

**SIEMENS**

*Ingenuity for life*

Mgr inż. Arnd Meyer,  
Erlangen

Zestawy kołowe czy  
niezależnie obracające się  
koła – od teorii do praktyki

[siemens.com/mobility](https://www.siemens.com/mobility)

## Streszczenie

Wózki z niezależnie obracającymi się kołami (IRW) [Independently Rotating Wheels] wydają się być tylko kompromisem, ponieważ brakuje miejsca na oś. Niniejszy dokument wyjaśnia teorię prowadzenia w torze przez IRW i pokazuje, że IRW ma pewne zalety w stosunku do konwencjonalnych zestawów kołowych, gdy są one stosowane w systemach tramwajowych z ich ciasnymi łukami. Rozważania te są następnie poparte danymi doświadczalnymi, pokazując, że tramwaje z IRW oferują doskonałą jakość jazdy i niski poziom zużycia kół/szyn – jeśli uwzględnione są szczególne cechy tej zasady.

### 1. Wprowadzenie

„Oś lub brak osi, oto pytanie!” Ta parafraza Szekspira trafnie podsumowuje co należy rozważyć dla koncepcji prowadzenia tramwajowego układu biegowego. Podczas gdy główne linie kolejowe prawie wyłącznie używają wózków o sztywnych zestawach kołowych co jest nieporozumieniem w sektorze tramwajowym. Możliwość zastosowania niezależnie obracających się kół (IRW) jest kusząca dla uzyskania niskiej podłogi w całej przestrzeni pasażerskiej, jednocześnie jest równie wielki sceptycyzm wobec rezygnacji z zasady sztywnego zestawu kołowego, który wypróbowano i przetestowano przez prawie 200 lat służby.

Niniejszy dokument powinien pomóc, na podstawie faktów, aby zdecydować, która zasada przewodnia stanowi najlepszy kompromis dla rzeczywistych warunków eksploatacji. Podczas gdy zaskakująco złożona teoria ruchu niezależnie obracających się kół została naświetlona w [1] i [2], ten dokument ustanawia związek z całym pojazdem i przedstawia wyniki osiągnięte w praktyce. Tak jak dobre może być nasze rozumienie teorii prowadzenia w torze, jedynie praktyka może pokazać, czy kompromis między różnymi wymaganiami osiągnął sukces. Na przykładzie niskopodłogowego tramwaju Siemens Avenio dla Monachium, ten dokument pokazuje, jak w praktyce wygląda niskie zużycie kół i wysoki komfort jazdy.

### 2. Wymagania dotyczące układów biegowych

Oceniając różne koncepcje, najpierw należy wyjaśnić wymagania. W tym miejscu należy skupić się na wymaganiach różniących koncepcje. Przykładowo, niezawodne prowadzenie jest podstawowym wymaganiem wstępnym oraz cechą każdego dopuszczonego do ruchu pojazdu. Natomiast, zużycie i komfort jazdy, są silnie uzależnione od koncepcji prowadzenia w torze.

#### 2.1. Niskie zużycie

Reprofilacja i wymiana obręczy z powodu zużycia stanowią najdroższe pojedyncze operacje w utrzymaniu pojazdu. Oczywiście jest, że zasada prowadzenia ma na to znaczny wpływ. Temat ten zostanie szczegółowo umówiony w dalszej części.

#### 2.2. Wysoki poziom komfortu jazdy

Dla oceny komfortu jazdy kluczowe są wibracje w kierunku Z (oś pionowa pojazdu) na które wpływ mają kryteria projektowe magistralnych linii kolejowych. Jednak w przypadku tramwajów, co najmniej tak samo ważny jest komfort w kierunku Y (oś poprzeczna pojazdu) co wynika z częstotliwości zmiany krzywizny toru. Niezbędne jest aby tutaj wykazać, w jaki sposób i do jakiego stopnia jest to zależne od koncepcji prowadzenia.

### 3. Ocena wytycznych zestawów kołowych i IRW

#### 3.1. Czym jest prowadzenie?

Prowadzenie to określenie kierunku ruchu pojazdu przez tor. Wymaga to, aby wózki musiały być w stanie automatycznie uwolnić się z błędnego ustawienia. Ewentualne błędne ustawienie jest przesunięciem bocznym, przekoszeniem w torze lub kombinacją obu powyższych (Ryc. 1). Niezbędne dla wycentrowania siły kontaktowe koło-szyna, mogą być siłami geometrycznymi profilu lub siłami tarcia.

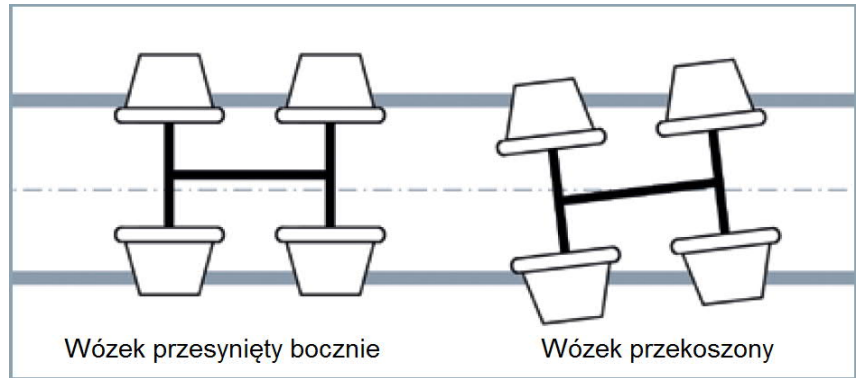
Siły tarcia dla obracającego się koła występują gdy występuje ruch względny – poślizg – pomiędzy kołem i szyną w miejscu kontaktu. Może to wystąpić w kierunku podłużnym, w przypadku koła napędzanego lub hamowanego (Ryc. 2, z prawej) lub w kierunku poprzecznym. Poślizg w kierunku poprzecznym występuje, gdy koło, jak pokazano na Ryc. 2, po lewej stronie, nie jest równoległe do szyny. Ogólnie ruch w punkcie kontaktowym nie jest całkowicie zgodny z kierunkiem toczenia, i w ten sposób składowa boczna powoduje poślizg. Siły wzdłużne i poprzeczne mogą być użyte do prowadzenia, ale są powiązane ze zużyciem, gdy poślizg i siła są skierowane w tym samym kierunku i w ten sposób wykonują pracę – pracę zużycia.

Siły geometryczne profilu są rozumiane jako siła normalna w punkcie kontaktu koła z szyną. Jeśli ta siła ma składową w kierunku poprzecznym (oznaczoną  $S_y$  na Ryc. 3), może ona być użyta do prowadzenia. Ponieważ główny kierunek ruchu koła podąża ze szyną w kierunku wzdłużnym do toru,  $S_y$  jest prostopadła do ruchu i w ten sposób nie wykonuje żadnej pracy. Stąd prowadzenie siłami geometrycznymi profilu jest praktycznie pozbawione zużycia.

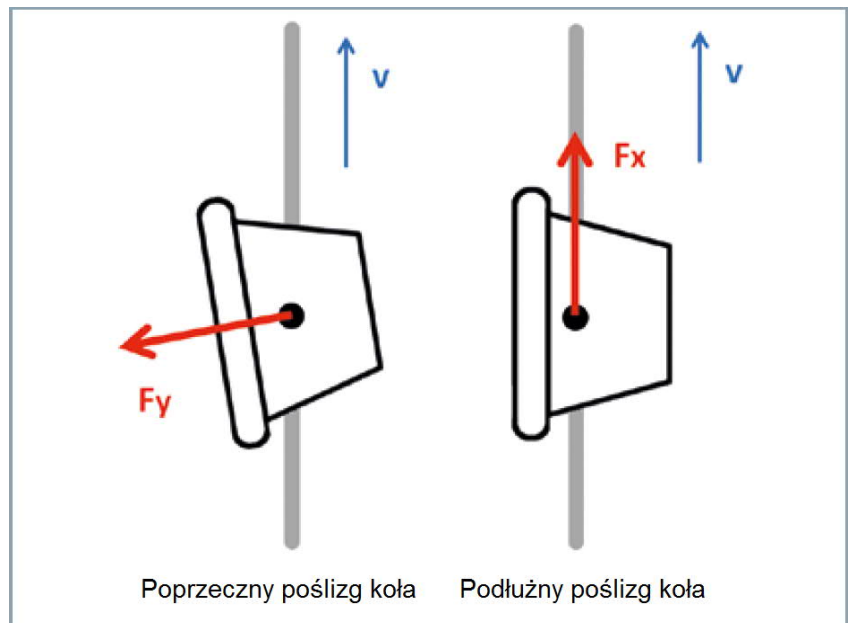
#### 3.2. Jazda po torze prostym

##### 3.2.1. Zestaw kołowy

Mechanizm prowadzenia zestawu kołowego na prostym torze jest ogólnie dobrze znany. Jeśli zestaw kołowy jest przesunięty w bok, promienie kół w punkcie kontaktu kół są różne. Ze względu na sztywne sprzęgnięcie prędkości obrotowych, jedno koło staje się kołem napędzającym, a drugie kołem hamowanym. To prowadzi do „ruchu sterującego”, który prowadzi zestaw kołowy z powrotem do środka toru. Ruch trwa dalej za oś toru, dopóki nie pojawi się taka sama sytuacja w lustrzanym odbiciu do pozycji wyjściowej – a proces zaczyna się od nowa (patrz Ryc. 4).



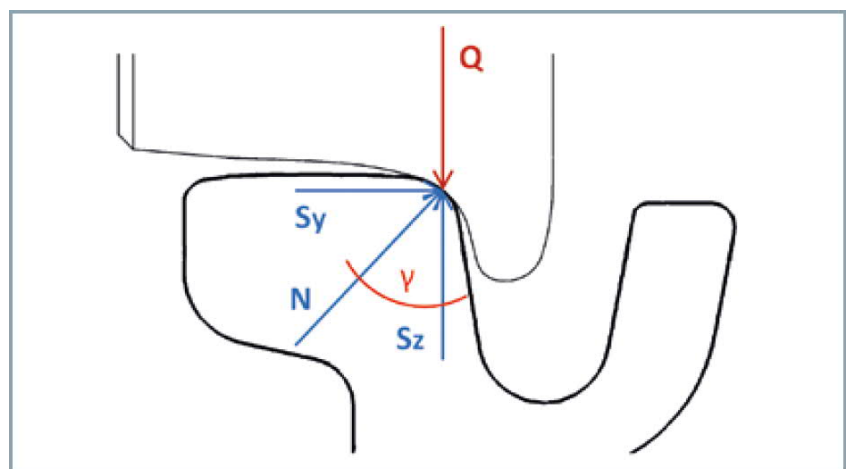
Ryc. 1: Możliwe błędy ustawienia układu biegowego w torze



Ryc. 2: Siły tarcia poprzeczne i podłużne do kierunku ruchu w punkcie kontaktu koło/szyna

$v$ : Prędkość jazdy

$F_x, F_y$ : Siły tarcia



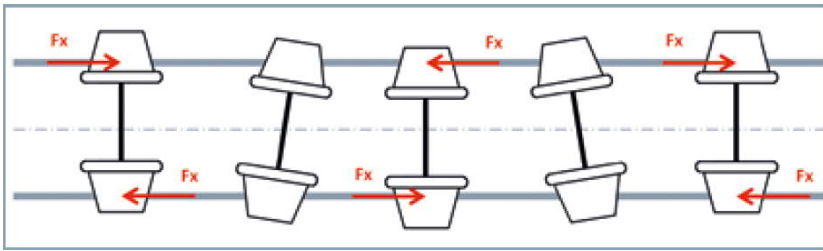
Ryc. 3: Rozkład sił geometrycznych w punkcie kontaktu koło/szyna

$Q$ : Siła ciężkości

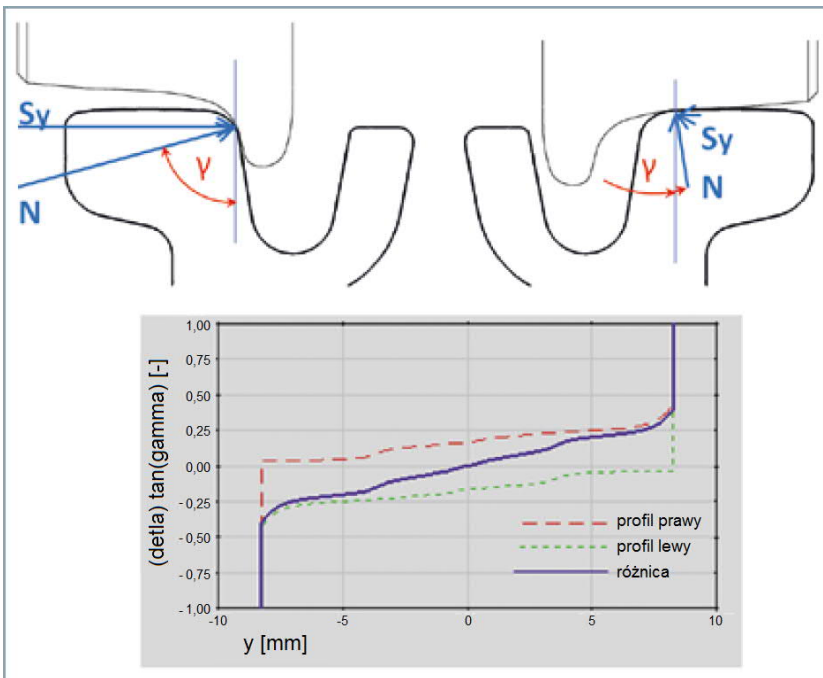
$N$ : Siła normalna do powierzchni kontaktu

$S_y, S_z$ : Siły geometryczne w kierunku  $y$  oraz  $z$

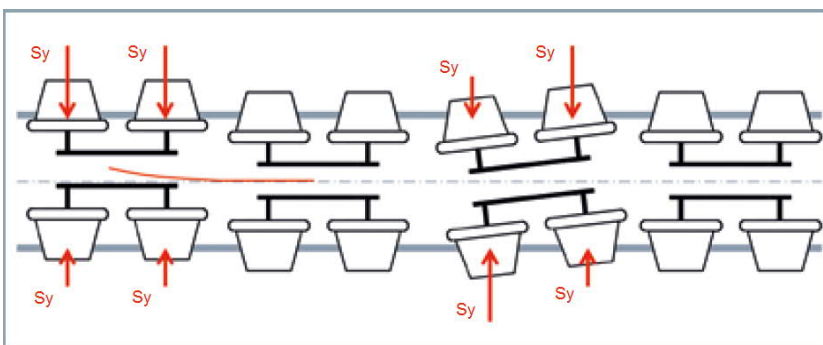
$\gamma$ : Nachylenie powierzchni kontaktu



Ryc. 4: Wężykowanie zestawu kołowego  
 $F_x$ : Siła tarcia podłużna



Ryc. 5: Równowaga sił przesuniętej bocznie pary kół IRW  
 $N$ : Siła normalna do powierzchni kontaktu  
 $S_y$ : Siła geometryczna w kierunku  $y$   
 $\gamma$ : Nachylenie powierzchni kontaktu  
 $\text{delta tan}(\gamma)$ : Współczynnik centrujący



Ryc. 6: Powrót IRW z przesunięcia bocznego lub przekoszenia za pomocą sił geometrycznych  
 $S_y$ : Siła geometryczna w kierunku  $y$

Ten powtarzany ruch nazywa się „ruchem sinusoidalnym” lub „wężykowaniem” [3] i został opisany po raz pierwszy przez Johanna Klingela w 1883.

Jest oczywiste, że ten mechanizm jest wystarczający skorygować nie tylko przesunięcia boczne, ale także przekoszenie zestawu w torze. To działa równie dobrze dla pojedynczego zestawu kołowego jak w przypadku dwóch zestawów kołowych połączonych w wózku.

„Wężykowanie” na prostych torach jest zasadniczo równomiernie rozłożonym ścieraniem powierzchni tocznej kół, przy czym „użyte są” wyłącznie wzdłużne siły tarcia, które przyczyniają się do zużycia. Ruch osi zestawu kołowego zostaje przeniesiony na cały pojazd, a tym samym wpływa na komfort jazdy. Ponadto stabilność oscylacji wężykowania zależy od prędkości jazdy. Każda konstrukcja posiada „prędkość krytyczną” powyżej której jazda staje się niestabilna i pojazd w sposób nieunikniony wykołuje się. Aby nie powstało zagrożenie w praktyce, można wpływać na tą prędkość różnymi parametrami konstrukcji. Jednak osiągnięcie efektu wymusza kompromisy w konstrukcji, co skutkuje pogorszeniem jakości jazdy i zwiększeniem zużycia kół/szyn.

### 3.2.2. Niezależnie obracające się koła

Prowadzenie IRW bazuje na całkowicie odmiennym sposobie działania, w którym geometria profilu koła odgrywa decydującą rolę. O ile profil stożkowy jest wystarczający dla wężykowania zestawu kołowego, w przypadku niezależnie obracających się kół geometria musi wykazywać wzrastający gradient od powierzchni tocznej do obrzeża koła. Ryc. 5 pokazuje, że przesunięcie bocznie pary kół skutkuje nierównomiernymi wartościami siły  $S_y$  na lewym i prawym kole, zatem powstaje efekt centruwania. Wielkość siły centrującej jest funkcją przesunięcia bocznego. Wykres przedstawia współczynnik centrujący „delta tan(gamma)”, który pomnożony przez średnie obciążenie kół, wytwarza siłę centrującą działającą na parę kół.

Przy użyciu IRW, siła centrująca jest odpowiedzialna nie tylko za powrót z przesunięcia bocznego, ale także z przekoszenia wózka (patrz rys. 6). Siły geometryczne profilu  $S_y$  działają poprzecznie do kierunku ruchu i dlatego praktycznie nie wywołują zużycia.

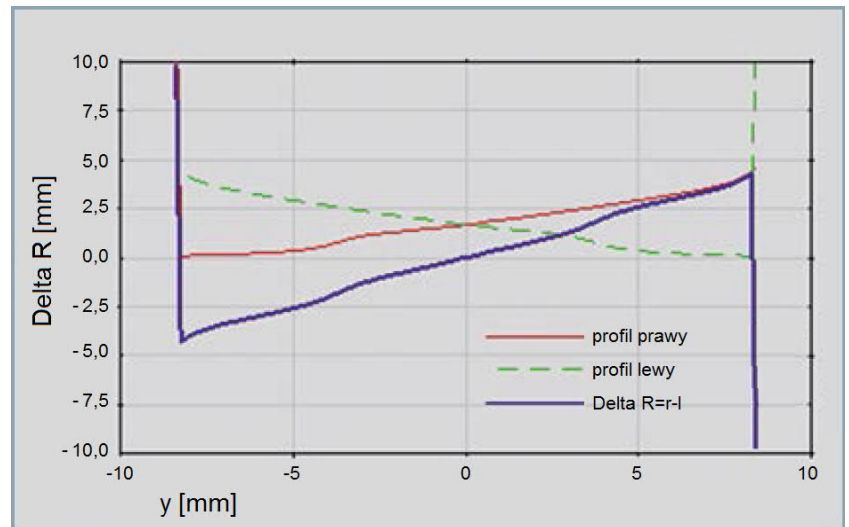
Całą geometria profilu niezbędna dla prowadzenia IRW oferuje dalsze zalety nad profilami stożkowymi. Już w przeszłości we wczesnych latach 70., został opracowany znormalizowany profil UIC-ORE S1002 [4] dla kolei magistralnych. Cel tego opracowania było otrzymanie profilu, który pozostanie bez zmian możliwie długo podczas eksploatacji, pomimo nieuniknionego zużycia. Chociaż nikt nie myślał o IRW podczas opracowywania profilu S1002, ten jest całkiem odpowiedni do osiągnięcia rozsądnego prowadzenia IRW.

Ze względu na brak sztywnej prędkości obrotowej, połączenie między IRW, nie występuje wężykowanie, więc i brak „prędkości krytycznej” lub negatywnego wpływu na komfort jazdy. Co ciekawe, prof. Dellmann i dr Abdelfattah wykazali w [1] i [2] że para niezależnie obracających się kół również wężykują podobnie do zestawu kół. Próby odnoszą się jednak do pojedynczej pary niezależnie obracających się kół bez wspartego na niej podła pojazdu. Przy dodaniu do modelu połączenia pomiędzy podwoziem i masą oraz bezwładność masy pudła pojazdu, efekt zanika – co również można zaobserwować w praktyce.

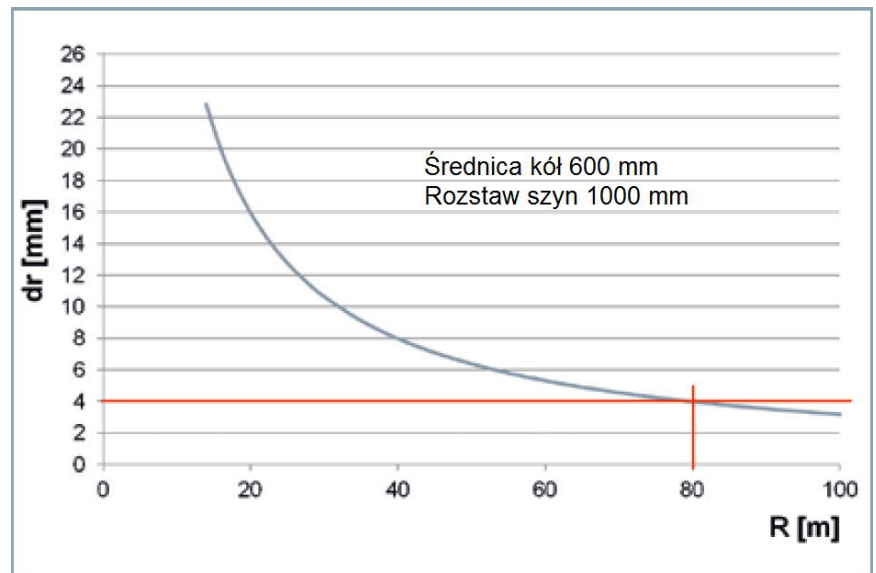
Należy pamiętać, że efekt centrowania wyłącznie siłami z geometrii profilu jest znacznie słabszy niż siłami wzdłużnymi dla zestawu kołowego. Zatem projektując układ jezdny, należy przywiązywać wielką wagę do dokładnej równoległości „osi” jak również kół. Jeśli to się powiedzie, to nie powstanie niepożądany jednostronny kontakt obrzeża koła IRW.

### 3.2.3. Porównanie

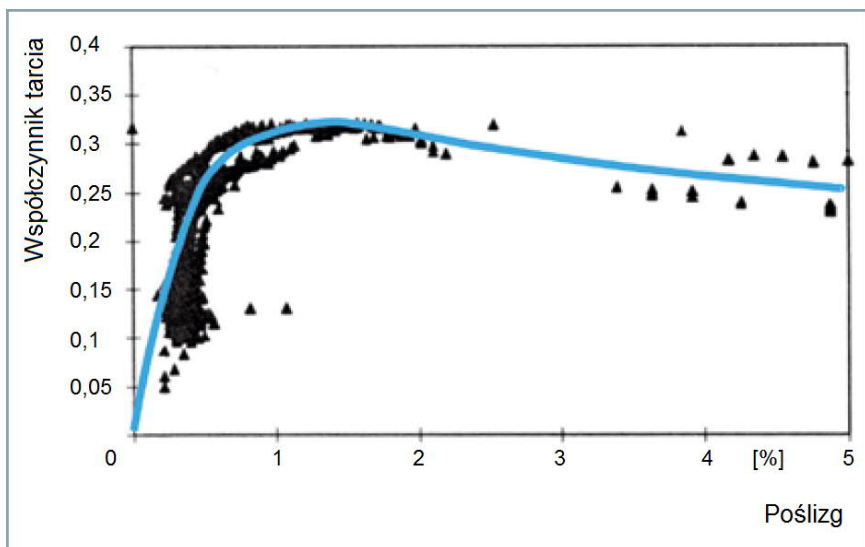
Zestawy kołowe reprezentują funkcjonującą koncepcję prowadzenia znaną od prawie 200 lat, która jednak na bazie wężykowania wprowadza niepożądane drgania do pojazdu. IRW nie podlegają temu zjawisku, dzięki czemu pozwalają na bardzo spokojny bieg z niskim zużyciem na prostych torach. Niski poziom zużycia zakłada jednak zachowanie szczególnej uwagi na równoległość osi i kół oraz odpowiedni profil koła w konstrukcji podwozia IRW.



Ryc. 7: Różne promienie dla lewego i prawego koła przy przesunięciu bocznym y: Przesunięcie boczne  
Delta D: Różnica promieni kół



Ryc. 8: Różnica kół niezbędna aby przejechać po łuku bez poślizgu wzdłużnego, w funkcji promienia łuku  
dr: Różnica promieni kół  
R: Promień łuku



Ryc. 9: Funkcja siły tarcia od poślizgu dla kierunku wzdłużnego według pomiarów wykonanych przez Deutsche Bahn (Źródło [5])

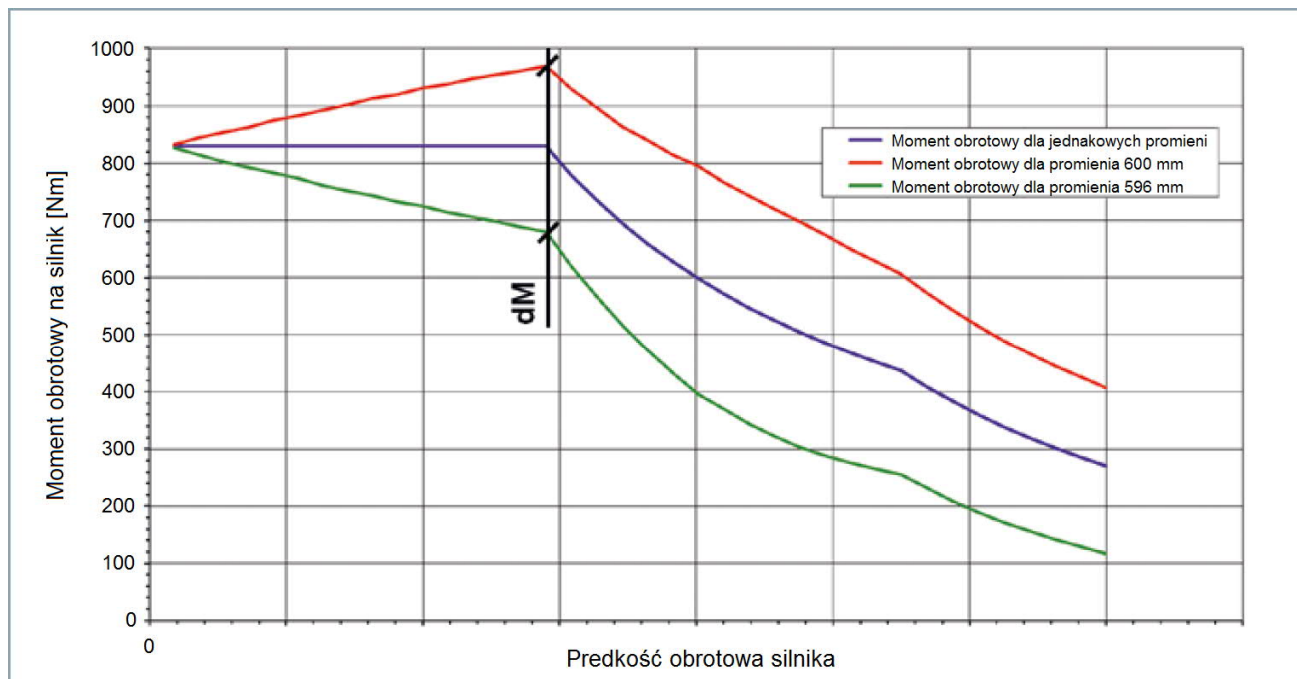
### 3.3. Jazda po łuku

#### 3.3.1. Zestaw kołowy

Pomimo sztywnego sprzężenia prędkości obrotowej pomiędzy kołami toczącymi po wewnątrz i zewnątrz krzywizny, zestawy kołowy może obracać się bez poślizgu na krzywych o dużych promieniach. Jest to możliwe ponieważ przesunięcie boczne w kierunku zewnętrznej szyny łuku skutkuje powstaniem różnicy promieni kół Delta R (patrz Ryc. 7), co oznacza, że prędkość obwodowa w punkcie styku dla zewnętrznego koła jest większa niż dla koła wewnętrznego.

To własność – automatyczne sterowanie w łukach – sprawia, że zestaw kołowy jest (prawie) bezdyskusyjnym elementem prowadzenia dla kolei magistralnych. Jednym z czynników, w jaki sieci tramwajowe się różnią od głównych linii kolejowych jest występowanie znacznie cieńszych łuków. Często używane są promienie rzędu 20 m, a nawet spotyka się promienie 15 m. Na tak ciasnych łukach nie działa już mechanizm nastawiania zestawu kołowego. Ryc. 8 ukazuje typowy system tramwajowy, w którym różnica w promieniu kół jest konieczna aby umożliwić toczenie się kół bez poślizgu podłużnego. Przyjmując rozsądne powiązanie koło/szyna maksymalna możliwa różnica wynosi 4 mm. Od tego miejsca następuje kontakt między obrzeżem koła a szyną. Te 4 mm pozwalają jednak tylko na bezpoślizgową jazdę po łuku o promieniu 80 m. Nawet „Popularna” krzywa o promieniu 25 m wymaga różnicy 14 mm. Jest oczywiste, że podłużne poślizgi są regułą, a nie wyjątkiem podczas przechodzenia zestawu kołowego przez łuki tramwajowe – nieuchronnie poślizg wzdłużny prowadzi do zużycia. Można to określić ilościowo za pomocą przykładu:

Przejazd po łuku o  $R = 30$  m przy warunkach ukazanych na Ryc. 8 geometrycznie wytwarzany jest poślizg wzdłużny o wartości 1%. Według Ryc. 9 na suchej szynie, powoduje to siłę tarcia ze współczynnikiem 0,3. Jeśli obciążenie koła wynosi 40 kN (obciążenie 2/3 wedle VDV), to siła tarcia równa 12 kN działa na każde koło!



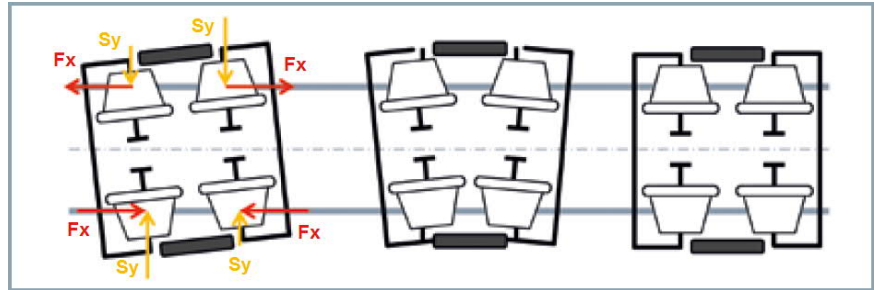
Ryc. 10: Charakterystyka prędkościowa silników Avenio sterowanych z jednego falownika trakcyjnego z lub bez różnicy promieni kół w punktach kontaktu  
dM: Różnica momentu między prawym i lewym silnikiem

### 3.3.2. Niezależnie obracające się koła

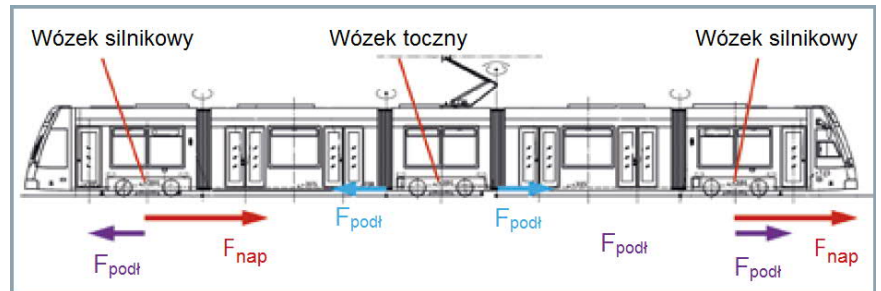
Mechanizm, który pozwala automatycznie prowadzić IRW na krzywych jest taki sam, jak przy powrocie z niewspółosiowości na torze prostym (patrz Ryc. 6). Wszak czy układ biegowy jest niewspółosiowy do toru, czy tory „obróciły się” pod nim (wchodząc w łuk), to nie ma znaczenia. IRW nie mają sztywnego mechanicznego sprzężenia prędkości obrotowej i w związku z tym w zasadzie nie występuje poślizg podłużny w ciasnych łukach – pod warunkiem, że nie są połączone „wałem elektrycznym”. Prawo i lewe koła IRW są często kontrolowane przez ten sam falownik trakcyjny i dlatego otrzymują identyczną prędkość obrotową faz stojana. Jeśli prędkość obrotowa koła jest sztywno połączona z sekwencją faz, otrzymalibyśmy takie same warunki jak w sprzężeniu mechanicznym. W zazwyczaj używanych maszynach asynchronicznych, takie sztywne połączenie nie istnieje, ale zamiast tego działa jak tłumik drgań skrętnych między lewym i prawym kołem. Należałoby teraz określić ilościowo działanie takiego „tłumika drgań skrętnych”.

Rozważone będą następujące IRW firmy Siemens sprzęgnięte napędem wzdłużnym. Wzdłużnie sprzęgnięte IRW zostały opracowane dla pojazdów platformy Combino i zastosowane praktycznie bez zmian w platformie Avenio M (Ulm, Niemcy). Układ biegowy platformy Avenio (Monachium, Haga, Katar) również wykorzystał ten wypróbowany system, gdzie połączenie pomiędzy układem biegowym i pudłem zostało zaadaptowane do odmiennych wymagań pojazdu jedno przegubowego względem wymagań pojazdu wieloprzegubowego. Dla uproszczenia, układ biegowy wszystkich trzech rodzin pojazdów są określone poniżej jako „Układ biegowy Avenio”. Jeśli konkretny typ pojazdu jest istotny dla rozważań, to jest to wskazane w tekście.

Tramwaj pokonuje łuk o  $R = 30$  m z przyspieszeniem poprzecznym określonym w wytycznych BOStrab jako  $a_q = 0,65$  m/s<sup>2</sup>, a więc z prędkością 16 km/h. Jak pokazano na Ryc. 8, dla przejazdu z tymi samymi prędkościami obrotowymi koła lewego i prawego, konieczna jest różnica promienia  $dr_{niezb} = 10$  mm. Ze względu na współpracę koło/szyna maksymalna różnica promienia może wynieść  $dr_{możl} = 4$  mm. W związku z tym brakuje sześciu milimetrów ( $dr_{brak} = 6$  mm), co prowadzi do powstania momentu obrotowego pomiędzy kołami. Ryc. 10 pokazuje wielkość tego momentu obrotowego dla różnicy promieni 2 mm przy maksymalnym momencie obrotowym silnika.

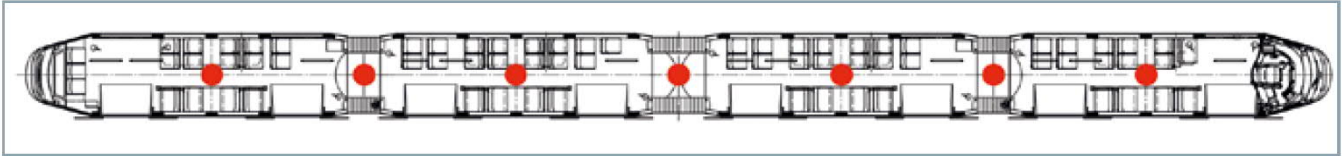


Ryc. 11: Zasada działania napędu wzdłużnego gdy wózek jest przekoszony w torze  
 $S_y$ : Siła geometryczna w kierunku y  
 $F_x$ : Podłużne siły geometryczne

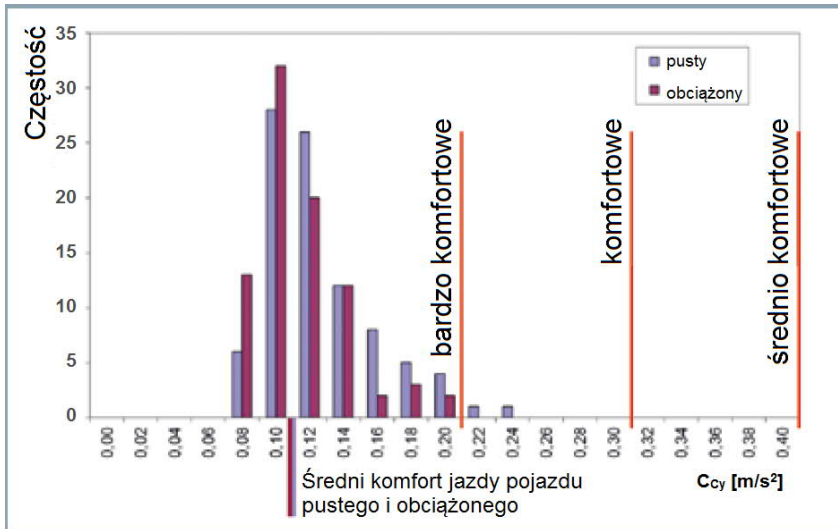


Ryc. 12: Zasada „rozciągania pojazdu” dla wspierania centrowania wózka tocznego na przykładzie pojazdu Avenio M  
 $F_{nap}$ : Średnia siła napędowa wózka silnikowego  
 $F_{podt}$ : Celowo wywołana siła rozciągająca

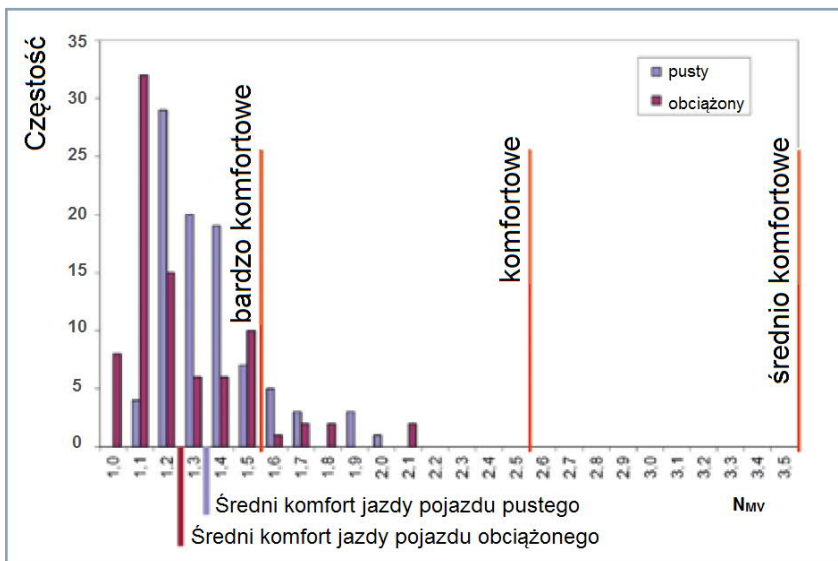
Biorąc pod uwagę przełożenie przekładni, średnicę kół i fakt, że dwa koła są napędzane przez jeden silnik (napęd wzdłużny Avenio), to daje siłę wzdłużną w miejscu styku koło/szyna  $F_{x,max,2} = 1,8$  kN na koło. W naszym przykładzie efektywna różnica promienia wynosi 6 mm, tak, że wartość 2 mm jest ekstrapolowana do trzykrotności wartości przyjmując uproszczenie liniowe. Przy maksymalnym momencie obrotowym silnika to wytworzyłoby siłę wzdłużną  $F_{x,max,6} = 5,4$  kN na koło. Jednak dla przejazdu po poziomym łuku  $R = 30$  m, nie potrzeba maksymalnego momentu obrotowego silnika, ale tylko około 20%. Większość oporu ruchu pochodzi od oporu łuku. Wynika to głównie z poślizgów bocznych kół ze względu na nabieganie układu biegowego w ciasnych łukach. To jest zjawisko, które dotyczy wszystkich układów biegowych w których koła nie mogą się ustawić idealnie promieniowo w łuku – bez względu czy są to zestawy kołowe czy IRW. Uwzględniając 20% momentu maksymalnego, siła wzdłużna jest zredukowana – ponownie interpolowana z uproszczeniem liniowym – podobnie do jednej piątej, a więc do  $F_x = 1,1$  kN. Ogólnie jazda przez poślizgu wzdłużnego przez ciasne łuki nie jest możliwa, nawet dla napędzanych lub hamowanych IRW.



Ryc. 13: Punkty pomiarowe (czerwone kropki) dla wyznaczenia komfortu jazdy w tramwaju Avenio Monachium



Ryc. 14: Rozkład częstości charakterystyki  $C_{cy}$  komfortu jazdy zmierzonego dla Avenio Monachium zgodnie z EN 12299



Ryc. 15: Rozkład częstości charakterystyki  $N_{mv}$  komfortu jazdy zmierzonego dla Avenio Monachium zgodnie z EN 12299

### 3.3.3. Porównanie

Zasada zestawu kołowego zawodzi w przypadku ciasnych łuków typowych dla sieci tramwajowych. Ewentualna różnica promienia koła jest niewystarczająca na dalszą drogę, aby zapobiec przejazdowi kół bez poślizgu wzdłużnego. Nawet biorąc pod uwagę „wał elektryczny”, w przypadku IRW następuje znaczna redukcja poślizgu podłużnego. Na łuku o promieniu  $R = 30$  m siła poślizgu wzdłużnego dla zestawu kół wynosi 12 kN, a zatem 10 krotnie większa niż 1,1 kN dla IRW!

## 4. Sposoby centrowania układu biegowego

IRW wykazują mniejszy efekt centrowania niż zestawy kołowe. Nie chcąc tracić powyżej wspomnianych zalet związanych z mniejszym zużyciem, należy uwzględnić ten fakt przy projektowaniu pojazdu i układu biegowego. Poniżej opisano trzy różne środki, które są zastosowane w pojazdach tramwajowych firmy Siemens.

### 4.1. Pominięcie tłumików w przegubach

W pojazdach tramwajowych często spotykane są tłumiki przegubu, które służą do osłabienia odchylen między poszczególnymi członami. Jednak takie tłumiki spowalniają ustawienie stycznych członów po wjeździe lub wyjeździe z łuku, a więc także – zwłaszcza w przypadku pojazdów wieloprzegubowych – stycznne ustawienie układu biegowego. Nieunikniony element suchego tarcia w tłumiku może nawet spowodować trwałą nieprawidłową orientację, a więc jednostronny kontakt obrzeża z szyną. Stąd, szczególnie w przypadku pojazdów z IRW, należy unikać tłumików przegubów. The brak „wężykowania” układu biegowego – zakładając, poprawne dostrojenie połączenia układu biegowego – czyni to możliwym w łatwy sposób. Tramwaje Siemens nie wykazują tendencji do drgań pomiędzy członami nawet bez tłumików przegubów.



Operator	Typ pojazdu	Liczba pojazdów	JK/DK	Rozstaw szyn [mm]	Przebieg obręczy [km]	Okres między reprofiliacją [km]
Bernmobil	Combino	36	JK	1000	WS: 280 000 WT: 260 000	WS: 40 000 WT: 40 000
MPK Poznań	Combino	14	JK	1435	WS: 217 135 WT: 209 630	WS: 25 500 WT: 38 500
VAG Freiburg	Combino	18	DK	1000	WS: 450 000 WT: 450 000	WS: 60 000 WT: 60 000
Rheinbahn Düsseldorf	NFU NF8 NF10	127	JK/DK	1435	WS: 260 000 WT: 260 000	WS: 35 000 WT: 35 000
GVB Amsterdam	Combino	155	JK/DK	1435	WS: 225 000 WT: 250 000	WS: 32 000 WT: 32 000
AVG Augsburg	Combino	41	JK	1000	WS: 207 500 WT: 207 500	WS: 45 000 WT: 45 000

Tabela 1: Przebieg eksploatacyjny obręczy wózków Combino u różnych operatorów

JK – Jednokierunkowy      WS – Wózek silnikowy

DK – dwukierunkowy      WT – Wózek toczny

#### 4.2. Napęd wzdłużny

Jedną konkretną funkcją wspiera centrowanie wózków silnikowych w tramwajach Siemens: napęd wzdłużny. Z napędem wzdłużnym, oba koła po jednej stronie wózka są napędzane tylko jednym silnikiem, a zatem – pomijając elastyczność sprzęgła – posiadają jednakową prędkość obrotową. Ryc. 11 pokazuje wpływ tego na prowadzenie. Jeśli ten wózek jest przekoszony względem osi toru, koła po jednej stronie jadą z różnymi średnicami toczenia. Ponieważ prędkości obrotowe są sprzęgnięte, to jedno koło staje się kołem napędowym, a drugie hamulcowym. Ryc. 11 pokazuje, jak skutkuje to zmianą wzajemnej orientacji osi, w zakresie podatności podłużnej pierwszego stopnia zawieszenia. Takie wzajemne ustawienie („skręcenie osi”) powoduje że wózek wraca do pozycji stycznej. Stanowi to wsparcie dla centrującego działania sił od profilu geometrycznego. W ten sposób napęd wzdłużny reprezentuje skuteczny element w prowadzeniu IRW.

#### 4.3. Rozciąganie pojazdu

Opisany efekt napędu wzdłużnego nie występuje oczywiście w wózkach tocznych. „Sztuczne” sprzęgnięcie prędkości obrotowej nie jest uzasadnione ani ekonomicznie, ani konieczne. Efekt centrujący można osiągnąć również, po prostu przez rozszerzenie sterowania napędu: „oprogramowaniem rozciągającym”. Polega to na delikatnie większym momencie obrotowym wózka przedniego niż wózka tylnego (patrz Ryc. 12). Równowaga sił skutkuje powstaniem siły  $F_{podt}$ , która rozciąga pojazd i tym samym ustawia wózek toczny stycznie. Optymalny stosunek siły rozciągającej do siły napędowej wynika z kompromisu pomiędzy zwiększonym poślizgiem wózków silnikowych i zredukowanego poślizgu bocznego z powodu poprawionego ustawienia wózka tocznego. Ta zasada jest używana tylko przy rozpędzaniu, ale także podczas hamowania, lecz dokładnie odwrotnie.

## 5. Doświadczenia praktyczne

Powyższe rozważania teoretyczne malują obraz, który przedstawia IRW jako „lepsze” pod każdym względem dla systemów tramwajowych, nie tylko pod względem komfortu jazdy (komfort wibracji), ale także pod względem redukcji zużycia kół. Rozważanie teoretyczne, są w rzeczywistości zredukowane do (szczęśliwie poprawnie zidentyfikowanych) czynników o dominującym wpływie. W praktyce są pokryte niezliczonymi innymi czynnikami, których wpływ jest często trudny do oszacowania. Dlatego zawsze konieczne jest sprowadzenie wyników rozważań teoretycznych do rzeczywistości.

Poniższe rozdziały podkreślają osiągnięte w praktyce wartości dla komfortu jazdy oraz zużycia kół dla Avenio i Combino. Obie serie pojazdów są wyposażone w identyczne układy jezdne pod względem zasady prowadzenia pojazdu. Oba posiadają niezależnie obracające się koła oraz napęd wzdłużny.

### 5.1. Komfort jazdy

Pojazdy Avenio znajdują się w ruchu pasażerskim w Monachium od września 2014 r. Podczas wprowadzania do eksploatacji, zostały przeprowadzone wyczerpujące próby w celu ustalenia poziomu komfortu jazdy. Na 13 odcinkach toru monachijskiej sieci, określonych wspólnie z jednostką dopuszczającą, wykonano łącznie 13 jazd próbnych dla pustego pojazdu i 12 jazd dla pojazdu w pełni obciążonego. Pojazd został wyposażony w akcelerometrię umieszczone w siedmiu miejscach (patrz Ryc. 13), pozwalając zebrać 175 wyników ( $13 \cdot 7 + 12 \cdot 7 = 175$ ). Wyniki te zostały przeanalizowane zgodnie z EN 12299 [6] i dla każdego przypadku został wyznaczony poziom komfortu ciągłego  $C_{Cy}$  i poziom komfortu średniego  $N_{MV}$ .  $C_{Cy}$  reprezentuje wyłącznie komfort drgań w kierunku poprzecznym a  $N_{MV}$  zbiera wartości komfortu dla wszystkich trzech kierunków przestrzennych.  $C_{Cy}$  ma szczególne znaczenie w ocenie koncepcji prowadzenia, ponieważ reprezentuje głównie wpływ ruchów poprzecznych pojazdu. PN-EN 12299 charakteryzuje wskaźniki  $C_{Cy}$  i  $N_{MV}$  ocenami „bardzo komfortowe”, „komfortowe”, „średnio komfortowe”, „lekkie niekomfortowe” i „niekomfortowe”. Częstotliwości wartości określone dla Avenio Monachium są pokazane na histogramach (Ryc. 14 i 15).

Wartość  $C_{Cy}$  określona dla wszystkich pomiarów jest mniejsza niż  $0,12 \text{ m/s}^2$  – dobrze poniżej granicy „bardzo komfortowe”, określonej jako  $0,2 \text{ m/s}^2$ . Rozkład zmierzonych wartości jest zadziwiająco wąski. Tylko dwa z 175 pomiarów znajduje się powyżej górnej granicy. Wyznaczone  $N_{MV}$ , również znajduje się wyraźnie w granicach „bardzo komfortowe”. Ponieważ w kluczowej charakterystyce zawierają się również drgania pionowe, wyniki odzwierciedlają znany efekt, że pojazd w pełni obciążony oferuje lepszy komfort drgań pionowych niż pojazd pusty.

Oznaczenie jakości jazdy dla Avenio Monachium, jako „bardzo komfortowe” zgodnie z definicją EN 12299 zostało imponująco potwierdzone przez pomiary. Koncepcja układu biegowego z „niezależnie obracającymi się koła z napędem wzdłużnym” nie jest jedynym parametrem wpływającym na komfort drgań, ale na pewno przyczynia się do tego.

### 5.2. Zużycie kół

Osiągalny okres eksploatacji kół dla floty pojazdów jest dobrym wskaźnikiem charakteru zużycia układu biegowego. Ponieważ znaczny wpływ ma rotowanie pojazdu po różnych liniach sieci czy przyjęta przez operatora strategia utrzymania, to znacząca może być jedynie statystyka opierająca się na największej możliwej liczbie sieci. Dla takiej statystyki (patrz Tabela 1) rozważane są pojazdy rodziny Combino, ponieważ są one eksploatowane na wystarczającej liczbie sieci. Podane liczby nie zostały skompilowane przez firmę Siemens, ale zostały przesłane przez operatorów. Pojazdy typu NF8U, NF8 i NF10 używają niezmodyfikowanych wózków Combino w modułach wózkowych; moduły końcowe są wyposażone w wózki o małych kołach.

Z zebranych danych wyraźnie widać że IRW ułatwiają długą żywotność koła. Bezpośrednie porównanie z konwencjonalnymi pojazdami z zestawami kołowymi pozostawia się czytelnikowi. Ponieważ Siemens AG nie obsługuje żadnego niskopodłogowego tramwaju z konwencjonalnymi zestawami kołowymi, toteż nie zbiera takich informacji. Osoby obeznane z eksploatacją innych pojazdy będą jednak mogły zauważyć, że wartości dla układu biegowego Siemens są doskonałe.

## 6. Podsumowanie

Artykuł otwarty pytaniem:

„[Zestaw kołowy] oś lub brak [zestawu kołowego] osi?”. Nawet późniejsze obserwacje nie mogą dostarczyć ostatecznej odpowiedzi. Ale można pokazać następujące:

- Teoretycznie zarówno zestawy kołowe jak i IRW wykazują mocne i słabe strony w zależności od ograniczeń poszczególnych sieci tramwajowych.
- Istnieją rozwiązania strukturalne i konstrukcyjne, aby rekompensować słabości zarówno IRW jak i zestawów kołowych.
- Praktyka pokazuje, że pojazdy Siemens z IRW oferują poziomy komfort jazdy i zachowanie zużywające się, które wyznacza standardy.

Podsumowując, można powiedzieć, że dla jakości projektowanego układu jednego decydującym czynnikiem nie jest koncepcja prowadzenia pojazdu, ale decyzja o zastosowaniu wózków z osiami lub bez.

## Przypisy:

- [1] Dellmann, T.; Abdelfattah, B.: Vergleich der dynamischen Eigenschaften von Radsatz und Losradpaar – Ein theoretischer Beitrag zu einer fast vergessenen Technik. (Porównanie właściwości dynamicznych zestawu kołowego i niezależnie obracających się kół – teoretyczny wkład w prawie zapomnianą technikę) ZEVrail 136 (2012) 10, str. str. 380-390
- [2] Dellmann, T.; Losradfahrwerke – eine Parameterstudie für das Losradpaar. (Wózki z niezależnie obracającymi się kołami – badanie parametrów dla pary niezależnie obracających się kół) ZEVrail 139 (2015) 5, str. str. 183-195
- [3] Knothe, K.; Stiche, S.: Schienenfahrzeugdynamik (VDI-Buch) (Dynamika pojazdów kolejowych (Książka VDI)), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003
- [4] PN-EN 13715: Kolejnictwo – Zestawy kołowe i wózki – Koła – Zewnętrzne zarysy wieńców kół PKN, Warszawa 2011
- [5] Miluczky, A.: Die Gesetzmäßigkeiten des Fahrwerklaufs erprobter Multigelenkniederflurstadtbahnwagen (Zasady eksploatacji podwozi wypróbowanych wieloprzegubowych niskopodłogowych tramwajów), Rozprawa doktorska, RWTH Aachen, Akwizgran 2008
- [6] PN-EN 12299: Kolejnictwo – Komfort jazdy pasażerów – Pomiary i ocena PKN, Warszawa 2009



Mgr inż. Arnd Meyer, (47)

Studiował inżynierię mechaniczną specjalizując się w transporcie kolejowym pojazdy w RWTH Akwizgran Uniwersytet do 1996 r. Następnie członek personelu naukowego w Instytucie Pojazdów Szynowych i Technologii Transportowych Uniwersytetu RWTH w Akwizgranie, specjalizujący się w dynamice pojazdów oraz elektronicznym wspomaganie prowadzenia. Od 2004 r. Zatrudniony w Siemens AG, Railway Technology, najpierw w dziedzinie dynamiki pojazdów i od 2013 roku w zakresie technicznego zarządzania projektami dla systemy tramwajowe.

Adres:

Siemens AG, MO UT EN LR TE  
Nägelsbachstr. 33

91052 Erlangen, Niemcy

E-mail: arnd.meyer@siemens.com

Opublikowane przez  
Siemens AG 2016

Siemens AG  
Mobility Division  
Otto-Hahn-Ring 6  
81739 Monachium  
Niemcy

[contact.mobility@siemens.com](mailto:contact.mobility@siemens.com)

Artykuł Nr MOUT-T10029-00-7600

Dispo 21720 SIMC-0000-47758

TH 325-160669 T 08160.5

Wersja polska:

Inż. Jacek Fink-Finowicki

Siemens Mobility Sp. z o.o.

Ul. Żupnicza 11, 03-821 Warszawa

Kontakt: [mobility.pl@siemens.com](mailto:mobility.pl@siemens.com)

Może zawierać zmiany lub błędy.

Informacje podane w tym dokumencie zawierają wyłącznie ogólne opisy i/lub charakterystyki, które nie zawsze odnoszą się konkretnie do opisanych produktów lub które mogą ulec modyfikacji w trakcie dalszego rozwoju produktów. Wymagane cechy obowiązują tylko wtedy, gdy są wyraźnie uzgodnione w zawartej umowie.

Avenio® jest zarejestrowanym znakiem towarowym Siemens AG. Nieautoryzowane użycie jest zabronione. Wszystkie inne oznaczenia w tym dokumencie mogą reprezentować znaki towarowe, których wykorzystanie przez osoby trzecie do własnych celów może naruszać prawa własności właściciela.