

prof. dr hab. inż. BOGDAN MIEDZIŃSKI
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG
dr inż. WITOLD DZIERŻANOWSKI
dr inż. MARCIN HABRYCH
Politechnika Wrocławska
mgr inż. JANUSZ WANDZIO
KGHM Polska Miedź S.A. O/ZG Rudna

Analiza i badanie dynamiki pracy zestyku ślizgowego transportu kopalnianego w warunkach eksploatacyjnych

W artykule przedstawiono wyniki badań dynamiki działania układu zestyku ślizgowego stosowanego w kołowym transporcie kopalnianym kopalni rud miedzi. Wyniki analiz symulacyjnych potwierdzono wynikami badań w układzie rzeczywistym przy wymianie dotychczasowego materiału ślizgu (kompozyt grafitowy) na kompozyt Cu-Mo wytworzony metodą elektronowego napylania w próżni. Sformułowano odpowiednie wnioski praktyczne.

1. WSTĘP

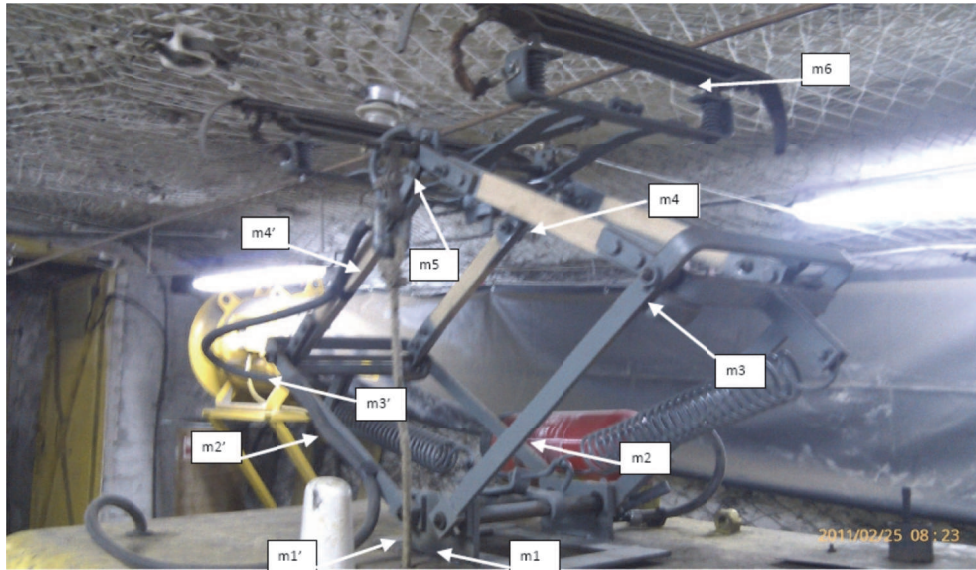
Dynamika pracy zestyku jest czynnikiem kluczowym, odpowiedzialnym za poprawną pracę wszystkich rodzajów łączników, niezależnie od ich struktury i zastosowania. Nabiera jednak szczególnego znaczenia dla zestyku ślizgowego drut jezdny – zestyk ślizgowy, stosowanego w szynowym transporcie kopalnianym. Związane jest to ze szczególnie trudnymi warunkami pracy zestyku (obciążenie DC 250 V, 250 A) i środowiskowymi (wysoka wilgotność i temperatura, sól itp.). W powiązaniu ze zmienną wartością siły docisku zestyku powoduje to gwałtowny wzrost jego rezystancji oraz wzrost strat energii powodowanych stałoprądowym łukiem elektrycznym. Prowadzi to do wzrostu temperatury zestyku, a w konsekwencji przyspiesza degradację zestyku i skraca czas jego eksploatacji [1-3].

Model matematyczny zestyku ślizgowego opracowano, korzystając z wyników badań tradycyjnego grafitowego zestyku, stosowanego w lokomotywie kopalnianej. Analizę symulacyjną przeprowadzono

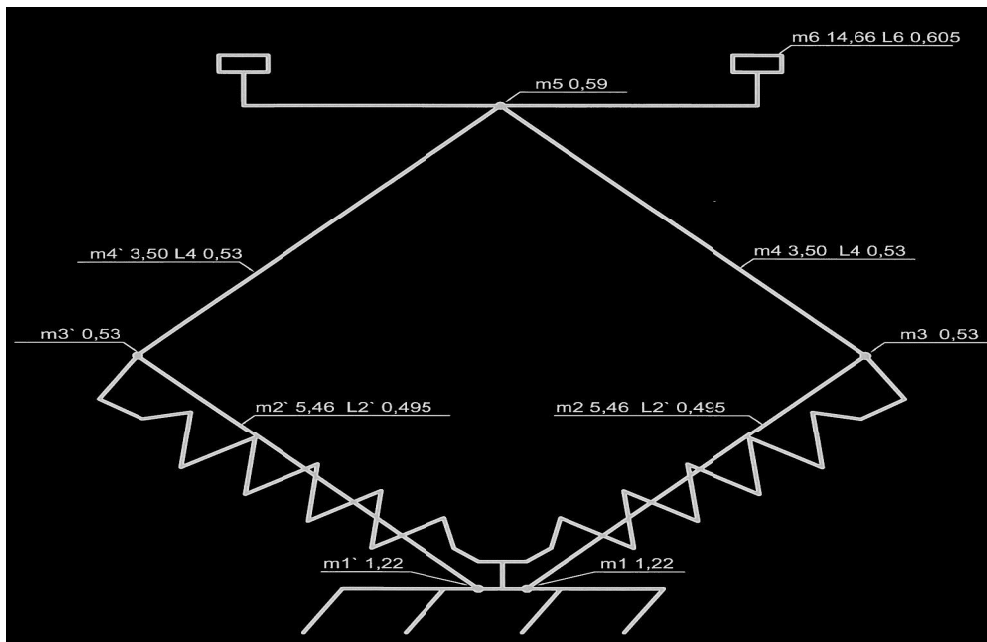
dla różnych warunków pracy lokomotywy. Na podstawie wyników symulacji, zweryfikowanych badaniami w układzie rzeczywistym, sformułowano odpowiednie wnioski praktyczne dotyczące możliwości wymiany dotychczasowego materiału ślizgu na materiał kompozytowy Cu-Mo.

2. OKREŚLENIE PARAMETRÓW MECHANICZNYCH ZESTYKU ŚLIZGOWEGO

W celu opracowania uproszczonego modelu matematycznego zestyku ślizgowego niezbędnym było określenie wartości wielkości fizycznych (zredukowanych mas, stałych sprężystości oraz tłumienia z uwzględnieniem wpływu elementów konstrukcyjnych odbieraka prądu) dla układu drut jezdny – ślizg. Widok odbieraka prądu, stosowanego w lokomotywach kopalnianych LdT-31, przedstawiono na rys. 1. Jego uproszczony szkic z zaznaczeniem istotnych elementów mechanicznych – mas (m1-m6) oraz długości (l2-l4) – pokazano na rys. 2.



Rys. 1. Widok odbieraka prądu (pantografu) lokomotywy LdT-31 z zaznaczeniem istotnych elementów ($m1, m1'$ – przeguby dolne; $m2, m2'$ – ramy dolne; $m3, m3'$ – przeguby środkowe; $m4, m4'$ – ramy górne; $m5$ – przegub górny; $m6$ – styk ślizgowy) (opracowanie własne)



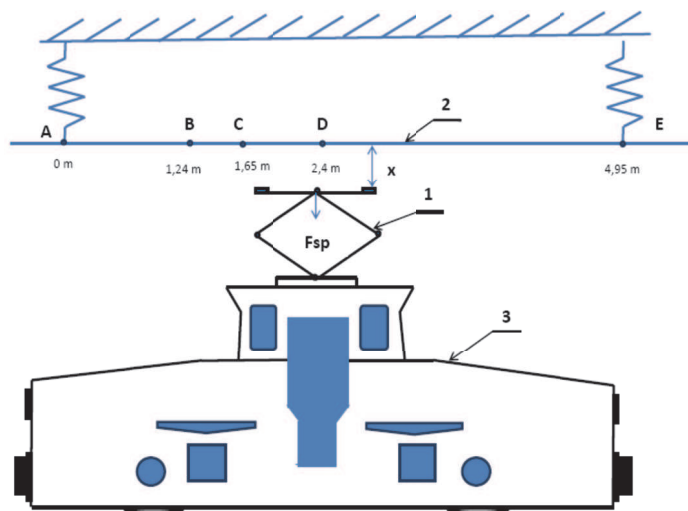
Rys. 2. Szkic pantografu ze wskazaniem istotnych elementów, jak na rys. 1. (m – masa [kg], l – długość [m]) (opracowanie własne)

Dla uproszczenia procedury obliczeń (z dokładnością akceptowalną w praktyce) zestyk ślizgowy został przedstawiony za pomocą układu drgającego o jednym stopniu swobody.

W celu identyfikacji wartości parametrów modelu matematycznego o parametrach skupionych wykonano pomiary w układzie rzeczywistym zestyku metodą odpowiedzi skokowej „step response” (dla różnej wartości siły docisku odbieraka prądu) [4], co pozwoliło na wyznaczenie zredukowanych mas, stałych sprężystości oraz stałych tłumienia.

Pomiary wykonano zarówno dla samego drutu jezdny, jak i dla układu drgającego: drut jezdny – zestyk – odbierak prądu.

Ponieważ wartości parametrów zależą od położenia zestyku ślizgowego względem mocowań zawieszek elastycznych (A-E), pomiary wykonywano w miejscach charakterystycznych pomiędzy kolejnymi zawieszkami (A-D), co pozwoliło na wyznaczenie wartości średniej mas zarówno zredukowanych, jak i stałych sprężystości oraz tłumienia (rys. 3).



Rys. 3. Ilustracja sposobu przeprowadzania pomiarów identyfikacyjnych: 1 – zestyk ślizgowy (pantograf), 2 – przewód trakcyjny, 3 – lokomotywa, F_{sp} – siła docisku zestyku (opracowanie własne)

Wartości współczynnika sprężystości pantografu wyznaczono podczas „odciągania” odbieraka prądu od drutu jezdny na odległość od 0,02 do 0,05 m z użyciem wartości siły określonej w tabelicy 1.

Tabela 1.
Zależność pomiędzy wartością siły F_{sp} , przemieszczeniem zestyku ślizgowego x oraz współczynnikiem sprężystości k dla układu drgającego: odbierak prądu – drut jezdny (opracowanie własne)

F_{sp}	x	k
[N]	[m]	[N/m]
86	0,02	4300
94	0,03	3133
90	0,04	2250
102,5	0,05	2050

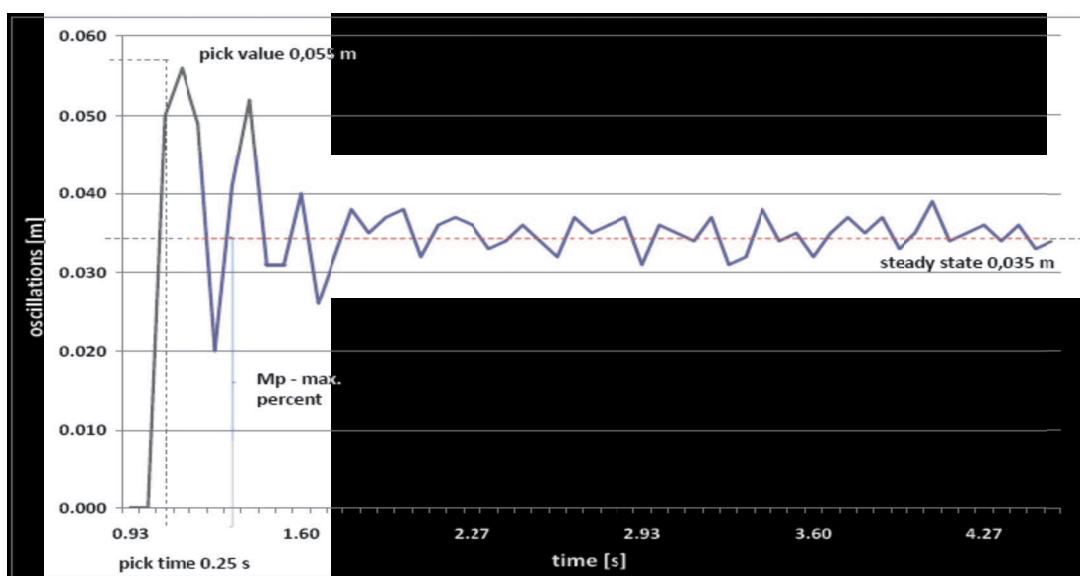
Siłę F_{sp} następnie zredukowano skokowo do zera (usunięto), a odpowiedź układu drgającego rejestrowano. Ogólne równanie układu drgającego ma postać:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

gdzie:

- m – wypadkowa masa zredukowana układu drgającego,
- b, k – współczynnik tłumienia i sprężystości odpowiednio.

Odpowiedź układu drgającego na skokową zmianę siły w punkcie D (od wartości siły równej 102,5 N do zera) pokazano przykładowo na rys. 4.



Rys. 4. Odpowiedź układu drgającego: pantograf – przewód jezdny na skokową zmianę siły mechanicznej w punkcie D (opracowanie własne)

Z przedstawionego przebiegu wynika, iż wartość szczytowa przesterowania wynosi około $x \approx 0,055$ m, stąd maksymalne przesterowanie procentowe M_p wynosi [4]:

$$M_p = [(0,055 - 0,035) / 0,035] * 100 = 57\%$$

Korzystając z zależności teoretycznej odpowiedzi skokowej dla modelu liniowego drugiego rzędu, można obliczyć wartości amplitudy wychylenia A oraz współczynnika tłumienia ζ z zależności (2):

$$A = \frac{\ln 100}{M_p} = \frac{\ln 100}{57} = 0,562; \quad \zeta = \frac{A}{\sqrt{\pi^2 + A^2}} = 0,176 \quad (2)$$

Pierwsze maksimum drgania mechanicznego układu wystąpiło po czasie $t_p \approx 0,25$ s. Stąd można określić wartość częstotliwości kątowej drgań ω_n oraz masy skupionej m z zależności (3) i (4):

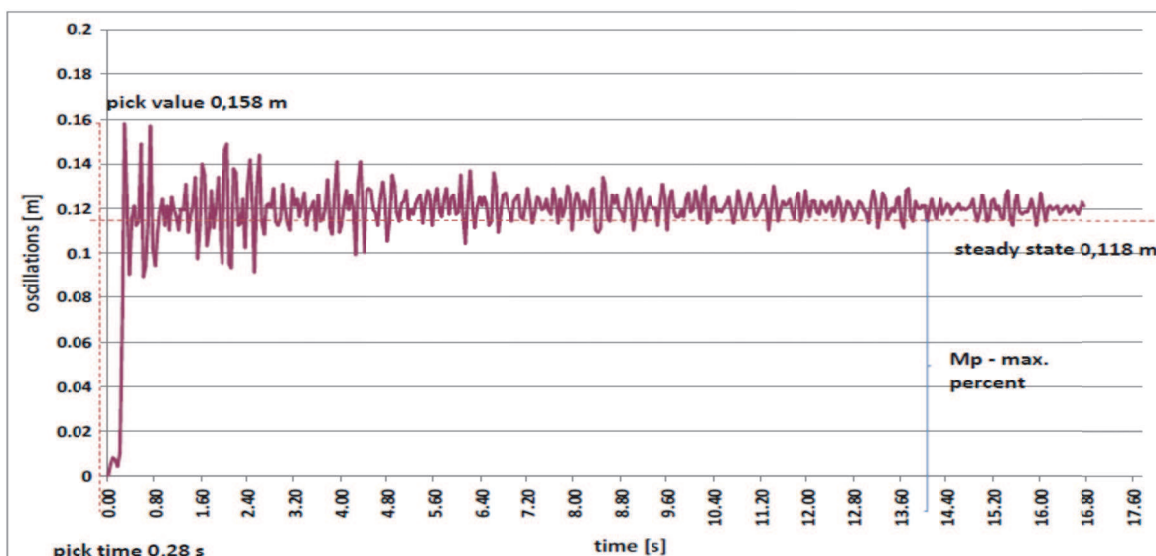
$$t_p = 0,25 = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} = \frac{3,15}{\omega_n} \quad (3)$$

Ponieważ $\omega_n^2 = 158$, zatem:

$$m = \frac{k}{\omega_n^2} = \frac{2050}{158} = 13 \text{ [kg]}$$

Wartość współczynnika tłumienia b obliczyć można z równania:

$$\zeta = \frac{b}{2\sqrt{m} * k} = \frac{b}{2\sqrt{13} * 2050} = 0,176$$



Rys. 5. Odpowiedź układu drgającego samego drutu jezdnego na skok jednostkowej siły „uniesienia” [4]

Z czego wynika, że $b = 57,5$ Ns/m, zaś równanie układu mechanicznego drgającego o jednym stopniu swobody (w osi x , w punkcie D) ma postać:

$$13\ddot{x} + 57,5\dot{x} + 2050x = f(t)$$

W analogiczny sposób, przy korzystaniu z pomiaru odpowiedzi skokowej w punkcie B, w równaniu ulegają zmianie parametry odpowiednio:

$$17,4\ddot{x} + 30,6\dot{x} + 2050x = f(t)$$

Dla stosowanego w kopalni drutu jezdnego (typ Djp 100 890 kg/km) średnie wartości stałej sprężystości k odpowiadające różnym punktom pomiarowym (A-D), dla różnych wartości siły F_{sp} (podczas „unoszenia” drutu jezdnego), zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2.
Średnie wartości współczynnika sprężystości k drutu jezdnego w różnych punktach pomiaru (zgodnie z rys. 3.)
(opracowanie własne)

Punkt	k
–	N/m
A	4037
B	3108
C	2578
D	2559

Dla samego drutu jezdnego (w pomiarowym punkcie D, rys. 5) równanie układu drgającego ma postać:

$$5,45\ddot{x} + 61,65\dot{x} + 2559x = f(t)$$

Analogicznie pokazano, dla przykładu, równanie w punkcie C:

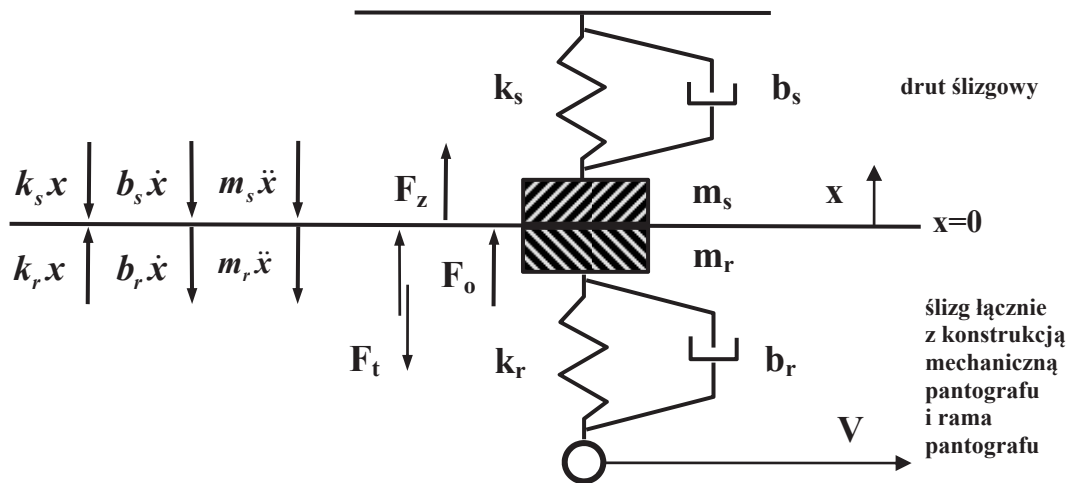
$$3,57\ddot{x} + 59,48\dot{x} + 2578x = f(t)$$

Bazując zatem na wartościach parametrów mechanicznych, określonych metodą odpowiedzi skokowej, możliwym było wyznaczenie uproszczonego modelu matematycznego ślizgu stosowanego w szynowym

transportie kopalnianym celem wykonania badań symulacyjnych dynamiki jego działania.

a) Uproszczony model matematyczny zestyku ślizgowego

Schemat uproszczonego modelu matematycznego wykorzystanego do symulacji pracy zestyku ślizgowego przy zmiennej wartości siły docisku pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Uproszczony schemat modelu zestyku ślizgowego przyjęty do badań symulacyjnych (opracowanie własne)

Równanie opisujące dynamikę układu mechanicznego zestyku ślizgowego ma postać:

$$(m_r=m_s)\ddot{x}+(b_r+b_s)\dot{x}-(k_s-k_r)x = F_0(I+0.01F_z)\text{sign}(\dot{x})F_t \quad (5)$$

gdzie:

- x – przemieszczenie zestyku ślizgowego pantografu,
- m_r, m_s – masa zastępcza pantografu i odcinka drutu jezdnego odpowiednio,
- F_o – siła unosząca pantografu (dla $x = 0$),
- F_z – siła zakłócenia w procentach siły F_o ,
- F_t – siła uwzględniająca tarcie w przegubach wewnętrznych pantografu,
- k_r, k_s – współczynnik sprężystości pantografu i drutu jezdnego odpowiednio,
- b_r, b_s – współczynnik tłumienia pantografu i odcinka drutu jezdnego odpowiednio.

Siłę docisku zestyku (zależną od oddziaływania drgających mas zestyku) w odpowiednim segmencie drutu jezdnego można przedstawić w postaci:

$$F_c = k_r x + F_o - m_r \ddot{x} \quad (6)$$

b) Wyniki obliczeń

Przykładowe porównanie wyników przebiegów symulacji z rzeczywistymi wynikami pomiarów (dla punktu D) pokazano na rys. 7.

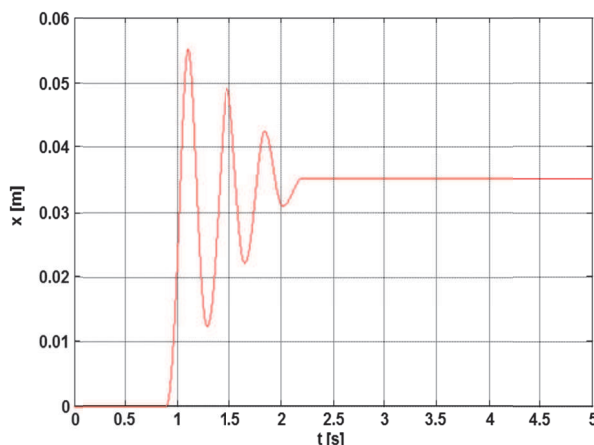
Przeprowadzona analiza symulacyjna, z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB, wykazała wystarczającą z praktycznego punktu widzenia zgodność wyników obliczeń z pomiarowymi ($\pm 20\%$).

Otrzymano zbieżne wartości zarówno co do maksymalnej wartości przemieszczeń odbieraka prądu, częstotliwości oscylacji jego ruchu, jak i pozycji odbieraka po zakończeniu procesu przejściowego (w stanie ustalonym).

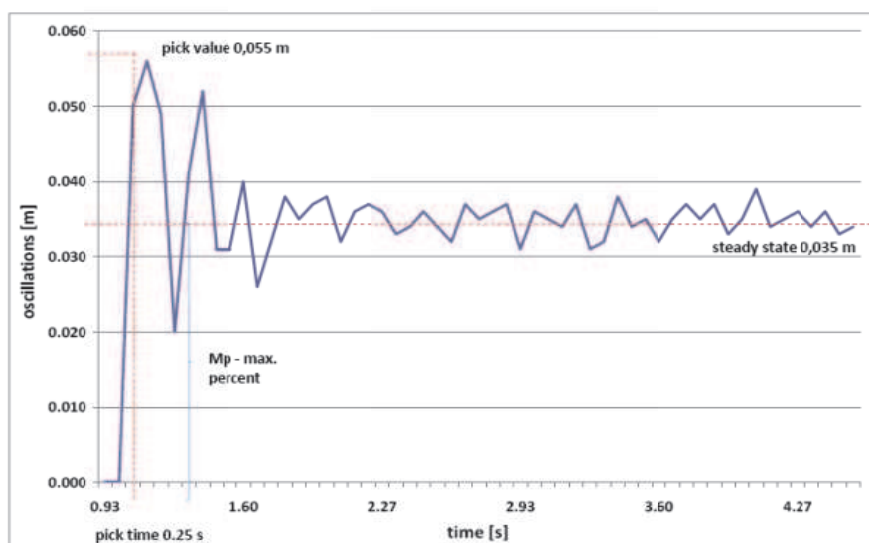
Stwierdzono poprawną pracę ślizgu dla wartości siły docisku zmienianej w zakresie od 60 do 160 N z uwagi na fakt występowania skokowej jej zmiany podczas ruchu lokomotywy, zwłaszcza na łączeniach szyn i rozjazdach.

Wymianę tradycyjnego materiału ślizgu (kompozyt grafitowy) na materiał kompozytowy Cu-Mo wykonano w taki sposób, aby nie zakłócić parametrów drgającego mechanicznego układu zestyku ślizgowego (łącznie z konstrukcją pantografu).

a)



b)



Rys. 7. Porównanie wyników symulacji: (a) z rzeczywistymi, (b) wynikami pomiarów w punkcie D (opracowanie własne)

3. WNIOSKI

Na podstawie odpowiedzi skokowej zarówno samego drutu jezdnego, jak i układu zestyku ślizgowego, łącznie z pantografem, możliwym było określenie wartości parametrów mechanicznych (masy, współczynniki sprężystości oraz tłumienia) oraz opracowanie modelu matematycznego zestyku ślizgowego, umożliwiającego przeprowadzenie symulacji dynamiki jego działania. Szczególną uwagę zwrócono na problem możliwości wystąpienia przerwania ciągłości zestyku (z generacją stałoprądowego łuku elektrycznego) podczas zmiany wartości siły docisku i jej oscylacji w pobliżu zera. Ma to miejsce głównie podczas przejazdu lokomotywy przez rozjazdy i przerwy sekcyjne.

W efekcie analiz symulacyjnych i badań eksperymentalnych uzyskano (po wymianie materiału sty-

kowego z grafitu na kompozyt Cu-Mo) stabilny zestyk ślizgowy, co zostało potwierdzone podczas testów w rzeczywistych warunkach panujących w kopalni miedzi.

Literatura

1. Karwowski K.: *Diagnostyka i monitoring odbioru prądu z sieci trakcyjnej*, Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy projektowania i budowy systemu zasilania sieci trakcyjnej kolei dużych prędkości”, Krzyżowa 19-21.09.2009.
2. Siemiński T.: *Odbieraki prądu i ich współpraca z siecią jezdnią*, WKiŁ, Warszawa 1989.
3. Miedziński B., Okraszewski Z., Habrych M., Wandzio J.: *Wpływ siły docisku zestyku na parametry zestyków ślizgowych stosowanych w elektrycznej trakcji kopalni miedzi*. „Mechanizacja i Automatyza Górnictwa”, 2009, 4/458, s. 15-26.
4. Palm III W. J.: *Mechanical Vibration*, John Willey and Sons, 2007.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.