

## Techniczne atrybuty oryginalnego systemu podwieszanej pasażerskiej kolejki estakadowej

W artykule zaprezentowano opatentowany system techniczny podwieszanej kolejki estakadowej, wyposażonej w wagoniki z indywidualnym napędem i sterowaniem, ze szczególnym uwzględnieniem układu biegowego. Mechaniczny układ zawieszenia wagonika wyposażonego w oryginalny układ biegowy umożliwia wybór trasy (z pokładu wagonika) i sterowanie (marszruty) jego ruchu w obrębie określonej sieci torów. Sieć torów transportowych (trajektorii) kolejki nie ma ruchomych (przestawnych) zwrotnic i jest pozbawiona jakichkolwiek części ruchomych.

Temat został zrealizowany w ramach grantu rektorskiego nr 503 S/1160/4620 z czerwca 2006 r Politechniki Warszawskiej.

### 1. Stan techniki znanych kolei estakadowych

Systemy transportu estakadowego z wagonikami lub uchwytami ładunkowymi, (poruszającymi się nad/pod estakadą) są dość powszechnie znane i rozpowszechnione w wielu zastosowaniach. Wagoniki podwieszane poruszają się pod wspornikami torowymi, lecz nad poziomem terenu. Liczne odmiany podwieszanych kolejek linowych, wagonikowych oraz zaczepowych, stosowane są w górskich wyciągach narciarskich, w halach przemysłowego montażu produktów masowych, w magazynach i w górnictwie.

Podwieszane systemy jednotorowe pracują **dwukierunkowo** w transportowych układach trasy zdeteterminowanej kształtami linii, lub sieci rozgałęzionej. Trasy w kształcie pętli toru sztywnego przeznaczone są do transportu **jednokierunkowego**. Takie trasy spotyka się w halach montażowych i w parkach rozrywki.

Systemy kolejek estakadowych podwieszanych pod sztywnymi belkami sieci rozgałęzionej są szczególnie rozpowszechnione w górnictwie. Górnicze koleje estakadowe, pracujące w rozgałęzionej sieci torowej podziemnych chodników transportowych wyróżniają się występowaniem **rozjazdów torowych**, dzięki którym wagoniki mogą być kierowane do określonego szybu lub chodnika.

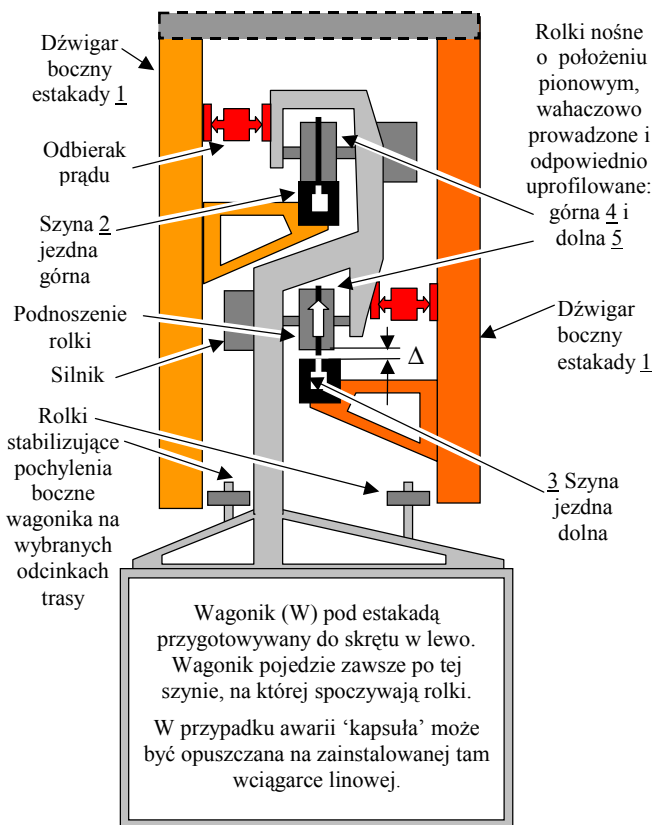
Wszystkie rozgałęzione sieci estakadowych torów naziemnych oraz podziemnych, dla umożliwienia rozrządzenia trasy ruchu pojazdów według założonej marszruty, w obrębie rozjazdów zawierają **ruchome, przelączane zwrotnice**. Zwrotnice rozjazdów wszystkich znanych sieci kolejowych, naziemnych, podziemnych i estakadowych, są przestawnymi, ruchomymi i sterowanymi częściami infrastruktury torowej.

### 2. Oryginalny atrybut systemu

Oryginalnym atrybutem prezentowanego rozwiązania jest **eliminacja ruchomych części torowej**

infrastruktury, przestawnych rozjazdów, przy równoczesnym umożliwieniu zautomatyzowanego sterowania, z pokładu wagonika, marszruty w obszarze określonej sieci układu torowego (według wybranego przez pasażera punktu docelowego).

Realizacja atrybutu stała się możliwa dzięki zastosowaniu toru estakadowego w postaci dwóch szyn, ułożonych jedna nad drugą, w układzie pionowym. Układ szyn wraz z podwieszonym wagonikiem pokazano na rysunku 1.



Rys.1. Wagonik podwieszony pod estakadą

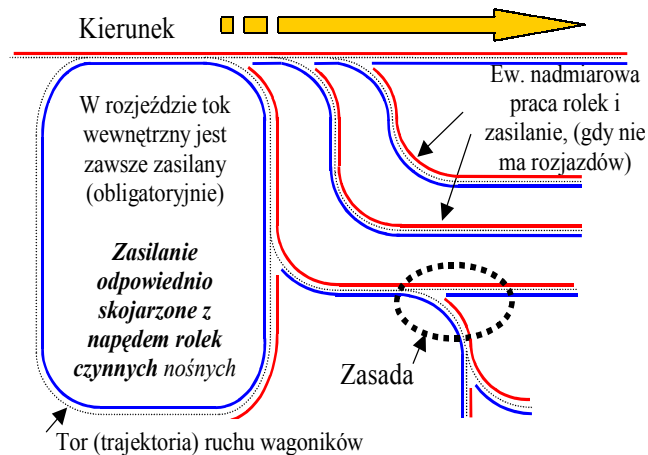
Rys. 1 przedstawia widok wagonika pod estakadą belkową. Estakada 1 zawiera dwie 'nitki' (trajektorie) toru: górną 2, skojarzoną z zaprojektowanym kierunkiem ruchu „w lewo” lub „w prawo”, oraz dolną 3, odpowiednio skojarzoną z drugim zaprojektowanym kierunkiem ruchu „w prawo” lub „w lewo”. Na rys. 1 przykładowo pokazano skojarzenie 'nitka' górna w lewo - dolna w prawo.

Uprofilowane rolki nośne wagonika, górne 4 i dolne 5, współpracujące z odpowiednio uprofilowanymi szynami 2 i 3, są zarazem rolkami trakcyjnymi: napędnymi i hamującymi.

Podczas ruchu wagonika w obrębie toru prostego, a także w torowym łuku bez rozjazdów, pracują trakcyjne rolki nośne górne 4 lub dolne 5, albo nawet równocześnie zarówno rolki dolne 5, jak i górne 4.

### 3. Wybór marszruty wagonika

Docelowy punkt podróży (transportu) w obrębie znanej sieci torów (trajektorii transportowych) jest wybierany przez pasażera przyciskiem na pokładzie wagonika. Wybór trasy (marszruty) przejazdu wagonika w obrębie znanej sieci torowej jest dokonywany i sterowany automatycznie przez odpowiednio oprogramowany system komputerowy wagonika wyposażonego w układ napędowy. Sterowanie polega na unoszeniu odpowiednich rolek biegowych, dolnych lub górnych. Na rys.2 pokazano układ stałych rozjazdów.

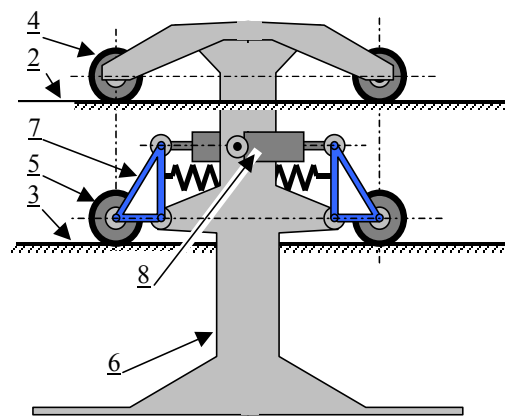


Rys.2. Ilustracja układu stałych rozjazdów i zasady skojarzenia szyn biegowych z szynami zasilającymi wagonik w energię elektryczną

Nie istnieją żadne formalne ograniczenia odnośnie do rozbudowy estakadowej sieci torowej w układzie kratownicy lub pajęczyny.

### 4. Mechaniczny układ wykonawczy wyboru trasy

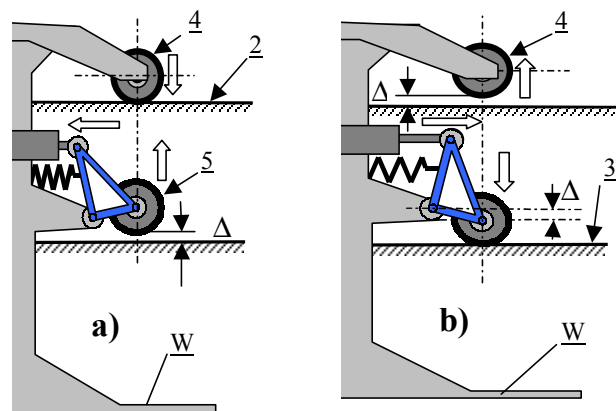
Przykładowy schemat wykonawczego układu mechanicznego unoszenia rolek trakcyjnych wagonika, dolnych 5 lub górnych 4, przedstawiono na rys. 3.



Rys.3. Schemat wykonawczego układu mechanicznego unoszenia rolek trakcyjnych wagonika

Do ramy nośnej 6 wagonika są obrotowo przyłączone wahacze 7, obracane za pomocą siłowników 8. Przed rozjazdem w lewo zostaną uniesione rolki 5, zaś przed rozjazdem w prawo, - rolki 4. Sterowanie siłowników dwustanowe: a) olej wtłoczony pod ciśnieniem - uniesione rolki górne, b) gdy olej z siłownika swobodnie wypłynie, pozostają uniesione rolki dolne.

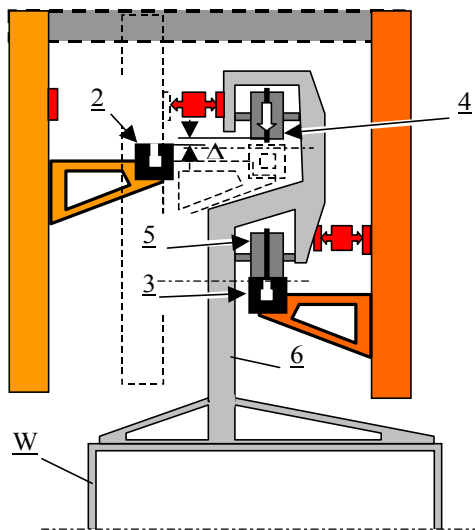
Zasadę unoszenia rolek dolnych przy skręcie w lewo i górnych przy skręcie w prawo, przedstawiono na rysunku 4.



Rys.4. Zasada unoszenia rolek a) dolnych i b) górnych

Wagonik podwieszonyj kolejki estakadowej najkorzystniej biegnie tylko po jednej szynie jezdnej 2 lub 3. Zmiana szyny biegowej według wybranej marszruty w sieci torowej odbywa się tylko przed rozjazdem na odcinku trasy wyposażonym w dwie szyny, jak pokazano na rys. 2. Dostatecznie długi odcinek dwuszynowy toru powinien znajdować się przed każdym rozjazdem oraz w obrębie samego rozjazdu. Na rys. 4a przedstawiono wagonik pod estakadą w obrębie wejścia w rozjazd na wybranym kierunku „w lewo”. Przed wejściem w rozjazd, trakcyjne rolki nośne 5 wagonika, które w torze pozbawionym rozjazdów współpracowały z nitką

toru prostego, zostały uniesione, zaś cała masa spoczęła w torze na rolkach 4 biegnących po nitce 2 toru biegnącej „w lewo”. W ten sposób wagonik pobiegnie wzdłuż nitki toru „w lewo”. Podobnie na rys. 4b zilustrowano wejście wagonika w rozjazd na wybranym kierunku „w prawo”. Rolki górne są unoszone wraz z całym wagonikiem W. Pasażerowie nie odczuwają powolnego ruchu unoszenia wagonika. Zasadę wyboru toru w obrębie rozjazdu pokazano na rys.5.



Rys.5. Zasada wyboru toru z pokładu wagonika w obrębie rozjazdu

## 5. Ogólne założenia budowy systemu

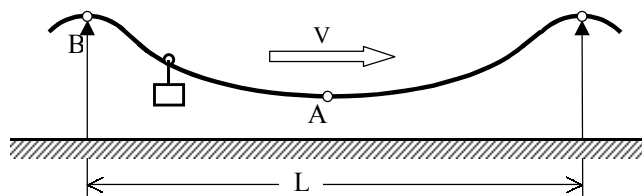
- System torowy estakadowy, z wagonikami podwieszonymi
- Sieć estakadowa w ogólnie pojmowanym układzie 'pajęczyny'
- Infrastruktura całkowicie bierna; rozjazdy estakadowe bez jakichkolwiek części ruchomych
- Programowanie trasy przejazdu z wnętrza wagonika przez podanie jedynie punktu docelowego na 'pajęczynie'
- Wagoniki napędzane elektrycznie, ok. 4-osobowe, z systemem głosowego powiadamiania podróżnych
- Wszystkie przetworniki mocy, układy sterowania napędu trakcyjnego oraz zautomatyzowanego wyboru trasy przejazdu znajdują się w wagonikach
- Odległości minimalne pomiędzy wagonikami sterowane automatycznie
- W przypadku zaniku napięcia samoczynnie uruchamia się hamulec cierny
- Wagonik wyposażony w awaryjny system komunikacji z dyspozytorem
- Możliwość zastosowania linowej wciągarki dla awaryjnego opuszczania 'kapsuły' wagonika z pasażerami na linach z estakady na poziom ulicy.

## 6. Wymagania techniczno-ruchowe dla wagonika

- Prędkość przewozowa (od punktu początkowego do celu) ok. 40 km/h
- Masa własna wagonika nie powinna przekraczać 1000 kg
- Moc startowa wagonika nie powinna przekraczać 50 kW
- Adhezyjne przeniesienie sił napędowych i hamujących na tor
- Wzniesienie / spadek toru nie większy niż 10%
- Należy zapewnić możliwość indukcyjnego wywiązywania sił trakcyjnych i hamujących w przyszłości
- Należy rozważyć możliwość zastosowania napędu zębatkowego na spadkach / wzniesieniach większych niż 20%
- Należy uwzględnić możliwość zastosowania rolek bocznych poprzecznie stabilizujących wagonik w warunkach silnego wiatru bocznego.

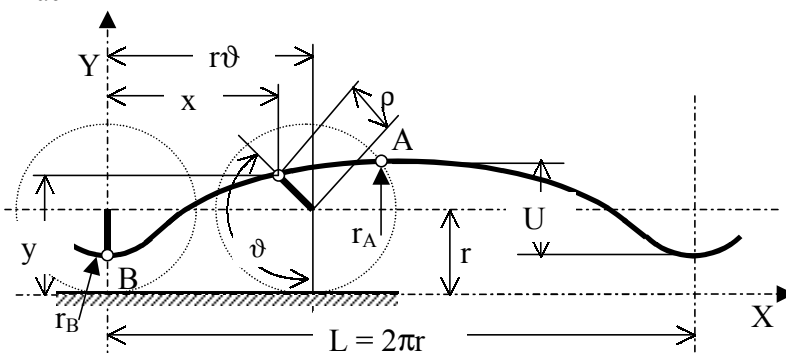
## 7. Techniczne parametry współpracy wagonika z belką torową z punktu widzenia ergonomii

Rozsądek gospodarczy nakazuje możliwie rzadkie rozmieszczanie podpór torowych. Belka torowa pomiędzy podporami będzie ulegała ugięciom pod działaniem sił grawitacyjnych, pochodzących od masy własnej oraz od wagonika (rys.6). W punkcie B dopuszcza się zaburzenie pionowego przyspieszenia o wartości nie większej niż 0,1g.



Rys. 6. Przybliżona linia ugięcia belki torowej

Odwzorowanie (z technicznym przybliżeniem) odwróconej linii ugięcia belki torowej może stanowić ogólnie pojmowana **cykloida skrócona (trochoida)**, pokazana na rys.7.



Rys.7. Aproxymacja odwróconej linii ugięcia belki torowej (cykloidy skróconej)

**Oznaczenia:**

- L – rozstaw podpór torowych
- V – prędkość jazdy wagonika
- U – maksymalne (wypadkowe) ugięcie toru pod wagonikiem
- t – czas (zmienna niezależna)
- T – okres trochoidy
- $\omega$  – prędkość kątowna koła trochoidy
- $\Omega$  – prędkość kątowna koła wagonika
- r – promień okręgu koła trochoidy
- R – promień okręgu tocznego koła wagonika
- $\rho$  – promień korby trochoidy
- $\vartheta$  – bieżąca wartość kąta obrotu ramienia korby
- $\lambda$  – współczynnik wykorbienia trochoidy

Podstawowe wzory są następujące:

$$\rho = \frac{U}{2}; \quad \rho = \lambda r; \quad r = \frac{L}{2\pi}; \quad \vartheta = \omega t; \quad t = \frac{x}{V}; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} L &= 2\pi r \\ L &= \omega r T = V T \\ \omega &= \frac{V}{r} = \frac{2\pi V}{L} \end{aligned} \right\} (2)$$

Równanie parametryczne cykloidy skróconej (trochoidy):

$$\left. \begin{aligned} x &= r\vartheta - \rho \sin \vartheta = r(\vartheta - \lambda \sin \vartheta) \\ y &= r - \rho \cos \vartheta = r(1 - \lambda \cos \vartheta) \end{aligned} \right\} (3)$$

{ Przejście graniczne: gdy  $\lambda=0$ , to także  $\rho=0$ ; wtedy otrzymuje się równanie ruchu środka abstrakcyjnego „koła trochoidy”, toczącego się bez poślizgów po sztywnym podłożu:

$$x = r\omega t; \quad y = r = const \quad \}$$

Promień rzeczywistego koła wagonika nie ma nic wspólnego z promieniem abstrakcyjnego koła trochoidy. Są jednak ściśle określone kinematyczne więzy pomiędzy tymi kołami:

$$\left. \begin{aligned} x &= r\omega t = R\Omega t \\ \text{oraz} \\ L &= r\omega T = R\Omega T \end{aligned} \right\} (4)$$

(Zatem  $r\omega = R\Omega$ )

Wielkości zadane (narzucone), to L oraz V, zaś wielkości mierzone to U oraz t. Znając więzy kinematyczne (4), przyjmując wielkości narzucone (2) oraz mierząc U i t, dokonuje się pełnej identyfikacji parametrów trochoidy wg (5):

$$\rho = \frac{U}{2}; \quad r = \frac{L}{2\pi}; \quad \lambda = \frac{\rho}{r}; \quad \omega = \frac{V}{r}; \quad t = \frac{x}{V}; \quad \vartheta = \omega t; \quad (5)$$

Zależności (5) wynikają wprost z równań (1) i (3).

Promienie krzywizn dla maksimum w pkt. A trochoidy, oraz dla minimum w pkt. B, wynoszą odpowiednio:

$$\left. \begin{aligned} r_A &= \frac{-r(1+\lambda)^2}{\lambda} \\ r_B &= \frac{r(1-\lambda)^2}{\lambda} \end{aligned} \right\} (6)$$

Podpory są umieszczone w punktach odpowiadających minimum trochoidy.

**Z względu na czynniki ergonomiczne, przyspieszenie wagonika w obrębie punktu B nie powinno przekraczać 0,1g; zatem można napisać:**

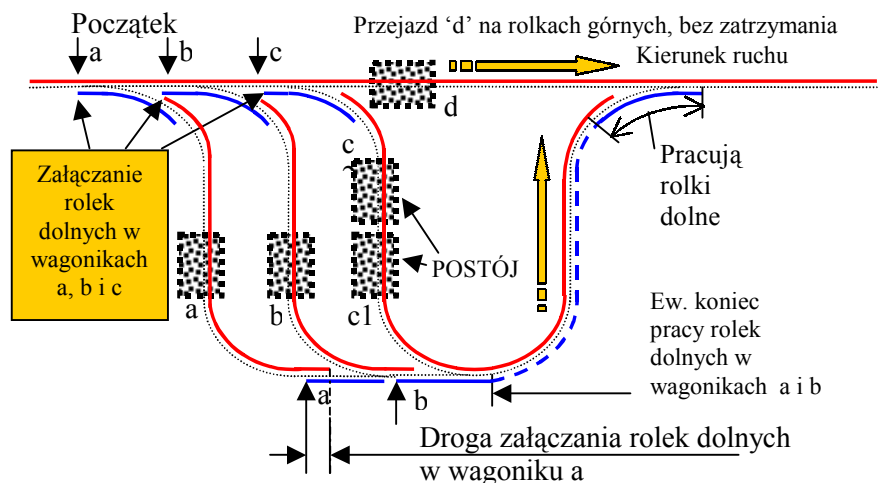
$$\frac{V^2}{r_B} \leq 0,1g \quad \text{czyli} \quad \frac{V^2\lambda}{r(1-\lambda)^2} \leq 1 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

albo (tylko w jednostkach SI), przy podstawieniu  $0,1g \approx 1[m/s^2]$

$$V^2 \leq \frac{L^2}{2\pi^2 U} \left( 1 - \frac{\pi U}{L} \right); \quad \left[ \frac{m}{s} \right]^2 \quad (7)$$

Wzór (7), w którym fizyczne jednostki przyspieszenia są niejawne, stanowi ‘ergonomiczny’ warunek właściwego doboru parametrów belki torowej L/U, gdy wagoniki nie mają pionowego usprężynowania.

**8. Zasady sterowania wagonika w rozjazdach i na przystankach oraz zarządzania siecią transportową**  
Przykładowy schemat przystanku pokazano na rys.8.

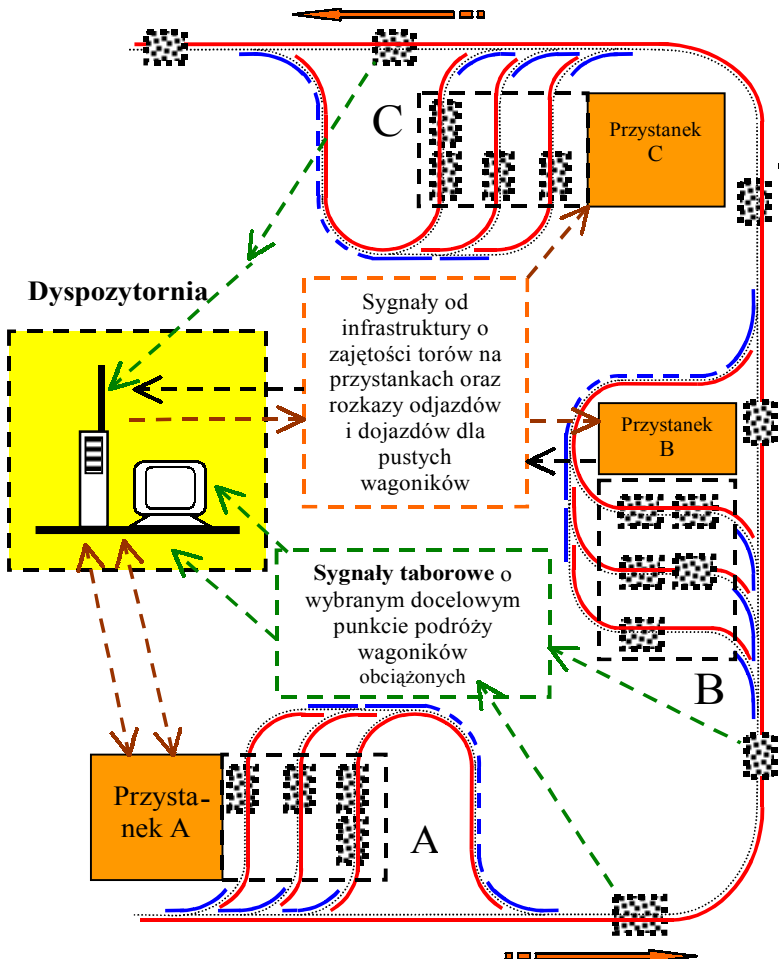


Rys.8. Przykładowy schemat przystanku w estakadowej sieci torów



## 8.1. Podstawowe zasady sterowania wagonika

- Tor ma dwie szyny, górną i dolną. Na schemacie: kolorem czerwonym oznaczono tok szynowy górny; niebieskim – tok szynowy dolny
  - Szyna górna określa **podstawowy tor ruchu** wagonika
  - Tor ruchu i szyna zasilania prądowego są odpowiednio skorelowane tak, aby wagonik był stale zasilany w energię elektryczną
  - Na podstawowym kierunku ruchu wagonika pracują trakcyjnie tylko górne rolki biegowe
  - Zejście z podstawowego kierunku ruchu możliwe jest tylko w rozjeździe
  - Dla zmiany kierunku ruchu w obrębie rozjazdów niezbędne jest krótkotrwałe przełączanie górnych rolek biegowych wagonika na dolne
  - Szyna dolna określa zmieniony tor ruchu wagonika w rozjeździe i tuż za rozjazdem
  - W określonej odległości za rozjazdem przywracany jest bieg oraz napęd wagonika na szynie górnej; w ten sposób zostaje ‘zresetowany’ podstawowy tor ruchu
  - Przełączanie rolek biegowych jest odpowiednio skojarzone z samoczynnym przełączaniem aktywnego napędu trakcyjnego
- Załączanie górnych lub dolnych silników trakcyjnych jest sterowane sygnałem ciśnienia oleju w siłowniku opuszczania i podnoszenia dolnych rolek biegowych
  - Pokładowy system sterowania wagonika jest autonomiczny. Reaguje on na dwa rodzaje sygnałów: **pokładowy** (wewnętrzny) i **sieciowy** (zewnętrzny).
    - **Sygnal „pokładowy”** (wewnętrzny) stanowi informację o wybranym przez pasażera (jednoznacznie zdeterminowanym) docelowym punkcie podróży. Wybór ‘optymalnej’ trasy obciążonego wagonika jest dokonywany przez komputer pokładowy. Sygnal pokładowy jest przekazywany do dyspozytorni.
    - **Sygnal „sieciowy”** jest (odpowiednio wczesnym, cyfrowym) rozkazem odjazdu wagonika pustego (z przystanku) do jednego z sąsiednich przystanków w sieci, **w celu ustąpienia miejsca dla wagonika aktualnie zmierzającego do tego przystanku docelowego** (wybranego przez pasażera na początku trasy). Sygnały sieciowe służą też jako rozkazy uzupełnienia niezbędnego zapasu wagoników na przystankach. Sygnały sieciowe są przekazywane bezstykowo.
    - **Sygnal odległości** między wagonikami (pustymi oraz obciążonymi) jest dla wagonika sygnałem sieciowym zewnętrznym niezdefiniowanym.



## 8.2. Ogólne zasady zarządzania siecią transportową

Na rys.9 pokazano schematycznie fragment estakadowej sieci transportowej.

Rys.9. Fragment estakadowej sieci transportowej i zasada zarządzania

- System transportowy w sieci torów jest zaprojektowany tak, że cały tabor może równocześnie swobodnie zmieścić się na postoju w obrębie przystanków. Na każdym przystanku powinna znajdować się niezbędna liczba wagoników. Zagadnienie systemowej redundancji stanowi wydzielony problem naukowy.
- Sieciowy system komputerowego sterowania wagonikami składa się z części czynnej i biernej. System sieciowy gromadzi i odpowiednio przetwarza sygnały (pochodzące z infrastruktury) o aktualnym stanie zajętości poszczególnych przystanków oraz wszystkie sygnały taborowe o wybranych przystankach docelowych i o zbliżeniu się każdego wagonika do wybranego przystanku (z należyтым wyprzedzeniem czasowym). Sterowanie siecią jest rozczłonkowane na sterowanie poszczególnymi przystankami.

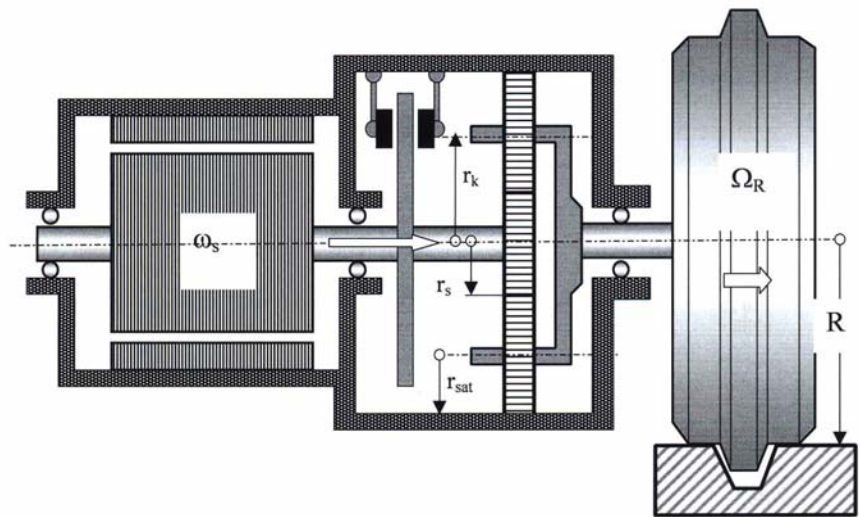
→ **Część bierna sieciowego systemu sterowania** dostarcza do wagonika sygnał o zbliżeniu się do zidentyfikowanego rozjazdu dla odpowiedniego przesterowania kierunku jazdy na trasie wybranej przez komputer pokładowy. W praktyce sygnał ten pochodzi z pokładowego czujnika położenia wagonika na trasie odpowiednio oznakowanej (obowiązkowo przed rozjazdami).

→ **Część czynna (aktywna) sieciowego systemu sterowania** zarządza ruchem wagoników pustych tak, aby każdy zbliżający się wagonik z pasażerami mógł w odpowiednim czasie znaleźć miejsce na przystanku wybranym przez pasażera na początku podróży. Część aktywna sieciowego systemu sterowania wagonika przekazuje do wagonika sygnał o numerze toru parkingowego. Część aktywna sieciowego systemu sterowania (z wyjątkiem sytuacji awaryjnych) nie powinna mieć wpływu na ‘optymalny’ wybór trasy wagoników w sieci torów estakadowych.

Kontroler wagonika reaguje na wewnętrzny sygnał wyboru celu podróży, oraz **sygnały zewnętrzne**:

- położenia w sieci torowej (zbliżenie się do określonego rozjazdu)
- rozkaz opuszczenia przystanku
- numer toru parkingowego na przystanku docelowym; kontroler wagonika steruje też płynnością trakcyjnego procesu rozruchu i hamowania.

## 9. Przekładnia mechaniczna układu napędowego wagonika (rys.10)



Rys.10. Schemat przekładni mechanicznej z samoczynnym hamulcem sprężynowo-luzownikowym i jej charakterystyczne parametry

Przełożenie przekładni  $i = \omega_s / \Omega_R$ :

$$i = \frac{2(r_s + r_{sat})}{r_s}; \quad r_{sat} = \left( \frac{i}{2} - 1 \right) r_s \quad (8)$$

gdzie:

$r_k$  – promień okręgu osadzenia osi satelitów koszu

$r_s$  – promień podziałowy koła słonecznego przekładni planetarnej

$r_{sat}$  – promień podziałowy koła satelitarnego przekładni planetarnej

$R$  – promień trakcyjny rolki biegującej (koła biegującego) wagonika

$\omega_s$  – prędkość obrotowa wirnika trakcyjnego silnika elektrycznego

$\Omega_R$  – prędkość obrotowa rolki trakcyjnej wagonika

## 10. Podsumowanie

Przedstawiony oryginalny system podwieszony pasażerskiej kolejki estakadowej został zgłoszony do opatentowania [1].

**Główną praktyczną korzyścią** zaprezentowanego rozwiązania jest całkowita eliminacja przestawnych, ruchomych części infrastruktury torowej (także w obrębie rozjazdów), przy równoczesnym umożliwieniu automatycznego sterowania marszruty z pokładu wagonika (przejazdu po wybranej trasie w obszarze określonej sieci „rozjazdów” torowych).

**Omówiono** najistotniejsze zagadnienia dotyczące dwóch nierozdzielnych, wzajemnie technicznie zależnych składników systemu: infrastruktury i pojazdów. Infrastruktura składa się z toru estakadowego wyposażonego w oryginalne nieruchome rozjazdy i klasyczne zasilające szyny energetyczne. Podwieszony wagoniki są wyposażone w pantografy, specjalne podwozia i elektrycznie napędzane koła.

**Docelowy punkt** podróży w obrębie znanej sieci torów (rozumianej jako zespół dostępnych trajektorii transportowych) jest sygnalizowany przez pasażera na pokładzie wagonika. Wybór i sterowanie trasy (marszruty) przejazdu wagonika w obrębie określonej sieci torowej jest dokonywany automatycznie przez odpowiednio oprogramowany **komputer pokładowy** wagonika wyposażonego w indywidualny układ napędowy. Obciążeniem poszczególnych przystanków i ruchem wagoników pustych steruje bezprzewodowo **centralny komputer stacjonarny**.

#### LITERATURA

- [1] *Madaj J., Choromański Wł.: Układ biegowy kolejki estakadowej. Zgłoszenie patentowe, Politechnika Warszawska, Zespół Rzeczników Patentowych. Nr zgłoszenia P. 381106 wg pisma ZR-Pat/3825/2006 z dnia 15. 12. 2006*