;
 - 4) **trasa tramwajowa** – rozumie się przez to przebieg na określonym obszarze torowiska tramwajowego wraz z przynależną do niego infrastrukturą obejmującą urządzenia energetyki trakcyjnej, urządzenia sterowania ruchem po torowisku, przystanki tramwajowe oraz inne obiekty budowlane powiązane konstrukcyjnie i/lub funkcjonalnie z torowiskiem. Trasę tramwajową charakteryzuje układ geometryczny, liczba torów (trasa jednotorowa, dwutorowa), lokalizacja słupów trakcyjnych (w międzytorzu lub poza nim) oraz rodzaj torowiska (zgodnie z pkt. 1);
 - 5) **linia tramwajowa** – rozumie się przez to wynikającą z potrzeb przewoźowych marszrutę określaną zwykle numerem i nazwami krańcowych przystanków;
 - 6) **konstrukcja torowiska** – rozumie się przez to układ warstw, na który składają się następujące zasadnicze grupy elementów stanowiących:
 - a) nawierzchnię torową,
 - b) zabudowę torowiska,
 - c) podbudowę torowiska,
 - d) separację torowiska,
 - e) odwodnienie torowiska,
 - f) podłoże gruntowe;
 - 7) **nawierzchnia torowa** – rozumie się przez to układ elementów takich jak:
 - a) szyny Vignole’a (tzw. kolejowe), szyny rowkowe lub szyny o profilu specjalnym, stosowane zwłaszcza w rozjazdach, w których są one dodatkowo charakteryzowane określeniami wynikającymi z ich ukształtowania i funkcji, jaką spełniają w rozjeździe (np. iglice, opornice, kierownice, itp.);
 - b) złączki będące - w zależności od spełnianej przez nie funkcji - przytwierdzeniami szyn (łączącymi szyny z podporami szynowymi) lub złączkami szynowymi (łączącymi końce szyn w toki szynowe),
 - c) podpory szynowe przenoszące obciążenia eksploatacyjne z szyn na podbudowę torowiska i będące zwykle podkładami betonowymi lub drewnianymi, albo innymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi;
 - 8) **zabudowa torowiska** – rozumie się przez to położony powyżej poziomu stopek szyn układ elementów i warstw takich jak:
 - a) wypełnienie przestrzeni bezpośrednio przylegającej do szyn, a w szczególności ich komór łubkowych za pomocą wkładek komorowych z betonu, gumy lub tworzywa sztucznego, mocowanych do szyn przez docisk lub sklejenie, stosowane głównie w celu izolacji elektrycznej szyn oraz izolacji akustycznej redukującej poziom hałasu emitowanego podczas ruchu tramwajów do otoczenia trasy,

- b) warstwa kruszywa (np. tłucznia kamiennego) układana zwykle do poziomemu spodu główek szyn,
- c) warstwa humusu i trawy lub innej roślinności,
- d) warstwa betonu cementowego lub asfaltowego stanowiąca **nawierzchnię drogową jezdni lub przejścia dla pieszych**.

Zabudowa torowiska może występować opcjonalnie – jeśli jest elementem składowym konstrukcji torowiska, to wówczas torowisko takie określa się, jako **torowisko zabudowane** – a jeśli zabudowa torowiska nie występuje, to jest to **torowisko niezabudowane**;

- 9) **podbudowa torowiska** – rozumie się przez to położony poniżej nawierzchni torowej (poniżej poziomu stopek szyn) układ elementów i warstw, takich jak:
 - a) podsypka - zwykle z tłucznia kamiennego, stanowiąca główną warstwę nośną i kształtującą układ geometryczny toru (tzw. podbudowę zasadniczą) – w wypadku zastosowania podsypki konstrukcja torowiska jest określana jako **konstrukcja podsypkowa**,
 - b) płyta betonowa (lub inna konstrukcja typu ława, ruszt, itp.) – stanowiąca warstwę zamienną w stosunku do podsypki. Torowisko wykonane bez zastosowania podsypki w podbudowie zasadniczej jest określane jako **konstrukcja bezpodsypkowa**. W bezpodsypkowych konstrukcjach torowiska mogą występować rozwiązania o jednolitej materiałowo, zintegrowanej zabudowie i podbudowie zasadniczej torowiska,
 - c) warstwa ochronna – o funkcji mrozochronnej i wodoprzepuszczalnej z kruszywa, stosowana w konstrukcjach podsypkowych i bezpodsypkowych jako pomocnicza podbudowa torowiska,
 - d) warstwa wibroizolacyjna – stosowana w celu redukcji wibracji i hałasu wtórnego od ruchu tramwajowego na otoczenie trasy; wykonywana zwykle w postaci maty lub inaczej ukształtowanych elementów z gumy, tworzywa sztucznego lub z wełny mineralnej;
- 10) **separacja torowiska** – rozumie się przez to zestaw elementów – zwykle krawężników – oddzielających torowisko od przyległych elementów lub warstw konstrukcyjnych pasa drogowego (np. jezdni, peronu przystankowego, zieleńca, itp.). Elementy separacyjne mogą być, w zależności od rozwiązań funkcjonalnych torowiska, wyniesione ponad płaszczyznę główek szyn (PGS) lub umieszczone w płaszczyźnie główek szyn (tzw. krawężniki wtopione). Separacja torowiska jest opcjonalną grupą elementów składowych konstrukcji torowiska i może nie występować jako odrębne elementy konstrukcyjne, lecz być rozwiązywana poprzez odpowiednie oznakowanie na jezdni lub na przejściu dla pieszych;
- 11) **odwodnienie torowiska** – rozumie się przez to zestaw elementów lub warstw stosowanych w celu odprowadzenia z obszaru torowiska wody opadowej. W zależności od miejsca odbioru tej wody przez system odwodnienia może być ono rozwiązywane jako **odwodnienie powierzchniowe** (odbiór wody z zabudowy torowiska, z rowków szyn lub z rowów

- odwadniającego) albo jako **odwodnienie wgłębne** (odbiór wody poprzez drenaż w pomocniczej warstwie podbudowy lub w podłożu gruntowym);
- 12) **podłoże gruntowe** – rozumie się przez to warstwy materiału gruntowego stanowiącego grunt rodzimy lub nasypowy o odpowiednim ukształtowaniu (nasyt, wykop) i zagęszczeniu;
 - 13) **rozjazd tramwajowy** – rozumie się przez to połączenie torów umożliwiający przejazd tramwaju z jednego toru na inny odgałęziający się od niego tor. W podstawowej wersji rozjazdu (rozjazd jednotorowy pojedynczy) są wyróżniane trzy strefy – zwrotnice, szyny łączące i krzyżownice. W zależności od ilości i wzajemnego powiązania zwrotnice i krzyżownice tworzą wraz z szynami łączącymi następujące podstawowe rodzaje rozjazdów tramwajowych:
 - a) jednotorowy pojedynczy, zawierający jedną zwrotnicę i jedną krzyżownicę,
 - b) jednotorowy podwójny, zawierający dwie zwrotnice i trzy krzyżownice,
 - c) dwutorowy pojedynczy, niepełny zawierający jedną zwrotnicę i pięć krzyżownic,
 - d) dwutorowy pojedynczy, pełny zawierający dwie zwrotnice i sześć krzyżownic,
 - e) dwutorowy podwójny, zawierający cztery zwrotnice i osiemnaście krzyżownic;
 - 14) **skrzyżowanie torów tramwajowych** – rozumie się przez to połączenie torów umożliwiający przejazd tramwaju przez krzyżujące się tory. Skrzyżowanie torów składa się z bloków krzyżownic i łączących je szyn. W zależności od ilości krzyżujących się torów i tym samym od liczby krzyżownic skrzyżowania są klasyfikowane jako:
 - a) jednotorowe pojedyncze, zawierające cztery krzyżownice,
 - b) dwutorowe pojedyncze, zawierające osiem krzyżownic,
 - c) dwutorowe podwójne, zawierające szesnaście krzyżownic;
 - 15) **węzeł rozjazdowy** – rozumie się przez to układ rozjazdów i skrzyżowań torów tramwajowych umożliwiających połączenia lub/i krzyżowanie się tras tramwajowych.

4. Warunki eksploatacyjne torowisk tramwajowych

Warunki eksploatacyjne torowisk tramwajowych w porównaniu do dróg kolejowych charakteryzują się mniejszymi prędkościami jazdy nieprzekraczającymi zwykle 70 km/h. Średnia prędkość komunikacyjna tramwaju w ruchu miejskim wynosi 19-24 km/h (obliczana z uwzględnieniem postojów na przystankach i skrzyżowaniach). Wynika ona z odległości pomiędzy przystankami (najczęściej rzędu 400-600 m) oraz konieczności podporządkowania się sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniach. Przy prędkości minimum 24 km/h mówi się o szybkim tramwaju poruszającym się po torowisku wydzielonym z jezdni ze średnią prędkością komunikacyjną ok. 27 km/h. Niezależność szybkiego tramwaju od pozostających

stałej komunikacji uzyskuje się stosując: torowiska wydzielone, wiadukty, nasypy, podziemne i napowietrzne przejścia piesze. Niekiedy dopuszcza się skrzyżowania jednopoziomowe z układem sygnalizacji świetlnej dającej bezwzględne pierwszeństwo tramwajowi. Stosuje się także większe odległości międzyprzystankowe niż dla klasycznego tramwaju (od 500 do 1000 m). W kolejach występują znacznie wyższe prędkości jazdy. Według Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie [4] maksymalna prędkość pociągów dla linii kategorii magistralnej może wynosić 200 km/h.

W przypadku tramwajów mamy do czynienia również z mniejszymi ciężarami pojazdów i związanymi z tym naciskami przenoszonymi od pojazdu na tor, wyrażanymi przez tzw. nacisk osi. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 22 grudnia 2003 r. w sprawie warunków technicznych tramwajów i trolejbusów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia [7], nacisk statyczny od jednej osi tramwaju na tor nie może przekroczyć 100 kN przy dopuszczalnej masie całkowitej. W przypadku kolei zgodnie z rozporządzeniem Ministra [4] dla linii kategorii magistralnej dopuszczalny nacisk na tor od osi pojazdu może wynosić 221 kN. Natomiast standardy techniczne [6] dopuszczają nacisk na tor od osi lokomotywy 225 kN.

Jednak duża częstotliwość kursowania tramwajów dochodząca na centralnych trasach niektórych miast do ok. 2 min. w godzinach szczytu powoduje, że roczne obciążenie przewozami na tych trasach może wynosić ok. 10 Tg/rok, co jest wartością porównywalną do obciążenia przewozami na drugorzędnych liniach kolejowych.

Warunki eksploatacyjne torowisk tramwajowych charakteryzują się dużą wrażliwością na zakłócenia przewozów spowodowane awaryjnością ich konstrukcji i utrudnioną realizacją robót utrzymaniowych. Ma to miejsce zwłaszcza w torowiskach wspólnych z jezdnią, gdzie wyłączenia z ruchu wprowadzane w celach remontowych powodują nie tylko zakłócenia ruchu tramwajowego, lecz także i drogowego, co niekorzystnie wpływa na układ komunikacyjny całego miasta lub jego określonych stref.

W przeciwieństwie do kolei sieci tramwajowe są w Polsce eksploatowane przeważnie przez tabor jednokierunkowy, co w czasie remontów wyklucza możliwość prowadzenia ograniczonego ruchu po jednym torze i wymusza tylko krótkie (max. 4-godzinne) nocne wyłączenia torowisk z ruchu lub długoterminowe zawieszenia przewozów na całych trasach, co jest stosowane dość rzadko i możliwe zwykle tylko w letnim okresie urlopowym. Warunki te wymuszają stosowanie konstrukcji torowisk o dużej trwałości i niezawodności eksploatacyjnej.

Inną specyficzną i ważną cechą eksploatacji torowisk tramwajowych jest konieczność skutecznego ograniczania poprzez konstrukcję i stan techniczny torowiska niekorzystnego oddziaływania ruchu tramwajowego na środowisko w otoczeniu trasy. Oddziaływania te przejawiają się jako hałas i wibracje oraz prądy błędzące, a ich ograniczanie co najmniej do dopuszczalnego poziomu określonego w obowiązujących przepisach wymaga stosowania konstrukcji torowisk o dużej izolacyjności wibroakustycznej i elektrycznej, wykorzystującej współczesne osią-

gnięcia inżynierii materiałowej, zwłaszcza w dziedzinie trwałych cech sprężystych materiałów stosowanych w poszczególnych warstwach tych konstrukcji.

Nie bez znaczenia dla charakterystyki warunków eksploatacyjnych torowisk tramwajowych jest coraz powszechniejsze dążenie do podniesienia atrakcyjności komunikacji tramwajowej w celu zachęcenia pasażerów do szerszego korzystania z miejskiego transportu publicznego – zwłaszcza szynowego - i ograniczania w miastach korzystania z samochodów. Realizacja tego celu obejmuje – oprócz wymienionych powyżej ogólnych wymagań stawianych konstrukcji torowisk tramwajowych – doskonalenie ukształtowania układu geometrycznego toru i zwiększenie również i w ten sposób komfortu jazdy poprzez redukcję przyspieszeń niezrównoważonych oddziałujących na pasażera.

5. Rozwój konstrukcji torowisk tramwajowych

Rozwój konstrukcji torowisk tramwajowych postępuje wraz z przedstawionymi powyżej zmianami ich warunków eksploatacyjnych i dostosowywaniem do nich odpowiednich wymagań technicznych.

Wymagania te są podporządkowane następującym celom głównym:

- I. Zwiększeniu podaży usług przewozowych przy podwyższeniu ich standardów jakościowych i racjonalnym zmniejszeniu kosztów eksploatacyjnych poprzez stosowanie rozwiązań konstrukcyjnych o dużej trwałości.
- II. Zmniejszeniu uciążliwych dla pasażerów oraz mieszkańców i miejskiej infrastruktury oddziaływań od ruchu tramwajowego na środowisko – zwłaszcza w postaci hałasu i wibracji.

Cele te są w różny sposób przekładane na szczegółowe wymagania techniczne stawiane projektantom i wykonawcom robót. Na przykład w Tramwajach Warszawskich Sp. z o.o. ogólne wymagania stawiane modernizowanej konstrukcji torowiska obejmują zwykle następujące warunki:

- a) stosowanie w torowiskach o zwiększonym obciążeniu, tj. w torowiskach wspólnych z jezdnią, na przejazdach i w węzłach rozjazdowych oraz na obiektach inżynierskich trwałej konstrukcji bezpodsytkowej ograniczającej zakres robót utrzymaniowych, zakłócających normalną eksploatację torowiska;
- b) bezpodsytkowa konstrukcja torowiska powinna zapewniać jego trwałość nie mniejszą niż 30 lat dla podbudowy w postaci płyty betonowej i co najmniej 15 lat dla nawierzchni torowej, bez konieczności okresowej regulacji układu geometrycznego torów, przy dopuszczeniu ewentualnych napraw bieżących dotyczących usuwania zużycia szyn przez szlifowanie lub napawanie ich zużytych powierzchni i krawędzi tocznej (odpowiednio do rodzaju zużycia);
- c) konstrukcja torowiska m.in. poprzez sprężyste posadowienie i mocowanie szyn, a w uzasadnionych lokalizacjach również ułożenie betonowej płyty

- podbudowy na matach wibroizolacyjnych oraz odpowiednio dobrany rodzaj zabudowy torowiska (w tym nawierzchni drogowej) powinna skutecznie ograniczać emisję hałasu i wibracji od ruchu tramwajów i innych pojazdów po torowisku i chronić otoczenie trasy tramwajowej przed prądami błądzącymi;
- d) torowisko musi być skutecznie odwodnione na odcinkach torów szlakowych, przy przystankach i w węzłach rozjazdowych (odprowadzenie wody ze wszystkich zwrotnic do sieci kanalizacji deszczowej).

Stosowanie w torowiskach tramwajowych konstrukcji bezpodsyPKowych, tj. konstrukcji, w których główna warstwa nośna i kształtująca układ geometryczny toru jest wykonana bez zastosowania warstwy podsypki, zastępowanej zwykle przez podbudowę w postaci płyty betonowej, ma historię dłuższą i o większym zakresie niż stosowanie tych konstrukcji w drogach kolejowych. Wynika to z przedstawionych powyżej uwarunkowań eksploatacyjnych. Rozwój tych konstrukcji w torowiskach tramwajowych przejawia się w doskonaleniu zarówno nawierzchni torowej i jej mocowania do podbudowy, jak też i zabudowy torowiska.

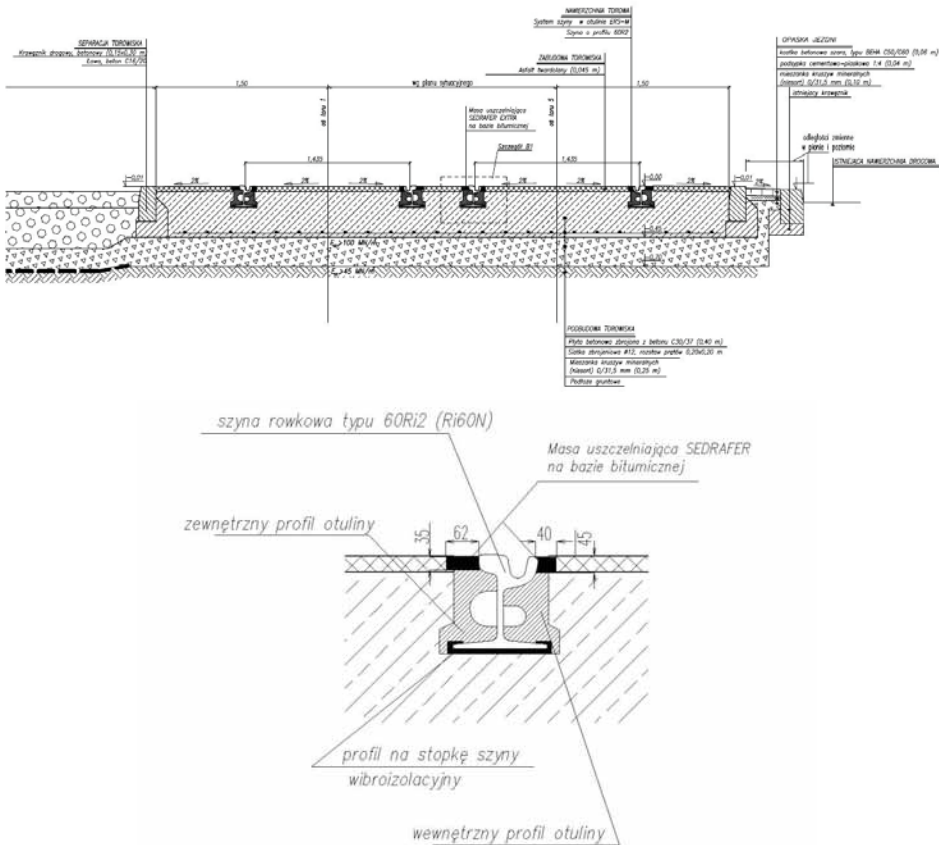
Mocowanie nawierzchni torowej do podbudowy betonowej jest zwykle powiązane z rozwiązaniami konstrukcji zabudowy torowiska – stosowane jest tu często ciągle, sprężyste podparcie szyn i jednocześnie ich ciągle zakrycie w postaci różnych form tzw. otuliny szyny. Sprężyste podparcie szyn – ciągle lub punktowe - na sztywnej podbudowie betonowej jest zapewniane poprzez stosowanie pod szynami podlewu z trwale elastycznych mas na bazie żywicy poliuretanowej (rzadziej z modyfikowanych mas bitumicznych) oraz z przekładek podszytowych lub profili gumowych nakładanych na stopkę szyny. Dla zapewnienia sprężystego przenoszenia sił poziomych i w celu izolowania powierzchni bocznych szyny od transmisji drgań oraz od upływności prądów błądzących są stosowane podobne rozwiązania bocznych elementów otuliny szyn w postaci tzw. profili przyszynowych dostosowanych kształtem do szyn rowkowych lub do szyn Vignole'a (tzw. kolejowych). Zabudowa szyn w postaci różnych rozwiązań materiałowych otuliny – zwłaszcza na bocznych powierzchniach szyny – pełni nie tylko funkcję wibroizolacyjną, lecz jest skuteczną izolacją elektryczną i wibroakustyczną ograniczającą emisję hałasu.

Systemy szyny w otulinie są rozwiązaniem szczególnie korzystnym w wypadku stosowania otuliny w postaci masy zalewowej z żywicy poliuretanowej. Są to zwykle konstrukcje, w których tak wykonana otulina pełni równocześnie kilka funkcji takich, jak:

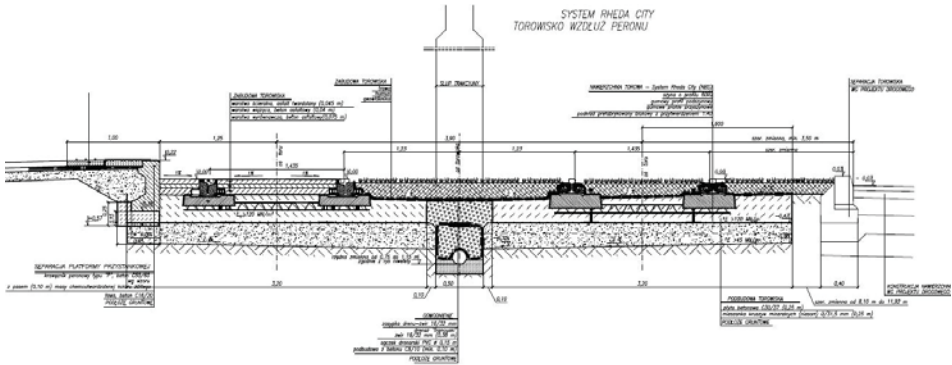
- ciągle, sprężyste podparcie szyny (zwykle w połączeniu z ciąglą przekładką podszynową) zapewniające sprężyste przenoszenie pionowych nacisków i poziomych sił bocznych,
- ciągle, sprężyste mocowanie szyny do dna i do bocznych ścianek kanału szynowego eliminujące potrzebę stosowania typowych w nawierzchniach szynowych przytwierdzeń szyn za pomocą połączeń śrubowych lub zaciskowych. Przytwierdzenia te są niezbędne również dla przenoszenia sił termicznych wywołujących wyboczenie szyn (poziome, a niekiedy także pionowe),
- tłumienie wibroakustyczne (wibracje i hałas),
- izolacja elektryczna szyn stanowiąca ochronę przed prądami błądzącymi.

Konstrukcje szyny w otulinie z zastosowaniem żywic poliuretanowych są szczególnie korzystne w torowiskach wspólnych z jezdnią lub na obiektach inżynierskich, gdzie dzięki integracji podbudowy i zabudowy torowiska w postaci monolitycznej, betonowej płyty z odpowiednio ukształtowanymi kanałami szynowymi zmniejszają wysokość konstrukcji torowiska, ważną w warunkach intensywnej miejskiej infrastruktury podziemnej. Bezpodsypkowe konstrukcje torowisk tramwajowych są często realizowane w postaci tzw. torowisk trawiastych, w których na podbudowie betonowej jest układana warstwa humusu stanowiącego podłoże dla trawy lub innego rodzaju niskiej roślinności. Oprócz wymienionych powyżej zalet systemu szyny w otulinie w postaci żywicznej masy zalewowej, torowiska trawiaste mają dodatkowe zalety, istotne dla warunków miejskich. Polegają one na znaczącej poprawie estetyki ulic i na zwiększeniu czynnej biologicznie powierzchni miasta, a ponadto torowiska trawiaste wykazują bardzo wysokie tłumienie hałasu, wynoszące co najmniej 5 dB.

Przykłady bezpodsypkowych konstrukcji torowisk tramwajowych przedstawiają rysunki 1 i 2.



Rys. 1. Przykład bezpodsypkowej konstrukcji torowiska zabudowanego wspólnego z jezdnią o zintegrowanej betonowej zabudowie i podbudowie torowiska z szynami w otulinie z profili wykonanych z kompozytu poliuretanowego. Szczegół konstrukcyjny nawierzchni torowej – system ERS-M



Rys. 2. Przykład bezpodsypkowej konstrukcji torowiska wydzielonego z jezdni, zabudowanego wzdłuż peronu nawierzchnią drogową, a na międzytorzu i w przyległym torze z zabudową trawiastą, z szynami w otulinie z profili gumowych – system Rheda City

6. Rozwój układu geometrycznego torowisk tramwajowych

Układy geometryczne tras tramwajowych w stosunku do linii kolejowych charakteryzują się istotnymi uproszczeniami ze względu na zmniejszone prędkości i naciski osi pojazdów. Ponadto układ geometryczny trasy tramwajowej jest ściśle powiązany i w dużym stopniu uzależniony od układu geometrycznego ulicy lub ogólnie trasy drogowej. Układ geometryczny tras tramwajowych w porównaniu do linii kolejowych charakteryzuje się:

- mniejszymi wartościami promienia łuku poziomego,
- wartościami przechyłki mniejszymi niż to wynika z fizycznych zależności,
- uproszczonymi sposobami przechodzenia prostej w łuk (krzywe koszowe),
- uproszczonymi rampami przechyłkowymi (prostoliniowymi),
- znacznie większymi pochyleńiami podłużnymi.

Rozporządzenie Ministra [1] dopuszcza w torowiskach tramwajowych wielkość promienia łuku 50 m. Zgodnie z wytycznymi [2] i rozporządzeniem Ministra [1] na skrzyżowaniach ulic i w węzłach rozjazdowych, gdzie najczęściej zachodzi konieczność dostosowania się do sytuacji drogowej minimalny promień łuku poziomego może wynosić tylko 25 m. Dodatkowo zgodnie z Rozporządzeniem Ministra [1] promień 25 m dopuszczony jest także w rozjazdach i na pętlach.

W przypadku kolei występują zupełnie inne warunki eksploatacyjne i dlatego minimalne dopuszczalne promienie łuków są znacznie większe niż na trasach tramwajowych. Zgodnie z rozporządzeniem Ministra [4] na nowo budowanych liniach magistralnych dla prędkości powyżej 160 km/h minimalna wartość promienia łuku poziomego wynosi 4000 m, a na liniach modernizowanych 2000 m. Natomiast dla linii znaczenia miejscowego w terenie górskim 200 m. Zgodnie ze standardami technicznymi [6] dla linii typu 250 (prędkość pociągów pasażerskich 250 km/h, prędkość pociągów towarowych 120 km/h) zalecana wartość promienia wynosi 3100 m, a zasadnicza 2750 m. Natomiast dla linii typu T40 (prędkość po-

ciągów pasażerskich i towarowych 40 km/h) wartość promienia zalecanego wynosi 250 m, a zasadniczego 200 m.

W torowisku tramwajowym wydzielonym z jezdni, na łuku dobiera się wartość przechyłki na podstawie tabeli przedstawionej w wytycznych [2]. W tabeli są podane wartości dla dwóch rodzajów przechyłek:

- przechyłki normalnej, do zastosowania której należy dążyć wszędzie tam, gdzie pozwalają na to warunki terenowe,
- przechyłki minimalnej, której wartość dopuszcza się tam, gdzie nie można zaprojektować przechyłki normalnej.

Wartości przechyłki w drogach szynowych wynika z fizycznych zależności i wyznacza się ją na podstawie wzoru 1. Wzór ten stosowany jest powszechnie w przepisach dotyczących kolei i metra zwykle z dodatkowym członem wynikającym z możliwości występowania akceptowalnej, niezerowej wartości niezeroważonego przyspieszenia odśrodkowego o dopuszczalnej wartości a_{dop} (według wzoru 2).

$$h = \frac{11,8 \cdot V^2}{R} \quad (1)$$

$$h = \frac{11,8 \cdot V^2}{R} - 153 \cdot a_{dop} \quad (2)$$

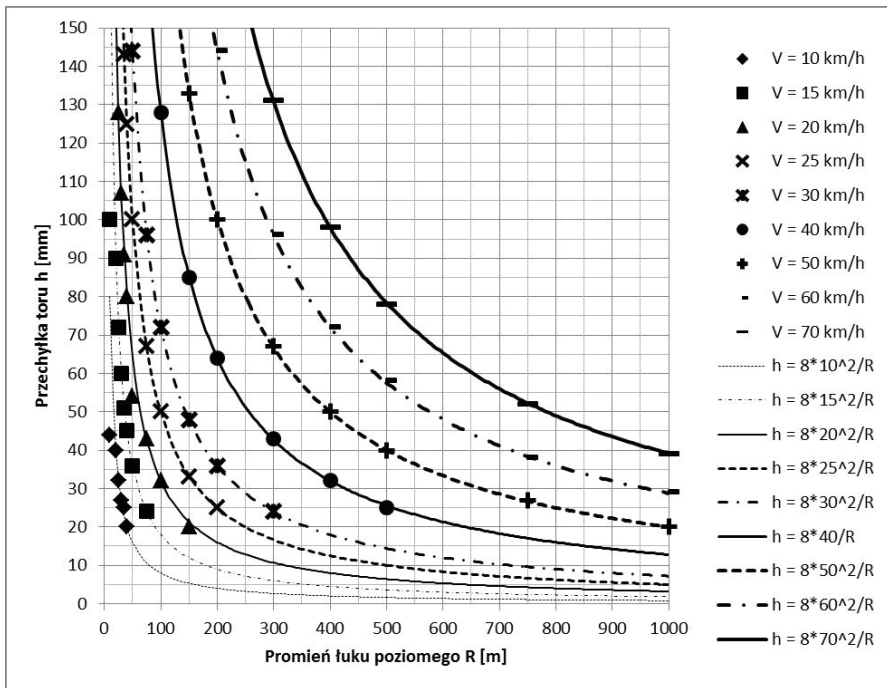
Natomiast według wytycznych [2] wartości przechyłek toru dla torowisk tramwajowych w tabeli 1 są wyznaczone na podstawie zmodyfikowanego wzoru (1), przy arbitralnym założeniu, że tylko 2/3 tramwajów porusza się z prędkością nominalną, co ma uzasadniać, że w tej samej proporcji można zmniejszyć wartość przechyłki w stosunku do wartości zasadniczej obliczanej według wzoru (1). Tak więc po uwzględnieniu tego założenia wzór (1) na wartość przechyłki wynikającą z fizycznych zależności przekształca się następująco we wzór (3) będący podstawą dla obliczenia wartości przechyłki toru przedstawionych w tabeli 1.

$$h_T = \frac{2}{3} \cdot \frac{11,8 \cdot V^2}{R} = \frac{7,87 \cdot V^2}{R} \approx \frac{8 \cdot V^2}{R} \quad \Rightarrow \quad h_T = \frac{8 \cdot V^2}{R} \quad (3)$$

Tabela 1. Wartości przechyłki toru tramwajowego o szerokości 1435 mm na łukach [2]

Promień R [m]	Prędkość jazdy [km/h]									Rodzaj przechyłki
	10	15	20	25	30	40	50	60	70	
< 20		25								minimalna normalna
	44	100								
20		20	114							minimalna normalna
	40	90								
25		20	70							minimalna normalna
	32	72	128							
30		20	34	123						minimalna normalna
	27	60	107							
35		20	87							minimalna normalna
	25	51	91	143						

40	20	45	80	125	143					minimalna normalna
50		36	54	100	144					minimalna normalna
75		24	43	67	96	140				minimalna normalna
100			32	50	72	128	59			minimalna normalna
150			20	33	48	85	133	62	148	minimalna normalna
200				25	36	64	100	72	149	minimalna normalna
300					24	43	67	96	131	minimalna normalna
400						32	50	72	98	minimalna normalna
500						25	40	58	78	minimalna normalna
750							27	38	52	minimalna normalna
1000							20	29	39	minimalna normalna
2000									20	minimalna normalna



Rys. 3. Przechyłki normalne toru tramwajowego i ich przybliżenie wzorem (3)

Wartości tzw. normalnych przechyłek toru tramwajowego w tabeli 1 zostały przedstawione jako punkty w układzie współrzędnych h/R na rys. 3 dla poszczególnych poziomów prędkości (od 10 do 70 km/h). Następnie we wspólnym układzie współrzędnych naniesiono wykresy opisane wzorem (3) dla poszczególnych poziomów prędkości (od 10 do 70 km/h). Większość punktów pokrywa się z wykresami, co potwierdza przedstawione powyżej założenie upraszczające sposób obliczania wartości przechyłki toru w torowiskach tramwajowych. Różnice pomiędzy wartościami przechyłek wynikających z fizycznych zależności (1) i przechyłek normalnych ustalonych w wytycznych [2] wynoszą średnio 36 mm, co odpowiada wartości przyspieszenia niezrównoważonego $0,24 \text{ m/s}^2$.

Dodatkowo warto nadmienić, że zgodnie z wytycznymi [2] stosując wartości przechyłki minimalne zamiast normalnych, średni niedomiar przechyłki wynosi 67 mm, a odpowiadająca temu wartość przyspieszenia niezrównoważonego wynosi $0,44 \text{ m/s}^2$. Podsumowując charakterystykę zasad ustalania przechyłki w torach tramwajowych należy stwierdzić, że stosując przechyłkę minimalną według wytycznych [2] średni niedomiar przechyłki względem zależności fizycznych (1) wynosi 103 mm i odpowiada temu wartość przyspieszenia niezrównoważonego $0,68 \text{ m/s}^2$.

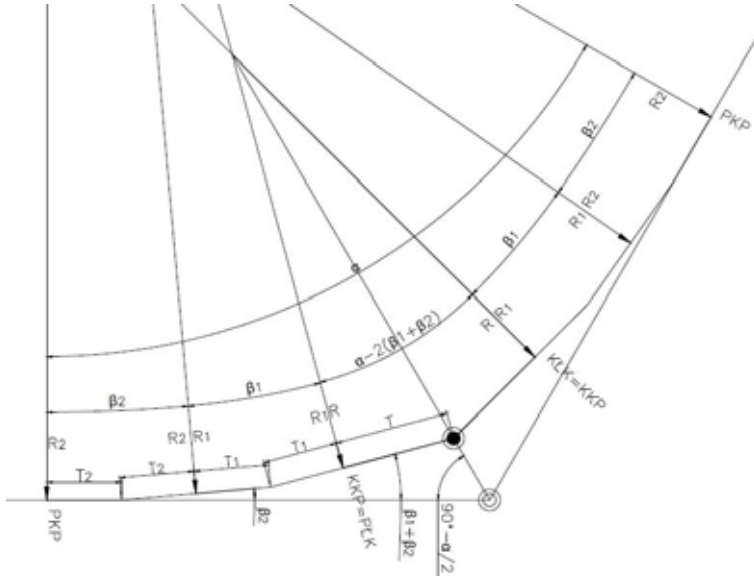
W tramwajach maksymalna wartość przechyłki przy szerokości toru 1435 mm wynosi 150 mm. Na kolei zgodnie z rozporządzeniem [4] maksymalna przechyłka wynosi 150 mm. Natomiast zgodnie ze standardami technicznymi [6] dla linii typu P dopuszczona jest wartość przechyłki toru 180 mm, a dla linii typu M i T 160 mm.

Stosowane obecnie w tramwajach zasady wyznaczania wartości przechyłki toru wymagają zmiany polegającej na wprowadzeniu do przepisów fizykalnego wzoru na przechyłkę (1). Przełoży się to zapewne na zwiększenie komfortu jazdy i zmniejszenie zużycia szyn i kół pojazdów, a tym samym zmniejszenie kosztów utrzymania infrastruktury tramwajowej.

W drogach kolejowych zgodnie z rozporządzeniem [4] również stosuje się zasadniczo rampy przechyłkowe prostoliniowe. Ponadto w trudnych warunkach terenowych oraz przy modernizacji układu torowego dopuszczone są rampy przechyłkowe krzywoliniowe w postaci paraboli 3-ego stopnia lub cosinusoidy.

Natomiast w torach tramwajowych stosuje się prostoliniowe rampy przechyłkowe o długości nie związanej bezpośrednio z prędkością ruchu, lecz o stałym pochyleniu maksymalnym 1:300 (pochylenie 3,3 ‰). Długość rampy przechyłkowej nie jest również powiązana z długością krzywej przejściowej. Wytyczne [2] określają, że w torach tramwajowych na szlaku dla promienia łuku poziomego poniżej 100 m należy stosować krzywą przejściową w postaci łuków o promieniach stopniowo malejących (krzywe koszone) lub paraboli 3-ego stopnia, która jednak w praktyce jest rzadko stosowana.

W zależności od wartości promienia zasadniczego stosuje się krzywą koszącą jednostopniową lub dwustopniową (rys. 4) dobierając wielkości odpowiednich parametrów geometrycznych na podstawie tabeli 2.



Rys. 4. Schemat układu stycznych krzywej koszowej dwustopniowej

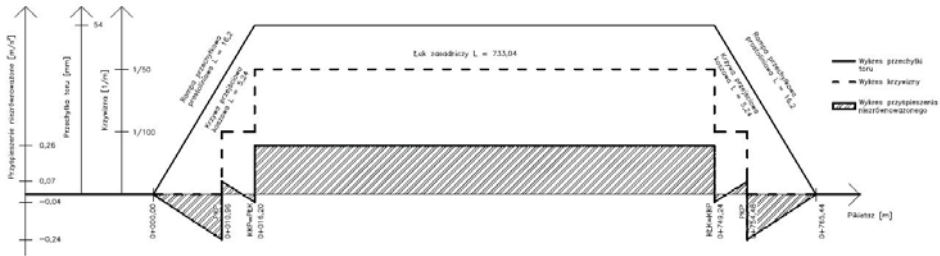
Tabela 2. Wartości wielkości parametrów geometrycznych do projektowania krzywych przejściowych (koszowych) w torach tramwajowych [2]

Wartość promienia łuku zasadniczego R [m]	Wartości promieni łuków przejściowych (koszowych), wartości kątów i długości łuków przejściowych (po osi toru)	
25-35	$R_2 = 100 \text{ m}, \beta_2 = 3^\circ,$ $T_2 = 2,6186 \text{ m}$	$R_1 = 50 \text{ m}, \beta_1 = 6^\circ,$ $T_1 = 2,6204 \text{ m}$
50	-	$R_1 = 100 \text{ m}, \beta_1 = 3^\circ,$ $T_1 = 2,6186 \text{ m}$
75	-	$R_1 = 150 \text{ m}, \beta_1 = 1,5^\circ,$ $T_1 = 1,9636 \text{ m}$

Krzywa koszowa jest rodzajem krzywej przejściowej o niekorzystnej – nieciągłej, skokowej zmianie krzywizny i wartości przyrostu przyspieszenia odśrodkowego stosowaną najczęściej na trasach tramwajowych. W niniejszym referacie w celu lepszego zobrazowania niekorzystnych efektów zastosowania krzywej koszowej jako krzywej przejściowej posłużono się przykładem dla konkretnych danych: $R = 50 \text{ m}$, $V = 20 \text{ km/h}$. Wartość przechyłki normalnej $h = 54 \text{ mm}$ dobrano z wytycznych [2]. Maksymalne pochylenie ramp przechyłkowych 1:300 wymusiło zastosowanie rampy o minimalnej długości 16,2 m.

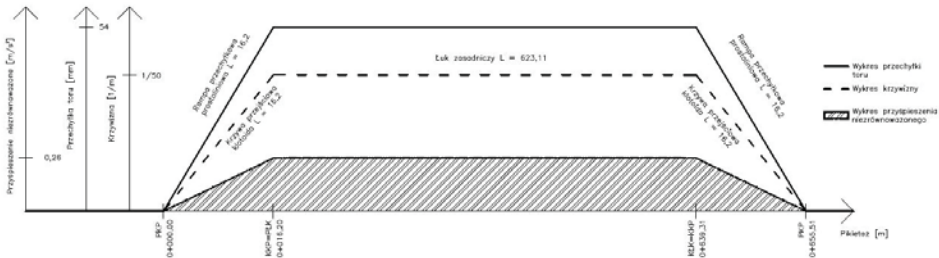
Na rys. 5 przedstawiono rozwiązanie z zastosowaniem jako krzywej przejściowej krzywej koszowej jednostopniowej (o łuku przejściowym $R = 100 \text{ m}$ dobranym według tabeli 2). Na wykresie widać, że rampa przechyłkowa zaczyna się znacznie wcześniej niż krzywa przejściowa, co skutkuje powstaniem niezrównoważonego przyspieszenia dośrodkowego. Poza tym zmiany krzywizny i przyspiesze-

nia odśrodkowego następują w sposób skokowy. Jest to niekorzystne rozwiązanie, zalecane przez wytyczne [2].



Rys. 5. Wykresy przechyłki toru, zmian krzywizny oraz wartości przyspieszenia niezerównoważonego dla krzywej przejściowej w postaci krzywej koszarowej jednostopniowej

Analogiczny wykres przedstawiony na rys. 6 opracowany dla klotoidy, jako krzywej przejściowej wykazuje znacznie korzystniejsze warunki jazdy. Rampa przechyłkowa i krzywa przejściowa zaczynają się w tym samym punkcie dzięki właściwemu doborowi parametru klotoidy. Przyspieszenie odśrodkowe narasta w sposób ciągły i liniowy, a jego występowanie spowodowane jest niedoborem przechyłki wynikającym z zastosowania przechyłki normalnej według wytycznych [2], zamiast wartości przechyłki wynikającej z fizycznych zależności (wzór 3).



Rys. 6. Wykresy przechyłki toru, zmian krzywizny oraz wartości przyspieszenia niezerównoważonego dla krzywej przejściowej w postaci klotoidy

Wynika z tego porównania wniosek, że w ramach rozwoju układów geometrycznych tras tramwajowych powinno się odchodzić od stosowania krzywych przejściowych w postaci krzywych koszarowych na rzecz krzywych przejściowych o liniowo zmiennej krzywiznie, jak np. klotoida opisana wzorem 4.

$$y = \frac{x^3}{6 \cdot R \cdot l} - \frac{x^7}{336 \cdot R^3 \cdot l^3} + \frac{x^{11}}{42240 \cdot R^5 \cdot l^5} - \dots \quad (4)$$

Oprócz powyższych różnic w stosunku do zasad stosowanych w kolejnictwie trasy tramwajowe mogą charakteryzować się większymi pochyleniami podłużnymi, które zgodnie z rozporządzeniem [1] mogą wynosić:

- 50 % na szlaku, jeśli przewidywany tabor ma odpowiednie właściwości trakcyjne,
- 30 % na dojazdach do wiaduktu i estakady,

– 25 ‰ na przystankach tramwajowym i w rozjazdach.

Łuki pionowe o promieniach minimalnych 2000 m (wytyczne [2] dopuszczają 1500 m) w załomach niwelety należy stosować, gdy algebraiczna różnica pochyłeń podłużnych jest większa niż 6 ‰.

7. Zagadnienia torowisk tramwajowych w profilu kształcenia inżynierów budownictwa komunikacyjnego

W Politechnice Warszawskiej w programie kształcenia inżynierów budownictwa komunikacyjnego realizowanym w ramach studiów I i II stopnia na specjalnościach Inżynieria Komunikacyjna oraz Drogi Szynowe (tylko na studiach II stopnia) są omawiane również zagadnienia komunikacji tramwajowej i zasady konstrukcji i kształtowania torowisk tramwajowych. Zagadnienia te są wykładane w zakresie problematyki planistycznej (przedmiot *Planowanie systemów transportu*) i technicznej – w szczególności infrastrukturalnej. W ramach przedmiotów *Drogi Szynowe*, *Diagnostyka nawierzchni szynowych*, *Infrastruktura miejskiego transportu szynowego* i *Podstawy energetyki trakcyjnej* tematyka torowisk tramwajowych zajmuje średnio ok. 25% godzin tych przedmiotów, czyli łącznie ok. 70 godz.

Omawianie w tym zakresie zagadnień związanych z komunikacją tramwajową – a zwłaszcza z jej infrastrukturą torową – jest z pewnością właściwym krokiem wychodzącym naprzeciw zapotrzebowaniu na specjalistów z tej branży, szczególnie wobec intensywnego rozwoju ilościowego i jakościowego infrastruktury tramwajowej występującego w Polsce w różnym stopniu we wszystkich miastach eksploatujących tramwaje.

8. Podsumowanie

Przedstawione w artykule zagadnienia rozwoju infrastruktury tramwajowej we wszystkich miastach eksploatujących ten system transportu miejskiego wskazują na wiele możliwości wzajemnego wykorzystywania doświadczeń eksploatacyjnych kolejowych i tramwajowych. Należą do nich analogiczne rozwiązania dotyczące zwiększenia trwałości eksploatacyjnej konstrukcji nawierzchni szynowej i zmniejszania niekorzystnych oddziaływań na środowisko w otoczeniu tras tramwajowych i kolejowych.

Polegają one na szerokim stosowaniu różnych systemów konstrukcji podsypkowych i bezpodsypkowych takich jak systemy szyny w otulinie (ERS, Rheda City i inne) stosowane na przejazdach i w torowiskach wspólnych z jezdnią.

Pozytywne efekty w dziedzinie rozwoju torowisk tramwajowych wymagają nie tylko działań w zakresie konstrukcji drogi, lecz także w dziedzinie kształtowania układu geometrycznego trasy, który w tramwajach wykazuje jeszcze wiele dawnych, wymagających nowelizacji wymagań technicznych. Należą do nich zmiany

zasad ustalania wartości przechyłki toru i zmiany zasad kształtowania krzywych przejściowych.

Postęp w omawianej dziedzinie wymaga także zwiększenia udziału problematyki infrastruktury tramwajowej w programach kształcenia inżynierów kierunku budownictwa komunikacyjnego, zwłaszcza na specjalnościach związanych branżowo z drogami szynowymi.

Bibliografia

- [1] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dz.U. 1999 nr 43 poz. 430.
- [2] Wytyczne techniczne projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych. Ministerstwo Administracji, Gospodarki Terenowej i Ochrony Środowiska. Departament Komunikacji Miejskiej i Dróg. Warszawa 1983.
- [3] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane. Dz.U. 1994 Nr 89 poz. 414.
- [4] Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie. Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987.
- [5] Projekt wytycznych Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej na temat warunków technicznych jakim powinny odpowiadać torowiska tramwajowe i ich usytuowanie. Opracowanie Biura Studiów i Projektów TRAM-PROJEKT. Warszawa 2013.
- [6] Centrum Naukowo – Techniczne Kolejnictwa: Standardy techniczne. Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200$ km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem). Tom I. Droga szynowa. Wersja 1.1. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2009.
- [7] Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 22 grudnia 2003 r. w sprawie warunków technicznych tramwajów i trolejbusów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia. Dz. U. 2003 nr 230 poz. 2300 i 2301.