

Edward RYDYGIER, Zygmunt STRZYŻAKOWSKI

SYMULACJE KOMPUTEROWE PROCESÓW ENERGETYCZNYCH W KONTAKCIE KOŁO – SZYNA

Streszczenie

W pracy zaprezentowano różne sposoby symulacyjnych badań procesów energetycznych w kontakcie tocznym koło – szyna. Obliczenia dokonano przy zastosowaniu metody modelowania procesów energetycznych, która wykorzystuje pojęcie energii jednookresowej. Przyjęto, że ze strony koła na szynę działa nieciągła periodyczna siła nacisku. Model układu dynamicznego koło – tor został opisany liniowym układem równań różniczkowych drugiego rzędu. Przeprowadzono symulacje komputerowe dla różnych parametrów mechanicznych i wyznaczono odpowiednie wartości energii zaabsorbowanej przez szynę. Wskazano na możliwości rozszerzenia modelu liniowego o elementy nieliniowe przez uwzględnienie nieliniowych charakterystyk parametrów dynamicznych podkładu. W pracy zaprezentowano także inny sposób modelowania kontaktu koło – szyna poprzez identyfikację źródeł ciepła na powierzchni szyny. Wykazano, że zaprezentowane badania modelowe procesów energetycznych w kontakcie koło – szyna mogą zostać wykorzystane do wspomagania diagnostyki pomiarowej pojazdu szynowego.

WSTĘP

Zagadnienie analizy kontaktu koło – szyna można badać przy zastosowaniu różnych metod modelowania. W różnych ośrodkach naukowych i badawczych prowadzone są badania modelowe ukierunkowane głównie na zwiększenie prędkości pociągu [4, 6, 8, 14, 16]. Podczas ostatniej dekady pojawiły się nowe wyzwania związane z redukcją kosztów eksploatacji taboru, nowymi technologiami diagnostyki toru i pojazdu szynowego oraz eliminacją negatywnych wpływów środowiska. Ostatnio wiele specjalistycznych ośrodków badawczych na świecie jest zaangażowanych w badania modelowe problemów dynamiki pojazdu kolejowego, które są przydatne w utrzymaniu wysokich wymagań komfortu jazdy koleją oraz zapewnieniu bezpieczeństwa transportu. Ma to szczególne znaczenie przy eksploatacji pociągów o podwyższonych prędkościach.

Prowadzenie tego typu badań wymaga szerszego i dogłębnego zrozumienia zagadnień technicznych, zastosowania innowacyjnych rozwiązań inżynierskich oraz korzystania z nowych systemów komputerowego wspomaganie [5, 7, 10, 11, 12, 13, 14]. Przedstawione w pracy metody modelowania procesów energetycznych kontaktu koło – szyna spełniają te nowe wymagania. Opracowane metody modelowania mogą zostać wykorzystane do wspomagania diagnostyki pojazdu szynowego z tego powodu. Do konstrukcji opracowanej w pracy metody oceny przekazanej do szyny energii zaadaptowano koncepcję energii jednookresowej [11, 15], co spowodowało uproszczenie procedur obliczeniowych. Założono, że badany układ znajduje się w stanie ustalonym, jest układem zdeterminowanym, a na szynę ze strony koła działa w obszarze kontaktu nieciągła siła normalna nacisku mająca charakter sygnału okresowego. Działanie nieciągłej siły w bardzo małym obszarze kontaktu (ok. 1 cm²) przy dużych obciążeniach ma wpływ na zmiany struktury materiału na powierzchniach tocznych szyny i koła. Opracowana metoda jest użyteczna w ocenie zniszczeń powierzchni tocznych koła i szyny, nie analizuje jednak zmian struktury w materiale na powierzchniach tocznych szyny i koła, gdyż nakierowana jest na wyznaczenie energii absorbowanej przez szynę spoczywającą na elastycznym podkładzie i sztywnym podłożu. W rozważanym modelu dla ograniczonego przedziału częstotliwości nie są brane pod uwagę zmiany

parametru tłumienia. Nieuwzględniane są też tłumienia własne i pasożytnicze elementów układu. Tymczasem, jeśli chodzi o warunki podróży koleją, to należy podkreślić, że na pogorszenie komfortu jazdy mają wpływ następujące czynniki:

- małe tłumienie,
- niestabilności w drganiach wózka wywołane sprzężeniem samowzbudnych drgań koła z drganiami własnymi szyny i podkładów,
- rezonans drgań własnych elementów pojazdu z periodycznymi drganiami siły obciążenia.

Po odpowiednich modyfikacjach uwzględniających wpływ częstotliwości na parametry sztywności i tłumienia zaproponowana metoda może zostać wykorzystana także do oceny komfortu jazdy pociągu. Przedstawione w niniejszej pracy badania modelowe są rozwinięciem badań zaprezentowanych przez autorów we wcześniejszych pracach [11], [12].

W pracy zaprezentowano także inny sposób modelowania zagadnień cieplnych w kontakcie koło-szyna polegający na identyfikacji źródeł ciepła w śladzie cieplnym na powierzchni tocznej szyny spowodowanym kontaktem tocznym koło – szyna.

1. MODEL DYNAMICZNY

Zagadnienie kontaktu między kołem a szyną jest podstawowym elementem badań dynamicznych układu pojazd szynowy – tor. Znajomość dynamiki pojazdu szynowego umożliwia wyznaczenie czynników mechanicznych, takich jak naprężenia w obszarze styku koła z szyną, czy siły styczne poślizgu w różnych warunkach. Na podstawie wyznaczonych czynników mechanicznych działających w kontakcie koło – szyna można ocenić ich wpływ na zmęczenie i zużycie materiału szyny i koła [2, 3, 4].

Siły kontaktowe działające na koła pojazdu są główną przyczyną powstawania zniszczeń w szynie. W wyniku działania nieciągłej pionowej siły nacisku w miejscach styku koła i szyny rozwijają się zniszczenia zwane spallingiem. Zniszczenia te mają charakter złuszczeń wokół pęknięć na powierzchni szyny i obręczy koła. Na zużycie szyny oprócz pionowej siły nacisku mają też wpływ siły

styczne i poślizgi koła na szynie. Parametry te zależne są od dużej liczby wzajemnie od siebie zależnych czynników takich, jak:

- konfiguracja pojazdu (rozstaw kół, obciążenie na oś, średnica koła),
- charakterystyki zawieszenia,
- geometria toru,
- profile kół (profil nominalny i po zużyciu),
- profile szyn (profil nominalny i po zużyciu),
- tarcie między kołem i szyną,
- przechyłka toru,
- siły przy przyspieszaniu i hamowaniu,
- właściwości materiałowe kół i szyn.

Przy konstruowaniu modelu dynamicznego kontaktu koło – szyna rozpatrzono kontakt toczny ciał elastycznych i założono, że własności materiału koła i szyny są takie same, tj. ciała te są w kontakcie kwazi-identyczne. W tym przypadku problem kontaktowy został przekształcony na oddziaływanie pionowe między kołem i szyną. Oznacza to, że ciśnienie normalne w punkcie styku jest proporcjonalne do wzajemnego przenikania się ciał w tym punkcie. Rozmiar i kształt obszaru styku koła i szyny mogą być wyznaczone różnymi technikami [3, 6, 8].

Do opisu badanego układu przyjęto model dyskretny, w którym szyna wraz z podkładem została podzielona na małe segmenty zawierające jeden podkład [6]. Ustalono warunki zewnętrzne przyjmując, że elastyczne podkłady są ułożone na sztywnym podłożu. Do matematycznego opisu badanego układu zastosowano model liniowy przyjmując, że odkształcenia są małe.

Przy przyjętych założeniach, dla każdego segmentu szyny równania ruchu badanego układu można opisać następującym układem równań różniczkowych zwyczajnych

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_2 + b_1 & -b_2 \\ -b_2 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_2 + k_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie: $y_1 = y_1(t)$, $y_2 = y_2(t)$ – przemieszczenia w płaszczyźnie pionowej do toru, m – masa zastępcza toru, b_1 , k_1 – parametry dynamiczne (tłumienie i sztywność) podkładu, M – masa szyny, b_2 , k_2 – parametry dynamiczne (tłumienie i sztywność) szyny.

Przyjęto, że badany układ znajduje się w stanie ustalonym, a na szynę ze strony koła działa pionowa nieciągła siła nacisku mająca charakter sygnału okresowego

$$F(t) = f(t + T) \quad (2)$$

gdzie: T – okres, który odpowiada przedziałowi czasu do przyjechania koła w następnym wagonie, $T = \Delta x/v$, v – prędkość pociągu.

Przebieg czasowy siły nacisku $F(t)$ można przedstawić w następującej postaci:

$$F(t) = f(t + T) = \begin{cases} F_0 & \text{dla } 0 \leq t \leq T_1 \\ 0 & \text{dla } T_1 \leq t \leq T_2 \\ F_0 & \text{dla } T_2 \leq t \leq T_3 \\ 0 & \text{dla } T_3 \leq t \leq T \end{cases} \quad (3)$$

gdzie: F_0 – amplituda sygnału, T_k , $k = 1, 2, 3$, – przedziały czasu odpowiadające oddziaływaniu nieciągłej siły nacisku na szynę.

2. ENERGIA JEDNOOKRESOWA

Pojęcie energii jednookresowej stosowane jest w analizie procesów energetycznych w obwodach elektrycznych w stanie okresowym. W tych warunkach wyznaczenie całkowitej przekazanej energii odbiornikowi w przedziale czasu $\Delta t = nT$, $n \in N$, zostaje sprowadzone do wyznaczenia energii przekazanej w jednym okresie, a następnie do przemnożenia wyznaczonej wartości przez liczbę okresów n

$$W(\Delta t) = nW_T \quad (4)$$

gdzie: W_T – energia jednookresowa.

W przypadku badania skutków oddziaływania nieciągłej okresowej siły normalnej nacisku $F(t)$ w obszarze styku koła z szyną, energię jednookresową można wyznaczyć ze wzoru

$$W_T = \int_0^T F w dt = \int_{y(0)}^{y(T)} F dy_2, \quad w = \frac{dy_2}{dt} \quad (5)$$

Z postaci wyrażenia (5) wynika, że pole powierzchni ograniczonej pętlą na płaszczyźnie opisanej współrzędnymi $(F(t), y_2(t))$ określa energię W_T przekazaną szynie w jednym okresie. Czasowy przebieg przemieszczenia $y_2(t)$ można wyznaczyć rozwiązując układ równań ruchu (1). W celu rozwiązania układu dwóch równań różniczkowych zwyczajnych drugiego rzędu dwóch zmiennych w układ czterech równań różniczkowych pierwszego rzędu czterech zmiennych użyto podstawienia [9]

$$\frac{dy_1}{dt} = y_3(t) \quad \frac{dy_2}{dt} = y_4(t) \quad (6)$$

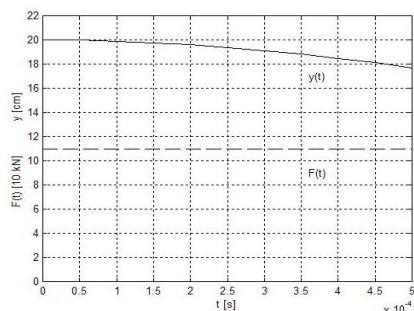
Uzyskany w wyniku podstawienia w postaci (6) układ równań różniczkowych zwyczajnych pierwszego rzędu został rozwiązany numerycznie przy wykorzystaniu funkcji `ode23` z biblioteki MATLAB.

3. WYNIKI BADAŃ

Przy danym okresie $T = 1$ s został oszacowany przedział czasowy Δt_s działania siły nacisku na szynę w miejscu styku. Dla prędkości pociągu $v = 80$ km/h, przyjmując długość obszaru styku $\Delta x = 10^{-2}$ m i korzystając ze wzoru $\Delta x = v \Delta t_s$ oszacowano przedział $\Delta t_s = 0,5$ ms. Przyjęto $F_0 = 110$ kN. Odwołując się do formuły (2) $T_1 = 0,5$ ms, natomiast $T_2 = T_3 = T = 1$ s. Wartości mas oraz parametrów dynamicznych związanych z tłumieniem i sprężystością zostały wzięte z prac [1] i [6]:

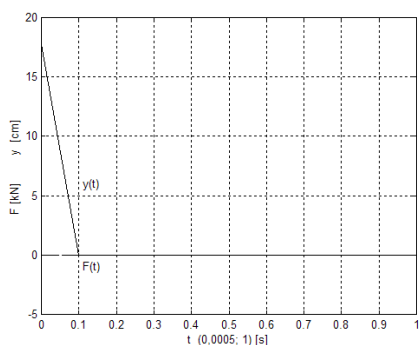
$$M = 264 \text{ kg}, \quad b_2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Ns/m}, \quad k_2 = 2,8 \cdot 10^8 \text{ N/m}, \\ m = 308 \text{ kg}, \quad b_1 = 1,65 \cdot 10^5 \text{ Ns/m}, \quad k_1 = 1,0 \cdot 10^8 \text{ N/m}.$$

Rozwiązując układ równań (1) wyznaczono czasowy przebieg przemieszczenia $y_2(t)$ w przedziale czasu odpowiadającym jednemu okresowi $T = 1$ s. Czasowy przebieg przemieszczenia $y_2(t)$ w przedziale (0; 0,0005) s odpowiadający działaniu siły pionowej w obszarze styku został zilustrowany na rysunku 1.



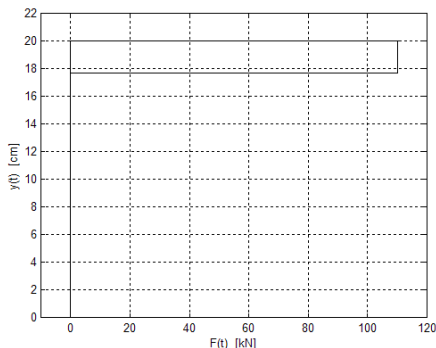
Rys. 1. Przemieszczenie przy $F = 110$ kN, dane z [1] i [6]

Natomiast przebieg czasowy przemieszczenia $y_2(t)$ w przedziale $(0,0005; 1)$ s przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przemieszczenie przy $F = 0$, dane z [1] i [6]

W układzie współrzędnych $(F(t), y_2(t))$ pętla energii jednookresowej przyjmuje postać przedstawioną na rysunku 3.

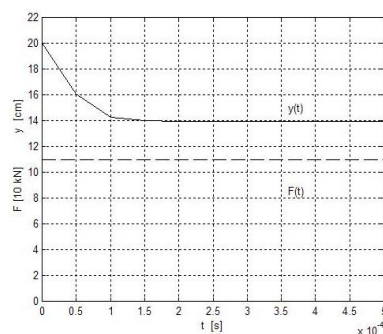


Rys. 3. Pętla energii jednookresowej, podkład elastyczny

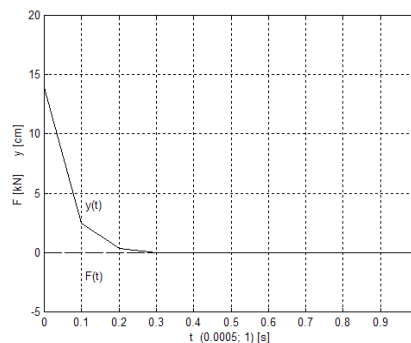
Z wykresu pętli przedstawionej na rysunku 3 (przyjmującej kształt prostokąta) można wyznaczyć wartość energii jednookresowej W_T przekazanej szynie na skutek działania siły normalnej $F(t)$ w jednym okresie T jako pole powierzchni prostokąta, $W_T = 110 \text{ kN} \cdot 2,3 \text{ cm} = 2,53 \text{ kJ}$. Wykonano także obliczenia dla wartości mas oraz parametrów dynamicznych wziętych z prac [6] i [16]:

$$M = 264 \text{ kg}, \quad b_2 = 6,0 \cdot 10^4 \text{ Ns/m}, \quad k_2 = 1,0 \cdot 10^6 \text{ N/m}, \\ m = 200 \text{ kg}, \quad b_1 = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Ns/m}, \quad k_1 = 7,0 \cdot 10^7 \text{ N/m}.$$

Przebieg czasowy $y_2(t)$ w przedziale $(0; 0,0005)$ s odpowiadającym działaniu siły pionowej nacisku w obszarze styku został zilustrowany na rysunku 4, a przebieg czasowy $y_2(t)$ w przedziale $(0,0005; 1)$ s przedstawiono na rysunku 5.

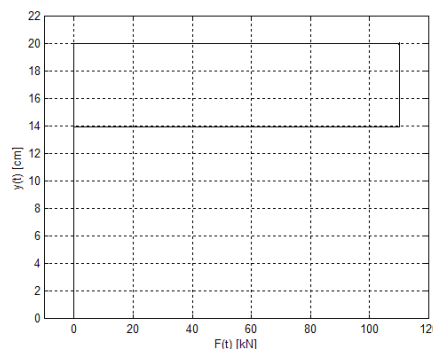


Rys. 5. Przemieszczenie przy $F=110$ kN, dane z [6] i [16]



Rys.5. Przemieszczenie przy $F=0$, dane z [6] i [16]

Pętla energii jednookresowej w tym przypadku przyjmuje postać przedstawioną na rysunku 6.



Rys 6. Pętla energii jednookresowej, elastyczny podkład

Z wykresu pętli przedstawionej na rysunku 6 wyznaczono wartość energii jednookresowej przekazanej szynie na skutek działania siły normalnej $F(t)$ w okresie T , $W_T = 6,66 \text{ kJ}$.

4. WPLYW NIELINIOWOŚCI

W przedstawionych przykładach energia przekazana szynie została wyznaczona przy założeniu modelu liniowego badanego układu. Do modelu układu można wprowadzić nieliniowości, np. przez uwzględnienie nieliniowej charakterystyki parametrów dynamicznych podkładu. Nieliniowa charakterystyka parametru sztywności podkładu może zostać przedstawiona za pomocą następującej formuły [15]:

$$f(y_1) = k_1(\alpha y_1^2 + \beta y_1^3) \quad (7)$$

gdzie: k_1 – stały parametr, α i β – parametry, które mogą zawierać wartości bifurkacyjne.

Przyjęcie nieliniowej charakterystyki parametru sztywności układu wymaga rozwiązania układu nieliniowych równań różniczkowych zwyczajnych. W pracy [15] dla nieliniowości w postaci (7) z wartościami $\alpha = 1,75$ oraz $\beta = -1$ i dla przyjętej siły nacisku w postaci sygnału z dwoma impulsami (3), wyznaczono energię jednookresową przy użyciu następującego wzoru:

$$W_T = \int_0^T F(t)w(t)dt = \int_{P(0)}^{P(T)} w(t)dP(t), \quad (8)$$

gdzie: $P(t) = \int_0^t F(\tau)d\tau$.

Uwzględnienie nieliniowości w modelu układu powoduje zwiększenie zaabsorbowanej energii w kontakcie koło – szyna. Korzyścią ze stosowania koncepcji energii jednookresowej jest utrzymywanie niezmiennego kształtu sygnału wejściowego przy zwiększaniu liczby elementów nieliniowych.

5. IDENTYFIKACJA ŹRÓDEŁ POLA

Badania modelowe zagadnień energetycznych w kontakcie koło-szyna można także przeprowadzić stosując metody identyfikacji źródeł pola. Opracowana przez autorów pracy Metoda Symulacyjna identyfikacji źródeł pola [10] jest efektywną metodą numeryczną wykorzystującą narzędzia obliczeniowe wzięte z analizy kombinatorycznej. W konstrukcji algorytmów metody zastosowano narzędzia obliczeniowe w postaci potęgowych wielomianów monicznych $T_n(q)$ i $P_n(q)$, a w procedurach programów komputerowych wykorzystano zmodyfikowane trójkąty liczbowe generujące wielomiany potęgowe. Badany układ opisany równaniem Poissona ze znanymi warunkami brzegowymi $u|_{\Gamma}$ na brzegu Γ rozpatrywanego obszaru ma postać

$$\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial y^2} = f(x, y) \quad (9)$$

gdzie $x \in (0, l_x)$, $y \in (0, l_y)$, $u = u(x, y) \in R^2$ oznacza funkcję polową, $f = f(x, y) \in R^2$ - funkcję rozkładu źródeł (funkcję źródłową).

Zadanie identyfikacji źródeł pola w badanym układzie (9) polega na wyznaczeniu funkcji rozkładu źródeł $f(x, y)$. W celu rozwiązania tego zadania sposobem numerycznym przybliżono ciągly opis układu modelem dyskretnym. Po zamianie zmiennych ciągłych na dyskretne, np. w przypadku prostokątnej siatki podziału badanego obszaru o wymiarach $l_x \times l_y$ według wzoru $x = ih$, $i = 0, 1, 2, \dots, M$, $y = jh$, $j = 0, 1, 2, \dots, N$, $M = l_x/h$, $N = l_y/h$, h - długość kroku dyskretyzacji, oraz przybliżeniu równania różniczkowego (9) równaniem różnicowym za pomocą schematu różnic skończonych uzyskano układ równań algebraicznych wiążących wartości funkcji polowej u i źródłowej f w węzłach siatki w następujący sposób

$$u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j} + u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1} = h^2 f(i, j) = q_{i,j} \quad (10)$$

$$i=1, 2, \dots, M, j=1, \dots, N,$$

gdzie: $u_{i,j} = u(i, j)$, $q_{i,j} = q(i, j)$.

Warunki brzegowe dla równania (10) przyjmują postać

$$u(0, j) = U_0(j), u(M, j) = U_M(j), \quad j = 0, 1, \dots, N$$

$$u(i, 0) = U_0(i), u(i, N) = U_N(i), \quad i = 0, 1, \dots, M.$$

Dla modelu dyskretnego (10) rozwiązanie zagadnienia identyfikacji źródeł polega na wyznaczeniu wartości funkcji źródłowej $q(i, j)$ w węzłach siatki. Funkcję polową i funkcję źródłową aproksymowano dyskretnym rozkładem Fouriera

$$f_{m,n} = \sqrt{2} \sum_{k=1}^{N-1} F_m(k) \sin \frac{k\pi n}{N}, \quad (11)$$

$$f_{m,0} = f_{m,N} = 0, \quad m = 0, 1, 2, \dots, M,$$

$$u_{m,n} = \sqrt{2} \sum_{k=1}^{N-1} U_m(k) \sin \frac{k\pi n}{N}, \quad (12)$$

$$u_{0,n} = u_{M,n} = 0, \quad n = 0, 1, \dots, N,$$

gdzie $F(k)$ i $U(k)$ oznaczają współczynniki rozkładu dla $k = 1, 2, \dots, N-1$.

Równanie (10) zapisane przy użyciu współczynników rozkładu Fouriera przyjmuje następującą formę

$$\frac{1}{h^2} \left[(U_{m+1}(k) - 2U_m(k) + U_{m-1}(k)) - (4 \sin^2 \frac{k\pi}{2N}) U_m(k) \right] = F_m(k), \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (13)$$

z warunkami brzegowymi określonymi przez $U_0(k) = 0$ oraz wartości $U_M(k)$ wyznaczone z równości $u_{M,n} = 0$, $n = 1, \dots, N$.

Po podstawieniu wielomianu monicznego $P(q_k)$ dla $q_k = 4 \sin^2 \frac{k\pi}{2N}$ do (13) rozwiązanie problemu prostego przyjmuje formę

$$U_m(k) = P_m(q_k) U_1(k) + \sum_{i=1}^{m-1} P_{m-i}(q_k) h^2 F_i(k), \quad (14)$$

$$m = 2, 3, \dots, M-1.$$

Wartości $U_1(k)$ w równaniu (14) można wyznaczyć z warunków brzegowych. Dla $N = M$ z układu $M-1$ równań można wyznaczyć zestaw współczynników $U_M(k)$, $k = 1, 2, \dots, M-1$. Następnie przez podstawienie tych współczynników do równania (4) dla $m = M$, można otrzymać zestaw współczynników $U_1(k)$ dla $k = 1, 2, \dots, M-1$. Funkcję polową u można odtworzyć według formuły (11). Natomiast rozwiązanie problemu odwrotnego wyznaczenia funkcji źródłowej przyjmuje postać

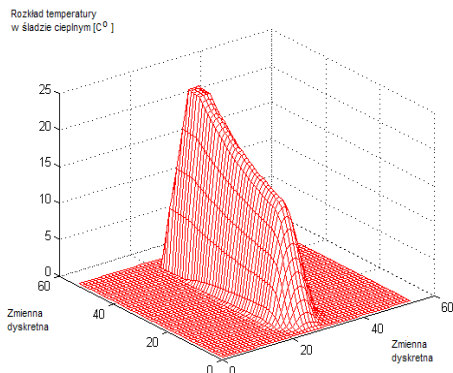
$$F_i(k) = \frac{U_{i+1}(k) - P_{i+1}(q_k) U_1(k) - \sum_{l=1}^{i-1} P_{i+1-l}(q_k) h^2 F_l(k)}{P_i(q_k) h^2} \quad (15)$$

Funkcję źródłową f można odtworzyć według formuły (12). Ponieważ zagadnienie identyfikacji źródeł pola jest problemem odwrotnym, zatem jego rozwiązanie wymaga stabilizacji wyników obliczeń. W celu zapewnienia stabilizacji wyników Metoda Symulacyjna została uzupełniona przez specjalną numeryczną procedurę aproksymacyjną opracowaną na podstawie metody odwrotnych odległości używaną do wygładzania danych w układach 2-D, która stanowi rodzaj samoregulacji. Przy pomocy Metody Symulacyjnej można dokonać identyfikacji źródeł w śladzie cieplnym na powierzchni tocznej szyny wywołanym kontaktem tocznym koło-szyna.

Rozpatrywane zagadnienie przepływu ciepła w szynie jest opisane równaniem Poissona

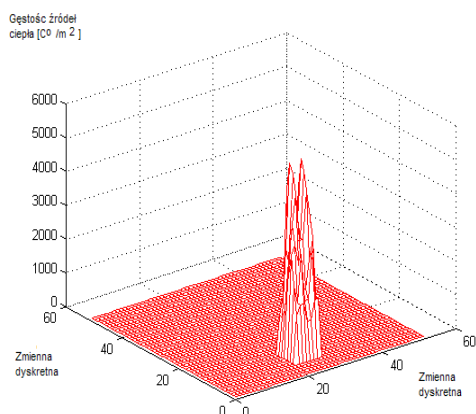
$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} = f(x, y), \quad (16)$$

gdzie $T(x, y)$ – funkcja rozkładu temperatury.
Dane wejściowe (przedstawione na rysunku 7) stanowiły rozkłady temperatury w śladzie ciepłym wyznaczone eksperymentalnie [10]



Rys. 7. Rozkład temperatury w śladzie ciepłym

Stosując do obliczeń Metodę Symulacyjną wyznaczono funkcję źródłową stanowiącą rozkład gęstości źródeł ciepła zilustrowaną na rysunku 8.



Rys. 8. Wyznaczona funkcja źródłowa

Identyfikacja źródeł w śladzie ciepłym stanowi wkład do pierwszego etapu rozwiązania problemu odwrotnego kontaktu koło-szyna. Kontakt toczny koło-szyna wywołuje skutki cieplne na powierzchni szyny, zatem wychodząc od rozkładów temperatury poprzez rozkłady gęstości tarcia można wyznaczyć siły działające na układ. Zagadnienie odwrotne kontaktu koło – szyna można sformułować następująco: badanie kontaktu tocznego koło – szyna przy zastąpieniu modelu mechanicznego przez model cieplny.

PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy wykazano, że metoda modelowania procesów energetycznych wykorzystująca pojęcie energii jednookresowej jest użyteczna w badaniach kontaktu koło – szyna przy założeniu, że pionowa siła nacisku na szynę jest nieciągła i periodyczna. Efektywność obliczeniowa stosowania opracowanej metody polega na wyznaczeniu wartości energii przekazanej szynie przy eliminacji analizy częstotliwościowej. Korzyścią stosowania zaproponowanej metody jest także możliwość dokonania oceny przekazanej energii

tylko w oparciu o analizę odpowiednich pętli na wykresach w płaszczyźnie opisanej przez współrzędne odpowiadające sile nacisku i przemieszczeniu w płaszczyźnie pionowej, co sprowadza się do oszacowania pola na wykresie obejmowanym przez pętlę. W przypadku nieciągłej siły nacisku uzyskane pętle przyjmują kształt prostokąta. Natomiast w przypadku sinusoidalnego przebiegu sygnału siły nacisku pętle przyjmują kształt elipsy, co też uprasza obliczenia energii jednookresowej, gdyż do wyznaczenia pola objętego pętlą stosuje się wówczas wzór na pole elipsy, po uprzednim jej obrocie [15].

Model liniowy kontaktu koło – szyna znajduje zastosowanie w ograniczonym przedziale częstotliwości. Ponieważ częstotliwość, jako odwrotność okresu, zależy od prędkości pociągu, dlatego w przypadku większych prędkości przyjęty model należy przebudować wprowadzając zależność współczynników sztywności i tłumienia od częstotliwości. Ponadto w celu zbadania zależności modelu od prędkości pociągu należy uwzględnić wzbudzenia wywołane nierównościami toru. Zaproponowaną w pracy metodę można uzupełnić o elementy nieliniowe odpowiadające nieliniowym charakterystykom parametrów dynamicznych podkładu.

Wyznaczanie energii przekazanej szynie w kontakcie tocznym koło – szyna za pomocą opracowanej metody modelowania może znaleźć zastosowanie w diagnostyce szyny i pojazdu przy ocenie stopnia zużycia materiałów na styku szyny i koła. Bardziej precyzyjne wyniki badań można otrzymać dokonując korekty współczynników sztywności i tłumienia ze względu na zmiany materiałowe w obszarze kontaktu powstałe podczas codziennej eksploatacji.

Natomiast Metoda Symulacyjna identyfikacji źródeł pola jest przydatna przy wyznaczeniu rozkładu gęstości źródeł ciepła na powierzchni szyny, co stanowi pierwszy etap rozwiązania problemu odwrotnego kontaktu koło – szyna. Kontakt toczny koło – szyna wywołuje skutki cieplne na powierzchni szyny, zatem w oparciu o zmierzone rozkłady temperatury w śladzie ciepłym, po wyznaczeniu źródeł pola, można określić rozkłady gęstości tarcia i w rezultacie wyznaczyć siły działające na układ.

BIBLIOGRAFIA

1. Bezin Y., Iwnicki S. D., Cavalletti M., de Vries E., Shazad F., Evans G., *An investigation of sleeper voids using a flexible track model integrated with railway multi-body dynamics*. Journal of Rail and Rapid Transit 2009, vol. 223, no. 6, pp. 597-607.
2. Bogacz R., Chudzikiewicz A., Frischmuth K., *Friction, Wear and Heat*. Mat. XI Warszt. Nauk. PTSK nt. „Symulacja w badaniach i rozwoju”, Białystok-Augustów, wrzesień 2004, str. 67-76.
3. Bogacz R., Frischmuth K., *Dynamical and evolutionary effects in vehicle – track interaction*. Mat. XV Warszt. Nauk. PTSK nt. „Symulacja w badaniach i rozwoju”, Zakopane, wrzesień 2008, str. 31-37.
4. Bogacz R., Świdorski Z., *Symulacja warunków eksploatacyjnych powodujących uszkodzenia powierzchni tocznych kół i szyn kolejowych*. Symulacja w badaniach i rozwoju 2010, Vol. 1, No. 2, str. 119-130.
5. Bril J., Rydygier E., *Analiza stanu bezpieczeństwa transportu krajowego*. Mat. XX Warszt. Nauk. Polskiego Towarzystwa Symulacji Komputerowej nt. „Symulacja w badaniach i rozwoju”, Koszalin-Unieście, czerwiec 2013, str. 10-11.
6. Kisilowski J. (red.), *Dynamika układu mechanicznego pojazd szynowy – tor*. PWN, Warszawa 1991.
7. Kisilowski J., *O pewnych zjawiskach mających wpływ na bezpieczeństwo ruchu pociągu o podwyższonej prędkości*. Technika Transportu Szynowego 2012, nr 9.

8. Kisilowski J., Knothe K. (red.), *Advanced Railway Vehicle Dynamics*. WN-T, Warszawa 1991.
9. Palczewski A., *Równania różniczkowe zwyczajne*. WNT, Warszawa 2004.
10. Strzyżakowski Z., Rydygier E., *Application of numerical methods of field sources identification to selected issues in rail vehicle – track systems*. Prace Naukowe PW, Transport, Z. 71, Warszawa 2009, pp. 196-205.
11. Rydygier E., Strzyżakowski Z., *Modelling of contact problems involved in ensuring the safety of rail transport*. LogForum 2013, nr 9(4), pp. 231-238.
12. Rydygier E., Strzyżakowski Z., *Modelowanie procesów energetycznych w kontakcie koło – szyna na potrzeby diagnostyki toru kolejowego*. Logistyka 2014, nr 6.
13. Steenbergen M. S., *Modeling of Wheels and Rail Discontinuities in Dynamic Wheel – Rail Contact Analysis*. *Vehicle System Dynamics*, 2006, vol. 44, no. 10, pp. 763-787.
14. Strzyżakowski Z., *Modelowanie zagadnień dynamicznych w układach transportowych*. Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 2007.
15. Trzaska Z., *Modeling of energy processes in wheel-rail contacts operating under influence of periodic discontinuous forces*, *Journal of Transportation Technologies* 2012, Vol. 2, pp. 129-143.
16. Zboiński K., *Metodyka modelowania dynamiki pojazdów szynowych z uwzględnieniem zadanego ruchu unoszenia i jej zastosowania*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, Z. 43, Warszawa 2000.

Autorzy:

dr **Edward Rydygier** – Urząd m.st. Warszawy, ul. Kondratowicza 20, 00-983 Warszawa, e-mail: erylidygier@gmail.com
dr hab. **Zygmunt Strzyżakowski**, Prof. UTH, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, e-mail: zstrz@data.pl

COMPUTER SIMULATIONS OF ENERGY PROCESSES IN THE WHEEL-RAIL CONTACT

Abstract

. Paper presents different ways of simulated investigations of energy processes in the results in a rolling wheel-rail contact. Calculations were carried out using the method of energy modeling using one-period energy concept. It was assumed that the from the wheel on the rail run discontinuous periodic force. Dynamic model of the wheel-rail contact has been described in a linear system of differential equations of second order. It was pointed the possibility of extending the linear model with the nonlinear elements to take into account the non-linear characteristics of the dynamic parameters of the sleeper. Several computer simulations for different mechanical parameters were done and set the appropriate amount of energy absorbed by rail was calculated. In this paper there was present another approach to model a wheel-rail contact which uses an identification of field sources on the rolling surface of rail. It has been shown that the presented model studies of energy processes in the contact wheel-rail can be used to assist in the diagnostics of the railway vehicle.