

Maciej Kozłowski¹

Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej

Symulacja i analiza przebiegu pracy napędu tramwaju w okresach zerwania przyczepności

1. WPROWADZENIE

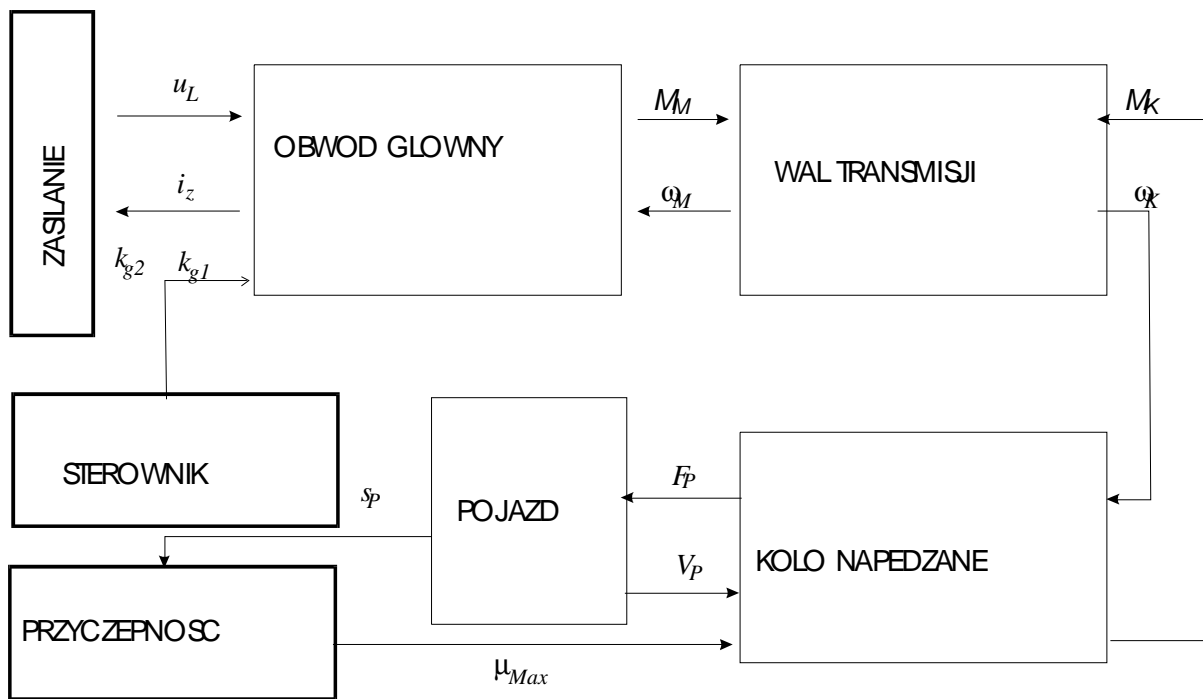
Prawidłowa współpraca koła z szyną odbywa się w zakresie mikroślizgu. W tej strefie, ślizg jest efektem odkształceń sprężystych powierzchni kontaktowych, a siła przyczepności rozwija się proporcjonalnie do prędkości ślizgu. Zerwania przyczepności kół napędzanych pojazdów szynowych są zjawiskiem niebezpiecznym ruchowo obniżającym trwałość eksploatacyjną pojazdu. Są jednym z czynników sprzyjających intensyfikacji zużycia mechanicznych elementów układu napędu, w tym powierzchni tocznych kół napędzanych. Takie ponadprzeciętne zużycia kół występowały np. na kolei Jura Bahn, w metrze Warszawskim w pojazdach typu Metropolis, w lok. Bombardier 12X, Siemens S252, a także w lokomotywie EP09. Do najważniejszych form zużycia kół można zaliczyć owalizację (odkształcenie kształtu koła – lub płaskie miejsce na kole) lub poligonizację (kształt wielokątny). Odpowiednie formy zużycia falistego występują też na szynach jezdnych np. falistość prostego odcinka szyny lub połączenie szynowe albo rozjazd oraz nierówności główki szyn typu korrugacja. Odkształcenia te mogą być przyczyną zwiększonych oddziaływań dynamicznych w kontakcie koła z szyną powodując przekraczanie nacisków dopuszczalnych koła na nawierzchnię szyny powodując eksploatacyjne wady kół lub szyn. Wady szyn lub kół mogą prowadzić do wypadków.

W okresie zerwania przyczepności dochodzi do istotnej zmiany warunków pracy silników trakcyjnych. Zmiany te mogą być widoczne w przebiegach elektrycznych zmiennych stanu obwodu głównego. W nowoczesnych układach napędowych w warunkach eksploatacyjnych stan tych zmiennych jest precyzyjnie kontrolowany. Artykuł poświęcony jest problemowi analizy cech charakterystycznych przebiegu prądu napędu tramwaju w okresach zerwania przyczepności. Problem podjęto dla tramwajów z silnikami szeregowymi prądu stałego. W napędach tych okresy zerwania przyczepności są dodatkowo niebezpieczne ze względu na możliwość uszkodzeń komutatora.

2. MODEL SYMULACYJNY UKŁADU NAPĘDU TRAMWAJU

Podstawową strukturę modelu symulacyjnego układu napędu tramwaju przedstawia rys. 1. Model symulacyjny składa się z modeli następujących podzespołów układu napędu: zasilanie, obwód główny z układem sterowania, wał transmisji, koło napędzane z funkcją zadawania zmiennych warunków przyczepności układu koło – szyna i z bloku nadwozia pojazdu. Wielkości sprzęgające poszczególne elementy modelu oznaczono następująco: i_z – prąd sieci zasilającej (w obwodzie zasilania) lub dławika filtra wejściowego (w obwodzie głównym), u_L – napięcie sieci jezdnej (w obwodzie zasilania) lub wejściowe obwodu głównego, k_g – stan łączeniowy przerywacza obwodu głównego opisany funkcją dwuwartościową (0 – wyłączony, 1 – włączony), M_M – moment obrotowy silnika trakcyjnego, ω_M – prędkość kątowna twornika lub wału silnika, M_K – moment obrotowy koła napędzanego, ω_K – prędkość kątowna koła napędzanego, F_P – siła pociągowa (przyśpieszająca pojazd) wytworzona na kole napędzanym, V_P – prędkość jazdy, s_P – ślizg w układzie koło szyna, μ_{Max} – maksymalna wartość przyczepności układu koło szyna.

¹ mkozlo@it.pw.edu.pl



Rys. 1. Struktura modelu symulacyjnego. Symbole opisane w tekście.

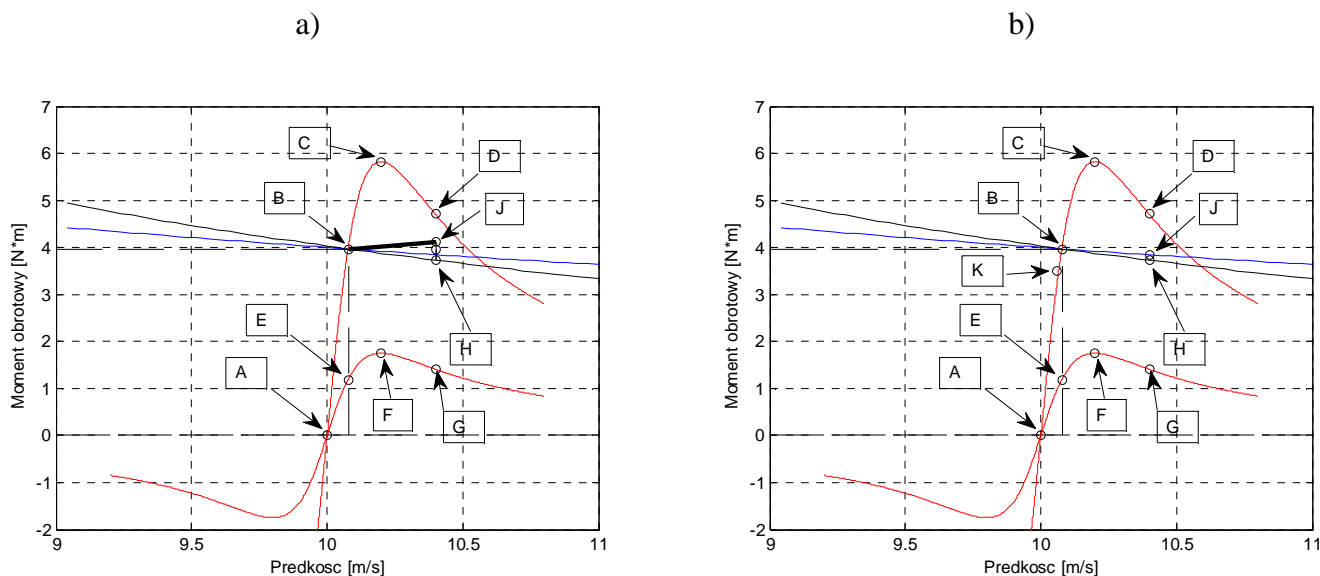
W celu opracowania modelu przyjęto m.in. następujące założenia podstawowe: urządzenia układu modeluje się za pomocą elementów o parametrach skupionych; w opisie oddziaływań dynamicznych elementów układów napędu nie uwzględnia się więzów nieholonomicznych; nieliniowości oddziaływań elementów układu opisują człony funkcyjne, których wartości w otoczeniu dt chwili t traktuje się jako chwilowo stałe parametry; ruch pojazdu modeluje się jako zmianę położenia bryły sztywnej, przy czym bryła opisująca pojazd porusza się po idealnej prostej bez możliwości ruchów poprzecznych i pionowych; w układzie koła z szyną rozpatruje się poślizgi wzdłużne kół o stałych promieniach (pomija się poślizg poprzeczny i wiertny) przy czym uwzględnia się wyłącznie jeden rodzaj deformacji kół - odkształcenie sprężyste i związany z nim mikroślizg sprężysty; do wyznaczania sił pociągowych stosuje się zależność współczynnika przyczepności w funkcji poślizgu wyznaczoną eksperymentalnie, w opisie działania elektrycznego obwodu głównego uwzględnia się proces przełączania zaworów sterowanych i nieliniowości charakterystyk magnesowania silników; w modelowaniu wałów transmisji układu mechanicznego przeniesienia momentu obrotowego na zestaw kołowy zakłada się współosiowość wałów napędu; wypadkowy model badań symulacyjnych napędu otrzymuje się przy założeniu, że warunki pracy dla wszystkich kół napędu tramwaju są identyczne.

Równania modelu matematycznego układu napędu przedstawiono w [1].

Ze względu na sposób sterowania prędkością pojazdu w zamkniętym układzie regulacji (stabilizacji momentu) można rozróżnić dwa przypadki zerwania przyczepności koła napędzanego: a) dla maszyny trakcyjnej, której punkt pracy spełnia warunki sterowania ze stałym momentem obrotowym, b) dla maszyny trakcyjnej, której punkt pracy nie spełnia warunków sterowania ze stałym momentem obrotowym. Zmiany położenia punktów pracy na charakterystykach przyczepności i silnika przedstawia rys. 2: a) przypadek I, b) przypadek II. Wykresy oznaczono: czerwony – charakterystyka przyczepności kół przy prędkości pojazdu 10 m/s, czarny – charakterystyka naturalna silnika, niebieski – hiperbola stałej mocy. Punkty oznaczono: A – punkt zerowej przyczepności koła w warunkach toczenia koła z prędkością punktu na obwodzie równą prędkości jazdy, B – przykładowy punkt przyczepności koła w warunkach mikroślizgu, C – punkt maksymalnej wartości przyczepności koła przy poślizgu krytycznym, D – punkt przyczepności koła z makroślizgiem, E – punkt pracy układu koła z mikroślizgiem na charakterystyce obniżonej przyczepności, F – punkt maksymalnej wartości przyczepności koła przy poślizgu krytycznym przy obniżonej przyczepności, G – punkt przyczepności koła z makroślizgiem przy obniżonej przyczepności. W obu przypadkach wzrost prędkości obrotowej maszyny której koło zerwało przyczepność, wywoła wzrost

sem silnika. W przypadku I układ regulacji automatycznej natychmiast podniesie napięcie zasilania obu maszyn, w celu utrzymania stałej zadanej wartości prądu. Moc elektryczna maszyny pierwszej wzrośnie w proporcji do wzrostu prędkości obrotowej, moc elektryczna maszyny drugiej nie zmieni się (bo nie zmieniają się warunki pracy tej maszyny), a moc zasilania przekształtnika wzrośnie. Sytuację tą przedstawia rys. 1a. W chwili początkowej punkty pracy silnika i koła znajdują się na charakterystykach w punkcie pracy ustalonej B i następuje chwilowe obniżenie wartości przyczepności. Punkt pracy koła przechodzi z punktu B do punktu E, a następnie poprzez punkt F do punktu G. Jeśli w tej chwili czasu następuje odzyskanie przyczepności to punkt pracy koła przechodzi do punktu D, a potem poruszając się na charakterystyce pełnej przyczepności osiąga punkt B (przechodząc przez C). W tym samym czasie punkt pracy silnika sterowanego w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego stabilizacji momentu obrotowego przesunie się z punktu B do punktu J. Nastąpi dodatni przyrost mocy silnika ze względu na przyrost napięcia w warunkach stabilizacji wartości prądu.

Gdy warunki stabilizacji prądu grupy silników nie są spełnione (silniki pracują w warunkach zasilania napięciem o wartości sieciowej przy pełnym wysterowaniu zaworów), to wzrost *sem* silnika, którego koło zerwało przyczepność nie będzie kompensowany wzrostem napięcia zasilania grupy. W konsekwencji spadnie wartość napięcia drugiego silnika. Zmiany rozkładu napięć wymuszą spadek prądu grupy silnika i spadek prędkości obrotowej drugiego z silników. Sytuację przedstawia rys. 1b. Ze względu na wzrost napięcia silnika pierwszego przy równoczesnym spadku prądu, punkt pracy tego silnika wypadnie w punkcie J (w pobliżu charakterystyki stałej mocy). Punkt pracy drugiego silnika znajdzie się w punkcie K (ze względu na spadek prądu i spadek napięcia na tym silniku). Warto zauważyć, że ze względu na bardzo stromy przebieg charakterystyki przyczepności, zmiana prędkości obrotowej drugiego silnika grupy jest minimalna.



Rys. 2. Zmiany położenia punktów pracy na charakterystykach przyczepności i silnika przedstawia rys. 2: a) dla maszyny trakcyjnej, której punkt pracy spełnia warunki sterowania ze stałym momentem obrotowym, b) dla maszyny trakcyjnej, której punkt pracy nie spełnia warunków sterowania ze stałym momentem obrotowym. Symbole opisane w tekście.

3. METODA FALKOWA ANALIZY JEDNOWYMIAROWYCH SYGNAŁÓW TRAKCYJNYCH

Jądrem dyskretnego przekształcenia falkowego jest *rodzina falek*. Falka jest to funkcja o nośniku zwartym, dla której istnieje funkcja skalująca. Rodzina falek powstaje przez *przesuwanie* i *rozciąganie* falki podstawowej $\psi(t_k)$ [2,3]:

$$\psi_{mn}(t_k) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}(t_k - 2^m n)) \quad (1)$$

gdzie:

- m – poziom analizy falkowej (2^m – skala analizy falkowej),
- n – przesunięcie,
- $\psi(t_k)$ – falka podstawowa,
- $\Psi_{mn}(t_k)$ – rodzina falek.

Długość analizowanego sygnału musi spełniać warunek skali diadycznej: $K = 2^{J+1}$ (gdzie: K – skala, J – poziom analizy). Zmiana m o 1 oznacza dwukrotną zmianę skali, tzn. przy ustalonej wartości m skala wynosi 2^m . Ustalony sposób doboru skal powoduje, że przy przejściu do kolejnej skali następuje dwukrotne zmniejszenie szerokości pasma przenoszenia falki.

W zastosowaniach praktycznych obowiązuje algorytm zapoczątkowany przez Mallata, a rozwinięty przez Daubachies związany z zastosowaniem funkcji skalującej, umożliwiającej tzw. wielorozdzielczą reprezentację sygnału oryginalnego f . Równanie analizy wielorozdzielczej przedstawia się następująco:

$$f(t_k) = D[f(t_k)] + A[f(t_k)] \quad (2)$$

przy czym:

$$A[f(t_k)] = \sum_{n \in \mathbf{Z}} s_J[n] \varphi_{Jn} \quad (3)$$

$$D[f(t_k)] = \sum_{m=j}^J \sum_{n \in \mathbf{Z}} d_m[n] \Psi_{mn}(t_k) \quad (4)$$

gdzie:

- $A[f]$ – aproksymacja (składowa podstawowa, składowa wysokiego poziomu analizy) sygnału,
- $D[f]$ – detal (składowa niskiego poziomu analizy),
- $d_m[n]$ – współczynniki falki (detalu),
- $s_J[n]$ – współczynniki funkcji skalującej (aproksymacji),
- $\varphi(t_k)$ – funkcja skalująca.

Pojęcie funkcji skalującej (ang. *Father wavelet*) zostało wprowadzone w celu przedstawienia tej części widma sygnału, które nie może być objęte przez skończoną liczbę kroków transformaty (wyrażone za pomocą falek tzn., że splot falki i funkcji skalującej jest równy zero). Pojęcie to umożliwiło Mallatowi opracowanie lustrzanego filtra dyskretnego i piramidowego algorytmu transformacji.

Transformata falkowa zamienia wektor wartości chwilowych sygnału na wektor współczynników transformaty falkowej, przy czym liczby elementów powyższych wektorów są identyczne. Dla transformaty falkowej o nośniku zwartym istnieje transformata odwrotna. Dzięki wprowadzeniu funkcji skalującej operacja transformaty odbywa się bez straty informacji. Istota analizy wielorozdzielczej funkcji f sprowadza się do możliwości wielokrotnego powtarzania transformaty falkowej dla skończonej liczby poziomów rozwinięć J . Powstają w ten sposób tzw. aproksymacje $A[f]$, detale $D[f]$ i składowe pasmowe $P[f]$.

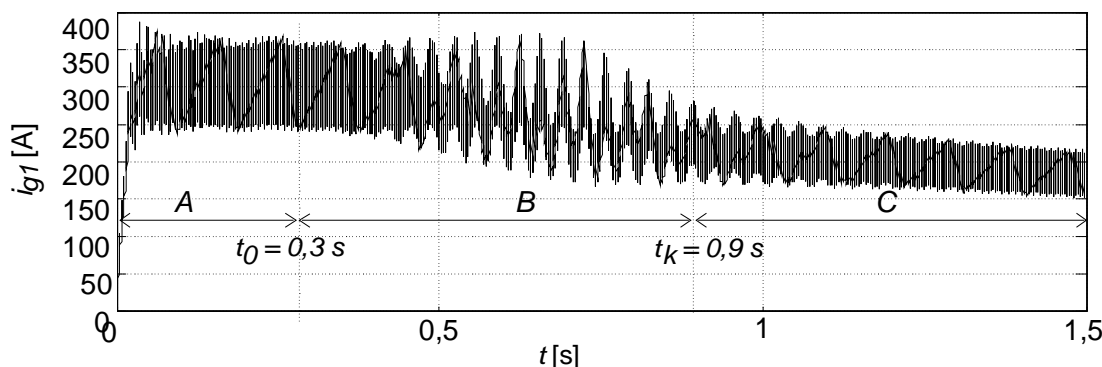
4. PRZYKŁADOWE WYNIKI SYMULACJI I ANALIZ FALKOWYCH PRĄDU GRUP SILNIKA W OKRESIE ZERWANIA PRZYCZEPNOŚCI KÓŁ NAPĘDZANYCH

Rys. 3 [1] przedstawia przykładowe wyniki symulacji (przebiegi czasowe zmiennych stanu) dla zjawiska zerwania przyczepności zakończonym poślizgiem rozwiniętym, w przypadku układu sterowania nie spełniającego warunku stabilizacji momentu obrotowego (układ regulacji automatycznej nie podnosi napięcie zasilania grupy silników): a) przebieg prądu grupy silnika, b) przebieg prędkości kątowej silnika, c) przebieg prądu grupy silnika w okresie przejazdu odcinka toru o obniżonej wartości współczynnika tarcia tocznego. Okresy jazdy oznaczono: A – początkowy okres jazdy na odcinku toru ze współczynnikiem przyczepności μ_{max} o największej wartości, B – okres przejazdu odcinka toru z obniżoną wartością współczynnika maksymalnej przyczepności μ_{max} , C - okres jazdy na odcinku toru z przywróconą największą wartością

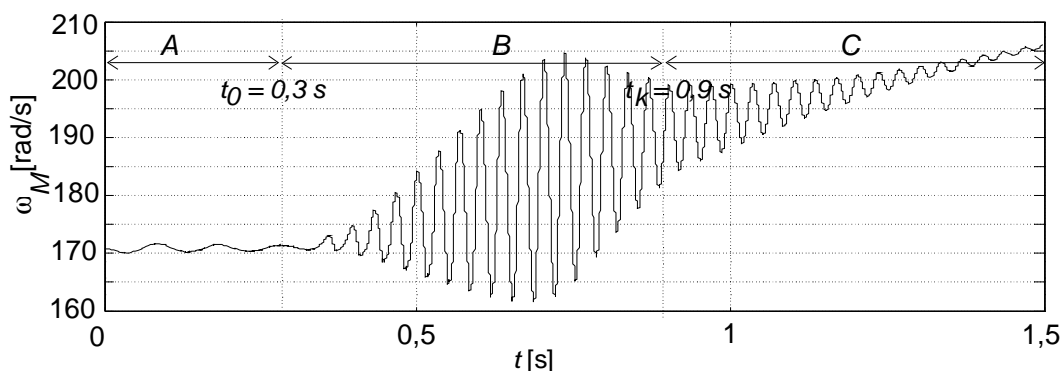
współczynnika maksymalnej przyczepności μ_{max} . Zjawisko rozwija się zgodnie z opisem rys. 2b. Widoczne są dodatkowe drgania skrętne (o charakterze drgań samowzбудnych) związane z niestabilną zmianą współczynnika przyczepności (między punktami F i G na rys. 2b). Drgania te należy traktować jako cechę charakterystyczną zjawiska zerwania przyczepności.

Rys. 4 [1] przedstawia przykładowe wyniki analiz falkowych prądu (którego wykres przedstawia rys. 3a) w chwili gdy rozwija się zjawisko zerwania przyczepności (w okresie jazdy oznaczonym na rys. 3a symbolem B, gdy punkt pracy koła przechodzi z punktu E do G na charakterystyce przyczepności tarcia tocznego o obniżonej wartości maksymalnej przedstawionej na rys. 2b). Rys. 4a przedstawia współczynniki pasm 4-6 transformaty, a rys. b) przebieg chwilowy składowej uzyskanej z tych współczynników (nazwany składową niskopasmową). Wyniki pokazują, że transformata falkowa może być dobrym ekstraktorem cech charakterystycznych drgań samowzбудnych towarzyszących zjawisku zerwania przyczepności.

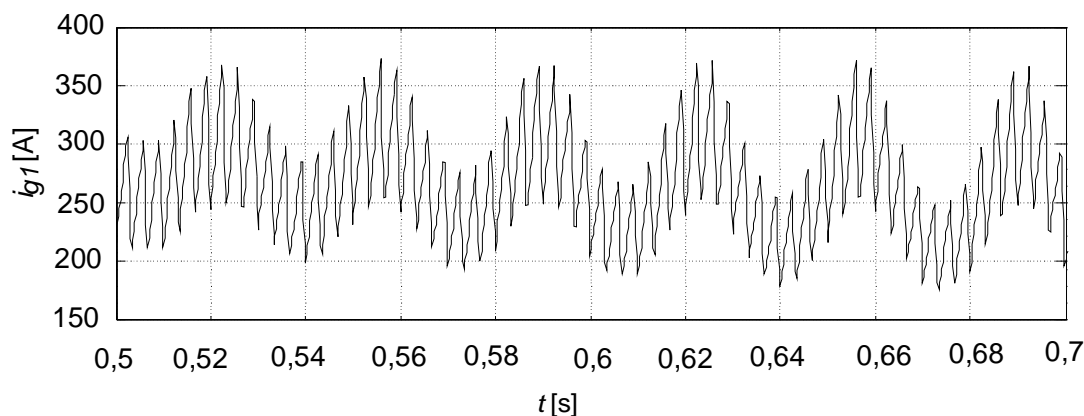
a)



b)



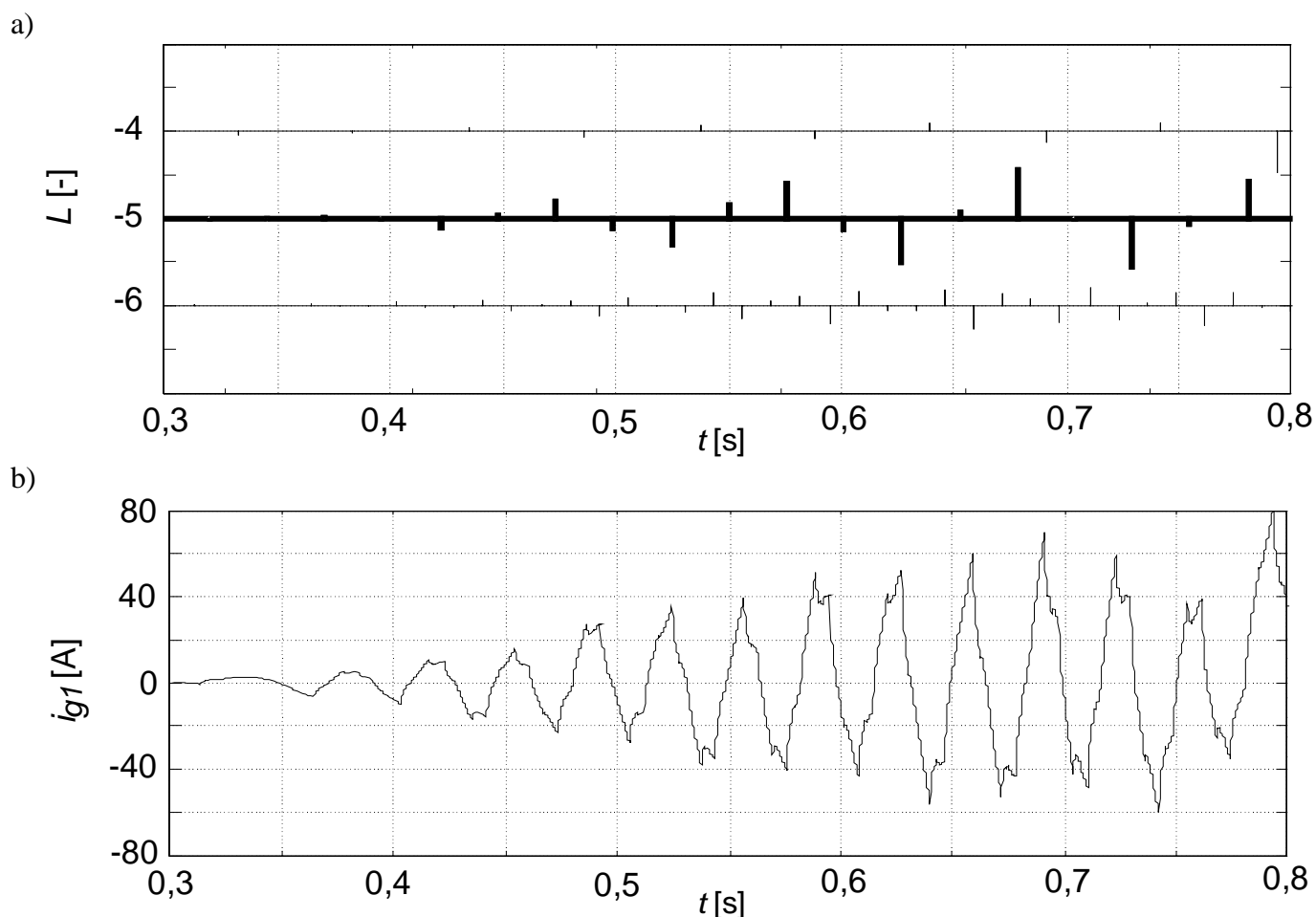
c)



Rys 3. Wyniki badań symulacyjnych zjawiska poślizgu rozwiniętego zakończonego zerwaniem przyczepności:

a) przebieg prądu grupy silnika, b) przebieg prędkości kątowej silnika, c) przebieg prądu grupy silnika w okresie przejścia odcinka toru o obniżonej wartości współczynnika tarcia tocznego. Okresy jazdy oznaczono: A – początkowy okres jazdy na odcinku toru ze współczynnikiem przyczepności μ_{max} o największej wartości, B – okres przejścia odcinka toru z obniżoną wartością współczynnika maksymalnej przyczepności μ_{max} , C – okres jazdy na odcinku toru z przywróconą największą wartością współczynnika maksymalnej przyczepności μ_{max} .

Źródło: [1].



Rys. 4. Przykładowe wyniki analiz falkowych sygnału prądu z rys 3.a: a) rozkład współczynników pasm 4 – 6 (pasma oznaczono symbolem „-”), b) przebieg chwilowy składowej niskopasmowej.

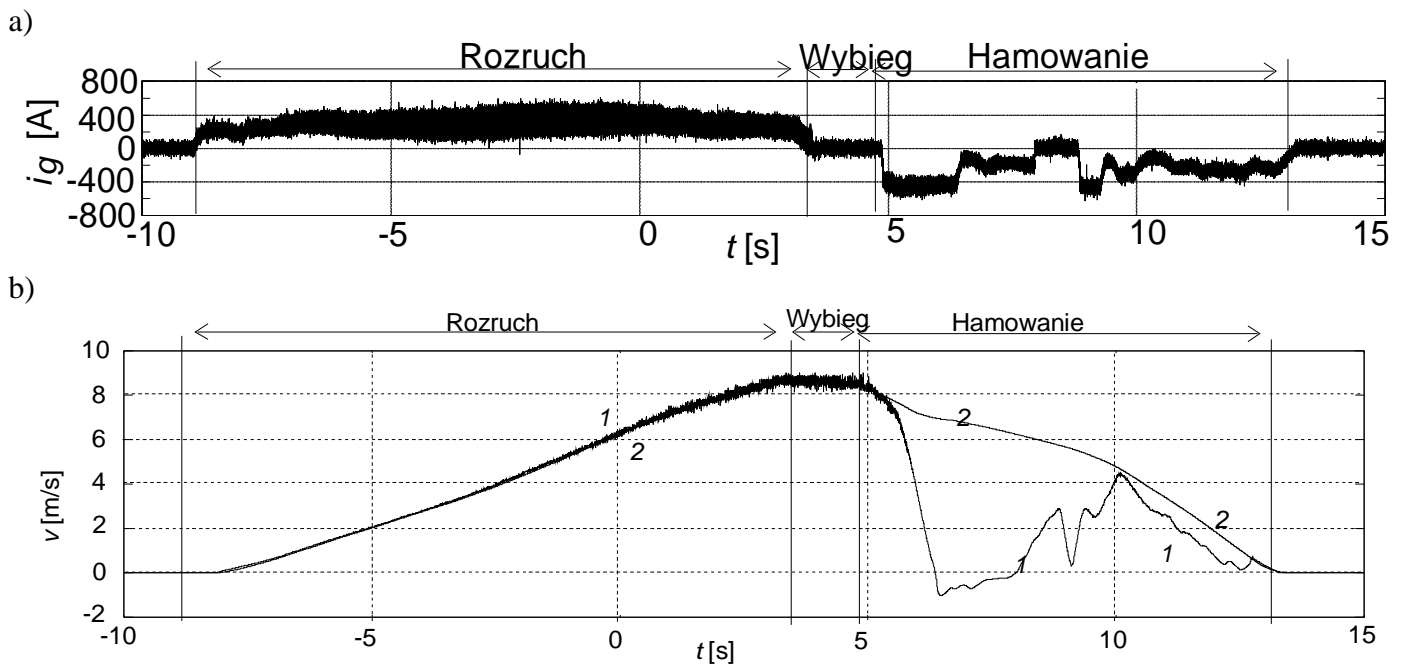
Źródło: [1].

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI WERYFIKACJI METODY ANALIZY CECH CHARAKTERYSTYCZNYCH

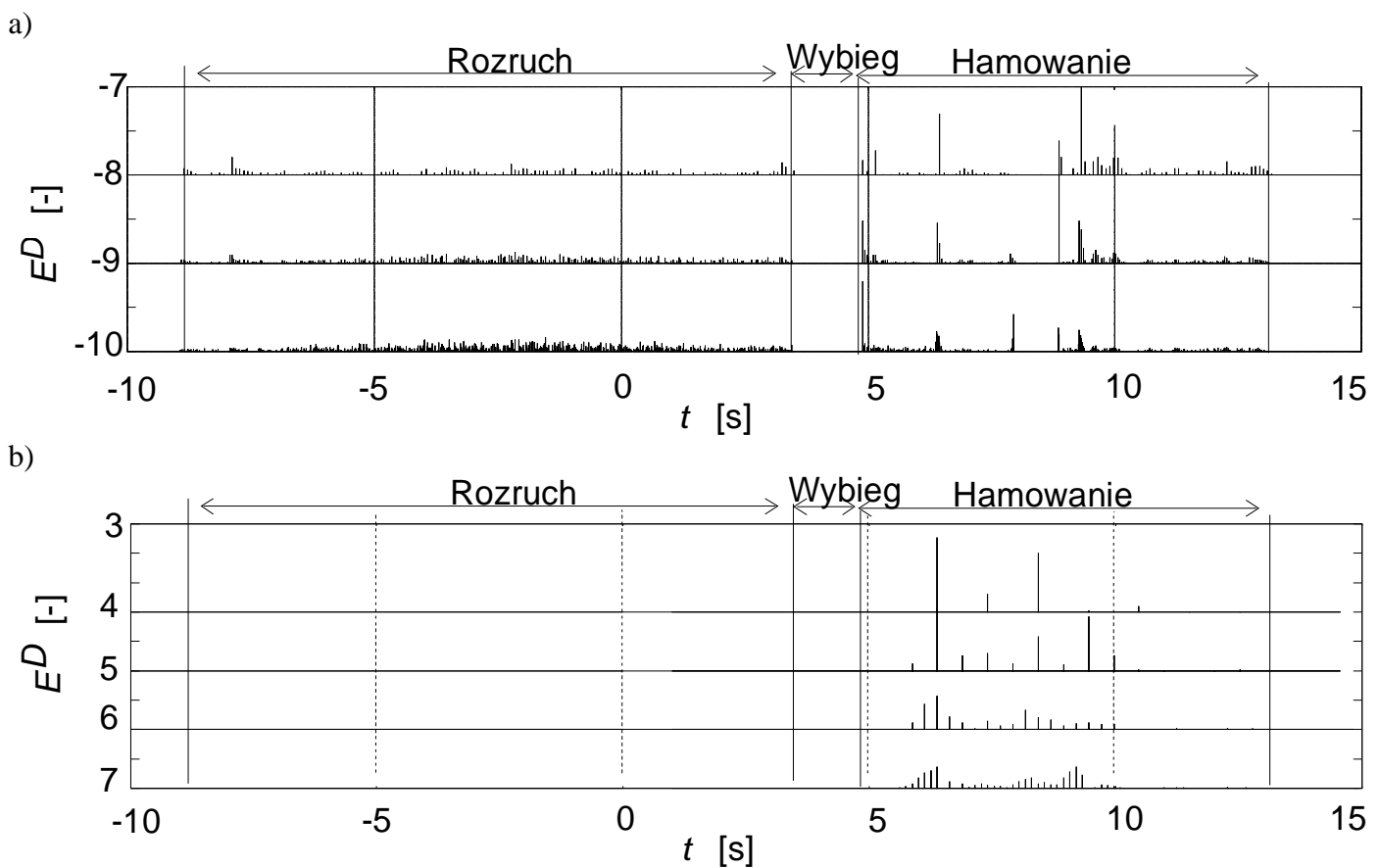
W celu weryfikacji przedstawionej tezy o możliwości ekstrakcji cech charakterystycznych drgań związanych z zerwaniem przyczepności wykonano badania na obiekcie rzeczywistym (tramwaju). Badania obejmowały 20 jazd próbnych. Rys. 5 przedstawia przykładowe wyniki pomiaru: a) prądu grup silnika, b) prędkości pojazdu. Widoczne jest zerwanie przyczepności w okresie hamowania tramwaju. Rys. 6 przedstawia wyniki analiz falkowych sygnałów dla współczynników składowej niskopasmowej. Analizy sygnałów wykonanych pomiarów pokazały, że w okresie rozwijania się zjawiska zerwania przyczepności w sygnałach prądu pojawia się składowa woloźmienna. Analiza falkowa może wykrywać cechy charakterystyczne tego zjawiska jako zwiększone wartości współczynników składowych niskopasmowych.

6. UWAGI KOŃCOWE

Wyniki badań obiektu rzeczywistego poparte wynikami analiz teoretycznych i symulacji pokazują, że w tramwajach napędzanych silnikami prądu stałego możliwe jest wykrywanie poślizgów kół napędzanych na podstawie analiz przebiegów prądów grup silników. Możliwe jest również poprawne wykrywanie poślizgu pojedynczego zestawu kołowego wyłącznie na podstawie analizy jego prędkości obwodowej bez konieczności porównań względem prędkości innych kół układu. Istnieje możliwość modernizacji układów antypoślizgowych poprzez zastosowanie indywidualnego sposobu wykrywania poślizgu bezpośrednio na podstawie analiz pojedynczego sygnału prądu lub pojedynczego sygnału prędkości obrotowej.



Rys. 5. Przykładowe wyniki pomiaru: a) prąd grupy silników, b) prędkości pojazdu. Wykresy oznaczono: 1 – prędkość liniowa punktu na obwodzie koła, 2 – prędkość pojazdu.



Rys. 6: Wyniki analiz falkowych: a) prądu grupy silników, b) prędkości liniowa punktu na obwodzie koła.

Streszczenie

Przedstawiono model symulacyjny układu napędu tramwaju z silnikami prądu stałego i energoelektronicznym układem zasilania przeznaczony do analiz przebiegu pracy w okresach zerwania przyczepności podczas rozruchu i hamowania. Podano przykładowe wyniki symulacji prądu grup silników. Omówiono metody analizy falkowej jednowymiarowych sygnałów trakcyjnych. Przedstawiono przykładowe wyniki ekstrakcji cech charakterystycznych zjawiska zerwania przyczepności na podstawie analiz prądu. Przedstawiono przykładowe wyniki weryfikacji.

Słowa kluczowe: zerwanie przyczepności, model zastępczy, symulacja, eksperymentalny pomiar prądu.

Simulation and analysis of tram operating courses drive devices in adhesion-loss condition

Abstract

The present paper deals with research on the movement of trams with direct-current series motors and a power electronic converter with particular attention paid to states of adhesion failure during start-up and electric braking periods. The objective of the paper is to determine methods of recognition of adhesion failure states on the basis of analyses of electric current course or analyses of speed course in individual drive systems.

Keywords: adhesion-loss condition, equivalent model, simulation, experimental current measurement.

LITERATURA

- [1] Kozłowski M.: Badania zerwania przyczepności w ruchu pojazdu szynowego, WPW 2010.
- [2] Białasiewicz J. T.: Falki i Aproksymacje, WNT Warszawa 2004.
- [3] Wojtaszczyk P.: A Mathematical Introduction to Wavelets, Cambridge University Press 1997.