

Modelowanie współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną

Streszczenie. W artykule przedstawiono aspekty oceny współpracy odbieraka prądu z górną siecią trakcyjną na podstawie porównania modeli matematycznych. Zaprezentowano modele odbieraków prądu i sieci jezdnej wskazując na ich użyteczność do oceny siły stykowej i uniesienia przewodów jezdnych. Wykonano szereg symulacji stanów dynamicznych interakcji górnej sieci trakcyjnej i odbieraka prądu dla różnych parametrów. W szczególności zwrócono uwagę na wpływ tarcia suchego i lepkiego pantografu na przebieg siły stykowej i uniesienia sieci jezdnej.

Abstract. The paper describes aspects of the pantograph-catenary interaction based on mathematical models comparison. The pantograph and overhead contact line (OCL) models which indicate their usefulness for the evaluation of contact force and uplift of wires were presented. A series of simulations of the dynamic interaction of OCL and pantograph for various parameters were performed. The influence of dry and viscous friction of pantograph components on waveform of contact force and uplift of OCL was described. **Modeling of the pantograph-catenary interaction.**

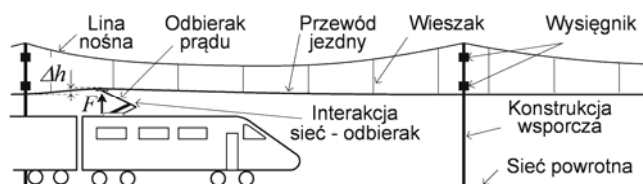
Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, odbierak prądu, sieć jezdna, siła stykowa.

Keywords: electric traction, pantograph, overhead contact line, contact force.

Wstęp

Górna sieć trakcyjna jest najefektywniejszym sposobem zasilania kolejowych pojazdów elektrycznych. Wzrost prędkości pojazdów zwiększa pobór mocy oraz wymaga zapewnienia prawidłowej współpracy odbieraków prądu pojazdów z siecią jezdnią [1-5].

Sieć jezdna wraz z pantografem pojazdu elektrycznego stanowi mechaniczny układ drgający, decydujący o przebiegu siły stykowej odbieraka. Przebieg tej siły znacząco wpływa na jakość odbioru prądu z sieci jezdnej. Na rysunku 1 przedstawiono szkic trakcji elektrycznej z wyróżnionym układem odbieraka prądu – sieć jezdna.



Rys.1. Układ odbieraka prądu – sieć jezdna; zaznaczono oddziaływanie odbieraka siłą F i uniesienie przewodu jezdnego Δh

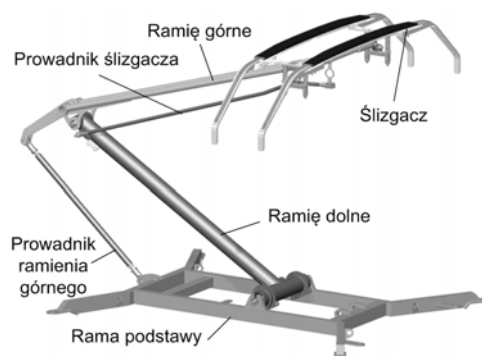
W ostatnim ćwierćwieczu prace nad dynamiką interakcji odbieraka prądu z siecią jezdnią były intensywnie rozwijane, zwłaszcza dla kolei dużych prędkości [1, 4, 6-15]. W literaturze spotykamy różne propozycje badań tego problemu – od stosunkowo prostych, opierających się na modelu odbieraka zazwyczaj o dwóch stopniach swobody i okresowo zmiennej elastyczności sieci [1, 12, 15], po złożone modele bazujące na analizie modalnej [8, 11], metodach elementów różnicowych (FDM) czy skończonych (FEM) [8], metodzie hybrydowej [14] i innych [16, 17].

Zgodnie z wytycznymi TSI i aktami normatywnymi [3, 18-20] współpraca układu odbieraka prądu – sieć jezdna powinna podlegać symulacyjnej ocenie parametrów takich, jak: uniesienie przewodów jezdnych, wartość średnia i odchylenie standardowe siły stykowej, a także innych. W niniejszej pracy dokonano oceny przydatności – do certyfikacji normatywnych – modeli odbieraków i sieci jezdnych implementowanych w środowisku MatLab-Simulink, opartych na parametrach krajowych sieci trakcyjnych 3 kV prądu stałego.

Modele układu odbieraka – sieć jezdna o parametrach skupionych

Na rysunku 2 pokazano typowy odbierak jednoramienny. Podczas jazdy pociągu odbierak wykonuje ruchy pionowe wprowadzając przewód jezdny w ruch drgający. Drgania tego układu mają dość złożony charakter.

Z tego powodu zakłada się pewne uproszczenia modeli. Przyjęto, że reakcja sieci na nacisk odbieraka składa się z części statycznej i dynamicznej [4]. Część statyczną uwzględnia stały nacisk na sieć jezdnią, wywierany przez pneumatyczny siłownik unoszenia ramion odbieraka, oraz stałą siłę aerodynamiczną – przy stałej prędkości jazdy. Dynamiczną współpracę odbieraka z siecią jezdnią przedstawiono za pomocą wybranych modeli ze skupionymi parametrami sieci i odbieraka [8, 11, 13, 15].



Rys.2. Widok odbieraka prądu (na rys. pominięto układ napędowy)

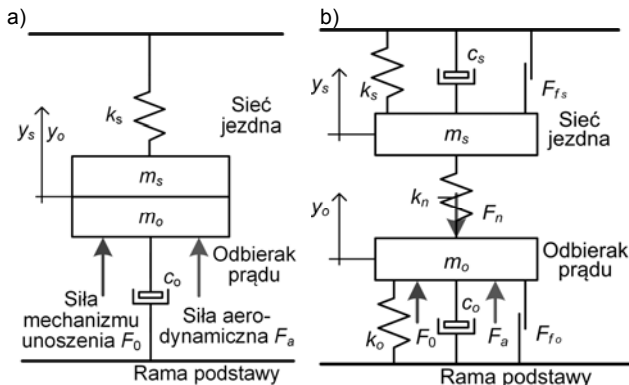
Model jednomasowy odbieraka prądu

Najbardziej uproszczony model układu drgającego można sprowadzić do układu o jednym stopniu swobody ruchu, opisywanym równaniem różniczkowym drugiego rzędu. Prezentowany na rysunku 3a model układu odbieraka – sieć składa się z połączonych mas zastępczych sieci i odbieraka (m_s , m_o), elementu sprężystego (k_s), elementu tłumiącego (c_o) modelującego tarcie wiskotyczne oraz statycznej siły mechanizmu unoszenia ($F_0 = \text{const}$) oraz siły aerodynamicznej ($F_a = 0,00097 \cdot v^2$, gdzie F_a [N], v [km/h]), zależnej od prędkości ruchu pojazdu (v) [4]. Ruch pionowy $y_s(t)$ odbieraka opisywany jest przez

$$(1) \quad (m_s + m_o) \ddot{y}_s + c_o \dot{y}_s + k_s y_s = F_0 + F_a$$

gdzie: m_s , m_o – odpowiednio masa zastępcza sieci jezdnej i odbieraka, c_o – współczynnik tłumienia, k_s – sztywność sieci jezdnej (odwrotność elastyczności).

Ten prosty, jednomasowy model, może być stosowany do badania dynamiki przy bardzo niskich częstotliwościach [15]. W celu rozszerzenia modelu o tarcie suche (F_{fs} , F_{fo}) oraz wyeksponowania oddziaływania siły stykowej (F_n) na nakładkę stykową ślizgacza, rozbudowano model do układu przedstawionego na rysunku 3b [1].



Rys.3. Układ odbierak – sieć jezdna: a) model o jednym stopniu swobody; b) model z wyróżnieniem sztywności nakładki stykowej

Model z rysunku 3b jest układem o dwóch stopniach swobody, opisywanym układem równań:

$$\begin{aligned}
 m_s \ddot{y}_s + c_s \dot{y}_s + k_s y_s - k_n (y_o - y_s) &= 0 \\
 m_o \ddot{y}_o + c_o \dot{y}_o + k_s y_o + k_n (y_o - y_s) &= F_0 + F_a \\
 k_n (y_o - y_s) &= F_n
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

gdzie: y_s, y_o – odpowiednio uniesienie sieci i odbieraka, k_n – sztywność nakładki stykowej, m_o – masa zastępcza odbieraka, c_s – współczynnik tłumienia wiskotycznego sieci, F_{fs}, F_{fo} – siła tarcia suchego odpowiednio sieci i odbieraka, F_n – siła działająca na nakładkę stykową.

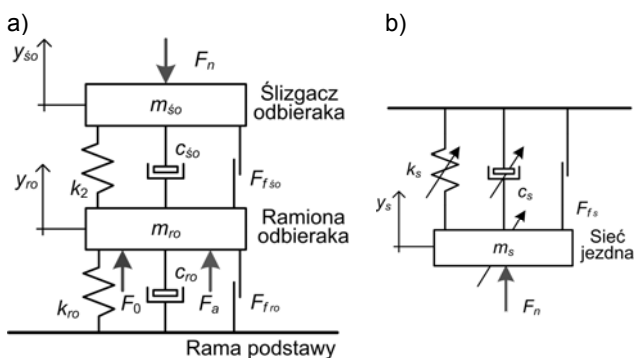
Równanie (2) jest słuszne, jeżeli spełniony jest warunek

$$m_s \ddot{y}_s + c_o \dot{y}_s + k_s y_s > 0 \tag{3}$$

ozn. nie występuje utrata styczności pomiędzy przewodem jezdny a ślizgaczem.

Model dwumasowy odbieraka prądu

Model dwumasowy odbieraka uwzględnia oddzielnie masę ślizgacza i masę zastępczą ramion pantografu, co przedstawiono na rysunku 4a. Reprezentowany jest on w normie PN-EN 50318 [18] jako dwumasowy model o wysokiej wartości sztywności pomiędzy masą ślizgacza i siecią jezdnią (rys.3b). Model ten dokładniej odwzorowuje niewielkie przemieszczenia pomiędzy odbierakiem a siecią jezdnią.



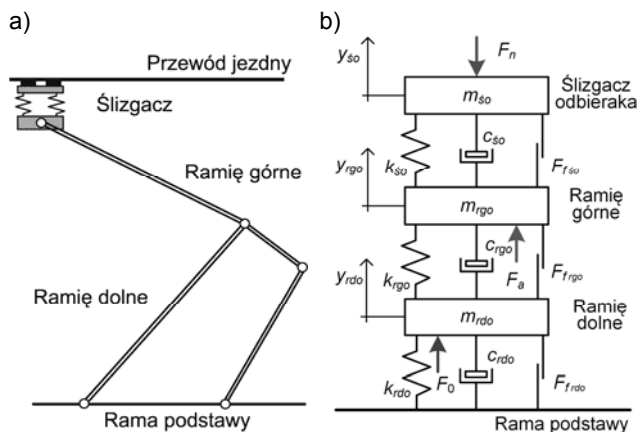
Rys.4. Układ odbierak – sieć jezdna: a) dwumasowy model odbieraka; b) model sieci jezdnej

Do analizy drgań oprócz modelu odbieraka należy przyjąć model sieci jezdnej, może to być prosty model o stałych parametrach, jak na rysunku 3 lub uwzględniający zmianę parametrów sieci wzdłuż przęsła zawieszenia (rys. 4b), co pozwala analizować ruch harmoniczny [11-13, 15]. Podobnie do układu (2) i (3) powyższy model, wraz z modelem nakładki stykowej, można opisać przez układ sześciu równań różniczkowych.

Model wielomasowy

Model trójmasowy pantografu uwzględnia jego oddzielne elementy – ślizgacz, ramię górne i ramię dolne [10]. Na rysunku 5a przedstawiono schemat kinematyczny odbieraka, zaś na rysunku 5b odpowiadający mu model.

Uwzględniając modele odbieraka, nakładki stykowej i sieci jezdnej cały układ opisywany jest przez osiem równań różniczkowych.



Rys.5. Wielomasowy model odbieraka: a) schemat kinematyczny układu odbierak – sieć jezdna; b) model trójmasowy odbieraka

Model sieci jezdnej

Sztywność sieci jezdnej jest zmienna wzdłuż przęsła zawieszenia tj. na odcinku między sąsiednimi punktami jej podwieszenia. W przypadku ruchu pojazdu ze stałą prędkością skutkuje to periodycznym wymuszeniem ruchu odbieraka w płaszczyźnie pionowej i fluktuacją siły stykowej [2, 10-13, 15]. Wartość minimalna sztywności występuje pośrodku przęsła, a maksymalna w otoczeniu punktu podwieszenia. Dla danego typu sieci jezdnej, z prostych zależności, można obliczyć maksymalną i minimalną wartość sztywności sieci jezdnej. Jeśli przyjmiemy ustaloną prędkość pojazdu, przy danej długości przęsła, to periodyczną zmianę sztywności sieci aproksymujemy przez:

$$k_s(t) = k_0 \left[1 + \alpha \cos\left(\frac{2\pi v}{L} t\right) \right] \tag{4}$$

przy czym

$$k_0 = \frac{k_{\max} + k_{\min}}{2} \quad \alpha = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_{\max} + k_{\min}} \tag{4a}$$

gdzie: k_{\max}, k_{\min} – największa i najmniejsza sztywność w przęsle podwieszenia, L – długość przęsła, v – prędkość ruchu pojazdu.

Do analizy symulacyjnej według (4), przyjęto parametry sieci łańcuchowej prostej: $k_0=3000$ N/m, $\alpha=0,3$, $L=65$ m. Parametry te odpowiadają sieci o dużej nierównomierności elastyczności. Ponadto przyjęto: stałą masę zastępczą sieci $m_s=28$ kg, stały współczynnik tłumienia wiskotycznego sieci $c_s=0,5$ Ns/m oraz brak tarcia suchego $F_{fs}=0$ N.

Stosowane są również inne modele sieci [11], w których aproksymuje się zmienne wartości masy, tłumienia i sprężystości według (5). Wartości te mogą być obliczone analitycznie [9, 11] lub wyznaczone eksperymentalnie [9]. Na podstawie literatury [4, 8, 9, 11, 12] i wykonanych obliczeń oszacowano parametry zależności (5) dla modelu o elementach skupionych dla: masy zastępczej – $m_{s0}=28$ kg, $m_{s1}=8$ kg, $m_{s2}=4$ kg, $m_{s3}=1$ kg, tłumienia wiskotycznego – $c_{s0}=0,5$ Ns/m, $c_{s1}=0$ Ns/m, $c_{s2}=0$ Ns/m, $c_{s3}=0$ Ns/m, oraz sztywność sieci – $k_{s0}=3000$ N/m, $k_{s1}=900$ N/m, $k_{s2}=400$ N/m, $k_{s3}=90$ N/m.

$$m_s(t) = m_{s0} + \sum_{i=1}^{i=3} m_{si} \cos\left(2i\pi \frac{v}{L} t\right)$$

$$(5) \quad c_s(t) = c_{s0} + \sum_{i=1}^{i=3} c_{si} \cos\left(2i\pi \frac{v}{L} t\right)$$

$$k_s(t) = k_{s0} + \sum_{i=1}^{i=3} k_{si} \cos\left(2i\pi \frac{v}{L} t\right)$$

Wyznaczanie parametrów elementów skupionych odbieraka

W celu określenia parametrów modeli odbieraków przeprowadzono pomiary na stanowisku laboratoryjnym z odbierakiem prądu typu 160EC produkcji polskiej (rys.6). Zidentyfikowano parametry układu kinematycznego odbieraka, wyznaczono współczynniki sprężystości, tłumienia wiskotycznego i suchego [21]. W tym celu wykonano rejestrację ruchu poszczególnych elementów konstrukcyjnych w układzie wahadła fizycznego (rys.7). Przebiegi te przetworzono w programie MatLab według algorytmu Levenberga-Marquardt'a uzyskując parametry modelu. Zestawienie parametrów zamieszczono w tabeli 1.



Rys.6. Widok stanowiska laboratoryjnego



Rys.7. Przykładowy przebieg ruchu elementu odbieraka prądu

Tabela 1. Parametry odbieraka prądu

Symbol	Jednostka	Wartość	Opis
m_{s0}	kg	16,7	Masa ślizgacza
m_{rgo}	kg	17,7	Masa ramienia górnego
m_{rdo}	kg	29,1	Masa ramienia dolnego
k_n	N/m	50000	Sztynność nakładki stykowej
k_{s0}	N/m	16000	Sztynność ślizgacza
k_{rgo}	N/m	10000	Sztynność ramienia górnego
k_{rdo}	N/m	50	Sztynność ramienia dolnego
c_{s0}	Ns/m	10	Tłumienie wiskotyczne ślizgacza
c_{rgo}	Ns/m	4	Tłumienie wiskotyczne ramienia górnego
c_{rdo}	Ns/m	90	Tłumienie wiskotyczne ramienia dolnego
$F_{f_{s0}}$	N	0,2	Tarcie suche ślizgacza
$F_{f_{rgo}}$	N	0,5	Tarcie suche ramienia górnego
$F_{f_{rdo}}$	N	10	Tarcie suche ramienia dolnego

Symulacje komputerowe – porównanie modeli

W celu jakościowego porównania różnych modeli przeprowadzono symulacje, których wyniki – dla dwóch modeli sieci jezdnej opisanych przez (4) i (5) oraz czterech modeli odbieraków (rys.3a, 3b, 4 i 5) przy prędkości jazdy $v=160$ km/h – przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

W tabelach 2 i 3 zestawiono wartości wskaźników oceny jakości współpracy odbieraka z siecią, zdefiniowanych w wymaganiach TSI i normach [3, 18-20], jakie uzyskano dla analizowanych modeli odbieraka i sieci, także dla prędkości $v=250$ km/h, granicznej w systemie zasilania 3 kV DC. Symbolem F_m oznaczono wartość średnią siły stykowej w obszarze przęsła [18]. Współczynnik przerw stykowych wyznaczano w oparciu o czas, w którym obliczona wartość chwilowa siły stykowej jest ujemna – w prezentowanych tu symulacjach taki przypadek nie występował. Analiza wyników i ich porównanie z innymi badaniami modelowymi i eksperymentalnymi [8, 10, 11, 13, 22] pozwala stwierdzić, że jeżeli głównym celem symulacji jest sprawdzenie, czy dla danego układu sieć – odbierak wartości normatywnych wskaźników ich prawidłowej współpracy nie będą przekroczone, dopuszczalne jest wykorzystanie prostszych wariantów modeli. Przy dobrze wyznaczonych parametrach, dla prędkości jazdy do 160 km/h – z wyjątkiem modelu jednomasowego (rys.3a), uzyskano zbliżone wartości tych wskaźników. Przy wyższych prędkościach, a zwłaszcza jeśli celem jest bardziej szczegółowa analiza zmian wartości chwilowych siły stykowej, wskazane jest użycie modelu odbieraka o większej liczbie stopni swobody.

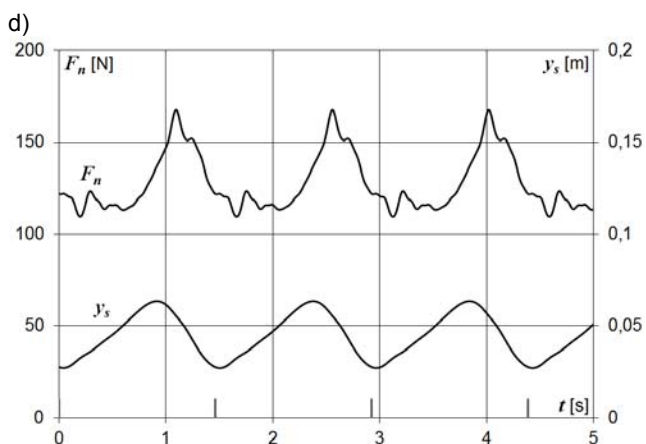
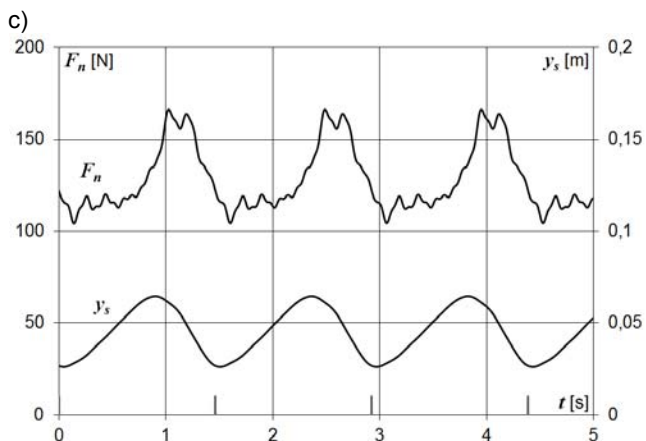
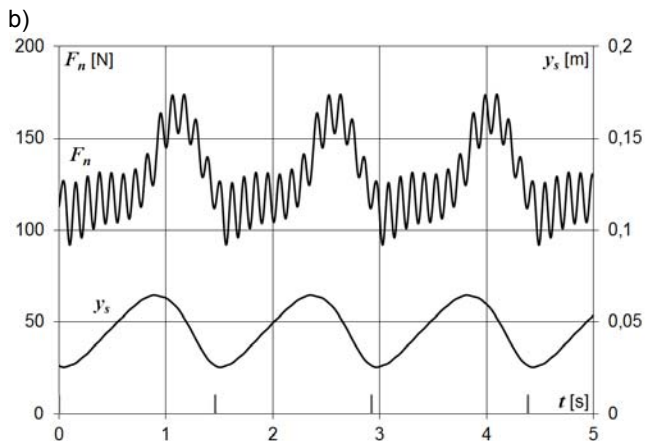
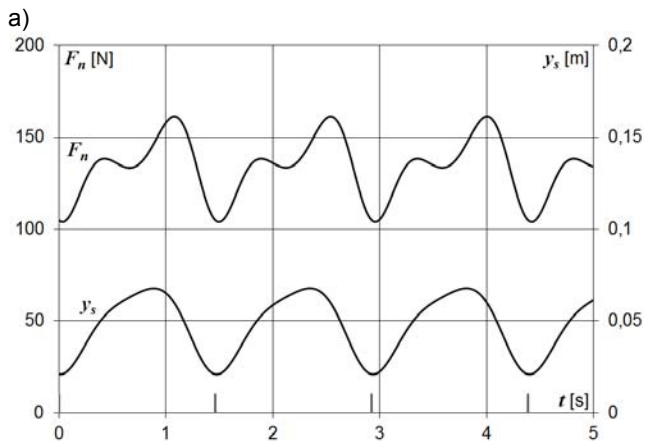
Należy też podkreślić zgodność uzyskanego w symulacji uniesienia przewodów jezdnych z wartościami mierzonymi na eksploatowanym stanowisku monitoringu [22].

Tabela 2. Porównanie modeli odbierak prądu – sieć jezdna wg (4)

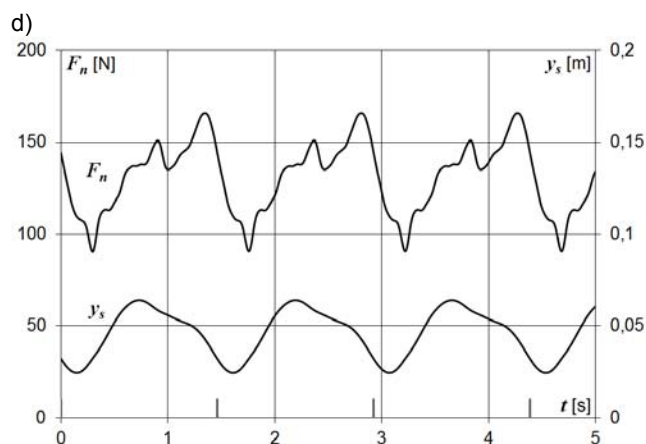
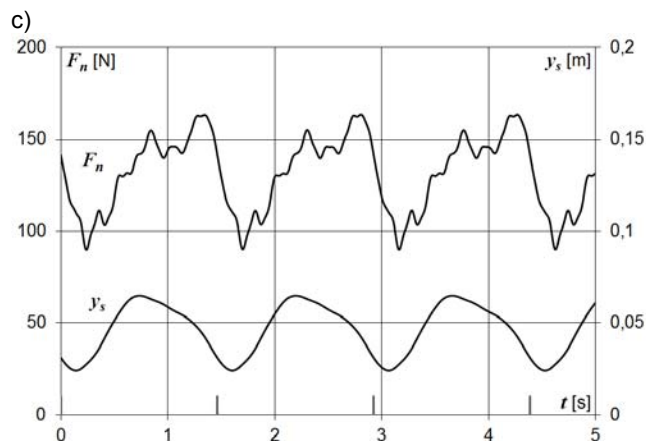
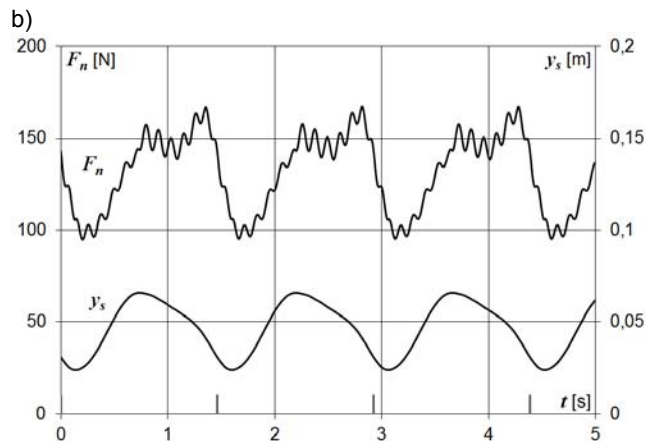
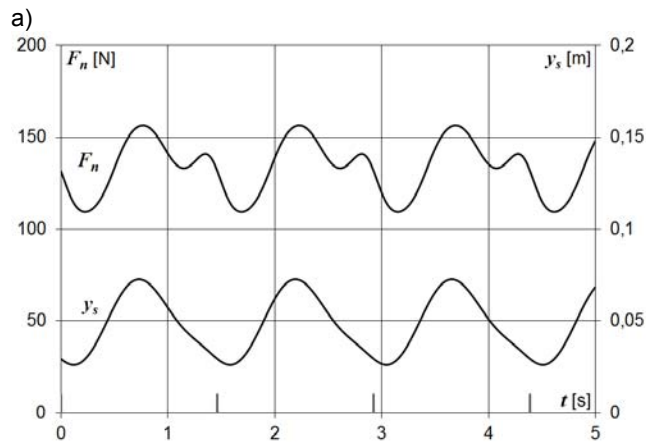
Model odbieraka z rysunku	3a	3b	4	5	3a	3b	4	5
Prędkość v [km/h]	160				250			
Siła stykowa F_m [N]	134,5	130,3	129,8	129,1	170,0	166,4	165,7	165,3
Odchylenie standardowe σ [N]	16,3	20,5	18,1	16,0	110,2	77,8	69,9	64,7
Stat. wartość max. siły $F_m+3\sigma$ [N]	183,3	191,8	184,2	177,1	500,7	399,7	375,5	359,5
Stat. wartość min. siły $F_m-3\sigma$ [N]	85,7	68,8	75,3	81,0	-160,7	-66,9	-44,1	-28,9
Maksymalna wartość siły [N]	161,3	173,9	166,3	167,6	343,6	299,7	290,3	279,9
Minimalna wartość siły [N]	103,8	91,8	104,2	109,5	21,9	63,6	76,1	80,3
Max. uniesienia pod konstr. wsp. [mm]	21,0	26,2	26,7	27,6	45,7	50,2	51,6	48,2
Współczynnik przerw styk. [%]	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 3. Porównanie modeli odbierak prądu – sieć jezdna wg (5)

Model odbieraka z rysunku	3a	3b	4	5	3a	3b	4	5
Prędkość v [km/h]	160				250			
Siła stykowa F_m [N]	134,5	133,8	133,3	132,7	170,0	166,1	165,4	165,0
Odchylenie standardowe σ [N]	14,6	20,7	20,5	19,2	132,8	91,3	79,8	71,1
Stat. wartość max. siły $F_m+3\sigma$ [N]	178,2	196,1	194,8	190,5	568,2	440,0	404,7	378,1
Stat. wartość min. siły $F_m-3\sigma$ [N]	90,8	71,6	71,9	75,0	-228,3	-107,7	-73,9	-48,2
Maksymalna wartość siły [N]	156,4	167,1	163,5	166,0	410,9	330,5	326,5	309,2
Minimalna wartość siły [N]	109,4	95,3	89,8	90,6	13,6	55,4	65,3	71,8
Max. uniesienia pod konstr. wsp. [mm]	29,4	30,8	31,1	32,2	77,1	65,7	63,1	58,1
Współczynnik przerw styk. [%]	0	0	0	0	0	0	0	0

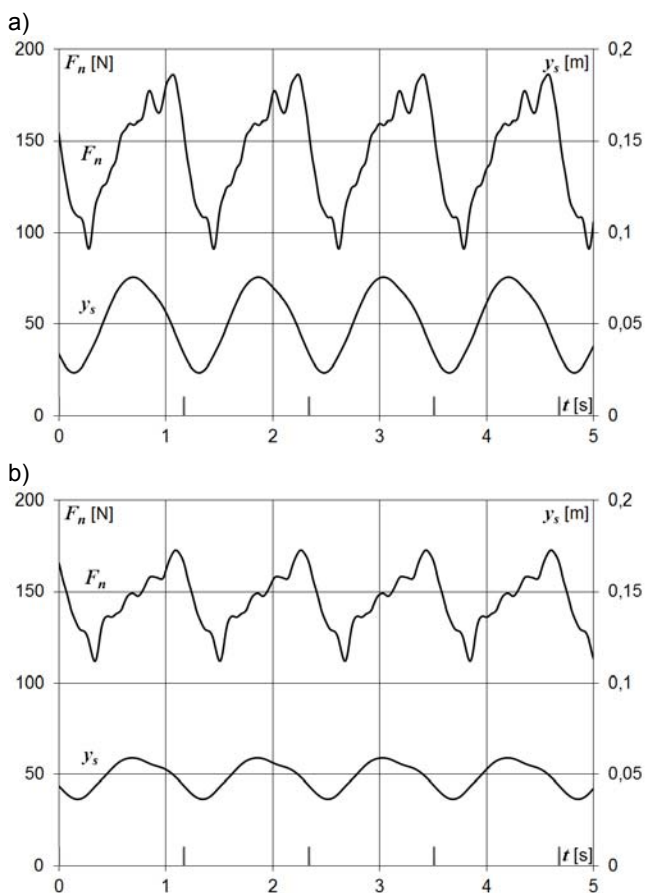


Rys.8. Wyniki symulacji układu odbierak – sieć jezdna dla modelu sieci według (4): a) dla modelu odbieraka z rys.3a; b) z rys.3b; c) z rys.4; d) z rys.5; $v=160$ km/h – znaczniki u dołu wykresów wskazują położenia konstrukcji wsporczych



Rys.9. Wyniki symulacji układu odbierak – sieć jezdna dla modelu sieci według (5): a) dla modelu odbieraka z rys.3a; b) z rys.3b; c) z rys.4; d) z rys.5; $v=160$ km/h – znaczniki u dołu wykresów wskazują położenia konstrukcji wsporczych

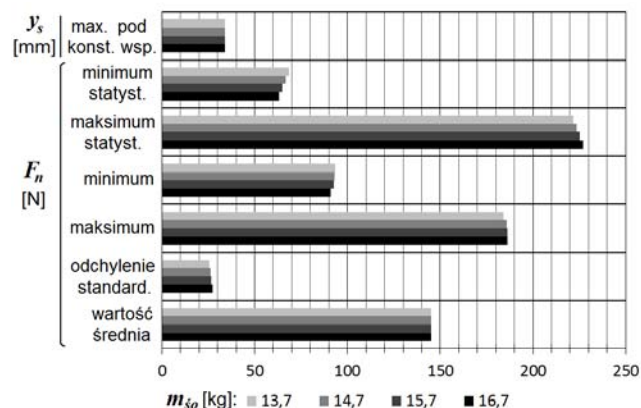
Dla wyższej prędkości jazdy $v=250$ km/h – przy modelu sieci o relatywnie dużym współczynniku nierównomierności elastyczności $\alpha \approx 0,3$ – uzyskano niezgodne z wymaganiami normy wartości statystycznej siły stykowej: maksymalnej – powyżej 400 N (dla niektórych modeli), oraz minimalnej – poniżej 0 N. W praktyce sieci dla kolei dużych prędkości wymagają odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych [1], zmniejszających nierównomierność elastyczności w obszarze przęsła zawieszenia. W niektórych rozwiązaniach osiąga się zmniejszenie współczynnika α do poziomu ok. 0,15. Biorąc pod uwagę warunki krajowe przeprowadzono symulację dla prędkości $v=200$ km/h na modelach sieci o dwóch wartościach współczynnika zmienności elastyczności $\alpha=0,29$ i $\alpha=0,17$ – wyniki przedstawiono na rysunku 10. Dla obydwu tych wartości uzyskano zgodne z normą wartości wyżej wymienionych wskaźników. We wszystkich badaniach przyjęto stałą wartość siły statycznej odbieraka $F_0=110$ N, zaś wartość siły aerodynamicznej F_a dostosowywano do prędkości ruchu pojazdu.



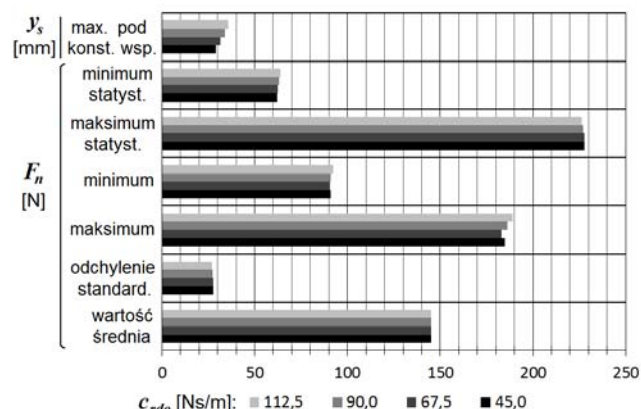
Rys.10. Wyniki symulacji układu odbierak – sieć jezdna przy prędkości $v=200$ km/h dla modelu odbieraka z rys.5 i modelu sieci wg (5), przy różnym stopniu nierównomierności elastyczności: a) $\alpha=0,29$; b) $\alpha=0,17$; α obliczone wg (4a)

Korzystając z opracowanych modeli przeprowadzono także badanie wpływu zmian wybranych własności odbieraka i sieci na wartości wskaźników normatywnych, podanych w tabelach 2 i 3, określających jakość współpracy odbieraka z siecią. Modelowano zmiany związane z naturalnym procesem eksploatacyjnego zużycia, jak np. zmniejszenie masy ślizgacza wskutek zużycia węglowych nakładek stykowych [23], jak również zmiany innych parametrów. Wyniki analizy statystycznej dla zmian kilku wybranych wielkości fizycznych przedstawiono na rysunkach 11-13. Zakres zmian każdego z parametrów ograniczono do przedziału wartości, które mogą wystąpić

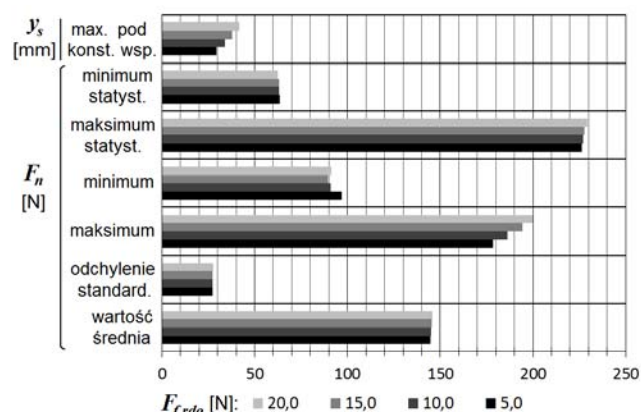
podczas długotrwałej eksploatacji i odpowiadają znacznemu zużyciu lub niepełnej sprawności technicznej odbieraka prądu. Przy takich warunkach badań wyniki symulacji wykazują stosunkowo niewielki wpływ analizowanych parametrów na zakres zmian siły stykowej i na uniesienie przewodów jezdnych sieci trakcyjnej.



Rys.11. Wyniki symulacji wpływu masy ślizgacza odbieraka na parametry jego współpracy z siecią jezdna przy prędkości $v=200$ km/h dla modelu odbieraka z rys.5 i modelu sieci wg (5) przy $\alpha=0,29$ – wartość nominalna $m_{sliz}=16,7$ kg



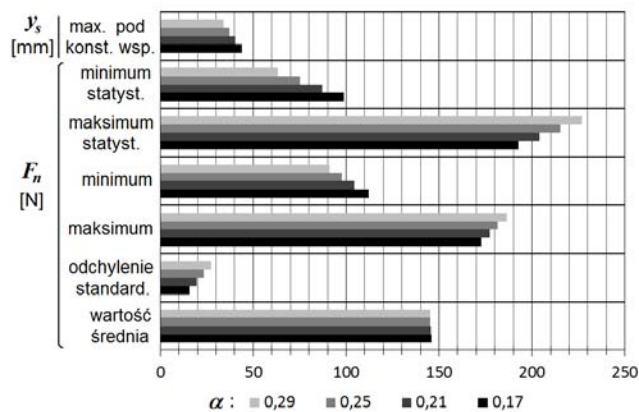
Rys.12. Wyniki symulacji wpływu tłumienia wiskotycznego ramienia dolnego odbieraka na parametry jego współpracy z siecią jezdna przy prędkości $v=200$ km/h dla modelu odbieraka z rys.5 i modelu sieci wg (5) przy $\alpha=0,29$ – wartość nominalna $c_{rdo}=90$ Ns/m



Rys.13. Wyniki symulacji wpływu tarcia suchego ramienia dolnego odbieraka na parametry jego współpracy z siecią jezdna przy prędkości $v=200$ km/h dla modelu odbieraka z rys.5 i modelu sieci wg (5) przy $\alpha=0,29$ – wartość typowa $f_{frdo}=10$ N

Na rysunku 14 przedstawiono analogiczne wyniki analizy statystycznej przy zmianach współczynnika nierównomierności elastyczności sieci w obszarze przęsła

zawieszenia α (4a). Zakres zmian α ograniczono do wartości, jakie odpowiadają różnym typom sieci w poprawnym stanie technicznym.



Rys.14. Wyniki symulacji wpływu stopnia nierównomierności elastyczności sieci jezdnej α – obliczanego wg (4a) – na parametry jej współpracy z odbierakiem prądu przy prędkości $v=200$ km/h dla modelu odbieraka z rys.5 i modelu sieci wg (5)

Podsumowanie

Przedstawione modele mechaniczne odbieraków i sieci jezdnej są opisane przez skupione masy zastępcze, elementy sprężyste oraz elementy z tarcim suchym i wiskotycznym. Te typy modeli są szeroko wykorzystywane i akceptowalne do wstępnych badań sieci i odbieraków prądu – w tym do projektowania układów regulacji odbieraków aktywnych [15]. Przy próbie wykorzystania symulacji do rozszerzonej analizy wyników pomiarów uniesienia przewodów jezdnych w warunkach ruchowych na stanowisku monitoringu [22] – w celu diagnostyki odbieraków o niewłaściwym stanie technicznym i identyfikacji rodzaju ich niesprawności – konieczne jest opracowanie bardziej zaawansowanych modeli sieci i odbieraków. W oparciu o przegląd piśmiennictwa można stwierdzić, że w odniesieniu do modeli sieci jezdnej lepsze rezultaty otrzymuje się bazując m.in. na zaawansowanych modelach FEM i modalnej analizie sieci [6-8, 10, 15]. W pracach tych zazwyczaj wykorzystywane są powyżej prezentowane modele odbieraków.

W ramach dalszych prac badawczych przewiduje się rozwinięcie modeli odbieraków z uwzględnieniem stopni swobody obrotów i przemieszczeń oraz modeli sieci w oparciu o metodę energetyczną Lagrange'a. Uzyskane wstępne wyniki [16, 17] są zachęcające. Będą one podstawą dla badań wg normy PN-EN 50318 i rozszerzenia oceny diagnostycznej odbieraków na linii kolejowej [22].

LITERATURA

- [1] Maciołek T., Elastyczna nakładka poprawiająca współpracę pantografu z siecią trakcyjną, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 01a, 12-16
- [2] Kaniewski M., Symulacja uniesienia przewodów jezdnych sieci trakcyjnej pod wpływem przejazdu wielu pantografów, *Czasopismo Techniczne*, T. 108, Zesz. 13 (2011)
- [3] Commission Decision of 23 July 2012 amending Decisions 2006/679/EC and 2006/860/EC concerning technical specifications for interoperability (notified under document C(2012) 4984) 2012/464/EU
- [4] Siemiński T., Jarosz T., Odbieraki prądu i ich współpraca z siecią jezdnią, Warszawa, WKŁ, 1983
- [5] Szeląg A., Mierzejewski L., Ground transportation systems. Chapter in *Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering*, Supplement I John Wiley & Sons Inc., NY, USA, 169-194, 1999 (Artykuł monograficzny)

- [6] Benet J., Cuartero N., Cuartero F., Rojo T., Tendero P., Arias E., An advanced 3D-model for the study and simulation of the pantograph catenary system, *Transportation Research Part C*, 36 (2013), 138-156
- [7] Rauter F. G., Pombo J., Ambrósio J., Chalansonnet J., Bobillot A., Pereira M. S., Contact model for the pantograph-catenary interaction, *Journal of Design and Dynamics*, vol.1, No.3 (2007), 447-453
- [8] Cho Y. H., Lee K., Park Y., Kang B., Kim K., Influence of contact wire pre-sag on the dynamics of pantograph-railway catenary, *International Journal of Mechanical Sciences*, 52 (2010), 1571-1490
- [9] Pombo J., Ambrósio J., Influence of pantograph suspension characteristics on the contact quality with the catenary for high speed trains, *Computers and Structures* 110-111 (2012), 32-42
- [10] Zhou N., Zhang W., Investigation on dynamic performance and parameter optimization design of pantograph and catenary system, *Finite Elements in Analysis and Design*, 47 (2011), Issue 3, 288-295
- [11] Kia S.H., Bartolini F., Mpanda-Mabwe, A.; Ceschi, R., Pantograph-Catenary Interaction Model Comparison, *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*
- [12] Wu T. X., Brennan M. J., Active vibration control of a railway pantograph. *Proc. of the IMechE, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 211 (1997), March 1, 117-130
- [13] Walters S., Rachid A., Mpanda A., On Modelling and Control of Pantograph Catenary Systems, *PACIFIC Conference 2011*, 8th December 2011 Amiens, France
- [14] Zhang W., Mei G., Wu X., Shen Z., Hybrid simulation of dynamics for the pantograph-catenary system. *Vehicle System Dynamics*, 38 (2002), Issue 6, 393-414.
- [15] Shin S. K., Eum K. Y., Um J. H., Contact Force Control of Pantograph-Catenary System using Block Pulse Function, *Proc. of the 7th World Congress on Railway Research (WCRR)*, June 4-8, 2006, Montréal, Canada
- [16] Wilk A., Karwowski K., Michna M., Mizan M., Skibicki J., Kaczmarek P., Modelowanie matematyczne górnej sieci trakcyjnej dla potrzeb diagnostyki odbieraków prądu. *XVI Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej: SEMTRAK 2014*, Wyd. PiT Kraków, 2014.
- [17] Wilk A., Judek S., Karwowski K., Mizan M., Modelowanie dynamiki odbieraka prądu pojazdu kolejowego do celów diagnostycznych. *Logistyka – nauka*, 2015 nr 3
- [18] PN-EN 50318:2003 Zastosowania kolejowe – Systemy odbioru prądu – Walidacja symulacji oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdnią górną, PKN, Warszawa 2003
- [19] PN-EN 50119:2009 Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacyjne – Sieć jezdnią górną trakcji elektrycznej, PKN, Warszawa 2009
- [20] PN-EN 50367:2012 Zastosowania kolejowe – Systemy odbioru prądu – Kryteria techniczne dotyczące wzajemnego oddziaływania między pantografem a siecią jezdnią górną (w celu uzyskania wolnego dostępu), PKN, Warszawa 2012
- [21] Hu C., Wan F., Parameter identification of a model with Coulomb friction for a real Inverted Pendulum System, *Control and Decision Conference, 2009. CCDC '09. Chinese*, 2009
- [22] Mizan M., Karwowski K., Karkosiński D., Monitoring odbieraków prądu w warunkach eksploatacyjnych na linii kolejowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013) nr 12, 154-160
- [23] Jarzębowicz L., Judek S., 3D Machine Vision System for Inspection of Contact Strips in Railway Vehicle Current Collectors, *2014 International Conference on Applied Electronics (AE)*, 2014, 139-144

Autorzy: dr inż. Sławomir Judek, E-mail: slawomir.judek@pg.gda.pl; dr hab. inż. Krzysztof Karwowski, E-mail: krzysztof.karwowski@pg.gda.pl; dr inż. Mirosław Mizan, E-mail: miroslaw.mizan@pg.gda.pl; dr hab. inż. Andrzej Wilk, E-mail: andrzej.wilk@pg.gda.pl; Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12 80-233 Gdańsk