

Władysław KOC¹
Andrzej WILK²
Sławomir GRULKOWSKI³
Piotr CHROSTOWSKI⁴

MODELOWANIE PROCESU REGULACJI OSI TORU KOLEJOWEGO

Na bezpieczeństwo transportu kolejowego wpływa między innymi bieżący stan infrastruktury oraz jej niezawodność. Ważnym czynnikiem mającym wpływ na bezpieczeństwo jest odpowiednie ustabilizowanie rusztu torowego, przez co minimalizowane jest ryzyko utraty stateczności konstrukcji. Zarówno minimalizacji imperfekcji, jak też zapewnieniu stateczności konstrukcji służy proces regulacji osi toru. W referacie przedstawiono ideę komputerowego wspomaganie oceny stanu infrastruktury poprzez modelowanie procesu pracy podbijarki, tj. maszyny dokonującej regulacji osi toru. Wspomaganie komputerowe jest w tym przypadku elementem bardzo istotnym, natomiast rzeczą niezwykle trudną jest ocena wspomnianych zjawisk jedynie na drodze doświadczalnej.

MODELLING OF RAILWAY TRACK ADJUSTMENT PROCESS

On the safety of rail transport affect the current state of infrastructure and its reliability. An important factor affecting the security is adequate state of stabilization of the ballast bed, which minimizes the risk of loss of track's stability. Both minimization of the imperfections, as well as ensuring the stability of the structure serves the process of track's adjustment. The paper presents the idea of the computer-supported assessment of the infrastructure by the use of the modeling of the tamping machine's work, i.e. the machine making the track's adjustment. Computer assistance in this case is a very important element, because the assessment these phenomena only on the way of experiments is extremely difficult.

¹ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska; 80-233 Gdańsk; ul. G. Narutowicza 11/12.
tel: + 48 58 347-10-26, Fax: + 48 58 347-26-44, e-mail: kocwl@pg.gda.pl

² Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska; 80-233 Gdańsk; ul. G. Narutowicza 11/12.
tel: + 48 58 347-10-26, Fax: + 48 58 341-08-80, e-mail: awilk@ely.pg.gda.pl

³ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska; 80-233 Gdańsk; ul. G. Narutowicza 11/12.
tel: + 48 58 347-10-26, Fax: + 48 58 347-26-44, e-mail: slawi@pg.gda.pl

⁴ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska; 80-233 Gdańsk; ul. G. Narutowicza 11/12.
tel: + 48 58 347-10-26, Fax: + 48 58 347-26-44, e-mail: piochros@pg.gda.pl

1. WPROWADZENIE

W obecnej dobie rozwoju technik komputerowych, związanych z przetwarzaniem sygnałów elektrycznych na binarne, akwizycją wielkiej ilości danych oraz przesyłaniem ich do baz danych, systemy diagnostyczne nabierają charakteru zautomatyzowanego. Już obecnie można mówić o fazie zautomatyzowanego monitoringu konstrukcji inżynierskich. Również w drogach kolejowych pomiary wykonywane są z dużo większą częstotliwością i również mają charakter automatyczny. Największą trudnością w pełnym zautomatyzowaniu monitoringu toru kolejowego jest jego liniowy charakter. W związku z tym pomiary odbywają się podczas przejazdu specjalnie skonstruowanych drezyn pomiarowych, z których najnowocześniejsze mogą rejestrować dziesiątki różnych cech konstrukcji. Równoległe do rozwoju technik pomiarowych trwają prace nad systemami wspomagającymi interpretację wyników. Sam fakt zgromadzenia setek terabajtów danych nie przyniesie pożytku, jeśli nie będzie istniał system pozwalający na łatwy dostęp do poszczególnych lokalizacji pomiaru oraz do przeprowadzania analiz, polegających przede wszystkim na prognozowaniu badanych zjawisk [1].

W inżynierii kolejowej jednym z większych problemów, zarówno natury pomiarowej jak i analitycznej, jest ocena ryzyka utraty stateczności toru. Wynika to z faktu, że głównymi czynnikami wpływającymi na stan równowagi konstrukcji są siły osiowe w szynach kolejowych oraz charakterystyka oporu poprzecznego konstrukcji nawierzchni. Obydwa te zjawiska mają charakter zmienny na długości toru oraz w dziedzinie czasu eksploatacji konstrukcji. Z racji tego, nie można mówić o analizie stateczności toru kolejowego bez współdziałania w podejściu doświadczalnym oraz analitycznym.

Z tego też względu w Katedrze Inżynierii Kolejowej Politechniki Gdańskiej od połowy lat 90. jest realizowany program badawczy, mający na celu opracowanie metody bezpośredniego pomiaru sił osiowych i oporu poprzecznego, a także komputerowe wspomaganie w określaniu tych wielkości na podstawie wyników pomiaru.

2. IDEA OKREŚLANIA SIŁ OSIOWYCH W SZYNACH ORAZ OPORÓW POPRZECZNYCH RUSZTU TOROWEGO

2.1 Podbijarka torowa jako maszyna diagnostyczna

Zarówno monitorowanie sił osiowych w szynach toru bezстыkowego, jak i stanu oporów poprzecznych jest zadaniem niezwykle trudnym [1, 6, 7, 8, 14]. Metody nieniszczące, które nie ingerują w ustabilizowaną konstrukcję toru kolejowego, są obecnie prężnie rozwijane, jednak nie opracowano jak dotąd metody przejścia z obrazu niewidocznych warstw podsypki [3, 4, 5] na ogólną siłę oporu. W związku z tym najpewniejszą metodą pozyskiwania informacji o oporach występujących w eksploatowanym torze kolejowym jest bezpośredni pomiar działającej siły i odpowiadającego jej przemieszczenia rusztu torowego w płaszczyźnie poziomej [7]. Niestety, tego typu badania powodują naruszenie struktury podsypki, a więc w praktyce nie mogą stanowić skutecznego narzędzia diagnostycznego.

Od połowy lat 90. ubiegłego wieku w Katedrze Inżynierii Kolejowej Politechniki Gdańskiej rozwijana jest koncepcja wykorzystaniem automatycznej podbijarki torowej w diagnostyce toru bezстыkowego. Głównym zagadnieniem, którym zajmowano się w

związku z pracą podbijarki, było poszukiwanie metody określenia stanu sił podłużnych w szynach toru bezстыkowego [2]. Podczas tych prac narodziła się również idea prowadzenia równoległych badań nad oporami poprzecznymi w torze kolejowym. W latach 2005 – 2009 działania te zaowocowały skonkretyzowaniem się nowej koncepcji wyznaczania sił podłużnych i oporów poprzecznych w torze kolejowym [9, 10].

Według tej koncepcji, opisaną pokrótce w niniejszym referacie, wyznaczanie wartości sił podłużnych i oporów poprzecznych w torze kolejowym postanowiono połączyć z procesem technologicznym, w którym przemieszczenia boczne ruszta torowego wykonywane są w zakresie zaplanowanych i koniecznych do wykonania robót. Taka sytuacja występuje podczas prac związanych z regulacją geometryczną toru kolejowego z wykorzystaniem podbijarki torowej. W celu przystosowania podbijarki do wyznaczonego przez autorów celu, skonstruowano odpowiednią aparaturę pomiarową dostosowaną do warunków, w jakich podbijarka wykonuje standardowe czynności związane z regulacją geometryczną toru kolejowego (rys. 1).



Rys. 1. Automatyczna podbijarka torowa z zamontowanymi czujnikami pomiarowymi

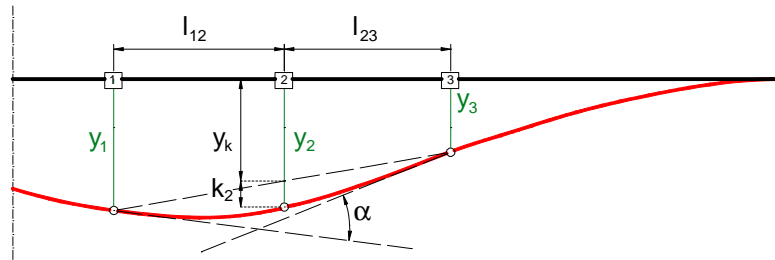
2.2 Idea wyznaczania sił podłużnych w szynach toru bezстыkowego

Siłę osiową w tokach szynowych, powstałą w skutek zmian temperatury oraz ruchu pojazdów szynowych, postanowiono wyznaczać w sposób pośredni, definiując odpowiedni wskaźnik, który mógłby w miarodajny sposób szacować jej wartość. Jako że w wyniku nasunięć poprzecznych w procesie regulacji geometrycznej tor (na prostej) zostaje zdeformowany do postaci krzywoliniowej, możliwe okazało się wyznaczenie wskaźnika krzywizny. Bazując na założeniu, że krzywizna odkształconego ruszta torowego ma ścisły związek z siłą osiową panującą w tokach szynowych, opracowano metodę wyznaczania tego wskaźnika oraz sposób na przejście z wartości wskaźnika na siłę osiową.

Aby opracować powyższą metodę, autorzy skupili się na metodyce przeprowadzenia niezbędnych doświadczeń eksperymentalnych, zarówno na stanowisku stacjonarnym, jak i podczas standardowych prac związanych z utrzymaniem toru kolejowego [13].

Ideę wyznaczania wskaźnika krzywizny pokazano na rysunku 2. Pomiar przemieszczeń poziomych y_1 , y_2 i y_3 odbywa się za pomocą czujników zainstalowanych na ramie podbijarki torowej. Przyjęty wskaźnik krzywizny k_2 jest określony przez wartość strzałki

poziomej w punkcie 2 dla cięciwy łączącej punkty 1 i 3. Wielkość wskaźnika k_2 jest zależna od kąta α między stycznymi do krzywej wygięcia w obu skrajnych punktach pomiarowych. Oznacza to zgodność z definicją krzywizny, oczywiście w pewnym przybliżeniu.



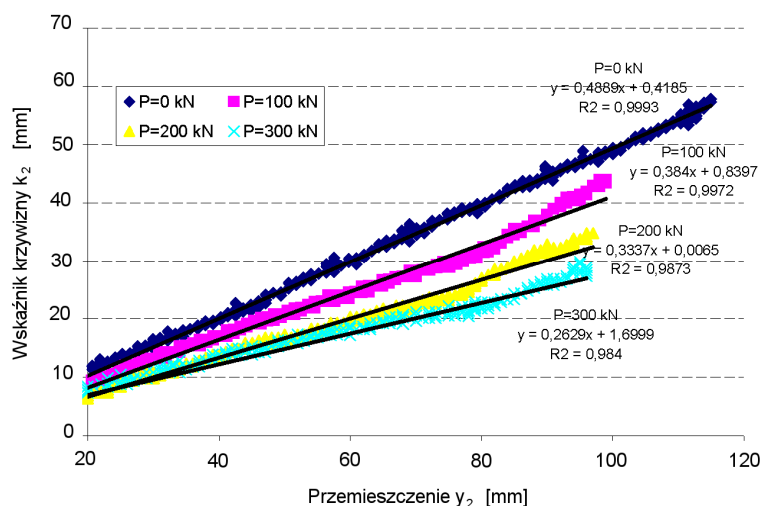
Rys. 2. Schemat ideowy sposobu wyznaczania wskaźnika krzywizny k_2 ; 1, 2, 3 – punkty pomiaru przemieszczeń; y_1, y_2, y_3 - wartości przemieszczeń poziomych w punktach 1, 2, 3; α – kąt między stycznymi do krzywej wygięcia

Jak wynika z rysunku 2, wskaźnik krzywizny k_2 stanowi różnicę rzędnej y_2 i wartości y_k , wyznaczonej z następującej zależności (dla $y_1 > y_3$):

$$y_k = y_1 - (y_1 - y_3) \frac{l_{12}}{l_{12} + l_{23}} \quad (1)$$

Rezultatem licznych serii doświadczeń było sporządzenie nomogramów pozwalających na odczytanie szacunkowej wartości siły osiowej na podstawie wskaźnika krzywizny. Było to możliwe dzięki kontrolowaniu wielkości sił podłużnych wprowadzanych do toków szynowych podczas eksperymentów na stacjonarnym stanowisku doświadczalnym.

Zależności wskaźnika krzywizny k_2 od przemieszczenia y_2 i siły osiowej P zaprezentowano na rysunku 3. Po raz kolejny potwierdzono wcześniejsze obserwacje, że wielkość krzywizny bezpośrednio zależy od siły osiowej w szynach toru kolejowego. Uzyskane zależności $k_2 = f(y_2)$ mają w prezentowanym zakresie bardzo wyraźny charakter liniowy.



Rys. 3. Wykresy prostych regresji $k_2 = f(y_2)$ dla różnych wartości sił osiowych w szynach

Przedstawione na rysunku 3 zależności umożliwiają – w stosunkowo prosty sposób – wyznaczenie sił osiowych w szynach poprzez pomiar przemieszczeń toru w trzech punktach w trakcie pracy podbijarki oraz określenie wskaźnika krzywizny.

Tak więc ogólny tok postępowania w przedstawionym powyżej sposobie wyznaczania sił podłużnych w szynach jest następujący:

1) skalowanie zależności $k_2 = f(y_2)$ dla sił naciągu będących wielokrotnością wartości ΔP (np. przy $\Delta P = 50$ kN)

$$k_2^{P_i} = a_{P_i} + b_{P_i} \cdot y_2 \tag{2}$$

$$P_i = i \cdot \Delta P, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, n; \tag{3}$$

2) wyznaczenie wartości przemieszczeń y_2^S i wskaźników krzywizny k_2^S w eksploatowanym torze kolejowym;

3) obliczanie wskaźników krzywizny $k_2^{S_i}$ odpowiadających przemieszczeniu y_2^S dla różnych sił P_i

$$k_2^{S_i} = a_{P_i} + b_{P_i} \cdot y_2^S, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, n; \tag{4}$$

4) znajdowanie przedziału, w którym zawiera się wskaźnik k_2^S

$$k_2^S \in \langle k_2^{S_i}, k_2^{S_{i+1}} \rangle, \tag{5}$$

gdzie: $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$;

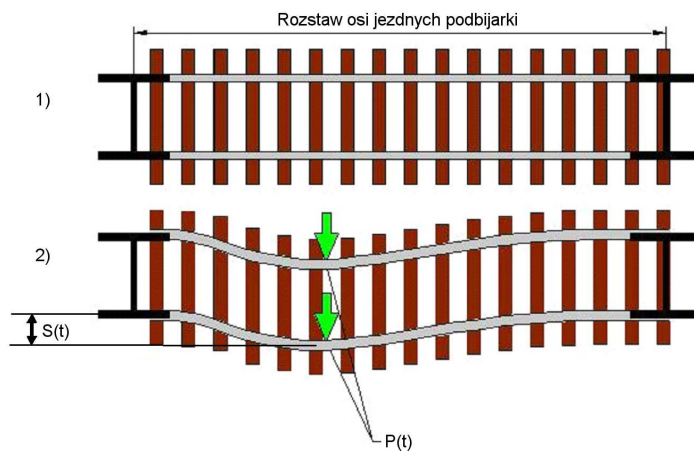
5) wyznaczenie siły S

$$S = S_i + \frac{k_2^{S_i} - k_2^S}{k_2^{S_i} - k_2^{S_{i+1}}} \cdot \Delta P \quad (6)$$

2.3 Idea wyznaczania oporu poprzecznego

Rozwijany program badawczy obejmował również metodę wyznaczania oporów poprzecznych w torze kolejowym. Opór poprzeczny jest bezpośrednio związany ze stanem ustabilizowania podsypki tłuczniowej. W trakcie prowadzonych badań z wykorzystaniem podbijarki torowej zauważono, że pomiar siły na tłoczyskach poziomych siłowników hydraulicznych dostarcza informacji o zróżnicowanym wpływie podsypki na przebieg sygnałów czasowych mierzonej wielkości. W związku z tym stwierdzono, że rejestracja wielkości pozwalających oszacować siłę, z jaką podbijarka dokonuje przemieszczenia poprzecznego rusztu torowego, jest kierunkiem właściwym dla opracowania metody określania oporów poprzecznych w eksploatowanym torze kolejowym. Na tej podstawie sformułowano założenia metody, opracowano system pomiarowy oraz metodykę prowadzenia eksperymentów, które w jak najmniejszym stopniu miały ingerować w funkcjonowanie maszyny oraz w harmonogram jej prac prowadzonych w trakcie standardowych czynności technologicznych.

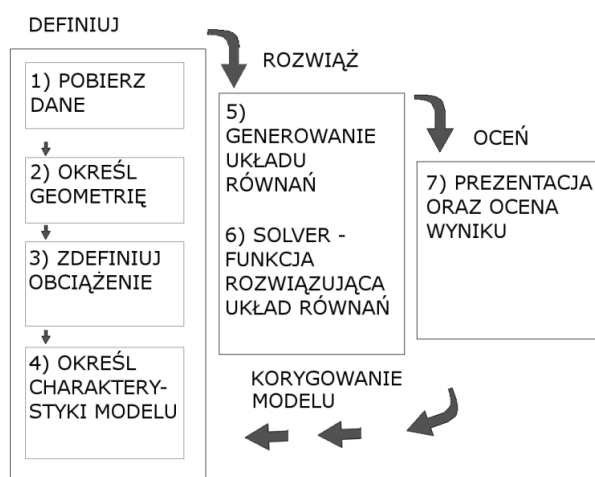
Ideę pomiaru niezbędnych do wyznaczenia oporów wielkości przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Idea wyznaczania oporu poprzecznego na podstawie pomiaru: $P(t)$ - sygnał czasowy siły wymuszającej, $S(t)$ - sygnał czasowy przemieszczenia poprzecznego. 1) - tor przed nasunięciem poprzecznym, 2) - tor zdeformowany

W wyniku tak przeprowadzonych pomiarów otrzymano (po odpowiednim przeliczeniu) sygnały czasowe siły oraz przemieszczenia. Sygnały te posłużyły do zdefiniowania praktycznych wskaźników oceniających opór poprzeczny w danej lokalizacji [11].

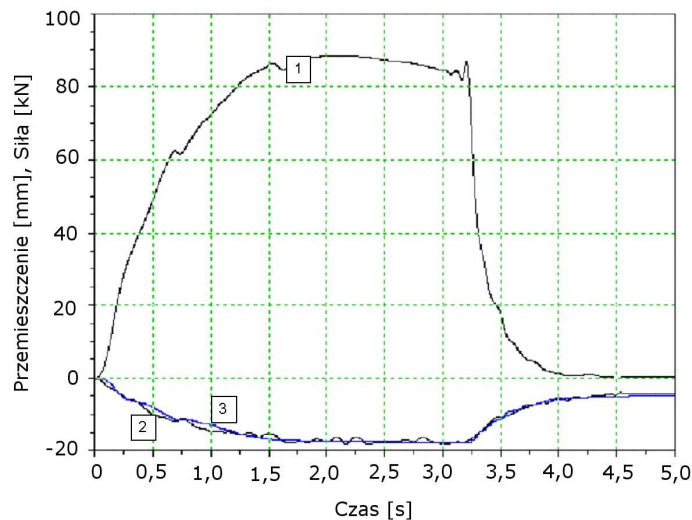
Natomiast aby z danych sygnałów wyodrębnić charakterystykę oporu związanego jedynie ze stopniem ustabilizowania podsypki, należy dokonać dekompozycji sygnału na składowe odpowiadające sztywności ramowej deformowanego rusztu torowego oraz poszukiwanego oporu. W tym celu sporządzono aplikację symulującą badany proces nasuwania toru przez podbijkę [10]. Do napisania programu posłużono się środowiskiem Scilab [15]. Ogólny algorytm postępowania przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Ogólny algorytm działania programu wspomagającego określenie oporu poprzecznego w torze kolejowym

Program komputerowy generuje (tworzy) model matematyczny fragmentu rusztu kolejowego. Model ten wyprowadzony jest z metody energetycznej Lagrange'a i zakłada, że odcinek toru kolejowego można przedstawić jako zbiór stosunkowo wielu elementów skupionych zachowawczych (bezwładnościowych i sprężystych) oraz dyssypatywnych (tłumiących) [12]. Relacje między elementami skupionymi ujmuje macierz więzów a model końcowy wynika z równania Eulera-Lagrange'a.

Dokładny przebieg procesu określania charakterystyk sprężystych oraz rozmieszczenia masy układu omówiono w pracy [10]. Głównym zadaniem programu miało być wspomaganie określania charakterystyki związanej z dyssypacją energii w procesie nasuwania. Poszukiwana jest zatem nieliniowa funkcja uogólnionego oporu poprzecznego. Program pozwala na dobranie współczynników założonej funkcji oporu na drodze iteracyjnej. Na tym etapie osoba analizująca musi samodzielnie dojść do odpowiednich wartości parametrów, opierając się na wyniku symulacji numerycznej. Celem jest uzyskanie zgodności odpowiedzi modelu z odpowiedzią rzeczywistej konstrukcji, co okazuje się możliwe, ponieważ do obciążenia modelu program wykorzystuje sygnały czasowe siły pozyskane z badań doświadczalnych. Na rysunku 6 przedstawiono wynik symulacji komputerowej na tle przemieszczenia zarejestrowanego w przykładowej lokalizacji w eksploatowanym torze kolejowym.



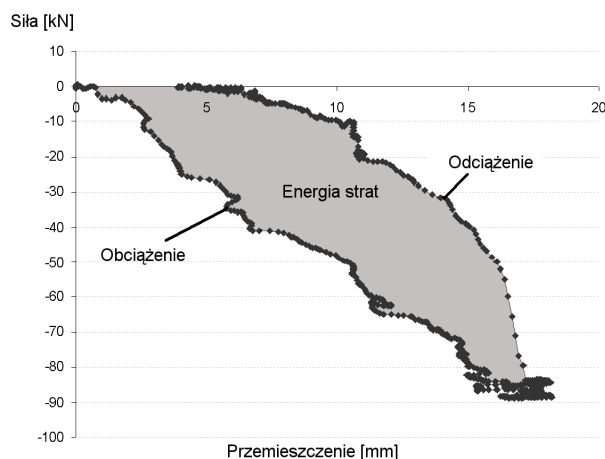
Rys. 6. Wynik symulacji komputerowej na tle sygnału obciążenia i przemieszczenia rusztu torowego w wybranej lokalizacji. 1 – sygnał siły $P(t)$, 2 – sygnał przemieszczenia konstrukcji $S(t)$, 3 – sygnał reakcji modelu jako wynik ostatecznej symulacji

Jak wynika z przeprowadzonych symulacji, możliwe jest określenie funkcji opisującej opór poprzeczny tak, aby odpowiedź modelu na obciążenie pozyskane na drodze doświadczalnej była zbieżna z odpowiedzią obciążonego rusztu torowego. Kolejnym krokiem w rozwijaniu programu wspomagającego będzie zautomatyzowanie doboru współczynników funkcji. Dla przykładu pokazanego na rysunku 6 nieliniowa funkcja oporu T_{ob} w fazie obciążenia poprzecznego opisana została następującym równaniem:

$$T_{ob} = 1,85 \cdot \arctan\left(\frac{t}{0,18}\right)^{2,75} \quad (7)$$

3. ALTERNATYWNA KONCEPCJA WYZNACZANIA SIŁY PODŁUŻNEJ W SZYNACH

Podczas analizowania sygnałów czasowych, będących wynikiem pomiaru oporów poprzecznych w trakcie pracy podbijaki, autorzy zauważyli, że istnieje możliwość wnioskowania o sile w tokach szynowych na podstawie zjawiska histerezy. Zjawisko to można zaobserwować przedstawiając sygnał siły (w fazie obciążenia i odciążenia) w funkcji przemieszczenia. Sytuację tę przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Efekt histerezy energii deformacji rusztu torowego w próbie obciążenie – odciażenie w przykładowej lokalizacji eksploatowanego toru kolejowego

Pole wewnątrz pętli histerezy ma wymiar energii i określa energię strat. Wartość wyrażona w dżulach odpowiadająca temu polu mówi o dyssypacji energii mechanicznej układu na skutek procesów związanych z tłumieniem na styku podkład – podsypka oraz w samej strukturze rusztu torowego i podsypki. Można wykazać, że istnieje zależność pomiędzy energią potencjalną skumulowaną w szynach w wyniku istnienia rozciągających sił osiowych oraz odkształcenia rusztu przez podbijkarkę, a wskazaną energią strat. Innymi słowy, im większa wartość siły rozciągającej w szynach, tym mniejsze zjawisko histerezy powinno zostać zaobserwowane na drodze pomiaru. W skrajnej sytuacji, tj. gdy poziom siły rozciągającej będzie odpowiednio duży, krzywa obciążenia i odciażenia powinny wyraźnie zbliżyć się do siebie. Odizolowanie wpływu nieliniowej charakterystyki oporu poprzecznego może być możliwe przy założeniu, że w fazie odciażenia rusztu torowego skuteczny opór poprzeczny, wynikający ze stanu ustabilizowania podsypki tłuczniowej, jest praktycznie pokonany. Pozostały resztkowy opór na przemieszczenie wynika głównie z siły tarcia na styku podkład – podsypka. Siła ta jest znacznie łatwiejsza do określenia niż w nieliniowej fazie obciążenia, ponieważ zależy głównie od stałej siły nacisku i aktualnych współczynników tarcia. Przedstawiając założenie opisanej metody, autorzy mają na celu zasygnalizowanie aktualnego stanu zaawansowania omówionego projektu badawczego.

4. WNIOSKI

Badania prowadzone w celu określenia możliwości diagnozowania stanu sił osiowych oraz oporów poprzecznych podczas procesu technologicznego regulacji geometrycznej toru doprowadziły do opracowania metodyki wyznaczania tychże wielkości. Badania te zaowocowały zdefiniowaniem wskaźników, które mogą służyć do porównywania badanych wielkości na długości danej linii kolejowej.

Aby określić nieliniową charakterystykę oporu poprzecznego, niezbędne jest wspomaganie komputerowe prowadzonych badań. Opracowywany program komputerowy

pozwała na określenie owej charakterystyki w konkretnej lokalizacji w eksploatowanym torze kolejowym.

Zespół badawczy nadal rozwija zarówno metodykę doświadczalną w omawianej dziedzinie, jak również metody wspomaganie numerycznego. W przyszłości autorzy zamierzają opracować dodatkową, alternatywną metodę wyznaczania wartości siły osiowej w szynach badając zjawisko histerezy, obserwowanej na drodze doświadczalnej, przy wspomaganii komputerowym.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bałuch M.: *Interpretacja pomiarów i obserwacji nawierzchni kolejowej*, Politechnika Radomska, Radom 2005.
- [2] Barylski A., Koc W., Wilk A.: *Longitudinal forces in railway track and tamping machine shifting sets*, NDT&E International, 1999, Vol. 32, pp. 445-455.
- [3] Carpenter D., Jackson P. J., Jay A.: *Enhancement of the GPR method of railway trackbed investigation by the installation of radar detectable geosynthetics*, NDT&E International, 2004, Vol. 37, pp. 95-103.
- [4] Clark M., Gordon M., Forde M. C.: *Issues over high-speed non-invasive monitoring of railway trackbed*, NDT&E International, 2004, Vol. 37, pp. 131-139.
- [5] Clark M., McDann D. M., Forde M. C.: *Infrared thermographic investigation of railway track ballast*, NDT&E International, 2002, Vol. 35, pp. 83-94.
- [6] Czyczula W.: *Tor bezstykowy*, Politechnika Krakowska, Kraków 2002.
- [7] ERRI D 202/RP7 *Improved knowledge of forces in CWR track (including switches), Lateral and longitudinal resistance measurements. Synthesis report*, Utrecht, NL, April 1999.
- [8] ERRI D 202/RP12 *Improved knowledge of forces in CWR track (including switches), Final report*, Utrecht, NL, April 1999.
- [9] Koc W., Wilk A.: *Investigations of methods to measure longitudinal forces in continuous welded rail tracks using the tamping machine*, Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit, 2009, 223 (F1), pp. 61-73.
- [10] Koc W., Wilk A., Chrostowski P., Grulkowski S.: *Determination of the Transverse Resistance Characteristics in the Railway Track*, ASCE, Journal of Transportation Engineering, ISSN:1943-5436 (online), posted ahead of print 26 April 2010.
- [11] Koc W., Wilk A., Chrostowski P., Grulkowski S.: *The conception of conducting a research of the lateral resistance in the track structure during the tamping process*. [CD-ROM] Conference Papers of 10th International Conference & Exhibition RAILWAY ENGINEERING–2009, London, United Kingdom, 2009, Ballasted Trackbed Section.
- [12] Koc W., Wilk A., Dobrowolski P., Grulkowski S.: *Numerical analysis of the rail mechanics in the process of adjustment of track level*. . [CD-Rom] Conference Papers of The Fifth International Conference RAILWAY ENGINEERING – 2002 “Maintenance and Renewal of Permanent Way ; Power & Signaling; Structures & Earthworks”, London, United Kingdom, 2002, Rail Maintenance & Improvement Section

-
- [13] Koc W., Wilk A., Grulkowski S., Chrostowski P.: *Poszukiwania metody określania sił podłużnych w szynach toru bezstykowego*, Technika Transportu Szynowego 2009, nr 1-2, s. 73-81.
- [14] Towpik K.: *Utrzymanie nawierzchni kolejowej*, WKŁ, Warszawa 1990.
- [15] Strona internetowa: www.scilab.org (The Free Platform for Numerical Computation).