

Problems of simulation of the pantograph–catenary contact line interaction in terms of interoperability

Janusz Szkopiński , Maciej Śmieszek 

Warsaw University of Technology, Faculty of Transport

Abstract: The paper presents the application of the pantograph-overhead contact line interaction simulation, which is carried out to assess the fulfillment of the essential interoperability requirements for the interoperability component, which is the overhead contact line. According to the paper's authors, carrying out model validation according to the EN 50318:2002 standard indicated in the technical specification for interoperability does not exhaust the question of the correctness of the method used. This fact is also confirmed in the literature discussed in the paper. To substantiate the above thesis, a numerical simulation was carried out in MATLAB/Simulink using a two-mass model of the pantograph and overhead contact line. As a result of the sensitivity analysis of the influence of the input data on the simulation results, conclusions were formulated to confirm the thesis in question.

Keywords: compatibility, pantograph, overhead, subsystem Energy, TSI, simulation

1. Wstęp

W celu ujednoczenia na kolejach państw UE warunków współpracy pomiędzy pojazdami (pantograf) a siecią trakcyjną (przewód jezdny) zdefiniowane zostały w technicznej specyfikacji interoperacyjności („TSI ENE”, rozporządzenie UE nr 1301/2014 [1]) odpowiednie wymagania dla podsystemu strukturalnego „Energia”.

Zakres wymagań dla podsystemu „Energia” obejmuje aspekty związane z zasilaniem energią, charakterystyką sieci trakcyjnej oraz jakością odbioru prądu oraz środkami ochrony przed porażeniem elektrycznym. Wymagania TSI ENE zostały określone zarówno na poziomie podsystemu (konfiguracja urządzeń realizowana na danym obszarze infrastruktury kolejowej) jak i na poziomie tzw. składnika interoperacyjności, jakim jest sieć trakcyjna (górną sieć jezdna). Ponadto w TSI Energia określono osobne wymagania dla oceny zgodności składnika interoperacyjności oraz weryfikacji podsystemu.



Wymagania techniczne wskazane w TSI ENE opierają się na dotychczasowej wiedzy branży elektroenergetyki w Europie oraz odwołują do znanych norm technicznych.

Article citation information:

Szkopiński, J., Śmieszek, M., (2023). Problems of simulation of the pantograph–catenary contact line interaction in terms of interoperability, WUT Journal of Transportation Engineering, 137, 5-18, ISSN: 1230-9265, DOI: [10.5604/01.3001.0053.6038](https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.6038)

*Corresponding author

E-mail address: janusz.szkopinski@pw.edu.pl (J. Szkopiński), maciej.smieszek@pw.edu.pl (M. Śmieszek)

ORCID:  [0000-0001-6654-2089](https://orcid.org/0000-0001-6654-2089) (J. Szkopiński),  [0000-0002-4622-1824](https://orcid.org/0000-0002-4622-1824) (M. Śmieszek)

Received 27 March 2023, Revised 18 April 2023, Accepted 2 May 2023, Available online 24 May 2023

Ponieważ wymagania powyższe nie stanowią znacznej nowości, spełnienie ich przez producentów sieci trakcyjnych oraz wykonawców podsystemów „Energia”, w większości przypadków, nie stanowi trudności technicznej, i w szczególności, nie powoduje to konieczności zastosowania typów sieci trakcyjnych o nowej konstrukcji.

Niewątpliwą trudnością w stosowaniu wymagań TSI ENE są kwestie wykazania (potwierdzenia zgodności) poszczególnych typów sieci trakcyjnych oraz podsystemów. W dużej mierze dotyczy to aspektu dynamicznej współpracy pomiędzy pantografem i siecią trakcyjną, która wiąże się m.in. z koniecznością przeprowadzenia nie wykonywanych dotychczas symulacji. Zgodnie z TSI ENE ponowienie oceny dla danego typu sieci trakcyjnej jest konieczne, jeżeli nie jest możliwe wykazanie, że dana konstrukcja sieci trakcyjnej została w przeszłości sprawdzona z wynikiem pozytywnym pod kątem tych samych wymagań. Tym samym, konieczność przeprowadzenia oceny zgodności m.in. poprzez symulację współpracy dynamicznej pantograf-sieć trakcyjna dotyczy nie tylko nowych typów sieci trakcyjnych, ale także typów stosowanych dotychczas.

2. Problematyka zagadnienia w literaturze

Problematyka oceny zgodności współpracy dynamicznej pantograf – sieć trakcyjna jest szeroko omawiana w literaturze szczególnie, dla zagadnień projektowania i sprawdzenia sieci trakcyjnej na liniach wysokich prędkości (powyżej 250 km/h).

W publikacji [2] przedstawiono realizację projektu pod nazwą pantoTRAIN w ramach którego, dokonano analizy zastosowania wirtualnych testów pantograf – sieć trakcyjna w celu zidentyfikowania najbardziej odpowiedniej strategii modelowania dla niezawodnej symulacji interakcji pantograf – sieć trakcyjna.

Praca została wykonana w odniesieniu do dwóch przypadków interakcji pantograf-sieć trakcyjna: pantograf Faiveley CX, poruszający się pod francuską siecią trakcyjną dużych prędkości LN2 oraz ten sam pantograf poruszający się pod niemiecką siecią trakcyjną dużych prędkości Re330.

Istotnym wynikiem projektu było wykazanie, że wyniki testów wirtualnych dobrze korelują z testami eksperymentalnymi, pod warunkiem przestrzegania ścisłych procedur modelowania. Dokonano tego poprzez określenie jakie zjawiska fizyczne miały zostać zasymulowane oraz ustalenie ogólnych wymagań modelu, które miały zostać użyte np. model sieci trakcyjnej, luz wieszaków, wielofunkcyjność pantografu itd.

Dla pantografu ustalono wymagania, które powinny uwzględniać odchylenia od ich nominalnej konstrukcji i parametrów eksploatacyjnych tj.: masy, bezwładności, geometria, sztywność sprężyn, współczynniki tłumienia i siły tarcia.

Jak wskazano w publikacji kluczowym elementem modelu skupionych mas jest uwzględnienie zmiennej w czasie sztywności sieci trakcyjnej, jako dynamicznego czynnika siły zakłócającej, oraz wartości zastosowanej masy skupionej sieci trakcyjnej. Model masy skupionej jest natomiast abstrakcją matematyczną, której parametry generalnie należy identyfikować eksperymentalnie, a nie na podstawie elementów konstrukcji.

W przedmiotowym artykule przedstawiono wyniki wykonanych trzech analiz: analizę wrażliwości w celu zbadania wpływu głównych parametrów w modelu pantografu na wyniki symulacji pantograf – sieć trakcyjna (wpływy zróżnicowania parametrów wejściowych o wielkość $\pm 10\%$ wartości nominalnej), analizę wpływu drgań implikowanych przez przedni

pantograf na współpracę z sieci jezdnej z pantografem tylnym (w odległości: 31 m, 100 m, 201 m i 400 m), analizę wpływu sił aerodynamicznych działających na pracujący pantograf. Analizy dokonano dla prędkości pociągu: 200 km/h, 250 km/h, 300 km/h i 350 km/h.

Wyniki z realizacji przedmiotowego projektu pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących istotnych czynników związanych z symulacją warunków eksploatacyjnych tj.: prędkość i statyczne obciążenia stykowe. Zauważono, iż wraz ze wzrostem prędkości amplituda sił kontaktowych znacznie rośnie, mimo że średnia wartość pozostaje zbliżona do siły statycznej zwiększonej o oddziaływanie sił aerodynamicznych. Parametry projektowe pantografu i sieci trakcyjnej wpływają natomiast w wymiernym stopniu na możliwe do zastosowania wartości graniczne sił, występujących na styku pantograf (nakładka stykowa) – drut jezdny. Składowe modelu pantografu tj. masa zastępcza, sztywność sprężyn oraz współczynniki tłumienia wpływają głównie na maksymalne i minimalne wartości siły stykowej. Wrażliwość pozostałych parametrów statystycznych na zmienność elementów modelu pantografu jest mniej istotna, jak uzyskano w badaniu zmian w zakresie +/- 10%.

Wskazano również, iż badanie charakterystyki współpracy pantografu z siecią jezdnią należy przeprowadzić przy różnych amplitudach wzbudzenia, aby określić znaczenie efektów nieliniowych w dynamicznym zachowaniu systemu.

W publikacji [3] przedstawiono wyniki dobrowolnej inicjatywy wzorcowej, która została zaproponowana i koordynowana przez Politechnikę w Mediolanie, przy uczestnictwie 10 instytucji badawczych z 9 różnych krajów w Europie i Azji.

Celem inicjatywy była ocena rozrzutu wyników badań symulacyjnych pantograf – sieć trakcyjna, wykazanie dokładności metodologii numerycznych i modeli symulacyjnych oraz określenie najlepiej dopasowanej metody modelowania do realizacji badań.

Znaczącą różnorodność podejść w modelach symulacyjnych dotyczyła wielkości parametru tłumienia sieci trakcyjnej (efekt dyssypacyjny), który stanowi istotny czynnik w modelu sieci trakcyjnej, w związku z jego wpływem na wyniki symulacji. Sam zaś model sieci trakcyjnej opisany był w różny sposób m.in. za pomocą tzw. mas skupionych (obliczenia za pomocą metody Runge-Kutta) lub za pomocą elementów skończonych MES (zastosowanie metody β -Newmark lub α -HHT).

Kontakt ślizgowy między siecią trakcyjną a pantografem rozpatrywano biorąc pod uwagę tylko składową normalną siły nacisku, pomijając wpływ tarcia. Wskazano, że większość kodów symulacyjnych wykorzystuje tak zwaną „metodę kary” – siła normalną nacisku definiuje się na podstawie penalizacji wzajemnego przenikania się nakładki stykowej i trakcyjnego przewodu jezdnej. W przypadku zastosowania dwóch pantografów, stosuje się tę samą docelową średnią siłę nacisku dla przedniego i tylnego pantografu, natomiast wymagana odległość między pantografami została ustalona na 200 m, co stanowi minimalną możliwą wartość dla zastosowań dużych prędkości w Europie zgodnie z TSI.

We wnioskach z publikacji wskazano, iż nie osiągnięto pełnego konsensusu co do sposobu modelowania kontaktu ślizgowego między pantografem a przewodem jezdny, wpływu tłumienia sieci trakcyjnej oraz wpływu sił aerodynamicznych na pantograf i sieć trakcyjną, jak również opisu nieliniowego modelu wieszaków (model luzowania wieszaków), co również ma wpływ na dokładność realizowanej symulacji.

W publikacji zasugerowano konieczność zweryfikowania i zaktualizowanie wzorca walidacji modelu numerycznego dla symulacji współpracy pantograf - sieć trakcyjna, opartego na normie EN50318.

W publikacji [4] dokonano analizy wpływu na symulację zmienność warunków wynikających z błędów instalacji sieci trakcyjnej tj.: błędy długości wieszaka, rozstawu wieszaków i wysokości podparcia.

W ocenie zastosowano metodę Monte Carlo, na podstawie funkcji gęstości prawdopodobieństwa kilku wielkości.

Przedstawione w pracy wnioski wskazały, iż błędy rozstawu wieszaków mają niewielki wpływ na dynamiczne zachowanie systemu w przeciwieństwie do błędów ich instalacji tj. długość wieszaka i wysokości wspornika. Zaproponowano również, aby modele symulacyjne uwzględniały zmiany sztywności wzdłuż przęsła oraz zmiany masy zastępczej sieci trakcyjnej, co pozwoli na uwzględnienie propagacji fal w przewodach.

Wskazano, iż na ruch pantografu duży wpływ ma rozpiętość przęsła oraz masa kolektora pantografu, natomiast źródłem efektu nieliniowości jest zachowanie wieszaków (występowanie sztywności przy rozciąganiu i jej brak przy ściskaniu) oraz występowanie chwilowego braku styku pantografu z drutem jezdny (zerowanie wartości siły styku).

W publikacji [5] zaproponowano nowy model dla symulacji pantografu z siecią trakcyjną o masie skupionej, co wynikało z potrzeby uniknięcia pewnych trudności i niedokładności wynikających z modelu pierwotnego.

Autorzy publikacji wskazali trudności wynikające z określenia masy skupionej sieci trakcyjnej stanowiącej, ich zdaniem, kluczowy czynnik w dokładności symulacji. Jak zauważyli, przy różnych wartościach masy, symulacje pantografu i sieci trakcyjnej przedstawiają różne trajektorie ruchu układu (np. przemieszczenia przewodu jezdny), co komplikuje wyznaczenie reakcji pantografu na różną zmianę sztywności i wysokości przewodu jezdny. Kolejnymi trudnościami jest uwzględnienie wpływu czynników zewnętrznych tj.: zmiany geometryczne, wady sieci trakcyjnej, silny wiatr oraz wibracje nadwozia pojazdu. Wymienione czynniki, jak wskazano w publikacji, wyniki z zastosowanego modelu mas skupionych różniły się od wyników symulacji przeprowadzonej za pomocą modelu sieci trakcyjnej w postaci elementów skończonych MES. Natomiast sam model MES, chociaż zapewnia wysoki stopień dokładności symulacji sieci trakcyjnej, ma ograniczenia wynikające z potrzeby zaangażowania znacznego czasu obliczeniowego.

Biorąc pod uwagę ww. aspekty, autorzy pracy zaproponowali rozszerzenie klasycznego modelu masy skupionej o masę dopasowaną pod względem dynamiki i sygnał zakłócający. Podejście to oparte jest na dwukrotnym przeprowadzeniu symulacji, gdzie na podstawie danych z pierwszej symulacji, dokonuje się modyfikacji parametrów wejściowych modelu.

Wyniki przeprowadzonej końcowej symulacji zostały porównane z wynikami symulacji w oparciu o model elementów skończonych MES, potwierdzając, że proponowana sieć trakcyjna z bryłami masy może bardzo dobrze odzwierciedlać dynamiczne zachowanie sieci trakcyjnej MES, nawet przy różnych prędkościach jazdy.

W literaturze krajowej zagadnienia współpracy pantograf – sieć trakcyjna szeroko omawiane są m.in. w publikacjach: [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

W publikacji [6] przedstawiono koncepcję opracowania modelu referencyjnego sieci trakcyjnej z wykorzystaniem skupionych elementów zachowawczych i dyssypacyjnych, odpowiednio rozłożonych w przestrzeni 3D i połączonych ze sobą w mechanicznych węzłach. Opracowany model referencyjny zakładał podział przewodu jezdny i liny nośnej na zbiór skupionych elementów zachowawczych (kinetycznych i potencjalnych) oraz dyssypacyjnych. Model przewodu zasilającego oraz liny nośnej oparto na ciągu

odpowiednio sprzężonych elementów 8-węzłowych, co pozwoliło na uwzględnienie zmian wartości parametrów w wyniku zużycia przewodu oraz umożliwiło na symulację interakcji sieci trakcyjnej z odbierakami prądu.

Na podstawie wykonanych pomiarów oraz danych katalogowych przewodów jezdnych określono parametry mechaniczne elementów skupionych, tj. masy węzłowych elementów bezwładnościowych, podatności zastępczych elementów sprężystych oraz współczynniki tłumienia kinetycznego zastępczych tłumików.

W publikacji [7] dokonano jakościowego porównania różnych modeli symulacji: dla dwóch modeli sieci jezdnej oraz czterech modeli odbieraków przy prędkości jazdy $V = 160$ km/h.

Rezultatami pracy było potwierdzenie prawidłowości zastosowania modeli dla prędkości jazdy pociągów do 160 km/h (z wyjątkiem modelu jedno-masowego). W przypadku natomiast wyższych prędkości, wskazano konieczność użycia modelu odbieraka o większej liczbie stopni swobody. Dla przypadku natomiast sieci trakcyjnej o relatywnie dużym współczynniku nierównomierności elastyczności ($\alpha \approx 0,3$), uzyskano niezgodne z wymaganiami normy statystyczne wartości maksymalnej i minimalnej siły stykowej, co zdaniem autorów publikacji, wymaga odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych, zmniejszających nierównomierność elastyczności w obszarze przęsła zawieszenia.

W publikacji [8] przedstawiono analizę różnych modeli symulacyjnych uwzględniając parametry wskazane w normie PN-EN 50318, zdefiniowane dla modelu referencyjnego.

Zdaniem autorów publikacji: „...model referencyjny z założenia nie reprezentuje struktury mechanicznej konkretnej sieci. Jego zadaniem jest walidacja dowolnej metody symulacji, zwłaszcza stanów dynamicznych w układzie sieć jezdna – odbieraki prądu. Jeśli testowana metoda symulacji zostanie pozytywnie zweryfikowana na podstawie modelu referencyjnego, to może zostać dopuszczona do użytkowania”.

Analiza powyższej literatury skłoniła autorów pracy do utworzenia w środowisku MATLAB/Simulink dwumasowego modelu symulacyjnego pantograf – sieć trakcyjna. Celem takiego podejścia jest sprawdzenie faktycznej podatności modelu na uzyskanie błędnych wyników symulacji na skutek przyjęcia różnych wartości parametrów wejściowych w modelu. Rozbieżność danych wejściowych przyjęto na poziomie $\pm 20\%$, biorąc pod uwagę dostępne informacje z przeprowadzanych symulacji dla potrzeb oceny zgodności typu sieci trakcyjnej z wymaganiami TSI.

3. Model symulacyjny

Jednym z sposobów oceny współpracy dynamicznej pantograf – sieć jezdna jest ustalenie wielkości siły styku odbieraka pantografu z przewodem jezdny oraz wysokość uniesienia przewodu jezdny przy ramieniu odciągowym.

Wielkości te są ocenione na podstawie symulacji komputerowej, wykonanej dla określonego typu sieci trakcyjnej i typu pantografu, z uwzględnieniem prędkości maksymalnej na linii kolejowej oraz oddziaływania pojedynczego lub dwóch pantografów.

Siła styku i uniesienie przewodu analizowane są z punktu widzenia zachowania obszaru pracy pantografu, gdzie wartość minimalna siły decyduje o zjawisku właściwej przewodności elektrycznej między nakładką pantografu a drutem jezdny (minimalizacja

łuków elektrycznych), natomiast wartość maksymalna decyduje o wytrzymałości mechanicznej materiałów oraz właściwości cieplnych przewodu jezdnego.

Zgodnie z TSI ENE [1] powyższe wymagania powinny spełniać parametry: przestrzeń, w której następuje uniesienie ramienia odciągowego, powinna wynosić nie mniej niż $2 \times S0$, natomiast odchylenie standardowe przy maksymalnej prędkości powinno wynosić $\sigma_{max} = 0,3 Fm$.

Wielkość $S0$ jest to obliczone, symulowane lub zmierzone uniesienie przewodu jezdnego przy ramieniu odciągowym, występujące w normalnych warunkach eksploatacyjnych, dla jednego lub większej liczby pantografów wywierających maksymalną siłę równą górnej granicy Fm przy maksymalnej prędkości na linii.

Jeżeli uniesienie ramienia odciągowego jest fizycznie ograniczone poprzez konstrukcję sieci trakcyjnej, dopuszczalne jest zmniejszenie niezbędnej przestrzeni do $1,5 S0$ (norma EN 50119:2009, pkt 5.10.2).

Zgodnie z instrukcją zarządcy infrastruktury kolejowej PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (instrukcja Iet-107 z 2019 r. pkt. 6.6 oraz instrukcja Iet-2 z 2020 r., §18, pkt. 5), odległość pionowa od przewodów jezdnych do dolnej krawędzi wysięgu pomocniczego wynosić ma nie mniej niż 200 mm dla $v \leq 160$ km/h oraz 250 mm dla $v > 160$ km/h. Ponadto, według „Iet-107”, przestrzeń dla bezkolizyjnego uniesienia przewodów jezdnych pod konstrukcją wsporczą przy niesprzyjających warunkach aerodynamicznych, powinna odpowiadać podwójnej wielkości uniesienia w normalnych warunkach pracy przez jeden lub kilka pantografów przy średniej sile nacisku Fm i dla maksymalnej prędkości jazdy. Wielkość uniesienia w normalnych warunkach pracy powinna wynosić więcej niż 100 mm.

W przypadku siły stykowej, średnia siła stykowa Fm powinna mieścić się w wartościach: $0,00072 v^2 + 90 < Fm < 0,00097 v^2 + 110$, natomiast maksymalna wartość Fm powinna mieścić się w zakresie trzech odchyżeń standardowych: $F_{max} \leq Fm + 3 \sigma_{max}$.

W przypadku wartości chwilowych, maksymalna siła stykowa nie powinna przekroczyć wartości 300N przy prędkościach do 200 km/h oraz 400N przy prędkościach powyżej 200 km/h, minimalna natomiast siła stykowa musi być również zawsze większa od zera (dane określone w normie EN 50119:2009, tabela 4, pkt 5.2.5.2).

Rekomendowanym sposobem oceny zgodności projektów sieci trakcyjnej i podsystemu „Energia” w zakresie charakterystyki dynamicznej i jakości odbioru prądu jest zastosowanie narzędzia do symulacji zatwierdzonego zgodnie z normą EN 50318:2002 (dalej jako „norma”).

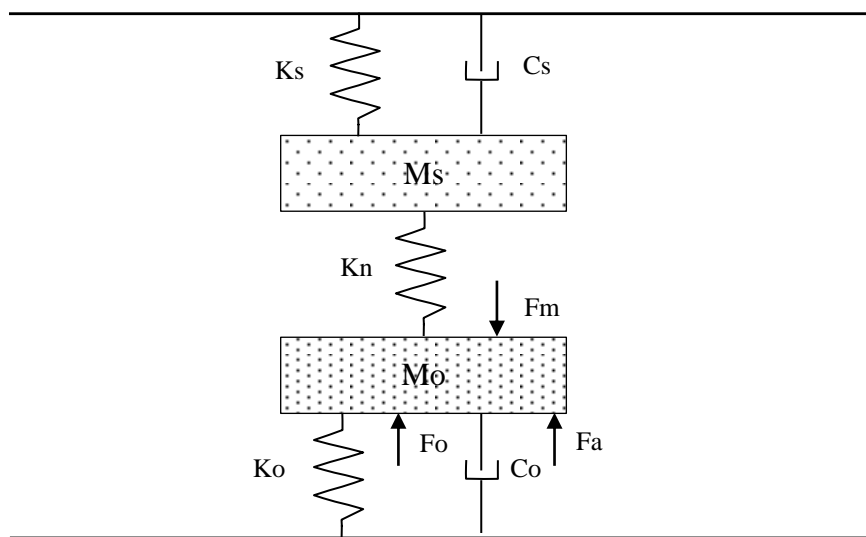
Dla celów symulacji oraz analizy wyników należy uwzględnić reprezentatywne elementy (na przykład tunele, przejazdy, odcinki neutralne itd.), natomiast symulacje należy przeprowadzić przy użyciu co najmniej dwóch różnych typów pantografów zgodnych z TSI przy odpowiedniej prędkości i systemie zasilania.

Symulację należy przeprowadzić zarówno przy zastosowaniu jednego pantografu, jak i kilku pantografów umieszczonych w odległościach zgodnych z wymaganiami określonymi w TSI ENE (rozstaw pantografów na potrzeby konstrukcji trakcyjnej).

Dopuszczenie sieci trakcyjnej jest możliwe wtedy, gdy symulowana jakość odbioru prądu jest zgodna w zakresie wznoszenia się, średniej siły nacisku oraz odchylenia standardowego dla każdego z pantografów.

Model symulacyjny został utworzony w programie MATLAB/Simulink w oparciu o wymagania sformułowane w normie, do rozwiązania równań różniczkowych zastosowano metodę Ode45 Dormand Prince.

Względem modelu referencyjnego wprowadzono uproszczenia polegające na przedstawieniu sieci trakcyjnej i konstrukcji pantografu jako model o parametrach dyskretnych (rys. 1) w postaci układu z wyróżnieniem sztywności nakładki stykowej [7, 8], przy założeniu, iż nie występuje przerwa stykowa pomiędzy drutem jezdnym a ślizgaczem pantografu.



Rys. 1. Model dwumasowy pantograf – sieć jezdna (źródło: opracowanie własne na podstawie normy EN 50318:2002)

Siłę średnią, siły minimalne i maksymalne oraz wielkość uniesienia przewodu jezdnego w czasie biegu pociągu wyznacza się na podstawie przebiegu drgań układu opisanego równaniami różniczkowymi zupełnymi drugiego rzędu:

$$\begin{cases} F_m = K_n (y_0 - y_s) \\ M_s \ddot{y}_s + C_s \dot{y}_s + K_s y_s - F_m = 0 \\ M_o \ddot{y}_0 + C_o \dot{y}_0 + K_o y_0 - F_m = F_0 + F_a \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

M_s – masa zredukowana sieci trakcyjnej,

M_o – masa zastępcza odbieraka prądu,

C_s – zastępczy współczynnik tłumienia sieci trakcyjnej,

C_o – zastępczy współczynnik tłumienia odbieraka prądu,

K_s – sztywność sieci trakcyjnej w funkcji drogi dla ustalonej prędkości jazdy,

K_o – sztywność konstrukcji pantografu,

K_n – sztywność nakładki stykowej,

y_0 – uniesienie odbieraka,

y_s – uniesienie sieci trakcyjnej,

$F_a = 0,00097 * V^2$ – siła aerodynamiczna działająca na pantograf,

F_0 – siła statyczna pantografu według normy PN-EN 50367:2006.

W wyliczeniach uwzględnia się sztywności sieci trakcyjnej, wzór (2), na podstawie zależności przedstawionych w instrukcji PKP Polskie Linie Kolejowe Iet-107.

$$K_s = K_0 \left[1 + u \cos \left(\frac{2\pi V}{L} t \right) \right] \quad (2)$$

$$K_0 = \left(\frac{1}{e_{\max}} + \frac{1}{e_{\min}} \right) / 2 \quad (3)$$

$$u = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\max} + e_{\min}} 100 [\%] \quad (4)$$

gdzie:

e_{\max} – maksymalna elastyczność sieci,

e_{\min} – minimalna elastyczność sieci,

L – rozpiętość przęsła,

V – prędkość maksymalna na linii kolejowej,

t – moment czasu jazdy pociągu na odcinku przęsła.

W oparciu o dane referencyjne (według aneksu A normy) oraz podanych wyżej zależności, przyjęto do symulacji następujące dane wejściowe:

1. Parametry ruchu: prędkość pociągu $V = 250$ [km/h], czas symulacji jazdy $t = 10$ [s] (wymagany czas na 10 przęsłach wynosi 8,64 [s]).
2. Parametry sieci trakcyjnej: długość przęsła naprężenia $L = 60$ [m], masa zastępcza $M_s = 11$ [kg], sztywność sieci $K_{sr} = 4365$ [N/m], współczynnik nierównomierności elastyczności sieci $\alpha = 0,49$, współczynnik tłumienia wiskotycznego sieci $C_s = 0,5$ [Ns/m].
3. Parametry pantografu: masa zastępcza $M_o = 15$ kg, sztywność pantografu $K_o = 49$ [N/m], zastępczy współczynnik tłumienia odbieraka prądu $C_o = 104$ [Ns/m], siła statyczna pantografu $F_o = 120$ [N]; siła aerodynamiczna $F_a = 0$ [N] (w modelu referencyjnym nie uwzględnia się działania sił aerodynamicznych).
4. Elastyczność sieci wyznaczono na podstawie sił naciągu w drucie jezdnym oraz siły naciągu w linii nośnej (tabela A.3 normy), długości przęsła, lokalizacji mocowania wieszaków (jak w tabeli A.2 normy), biorąc pod uwagę dystans 1 wieszaka od konstrukcji wsporczej oraz odległość między wieszakami w środku przęsła.
5. Masę zastępczą sieci trakcyjnej wyznaczono w oparciu o założenie, że siły naprężenia (występująca w sieci) równoważą siłę ciężkości działającej na sieć trakcyjną (gęstość jednostkowa drutu jezdny i liny nośnej podane są w tabeli A.3 normy). Zakłada się, iż działanie sił powoduje określone odkształcenie drutu jezdny (zmiany kierunku wektorów sił), implikując ugięcie druty jezdny. Maksymalne zaś ugięcie drutu jezdny oblicza się według zależności zdefiniowanej w publikacji [10].
6. Współczynnik dyssypacji (tłumienie sieci trakcyjnej) przyjęto według publikacji [7].
7. Masę zastępczą dla pantografu przyjęto jako masę ślizgacza zwiększoną o połowę masy ramy przegubowej.
8. Sztywność pantografu obliczono jako sumę (odwrotności) sztywności połączenia ślizgacza z ramą przegubową oraz ramy przegubowej z podstawą odbieraka.
9. Zastępczy współczynnik tłumienia odbieraka prądu jako sumę dyssypacji między ślizgaczem, ramą przegubową oraz podstawą odbieraka.

4. Walidacja modelu symulacyjnego

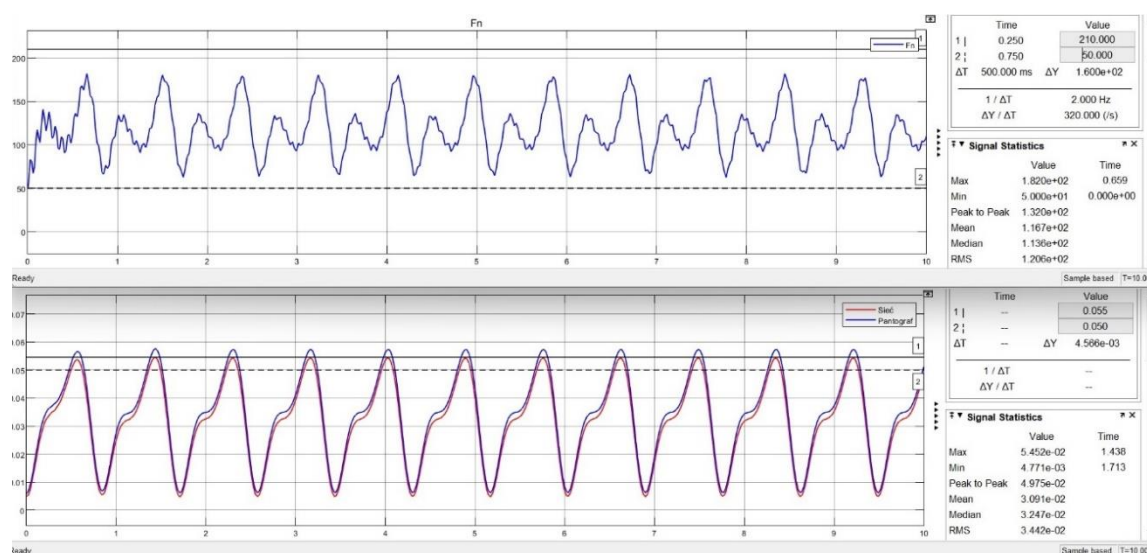
Walidację modelu symulacyjnego realizuje się na podstawie specyfikacji modelu referencyjnego podanego w załączniku A normy EN 50318:2002. Model referencyjny stanowi dyskretny model dwumasowy, który odwzorowuje powiązanie obiektów fizycznych

tj. pantograf i drut jezdny sieci trakcyjnej. W tabeli A.1. ww. normy zdefiniowane są dane wejściowe dla modelu referencyjnego tj.: sztywność nakładki stykowej, drutu jezdnego oraz ramienia pantografu, efektywna masa dynamiczna oraz właściwości tłumienia dla drutu jezdnego oraz ramienia pantografu. W modelu referencyjnym, w celu walidacji modelu, pomija się siłę aerodynamiczną, natomiast siłę statyczną przyjmuje się o wartości 120 N.

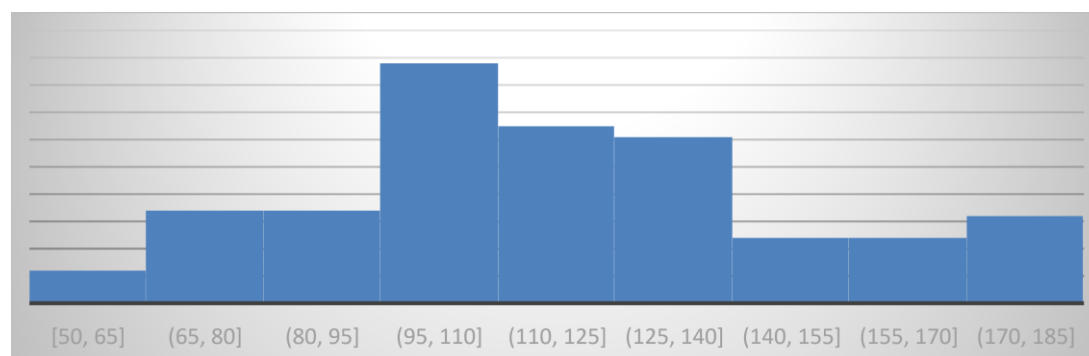
W specyfikacji do modelu referencyjnego uwzględnia się również konstrukcję sieci trakcyjnej m.in. długość przęsła, odległość między wieszakami, siłę naprężenia w drucie jezdnym i w linii nośnej. Na podstawie tych danych oblicza się odwrotność średniej elastyczności sieci trakcyjnej (średnia sztywność sieci) oraz współczynnik nierównomierności elastyczności, jak również wyznacza się sztywność drutu jezdnego w zależności od odległości od podpory sieci trakcyjnej.

Uzyskane w symulacji wyniki porównuje się zdefiniowanymi w modelu referencyjnymi przedziałami wartości dopuszczalnych w zakresie: średniej siły stykowej, odchylenia standardowego od wartości średniej siły stykowej, wartość maksymalna i minimalna chwilowej siły stykowej oraz maksymalne uniesienie przewodu jezdnego.

Uzyskane wyniki siły stykowej, uniesienia pantografu i drutu jezdnego oraz wykres siły styku w postaci histogramu przedstawione są na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Wykres siły stykowej oraz uniesienia pantografu i sieci trakcyjnej (źródło: opracowanie własne)



Rys. 3. Histogram siły stykowej dla przeprowadzonej symulacji (opracowanie własne)

Walidacja wyników siły stykowej: średnia, maksymalna, minimalna, odchylenie statystyczne 3 sigma oraz maksymalnego uniesienie drutu jezdniego zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie uzyskanych wyników do wartości wg. Normy EN 50318:2002

Źródło	Parametr	Wartość	Parametr	Wartość	Parametr	Wartość	Parametr	Wartość
Norma	F_m , górne [N]	120	Sigma, górne	31	F_m stat_max, górne [N]	210	F_m stat_min, górne [N]	40
Norma	F_m , dolne [N]	110	Sigma, górne	26	F_m stat_max, dolne [N]	190	F_m stat_min, dolne [N]	20
Wynik	Średnia F_m [N]	117	Sigma	30	F_m stat, max. [N]	208	F_m stat, min. [N]	25
Wynik	Wymaganie	Spełnia	Wymaganie	Spełnia	Wymaganie	Spełnia	Wymaganie	Spełnia
Norma	F_m chwilowe_max, górne [N]	210	F_m chwilowe_min, górne [N]	75	Uniesienie drutu jezdnego (max, górne) [mm]	55		
Norma	F_m chwilowe_max, dolne [N]	175	F_m chwilowe_min, dolne [N]	50	Uniesienie drutu jezdnego (max, dolne) [mm]	50		
Wynik	F_m , max [N]	182	F_m , min [N]	62	Y_{st} max. [mm]	54		
Wynik	Wymaganie	Spełnia	Wymaganie	Spełnia	Wymaganie	Spełnia		

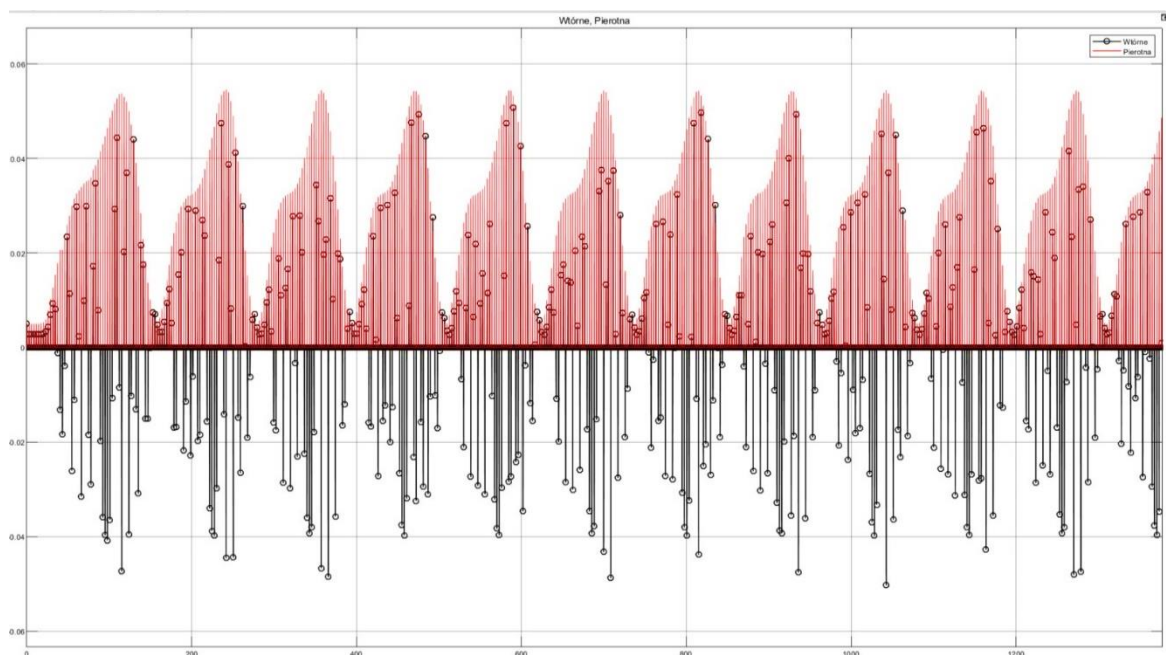
Na podstawie powyższego sprawdzenia, model został zwalidowany według wymagań normy EN 50318:2002.

Dla celów poglądowych dokonano również analizy tłumienia drgań drutu jezdniego w celu sprawdzenia faktycznego maksymalnego uniesienia przewodu na kolejnym pantografie.

Amplituda fali na drugim pantografie będzie superpozycją fal (sumą amplitudy pierwotnej i wtórnej), wynikającą z przeniesienia tłumionych drgań od drgań na pierwszym pantografie (amplituda wtórna).

Przyjmuje się, że dla prędkości pociągu $V = 250$ km/h (69,44 [m/s]), odległość między pantografami wynosi 200m, a poszukiwana amplituda dla fali tłumionej (wtórnej) będzie przesunięta w czasie o wartość: $T = 200 / 69,44 = 2,88$ [s].

Uzyskane wyniki przedstawione są na rys. 4, gdzie kolorem szarym przedstawiona jest zmiana wartości amplitudy uniesienia sieci na skutek działania pantografu. Kolorem czarnym (znaczniki w postaci kół) natomiast przedstawiona jest wartość amplitudy fali stłumionej, która nastąpi po czasie T . Suma tych dwóch amplitud stanowi wartość maksymalnego uniesienia drutu jezdniego podczas jazdy pociągu, zaś wartość ta, nie powinna przekraczać wskazanych przez zarządcę infrastruktury wartości S_0 , przykładowo według instrukcji PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. wartości 100 mm (jak opisano w punkcie 3).



Rys. 4. Amplituda fali pierwotnej i wtórnej na drugim pantografie (opracowanie własne)

5. Analiza wrażliwości

Potwierdzenie spełnienia wymagań normy EN 50318:2002 (walidacja) nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie, iż przeprowadzona symulacja prawidłowo opisuje badane zjawiska dynamiczne współpracy pantograf – drut jezdny. Problemem jest bowiem właściwe dobranie parametrów wejściowych do modelu (zastępcza masa, sztywność, zastępczy współczynnik tłumienia), aby mieć pewność, iż nieprecyzyjne przyjęcie wartości wejściowych spowoduje znaczący błąd w uzyskanych wynikach symulacji.

Ocenę „podatności” modelu na zmianę wartości wyjściowych w wyniku zmiany wartości wejściowych można dokonać za pomocą analizy wrażliwości. Jak przedstawiono w tabeli 2 w wierszu 3, wielkości wejściowe (1-7 kolumna tabeli) są modyfikowane w przedziale $\pm 20\%$, natomiast wyniki symulacji tj.: średnia siła stykowa, odchylenie standardowe, siła stykowa z uwzględnieniem odchylenia standardowego, maksymalna i minimalna chwilowa wartość siły stykowej oraz maksymalne i minimalne uniesienie drutu jezdny, wraz z ich procentowym odchyleniem od wartości podanych w wierszu 3, zestawione są w kolumnach 8–23. W wierszu 14 dodatkowo została sprawdzona podatność modelu na zmianę metody obliczenia równań różniczkowych (Ode23 Bogacki Shampine), jako czynnika wpływającego na wyniki obliczeń, niezależnie od dokładności danych wejściowych. W przypadku wyników o mniejszej wartości bezwzględnej niż wartości podane w wierszu 14, dla wierszy 2 – 14 w kolumnach 8 – 23, znaczenie odchylenia wyniku jest pomijalne.

Z przedstawionych w tabeli 2 wyników można zauważyć, iż największe znaczenie na prawidłowość wykonania symulacji ma prawidłowe ustalenie masy zastępczej i sztywności sieci trakcyjnej, odpowiednio odchylenie statystyczne siły stykowej: -27% i 11% oraz -20% i 16%, jak również masy zastępczej i współczynnika tłumienia pantografu odpowiednio: 20% i -19% oraz -19% i 8%.

Tabela 2. Wyniki analizy wrażliwości zmian wartości w modelu

l.p	Ms	Kśr	alfa	Cs	Mp	Kp	Cp	Fśr	zm.	σ [N]	zm.	Fśr+3*σ	zm.	Fśr-3*σ	zm.
	[kg]	[N/m]		[Ns/m]	[kg]	[N/m]	[Ns/m]	[N]	[%]		[%]	[N]	[%]	[N]	[%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	11	4365	0,49	0,5	15	49	104	117	-	30,4	-	208,2	-	25,8	-
2	8,8							117	0	32,1	6	213,3	2	20,7	-20
3	13,2							117	0	29,0	-5	204,0	-2	30,0	16
4		5238	0,49					117	0	32,7	8	215,1	3	18,9	-27
5		3492	0,49					116	-1	31,0	2	209,0	0	23,0	-11
6				0,4				117	0	30,4	0	208,2	0	25,8	0
7				0,6				117	0	30,5	0	208,5	0	25,5	-1
8					12			117	0	28,7	-6	203,1	-2	30,9	20
9					18			117	0	32,0	5	213,0	2	21,0	-19
10						39,2		117	0	30,7	1	209,1	0	24,9	-3
11						58,8		116	-1	30,2	-1	206,6	-1	25,4	-2
12							83,2	117	0	32,0	5	213,0	2	21,0	-19
13							124,8	116	-1	29,4	-3	204,2	-2	27,8	8
14	Metoda Ode23(Bogacki-Shampine)							117	0	30,4	0	208	0	25	-3

l.p	Ms	Kśr	alfa	Cs	Mp	Kp	Cp	Fmax	zm.	Fmin	zm.	Ymax	zm.	Ymin	zm.
	[kg]	[N/m]		[Ns/m]	[kg]	[N/m]	[Ns/m]	[N]	[%]	[N]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	11	4365	0,49	0,5	15	49	104	182	-	62	-	55	-	5	-
2	8,8							185	2	60	-3	56	2	5	0
3	13,2							178	-2	65	5	54	-2	5	0
4		5238	0,49					185	2	57	-8	49	-11	3	-40
5		3492	0,49					182	0	63	2	67	22	5	0
6				0,4				182	0	62	0	55	0	5	0
7				0,6				182	0	62	0	55	0	5	0
8					12			179	-2	68	10	57	4	5	0
9					18			182	0	55	-	53	-4	5	0
10						39,2		183	1	62	0	55	0	5	0
11						58,8		181	-1	62	0	54	-2	5	0
12							83,2	182	0	54	-	55	0	3	-40
13							124,8	181	-1	69	11	54	-2	5	0
14	Metoda Ode23(Bogacki-Shampine)							178	-2	66	6	54	-2	5	0

W przypadku wyznaczenia minimalnej siły stykowej istotne są parametry pantografu tj. masa zastępcza i współczynnik tłumienia odpowiednio: 10% i -11% oraz -13% i 11%. Dla maksymalnego uniesienia drutu jezdnego kluczowe jest ustalenie prawidłowych wartości sztywności sieci trakcyjnej – odchylenie wyniku wynosi -11% i 22%.

W przypadku wyników dla średniej siły stykowej oraz dla maksymalnej chwilowej siły stykowej, odchylenie $\pm 20\%$ nie ma znaczącego wpływu na wynik, wartości mieszają się w zastosowanym przybliżeniu zaokrąglenia siły do wartości całkowitych oraz w granicach odchyżeń dla zastosowanej metody obliczeń różniczkowych.

6. Wnioski

Właściwe zrozumienie wymagań TSI Energia w zakresie dynamicznej współpracy pomiędzy pantografem i siecią trakcyjną, a w konsekwencji opracowanie odpowiedniego modelu symulacyjnego pozwala nie tylko na osiągnięcie zgodności z wymaganiami

prawnymi TSI, ale także stanowi punkt wyjścia do integracji z innymi rozwiązaniami oraz zastosowania w nowych obszarach.

Sieć trakcyjna podlega ocenie zgodności na poziomie oceny składnika interoperacyjności, a także po wybudowaniu na poziomie podsystemu. W przypadku linii kolejowych o prędkościach od 160 km/h konieczna jest weryfikacji współpracy pantograf – sieć trakcyjna w drodze pomiarów. Możliwość symulacji w przedmiotowym zakresie, przy przyjęciu pomierzonych wartości parametrów, może służyć weryfikacji rozwiązań dla sunięcia stwierdzonych niezgodności w tym zakresie.

Zastosowanie modelu symulacyjnego wymaga odpowiedniej walidacji, jak i doboru prawidłowych danych wejściowych. Kluczowymi parametrami dla ustalenia siły stykowej i odchylenia jej wartości statystycznej oraz uniesienia drutu jezdnego są wartości masy zastępczej i sztywności sieci trakcyjnej, natomiast dla minimalnej wymaganej wartości siły stykowej parametry pantografu tj. masa zastępcza i współczynnik tłumienia.

Wykorzystanie symulacji w oparciu o pomierzone wartości może wspomagać analizę degradacji i stanowić element modeli predykcyjnych stosowanych na etapie utrzymania. Dzięki cyfrowej postaci modelu symulacyjnego możliwa jest jego integracja z innymi rozwiązaniami analizującymi stan infrastruktury oraz rozwiązaniami w zakresie cyfrowego modelu całej infrastruktury kolejowej (tzw. cyfrowego bliźniaka).

References

1. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1301/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. „w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Energia” systemu kolei w Unii”. Dz. U. L 356 z 12.12.2014, s. 179.
2. Hanley, R. (2012). PANTOgraph and catenary interaction: Total Regulatory Acceptance for the Interoperable Network. UNIFE – The European Rail Industry. Brussels.
3. Bruni, S., Ambrosio, J., Carnicero, A., Cho, Y.H., Finner, L., Ikeda, M., Kwon, S.Y., Massat, J.P., Stichel, S., Tur, M., Zhang, W. (2015). The results of the pantograph–catenary interaction benchmark, *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 53:3, 412-435, DOI: 10.1080/00423114.2014.953183.
4. Gregori, S. (2018). Efficient simulation of the pantograph-catenary dynamic interaction. Catenary optimisation and installation error analysis. Department of Mechanical and Materials Engineering of Universitat Politècnica de València. Valencia, PhD Thesis.
5. Huayu Duan, Roger Dixon & Edward Stewart (2022): A disturbance observer based lumped-mass catenary model for active pantograph design and validation, *Vehicle System Dynamics*, DOI: 10.1080/00423114.2022.2085586.
6. Kaczmarek, P., Karwowski, K., Kuciński, M., Michna, M., Skibicki, J., Wilk, A. (2014). Model referencyjny sieci trakcyjnej – koncepcja modelowania, *Zeszyt Naukowy Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, ISSN 2353-1290, nr 40/2014.
7. Judek, S., Karwowski, K., Mizan, M., Wilk, A. (2015). Modelowanie współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, r.91, nr 11/2015.
8. Karwowski, K. (red.) (2020). Energetyka transportu zelektryfikowanego. Poradnik inżyniera, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, ISBN 978-83-7348-800-7.
9. Szelaż, A. (2019). Trakcja elektryczna – podstawy, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, ISBN: 978-83-7814-857-9.
10. Mierzejewski, L., Szelaż, A. (2000). *Ground Transportation Systems*, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. 194, John Wiley & Sons, Inc., 169.
11. Maciołek, T. (2012). Aspekty projektowania sieci trakcyjnych kolei dużych prędkości, *Technika Transportu Szynowego*, nr 10/2012.
12. Bryja, D., Prokopowicz, D. (2016). Dyskretno-ciągły model obliczeniowy sprzężonego układu dynamicznego: pantograf - napowietrzna sieć trakcyjna, *Przegląd Komunikacyjny*, r. 71, nr 5, 44-51.

13. Bryja, D., Popiołek, A. (2017). Analiza drgań wieszara ciągnowego jako modelu kolejowej sieci trakcyjnej obciążonej ruchem pantografów, *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, t. 34, z. 64, nr 2, 177-190.
14. Szelaąg, A., Maciołek, T., Mierzejewski, L., Freliszka, J., Zgiep, J. (2008). Wytyczne projektowania, budowy i odbioru sieci trakcyjnej oraz układu zasilania 2×25 kV AC dla prędkości jazdy $V \leq 350$ km/h. Praca zbiorowa: CBP-BBK „Kolprojekt” sp. z o.o. i Zakład Trakcji Elektrycznej PW, Warszawa.
15. Kaniewski, M. (2013). Model matematyczny odbieraka prądu i sieci jezdnej, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*. 95, 209-220.

Problematyka symulacji współpracy pantograf – sieć trakcyjna w aspekcie interoperacyjności

Streszczenie: W pracy przedstawiona została problematyka zastosowania symulacji współpracy pantografu z siecią trakcyjną, która realizowana jest w celu oceny spełnienia wymagań zasadniczych interoperacyjności dla składnika interoperacyjności, jakim jest sieć trakcyjna. Zdaniem autorów pracy, przeprowadzenie walidacji modelu według wskazanej w technicznej specyfikacji interoperacyjności normy EN 50318:2002, nie wyczerpuje kwestii prawidłowości zastosowanej metody. Fakt ten jest również potwierdzony w literaturze, która została omówiona w pracy. Dla potrzeb uzasadnienia powyższej tezy, przeprowadzona została w programie MATLAB/Simulink symulacja numeryczna z wykorzystaniem dwu-masowego modelu pantografu i sieci trakcyjnej. W wyniku analizy wrażliwości wpływu danych wejściowych na wyniki symulacji zostały sformułowane wnioski potwierdzające przedmiotową tezę.

Słowa kluczowe: model, pantograf, sieć trakcyjna, TSI, walidacja, symulacja

