Władysław Koc, Andrzej Wilk, Sławomir Grulkowski, Piotr Chrostowski

Poszukiwania metody określania sił podłużnych w szynach toru bezstykowego

Siły osiowe od temperatury, a w zasadzie świadomość ich występowania oraz skutków, jakie mogą za sobą pociągnąć, miały istotny wpływ na rozwój konstrukcji drogi kolejowej. Obawa przed wyboczeniem się toru powodowała, że przez wiele dziesiątków lat tor klasyczny (stykowy) stanowił jedyny stosowany rodzaj nawierzchni, a przecież od dawna znano technologię spawania termitowego, wykonywanego w warunkach terenowych.

Wprowadzenie toru bezstykowego, które nastąpiło w latach 50. XX w., było prawdziwą rewolucją w kolejnictwie. Otworzyły się możliwości radykalnego zwiększenia prędkości na liniach kolejowych i w konsekwencji podjęcia walki konkurencyjnej z innymi środkami transportu. Nie można jednak zapomnieć o tym, że tor bezstykowy to zupełnie nowa konstrukcja: ciężkie typy szyn i podkładów, pryzma podsypki o imponującej objętości, bardzo dobrze ustabilizowane podtorze. Do tego dochodzi jeszcze system technologii budowy i utrzymania, oparty na wykorzystaniu maszyn torowych o znacznym stopniu automatyzacji, a ostatnio również komputeryzacji.

Od samego początku stosowania toru bezstykowego wszystkim towarzyszy świadomość braku efektywnej metody pomiaru sił osiowych. Wiadomo, że mogą one osiągać znaczne wielkości. Zabezpieczono się przed ich ewentualnymi skutkami przez „zasypanie" rusztu torowego tłuczniem i zagęszczenie podsypki od czoła oraz w okienkach między podkładami. Jednocześnie starano się, żeby wielkości występujących sił podłużnych w jak największym stopniu ograniczyć i nie dopuścić do powstawania miejsc ich koncentracji. Dlatego w latach 50. i 60. tory bezstykowe były układane metodą przęsłową, aby umożliwić stabilizację nawierzchni przed ułożeniem szyn długich. Wprowadzono technologie regulacji naprężeń w szynach.

Po pewnym czasie, w wyniku pomyślnych doświadczeń z wdrożenia nowej konstrukcji toru, problem sił osiowych stracił jakby na znaczeniu. Została z powodzeniem zastosowana bezprzęsłowa metoda wymiany toru bezstykowego. Sukces tej metody na PKP spowodował znaczne zmniejszenie zainteresowania omawianym problemem w naszym kraju. Dopiero wypadek, jaki miał miejsce w styczniu 1982 r., ponownie wskazał na konieczność kontroli stanu sił osiowych w szynach [2, 3, 14]. Lata 80. XX w. to jednocześnie okres poszukiwań metody bezpośredniego pomiaru sił podłużnych, prowadzonych głównie w USA [16]; w latach 90. poszukiwania te uległy znacznej intensyfikacji i są kontynuowane w bieżącej dekadzie.

W artykule przedstawiono w zarysie przegląd wybranych prac badawczych nad znalezieniem metody określania sił podłużnych w szynach toru bezstykowego, przeprowadzonych na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat. Rozległość tych badań jest imponująca, jednak efekty wciąż nie są do końca zadowalające. Jak dotąd nie opracowano bowiem metody bezpośredniego pomiaru sił podłużnych, dostosowanej w pełni do warunków praktyki utrzymaniowej.

Stosowana na PKP i ujęta w obowiązujących wytycznych [33] metoda wyznaczania sił podłużnych w szynach na podstawie pomiaru przemieszczeń szyn względem punktów stałych jest bardzo przydatna, gdyż pozwala wykrywać niekorzystne tendencje w kształtowaniu się rozkładu naprężeń na długości toru. Nie jest to jednak w ścisłym tego słowa znaczeniu metoda pomiaru sił podłużnych, lecz raczej szacowania ich zmienności na określonym odcinku.

Badania Politechniki Wrocławskiej

Opracowania metody bezpośredniego pomiaru sił osiowych w szynach podjęła się w 1970 r. Politechnika Wrocławska na zlecenie COBiRTK w Warszawie. Wykorzystując zjawisko magnetosprężystości, które polega na zmianie przenikalności magnetycznej materiału ferromagnetycznego (np. stali szynowej) pod wpływem naprężeń wewnętrznych, opracowano odpowiedni czujnik pomiarowy [20].

Pomiar naprężeń czujnikiem magnetosprężystym odbywał się przez rejestrację zmiany siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu wtórnym czujnika (transformatora) pod wpływem zmiany przenikalności magnetycznej zwory (tj. badanego fragmentu szyny) wywołanej zmianą siły podłużnej. Zastosowano czujnik o specyficznej budowie i oryginalnych rozwiązaniach konstrukcyjnych, który został poddany cechowaniu w warunkach laboratoryjnych. W 1972 r. przeprowadzono serię badań terenowych w eksploatowanym torze bezstykowym na linii Wrocław – Oława. Podstawową trudnością w praktycznym zastosowaniu czujnika okazał się błąd styku przy dociskaniu biegunów rdzeni do szyny i związane z tym znaczne rozrzuty (i brak powtarzalności) odczytów.

W 1977 r. podjęto ponowną próbę wykorzystania zasady magnetosprężystości do pomiaru naprężeń w szynach. Badania przeprowadzono na terenie Austrii, przy współpracy Instytutu Kolejnictwa i Komunikacji Uniwersytetu Technicznego w Grazu. Zastosowano udoskonaloną aparaturę pomiarową PENT, dla której w warunkach laboratoryjnych określono charakterystyki do pomiaru naprężeń w stopce szyny UIC 54E. Pomimo optymistycznego wniosku wysuniętego w pracy [21], że nowa metoda pomiaru naprężeń oparta na zjawiskach magnetosprężystych rokuje nadzieje na uzyskanie narzędzia umożliwiającego doraźny pomiar naprężeń termicznych w szynach, badań tych nie kontynuowano.

Od 1979 r. prowadzono natomiast, głównie na PKP i BR, badania nad opracowaniem miernika magnetycznego (w ramach prac Komitetu ORE D 150 [13]). Pomiar naprężeń oparty był na zjawisku zmiany pola powierzchni histerezy magnetycznej pod wpływem przyrostów naprężeń. Polegał on na oddziaływaniu wolnozmienną indukcją magnetyczną na obszar szyjki szyny. Jako miarę naprężeń przyjmowano tzw. współczynnik anizotropii pola powierzchni histerezy magnetycznej. Badania prowadzono do połowy lat 80. Zakończyły się one niepowodzeniem. Nie udało się wyeliminować wpływu naprężeń resztkowych. Przeprowadzone serie pomiarów w czynnych torach bezstykowych [26] nie potwierdziły laboratoryjnie uzyskanych zależności charakterystyk magnetycznych od siły podłużnej.

Badania przeprowadzone w latach 90. zostały skierowane na poszukiwanie metody dynamicznej wyznaczania sił podłużnych w szynie [22]. Istota metod dynamicznych polega na wzbudzaniu drgań szyny i pośrednim określaniu wielkości sił podłużnych na podstawie pomiaru parametrów drgań. Jak dotąd, nie udało się jeszcze osiągnąć wyników umożliwiających praktyczne zastosowanie tego typu metod w diagnostyce toru bezstykowego.

Badania Politechniki Krakowskiej

Na przełomie lat 80. i 90. w Politechnice Krakowskiej skonstruowano przyrząd MS-02 [27], stanowiący rozwinięcie metody ekstensometrycznej, zastosowanej między innymi we wcześniejszych badaniach Politechniki Gdańskiej. Istota przyjętego sposobu pomiaru polega na względnym pomiarze zmian długości bazy odniesienia (ustalonej przy pomocy bolców pomiarowych) przy zastosowaniu przyrządu, którego współczynnik rozszerzalności termicznej i prędkość absorpcji energii cieplnej są takie same jak badanej szyny. W ten sposób można mierzyć i rejestrować wszelkie zmiany sił podłużnych w szynach względem pomiaru odniesienia wykonanego podczas uzbrajania szyn w bolce pomiarowe.

Rys. 1. Miernik sił podłużnych w szynach MS-02 [24]
Źr. Technologia budowy i eksploatacji toru bezstykowego z uwzględnieniem nowych zasad diagnostyki (Temat 2047/22). Prace Centrum Naukowo-Technicznego Kolejnictwa, Zeszyt 127 Warszawa 1999, s. 23–30

Opracowanie przyrządu MS-02 i wykonanie nim wielu serii pomiarowych w torach wchodziło w zakres szeroko zakrojonych badań toru bezstykowego, prowadzonych w ramach E*uropean Rail Research Institute* [10, 11]. Wyniki pomiarów sił podłużnych przy użyciu miernika MS-02 były także publikowane w kraju [15, 31]. Próby wdrożenia opisywanego urządzenia na PKP były bardzo zaawansowane, jednak nie zakończyły się powodzeniem. Na potrzebę jego modyfikacji wskazano w pracy [6]. Chodziło przede wszystkim o wprowadzenie możliwości wyznaczania przez przyrząd rzeczywistej (skorygowanej) temperatury przytwierdzenia szyn do podkładów oraz pomiaru temperatury obudowy przyrządu.

Prace IPPT PAN i CNTK w Warszawie

W połowie lat 80. w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk podjęto prace nad wykorzystaniem zjawiska elastoakustycznego do wyznaczania naprężeń własnych [12]. W latach 90., w ramach współpracy IPPT PAN z Centrum Naukowo-Technicznym Kolejnictwa w Warszawie, prowadzono badania rozkładów naprężeń własnych w elementach stalowych nawierzchni kolejowej [1]. Następnie metodę ultradźwiękową zastosowano do pomiarów sił podłużnych w szynach [32].

Zjawisko elastoakustyczne wynika z nieliniowości własności sprężystych materiału i polega na tym, że stałe sprężystości i związane z nimi prędkości rozchodzenia się fali danego rodzaju w mierzalny sposób zależą od naprężenia. Zależność tę można dobrze opisać tylko na podstawie nieliniowej teorii sprężystości [12]. W sprężystym zakresie naprężeń prędkość propagacji fali ultradźwiękowej (lub czas jej przejścia) przez zdefiniowany odcinek drogi jest liniową funkcją naprężenia.

W wyniku trwających kilka lat prób skonstruowano układ głowic pomiarowych na fale podpowierzchniowe, który umożliwia pomiar czasu miernikiem naprężeń DEBRO zasilanym z akumulatorów i jest zamontowany na specjalnym wózku pomiarowym umożliwiającym łatwe sprzężenie akustyczne głowicy oraz przesuwanie się wzdłuż toru. Mierząc czasy przejścia fali ultradźwiękowej w różnych temperaturach można (znając własności termiczne szyny i głowicy pomiarowej) określić zmianę czasu przejścia wywołaną przez naprężenie i wyznaczyć przyrost naprężenia.

W przeprowadzonych seriach badań na odcinkach doświadczalnych stwierdzono, że zmiany naprężeń mierzone w konkretnym punkcie, charakteryzują się dobrą liniowością. Jednocześnie jednak występowało znaczne zróżnicowanie przyrostu naprężenia na jednostkę temperatury w poszczególnych punktach na długości toru doświadczalnego. Zmierzone wielkości przyrostów naprężeń, odniesione do przyrostu temperatury, przekraczały błąd pomiarowy, który w tym przypadku oszacowano na $\pm 0{,}5$ MPa/°C.

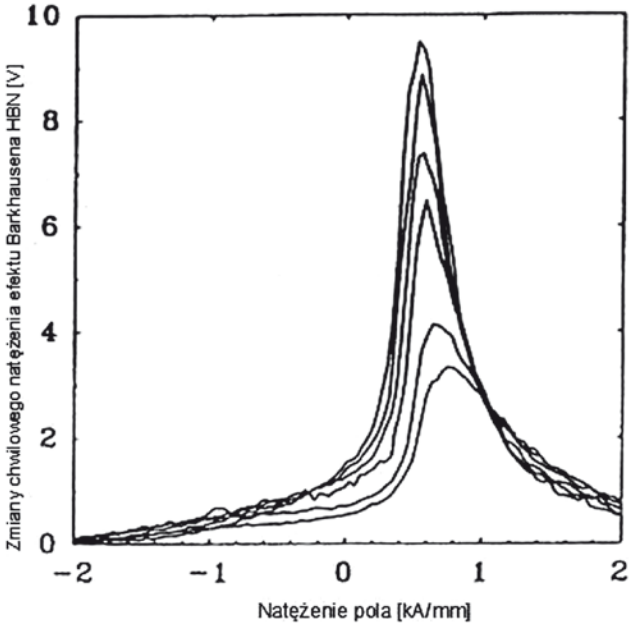
Badania węgierskie

Koleje węgierskie (MAV) opracowały dwie metody bezpośredniego pomiaru sił w szynach – RailTest i RailScan, w których wykorzystano tzw. efekt Barkhausena [28].

Każdy materiał ferromagnetyczny (w tym stal szynowa) złożony jest z obszarów zwanych domenami. Po przyłożeniu zewnętrznego pola magnetycznego do próbki materiału domeny o kierunku namagnesowania równoległym do kierunku zewnętrznego pola magnetycznego zaczynają wzrastać aż do wypełnienia całej objętości próbki, tj. do stanu nasycenia. Domeny o innym niż równoległy kierunek namagnesowania będą zanikać, co powoduje zmiany namagnesowania całej próbki. Umieszczając następnie próbkę w cewce indukcyjnej połączonej z głośnikiem uzyskuje się impulsy elektryczne przetwarzane na sygnały akustyczne zwane szumem magnetycznym Barkhausena. Efekt Barkhausena dotyczy skokowego, tzw. „nieodwracalnego", ruchu granic domen ma-

gnetycznych ferromagnetyka wymuszonego zmianą natężenia pola magnetycznego. Lokalne skokowe zmiany namagnesowania mogą być rejestrowane w formie impulsu napięcia indukowanego w cewce zbliżonej do powierzchni metalu. Ustalono, że na proces magnesowania ma wpływ, oprócz mikrostruktury materiału, między innymi poziom naprężeń mechanicznych. Zależność między natężeniem szumów magnetycznych a wielkością zadanych naprężeń można uzyskać wykonując krzywą kalibracji.

Na rysunku 2 pokazano przykładowe wyniki pomiaru natężenia efektu Barkhausena dla stali niskowęglowej poddanej działaniu naprężeń jednoosiowych równoległych do pola magnetycznego. Wyniki te ujawniają wyraźne zmiany chwilowego poziomu natężenia efektu Barkhausena BHN w funkcji natężenia pola *H*. W okolicy pola koercji (dla $H = 0{,}6$ kA/m) obserwuje się maksimum intensywności efektu. Wysokość tego maksimum zwiększa się dla naprężeń dodatnich oraz zmniejsza dla naprężeń ujemnych. Może więc ono stanowić parametr fizyczny opisujący wpływ naprężeń na natężenie efektu.



Rys. 2. Przykładowe wyniki pomiaru natężenia efektu Barkhausena

Jako pewnego rodzaju ograniczenie metody, specyficzne dla oceny naprężeń opartej o efekt Barkhausena, można uważać niewielką głębokość, z której jest zbierany sygnał Barkhausena. Fala elektromagnetyczna generowana podczas skoku Barkhausena jest bowiem tłumiona w metalu i w praktyce droga tłumienia tej fali dla częstotliwości sygnału Barkhausena rzędu kilkudziesięciu kHz jest rzędu ułamka milimetra. Oznacza to, że efekt Barkhausena dostarcza informacji o własnościach magnetycznych oraz o poziomie naprężeń z warstwy podpowierzchniowej o podobnej grubości.

Skonstruowane przez specjalistów węgierskich urządzenie RailScan [5], pokazane na rysunku 3, zostało dostosowane do pomiarów naprężeń w górnej strefie szyjki szyny, cechującej się praktycznie zerowym stanem naprężeń resztkowych, niezależnie od wielkości przeniesionych obciążeń. Według autorów, aparatura RailScan umożliwia precyzyjne określenie zarówno temperatury neutralnej szyn, jak i zmienności sił osiowych, co ułatwia monitorowanie odcinków szczególnie zagrożonych ich koncentracją.

Rys. 3. Przyrząd pomiarowy stosowany w metodzie RailScan (Materiały reklamowe firmy Elektro-Thermit GmbH)

Weryfikacja metody w warunkach PKP, przeprowadzona przez Politechnikę Śląską [17], wykazała wiarygodność uzyskanych wyników, jednocześnie wskazując na konieczność kontynuacji podjętych badań „…celem uzyskania zadowalających efektów wdrożeniowych rekomendowanej technologii".

Metoda RailScan była przez kilka lat intensywnie promowana na PKP. Brakowało jednak możliwości jej sprawdzenia podczas eksploatacji, gdyż producent nie był zainteresowany sprzedażą pojedynczych egzemplarzy urządzenia pomiarowego.

Badania przeprowadzone w USA

W Volpe National Transportation Systems Center w USA (stanowiącym placówkę badawczą Federal Railroad Administration) skonstruowano specjalny wagon pomiarowy (rys. 4), służący do określania oporów poprzecznych toru oraz wielkości sił podłużnych w szynach [29, 34].

Przyjęta metoda badawcza wyznaczania sił podłużnych polegała na podnoszeniu odłączonego od podkładów odcinka szyny na określoną wysokość z rejestracją niezbędnej do tego siły pionowej. Wartość tej siły zależy od występującej w szynie siły osiowej od temperatury. Jak stwierdzono, zależność siły niezbędnej do podniesienia szyny (na przyjętą wysokość 2 cali) i siły termicznej ma charakter liniowy. Metoda wymaga demontażu przytwierdzeń szyn do podkładów na określonej długości toru (kilkunastu podkładach), konstrukcji dużych gabarytów pojazdu pomiarowego oraz znacznych sił wymuszających.

Rys. 4. Wagon pomiarowy VNTSC [19]

Urządzenie nie znalazło szerszego zastosowania, mimo rozwiniętej akcji promocyjnej. Przyczynę tego stanowiły głównie wysunięte zastrzeżenia natury metodycznej. Potwierdziły to jednoznacznie badania przeprowadzone w Politechnice Gdańskiej [4], które wskazały na konieczność odejścia od koncepcji polegającej na podnoszeniu odłączonego od podkładów odcinka szyny i wyznaczania siły podłużnej w szynie na podstawie zmiany poziomej siły poprzecznej.

System VERSE

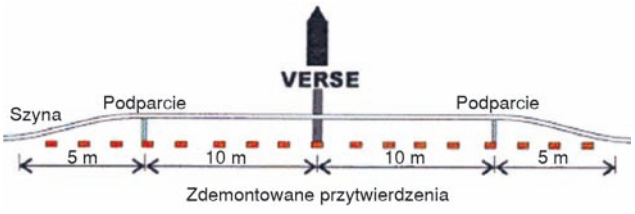
Pod koniec lat 70. XX w. w Wielkiej Brytanii rozpoczęto badania nad urządzeniem, które pozwoliłoby wyznaczać siły osiowe w szynie i temperaturę neutralną za pomocą pionowego przemieszczania szyny. Była to więc koncepcja równolegle rozwijana w USA. System został wprowadzony do realizacji dopiero w latach 90. XX w. Do tej pory w 15 krajach używanych jest około 100 egzemplarzy urządzenia VERSE (głównie jednak w Wielkiej Brytanii).

System VERSE [30], opracowany w firmie VORTOK Ltd., jest nieniszczącym przenośnym urządzeniem, które zapewnia szybki i mało kosztowny pomiar temperatury neutralnej niezbędnej do oszacowania działających w szynach sił podłużnych. System dostosowany jest do wszystkich przekrojów szyn oraz umożliwia pomiar przy różnych stanach toru. Oparty jest na założeniu, że pionowa siła potrzebna do uniesienia szyny zależy od osiowej siły w szynie podczas przemieszczenia

Rys. 5. System pomiarowy VERSE [30] (materiały reklamowe firmy VORTOK)

System VERSE jest zbudowany ze sztywnej przenośnej ramy umieszczonej nad szyną w punkcie pomiaru (rys. 5). Urządzenie o masie ok. 25 kg wykonane jest głównie z aluminium, co sprawia, że jest łatwe w transporcie.

Wykonanie pomiaru wymaga uwolnienia szyny z przytwierdzenia do podkładów na długości około 30 m. Następnie nad szyną, pośrodku nie przytwierdzonego toru, ustawia się na podkładach podnośnik. Szyna jest chwytana za pomocą haka, który umożliwia odpowiednie jej ułożenie i zawiesza na linie pomiarowej. Nieprzytwierdzona szyna musi być uniesiona na długości około 10 m z każdej strony punktu pomiarowego (rys. 6).



Rys. 6. Schemat zasady pomiaru sił podłużnych [30] (materiały reklamowe firmy VORTOK)

Dane z każdego pomiaru są zgrywane do specjalnego oprogramowania VERSE SFT i przechowywane w bazie danych jako stały spis pomiarów szyn, który może być wykorzystany w każdej chwili. Dane mogą być również przesyłane i analizowane w innych programach, takich jak: MS Excel lub MS Access, gdzie mogą być zintegrowane z innymi pomiarami toru, w celu lepszego podejmowania decyzji w sprawach utrzymaniowych toru bezstykowego.

System GRONTMIJ

Na początku 2007 r. holenderska firma Grontmij Nederland B.V. zaprezentowała na targach Rail Tech Europe 2007 w Utrechcie urządzenie do pomiaru naprężeń w szynach [25]. Działanie urządzenia polega na wzbudzeniu w szynie pola magnetycznego. Nierównomierność rozkładu tego pola świadczy o zróżnicowanym stanie naprężeń w szynie.

Rys. 7. Urządzenie GRONTMIJ w stanie eksploatacyjnym [23] (materiały reklamowe firmy GRONTMIJ)

Urządzenie (rys. 7) montuje się szybko na szynie, bez ingerencji w strukturę toru. Jest ono połączone z komputerem przenośnym i pozwala na bieżący odczyt i zapis wyników pomiaru. Istotną cechą podawaną przez autorów urządzenia jest pomiar tylko naprężeń podłużnych w szynie, bez uwzględnienia naprężeń własnych. Urządzenie umożliwia szybką identyfikację miejsc niebezpiecznych w torze lub narażonych na niekontrolowane zmiany naprężeń (rozjazdy, mosty itp.). Producenci tego urządzenia twierdzą, że na podstawie pomiaru naprężeń można obliczyć temperaturę neutralną w szynie z dokładnością 1–3°C. Urządzenie posiada najważniejsze certyfikaty dopuszczenia do stosowania w Europie.

Badania Politechniki Gdańskiej

Celem badań podjętych w pierwszej połowie lat 70. XX w. w Politechnice Gdańskiej było określenie charakteru pracy eksploatowanej nawierzchni bezstykowej. Szczegółowy opis omawianych badań został przedstawiony między innymi w pracach [9, 18]. Określenia wielkości naprężeń w szynach dokonywano na podstawie pomiarów odkształceń osiowych szyn za pomocą tzw. ekstensometru, przyrządu mechanicznego skonstruowanego w Katedrze Mostów Politechniki Gdańskiej.

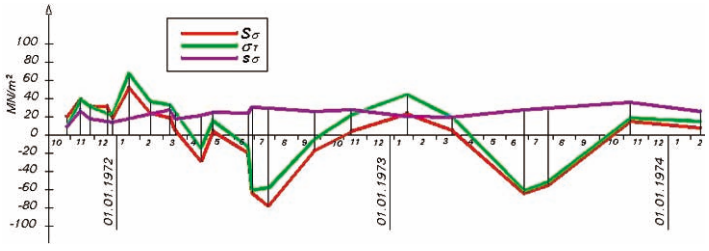
Badania przeprowadzone na odcinku poligonowym ułożonym metodą bezprzęsłową wykazały, że rozkład naprężeń na długości toru nie jest równomierny przy określonej temperaturze szyny; przyjmowanie modelu teoretycznego, opartego na założeniu, że jedynym miernikiem stanu sił osiowych w szynie jest różnica między temperaturą ułożenia a temperaturą aktualną, prowadzi do dużych niedokładności. Niejednorodność rozkładu naprężeń na długości toru ma tendencję do narastania w czasie eksploatacji. Jako wskaźnik nierównomierności przyjęto odchylenie standardowe s_σ wielkości naprężeń na długości toru. Stwierdzono, że wielkości s_σ wzrastały liniowo w okresie pierwszych 12 miesięcy od ułożenia nawierzchni bezstykowej, następnie zaś ustaliły się na pewnym poziomie (20–25 MPa). Jednocześnie zauważono, że średnie arytmetyczne naprężeń z punktów pomiarowych na długości odpowiadają wielkościom teoretycznym (rys. 8). Mogłoby to świadczyć o bilansowaniu się zwiększania i zmniejszania się naprężeń na długości toru (poprzez podłużne i poprzeczne przesunięcia szyn).

Badania na odcinku poligonowym ułożonym metoda przęsłową dały podobne rezultaty. Różnica występowała jedynie w początkowym okresie eksploatacji, kiedy to zaobserwowano mniejszy rozrzut wielkości naprężeń w poszczególnych punktach pomiarowych. Odpowiadało to okresowi stabilizowania się toru na odcinku ułożonym metodą bezprzęsłową.

Generalnym wnioskiem z badań było stwierdzenie wyraźnej i narastającej w czasie niejednorodności rozkładu naprężeń na długości toru bezstykowego. Wskazuje to na konieczność cyklicznego przeprowadzania regulacji naprężeń w szynach. Temu właśnie zagadnieniu poświęcono wówczas szczególną uwagę [7, 8].

Zastosowana metoda określania naprężeń w szynach odpowiadała charakterowi przeprowadzonych badań. Zdała bardzo dobrze egzamin, może być stosowana do weryfikacji innych metod pomiarowych. Przykładowo, od 1988 r. wykorzystywano ją w Politechnice Krakowskiej [15]. Nie jest to jednak metoda, która mogłaby znaleźć zastosowanie w praktyce utrzymaniowej.

W połowie lat 90., obserwując gwałtowne zwiększenie zainteresowania omawianym problemem w kraju i za granicą, opracowano odpowiedni program badawczy mający na celu skonstruowanie urządzenia do pomiaru sił osiowych przy wykorzystaniu metody wymuszonych przemieszczeń poprzecznych. Nawiązano zatem do badań amerykańskich i brytyjskich. Realizacja tego programu (w ramach projektu badawczego KBN nr 7 T07E 058 08) wskazała na możliwość wykorzystania do celów diagnostycznych podbijarki torowej oraz wnioskowania na temat siły podłużnej w szynach na podstawie pomiaru krzywizny przy różnych wielkościach przemieszczenia poprzecznego [19].

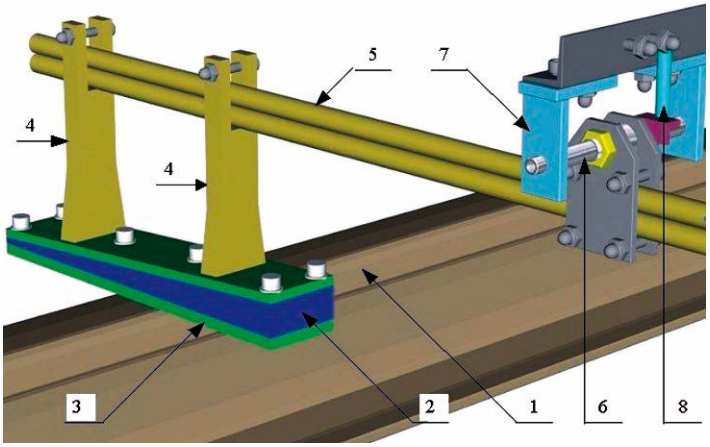


Rys. 8. Wykresy zmian w czasie eksploatacji toru naprężeń teoretycznych σ_T oraz wielkości średniej S_σ naprężeń pomierzonych i ich odchylenia standardowego s_σ dla odcinku poligonowym ułożonym metodą bezprzesłową [35]

Uzyskane rezultaty stanowiły podstawę programową kolejnego projektu badawczego KBN nr 8 T07E 027 21 *Diagnostyka toru kolejowego podczas procesu regulacji geometrycznej*, realizowanego w latach 2001–2003. Jego istotą było skonstruowanie aparatury pomiarowej, odpowiadającej przedstawionemu problemowi. Projekt został ukierunkowany w głównym stopniu na znalezienie efektywnej metody wyznaczania krzywizny toru na podstawie pomierzonych przemieszczeń poprzecznych, aby można było – z pewnym przybliżeniem – oszacować wielkość występującej w szynie osiowej siły podłużnej. Przyjęto sposób szacowania wielkości krzywizny, za pośrednictwem odpowiedniego wskaźnika, polegający na pomiarze przemieszczeń w trzech punktach na długości toku szynowego; linię odniesienia stanowi rama podbijarki.

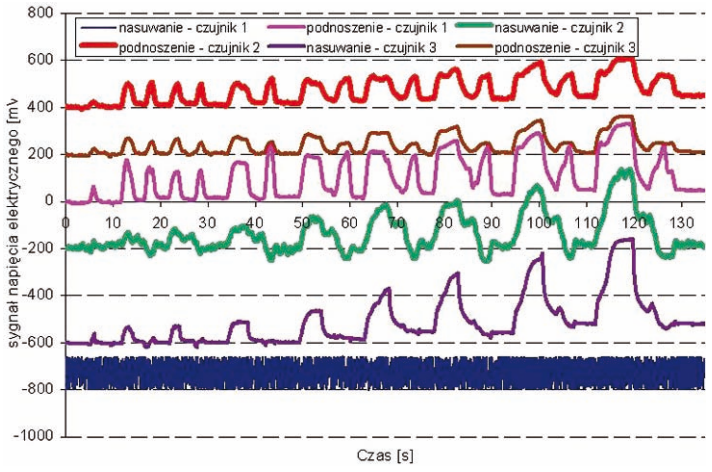
Realizatorom projektu przyświecała idea skonstruowania takiego urządzenia, które może współpracować nieinwazyjnie z podbijarką, a do tego jest odporne na oddziaływania zewnętrzne w czasie pracy podbijarki w torze. Skonstruowano kilka prototypowych urządzeń. Zaproponowano ostatecznie rozwiązanie, które nie wymaga zmian konstrukcyjnych w maszynie i nadaje aparaturze przenośny charakter. Ideę tego rozwiązania przedstawiono na rysunku 9.

Zasadniczym elementem konstrukcyjnym aparatury jest ślizgająca się po główce szyny stopa w kształcie zbliżonym do prostopadłościanu, wykonana z odpowiedniego tworzywa sztucznego. W stopie tej umieszczony jest czujnik indukcyjny zbudowany z elipsoidalnej cewki magnetycznej. Zadaniem tego czujnika jest pomiar przemieszczeń poprzecznych główki szyny. Rama jest zamocowana poprzecznie do wałka, który może się swobodnie obracać wokół własnej osi. Wałek jest ułożyskowany w uchwycie przytwierdzonym do ramy podbijarki. W uchwycie tym znajduje się drugi czujnik indukcyjny do pomiaru kąta obrotu belki aparatu. Gdy szyna jest unoszona przez układ podnosząco-nasuwający, stopa unosi się bez utraty kontaktu z główką szyny. Znamienną cechą takiego rozwiązania jest pomiar wektora odległości *r* między charakterystycznym punktem ramy a górną powierzchnią główki szyny.



Rys. 9. Schemat układu mechanicznego aparatury do pomiaru przemieszczenia poprzecznego szyny
1 – główka szyny, 2 – stopa przyrządu zawierająca elipsoidalną cewkę magnetyczną, 3 – specjalne podłoże ślizgowe stopy, 4 – wysięgniki łączące stopę z belką, 5 – belka obrotowa, 6 – wałek obrotowy, 7 – uchwyt do zamocowania przyrządu do ramy podbijarki, 8 – czujnik do pomiaru kąta obrotu

Rys. 10. Ogólny widok zestawu przyrządów do pomiaru przemieszczeń zainstalowanych na podbijarce torowej



Rys. 11. Sygnały czasowe z wszystkich czujników przy sile osiowej P = 500 kN

Na rysunku 10 pokazano ogólny widok wszystkich trzech przyrządów (stóp) zainstalowanych na podbijarce. Stopa duża była zamontowana między wózkiem pomiarowym a układem podnosząco-nasuwającym. Podczas prowadzonych pomiarów okazało się, że stosunkowo duża powierzchnia oraz ruchome części wózka i układu podnosząco-nasuwającego wprowadzały znaczne zakłócenia do przetwarzanego sygnału. Zakłóceń tych nie dało się wyeliminować ani też odfiltrować. Pozostałe czujniki działały bez zastrzeżeń.

Odcinek doświadczalny zlokalizowano w eksploatowanym torze odcinka linii Tczew – Gdańsk, w Gdańsku Oruni. Pomiary wymagały przecięcia toków szynowych, a po zakończeniu prac, ich zespawania. Badania polegały na naciąganiu toków szynowych za pomocą naprężaczy i poprzecznym przemieszczaniu rusztu torowego przez podbijarkę. Siłę osiową w zakresie 0–500 kN wprowadzano w stanie nieobciążonym; następnie wjeżdżała odpowiednio oprzyrządowana podbijarka, która wykonywała kilka cykli nasunięć. Odpowiednie sygnały były rejestrowane w pamięci masowej komputera, zainstalowanego w przedniej kabinie. Na rysunku 11 pokazano przykładowe wyniki pomiarów, uzyskane przy rozciągającej sile osiowej $P = 500$ kN.

Sygnał z wadliwego czujnika okazał się najważniejszy, gdyż on dostarcza informacji z rejonu największych przemieszczeń. Pomimo dysponowania pozostałymi pięcioma sygnałami, możliwości szczegółowej analizy są bardzo ograniczone. Dwa sygnały nasuwania poprzecznego to zbyt mało, żeby wyznaczyć krzywiznę poziomą toru. Wykorzystanie sygnałów kąta pionowego jest ograniczone, gdyż realizowane wielkości podnoszenia toru były bardzo małe.

Zasadniczym elementem weryfikacji urządzeń pomiarowych i przedstawionych koncepcji były pomiary przeprowadzone podczas procesu naprawy toru kolejowego. Badania objęły trzy cykle pomiarowe, zrealizowane w różnych lokalizacjach na linii Warszawa – Gdańsk. Wada czujnika nie pozwoliła na realizację podstawowego programu badań, jakim było przeanalizowanie stanu sił w szynach za pomocą krzywizny toru. Podstawowy efekt tych badań to wykazanie prawidłowości funkcjonowania wszystkich pozostałych czujników, które działają na oryginalnej zasadzie i były dostosowane do współpracy z poruszającą się podbijarką. Podczas badań wyłoniła się nowa koncepcja wykorzystywania wykonanej aparatury pomiarowej – do monitorowania pracy podbijarki podczas procesu regulacji geometrycznej toru. W istocie, zapisane sygnały czasowe przemieszczeń pionowych i porzecznych toru pozwalają określić technikę pracy operatora podbijarki, a także – po pewnym czasie – skutki, jakie ta technika niesie dla skuteczności wykonania robót.

W 2005 r. do Komitetu Badań Naukowych zgłoszono wniosek o finansowanie projektu badawczego *Zastosowanie automatycznej podbijarki w diagnostyce toru kolejowego*. Celem nowego projektu było między innymi kontynuowanie prac nad zagadnieniem wyznaczania sił podłużnych w szynach toru bezstykowego z wykorzystaniem automatycznej podbijarki, zakładano jednak znaczne rozszerzenie zakresu zastosowania tej maszyny w diagnostyce toru kolejowego. Miały zostać sprawdzone możliwości określania za jej pomocą wielkości oporów bocznych rusztu torowego, a także ciągłego pomiaru i rejestracji nierówności pionowych i poziomych występujących w eksploatowanym torze. Zakładano również opracowanie nowych metod obliczeniowych, które w znacznym stopniu usprawniłyby proces technologiczny regulacji osi toru.

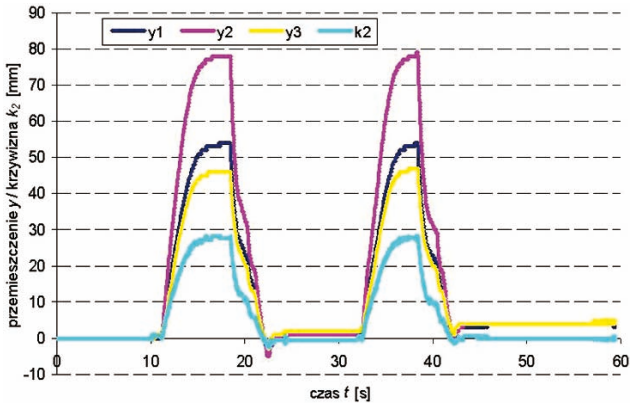
Niezakwalifikowanie projektu do finansowania wstrzymało na pewien czas realizacje prac badawczych nad omawianymi zagadnieniami.

W sytuacji, kiedy kompleksowe rozwiązanie problemu stało się mało realne, postanowiono prowadzić dalsze prace już na mniejszą skalę, w ramach uczelnianych badań własnych. W latach 2006–2007 udało się w tym zakresie przeprowadzić bardzo interesujące badania eksperymentalne. Stało się to możliwe dzięki życzliwości i wsparciu Pomorskiego Przedsiębiorstwa Mechaniczno-Torowego w Gdańsku.

Aby dowieść słuszności postawionej tezy, przeprowadzono badania eksperymentalne na stanowisku stacjonarnym, w których idea pomiaru pozostała taka sama jak poprzednio, ale skonstruowane wcześniej urządzenia pomiarowe zastąpiono dotykowymi transformatorowymi czujnikami indukcyjnymi CL70-200 do mierzenia przemieszczenia w kierunku poziomym. Rozszerzono program badawczy o analizę naprężeń w siłownikach poziomych układu nasuwania, co ma służyć określaniu oporów poprzecznych. Odkształcenia na siłownikach mierzono za pomocą dwóch par tensometrów elektrooporowych na każdym z siłowników, aby wyeliminować mimośrodowość odkształceń i błąd pomiaru. Eksperyment odbył się na terenie bazy nawierzchniowej PPM-T w Maksymilianowie koło Bydgoszczy.

Przed przystąpieniem do badań odsunięto toki szynowe w sąsiednich przęsłach, aby można było zamontować cztery naprężacze szynowe. Poluzowano również przytwierdzenia na odcinku badawczym, aby umożliwić odpowiednie rozłożenie sił na długości. Oba toki szynowe naciągano w celu uzyskania założonej siły osiowej. Następnie przystępowano do przemieszczania poziomego toru i pomiaru zasadniczego. Przemieszczanie odbywało się w zakresie 0–100 mm. Wykonano kilka serii pomiarowych, przy różnych wielkościach wprowadzonych sił osiowych w szynach: $P = 0$ kN, $P = 100$ kN, $P = 300$ kN, $P = 600$ kN.

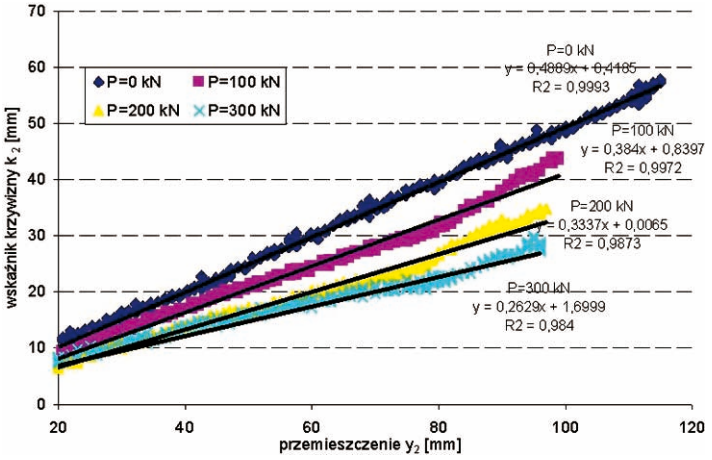
Bezpośredni pomiar pozwala na identyfikację zmian sygnału napięcia elektrycznego w czasie rzeczywistym. Odpowiednie przebiegi czasowe sygnałów z czujników indukcyjnych pozwalają śledzić charakter pracy czujników, przebieg samego procesu nasuwania oraz sposób pracy operatora podbijarki torowej. Przeskalowanie wielkości napięcia na występujące przemieszczenia umożliwia przedstawienie przebiegu czasowego nasuwania toru w punktach pomiarowych na długości maszyny (rys. 12). Przedstawione na wykresie wskaźniki krzywizny obrazują krzywiznę w punkcie środkowym pomiaru.



Rys. 12. Przebiegi czasowe sygnałów przemieszczenia y i wskaźnika krzywizny k_2 szyny przy wprowadzonej sile osiowej $P = 200$ kN

Jak widać, każda z prób badawczych składa się z tych samych faz: faza I – poprzeczne przemieszczanie toru do osiągnięcia określonej wielkości maksymalnej (końcowy etap tej fazy trwa z reguły dłużej); faza II – utrzymanie toru w położeniu maksymalnym; faza III – swobodny powrót toru w kierunku położenia początkowego; faza IV – dosunięcie toru do położenia początkowego. Samo badanie miało charakter dynamiczny z krótkimi przerwami na wprowadzanie sił z zewnątrz za pomocą naprężaczy szynowych.

Najbardziej istotnych informacji dostarczył oczywiście obliczony wskaźnik krzywizny k_2, określony w punkcie pomiaru maksymalnego przemieszczenia y_2. Porównanie zależności wskaźnika krzywizny k_2 od przemieszczenia y_2 i siły osiowej P zaprezentowano na rysunku 13. Po raz kolejny potwierdzono wcześniejsze obserwacje, że wielkość krzywizny bezpośrednio zależy od naprężenia wewnętrznego w szynach toru kolejowego. Uzyskane zależności mają bardzo wyraźny charakter liniowy.



Rys. 13. Wykresy prostych regresji $k_2 = f(y2)$ dla różnych wielkości sił osiowych w szynach

Przedstawione na rysunku 13 zależności w stosunkowo prosty sposób umożliwiają wyznaczenie sił w szynach przez pomiar przemieszczeń toru w trzech punktach w czasie prac podbijarki oraz określeniu wskaźnika krzywizny toru. Pokażemy to na konkretnym przykładzie.

Korzystając z nomogramów przedstawionych na rysunku 13 spróbujmy określić siłę występującą w szynach, jeżeli przy przemieszczeniu $y_2 = 90$ mm wyznaczono wskaźnik krzywizny $k_2 = 33$ mm. Dla przemieszczenia y_2 wyznaczamy – na podstawie wykresów – wskaźniki krzywizn występujących przy danych siłach:

$$k_2^0 = 0{,}4889\ y_2 + 0{,}4185 = 0{,}4889 \cdot 90 + 0{,}4185 = 44{,}4195$$

$$k_2^{100} = 0{,}384\ y_2 + 0{,}8397 = 0{,}384 \cdot 90 + 0{,}8397 = 35{,}3997$$

$$k_2^{200} = 0{,}3337\ y_2 + 0{,}0065 = 0{,}3337 \cdot 90 + 0{,}0065 = 30{,}0395$$

$$k_2^{300} = 0{,}2629\ y_2 + 1{,}6999 = 0{,}2629 \cdot 90 + 1{,}6999 = 25{,}3609$$

gdzie:

$k_2^0, k_2^{100}, k_2^{200}, k_2^{300}$ – wielkości wskaźnika krzywizny przy siłach naciągu szyny odpowiednio $F = 0$ kN, 100 kN, 200 kN, 300 kN.

Na podstawie porównania wskaźników krzywizny widzimy, że siła w analizowanym fragmencie toru będzie się zawierała w przedziale od 100 kN do 200 kN. Stosując zasadę interpolacji możemy teraz w prosty sposób oszacować siłę występującą w szynach, korzystając z przekształcenia:

$$P = 100 + \frac{k_2^{100} - k_2}{k_2^{100} - k_2^{200}} \cdot (200 - 100) =$$

$$= 100 + \frac{33{,}3997 - 33}{35{,}3997 - 30{,}0395} \cdot (200 - 100) = 144{,}7688$$

Zatem można określić wielkość siły osiowej w szynach na 144 kN. Jest to wielkość szacunkowa o dość dużym marginesie błędu. Aby uzyskać większą dokładność, konieczne jest skalowanie naciągu toru co 50 kN lub nawet co 20 kN.

Wnioski

- Poszukiwania metody określania sił osiowych w szynach toru bezstykowego trwają w zasadzie od początku wprowadzenia tego rodzaju nawierzchni do eksploatacji. Jednak jak dotąd zagadnienie to wciąż pozostaje nie do końca rozwiązane.
- Bardzo zaawansowane rezultaty w omawianej dziedzinie zostały uzyskane w USA i na kolejach węgierskich. Do metody VNTSC można jednak wysunąć zastrzeżenia natury metodycznej, zaś metoda RailScan obarczona jest wątpliwościami dotyczącymi skuteczności wykorzystania efektu Barkhausena w elementach konstrukcyjnych o dużych przekrojach poprzecznych.
- Trwająca promocja urządzeń VOLPE i GRONTMIJ świadczy o tym, że niektóre poszukiwania doprowadziły do fazy wdrożeniowej, jednak z ostateczną oceną skuteczności tych metod trzeba się jeszcze wstrzymać.
- Na tle badań zagranicznych bardzo korzystnie prezentują się osiągnięcia naszych jednostek naukowo-badawczych. Zwłaszcza politechniki – Gdańska, Krakowska i Wrocławska wniosły istotny wkład w rozwój omawianej dziedziny.
- Zespół naukowy Politechniki Gdańskiej wskazał na interesujące perspektywy wykorzystania pracy podbijarki w diagnostyce toru kolejowego. Po odpowiednim oprzyrządowaniu można by podczas bieżącej pracy maszyny wykrywać najbardziej niebezpieczne miejsca w torze, tj. miejsca koncentracji naprężeń.

❑

Literatura

[1] Adamski M., Towpik K.: *Badania rozkładów naprężeń w iglicach rozjazdowych.* Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, seria Budownictwo Lądowe, nr 41, 1995.

[2] Bałuch H., Gaweł K., Oczykowski A., Towpik K.: *Wyboczenie toru bezstykowego w warunkach zimowych.* Drogi Kolejowe 1982, nr 4.

[3] Bałuch M.: *Termiczny równoważnik nierówności toru bezstykowego.* Archiwum Inżynierii Lądowej XXIX, 1-2, 1983.

[4] Barylski A., Koc W., Kuć K., Wilk A.: *Pomiar sił osiowych w szynach metodą przemieszczeń poprzecznych.* Przegląd Kolejowy 1/19991.

[5] Beke D. L., Posgay G., Kis-Varga M., Szabo S.: *Determination of steress distribution in railway rail.* Berlin Neutron Scattering Center Experimental Reports, 1996.

[6] Bogdaniuk B.: *Diagnostyka toru bezstykowego w zintegrowanym systemie diagnostycznym*. Sympozjum Naukowo-Techniczne na temat „Budowa i utrzymanie toru bezstykowego". Kraków – Zakopane 1996.

[7] Brzozowski A., Koc W.: *Badania urządzeń naciągowych do regulacji naprężeń w torze bezstykowym*. Drogi Kolejowe 7-8/1978.

[8] Brzozowski A., Koc W.: *Ocena przydatności podgrzewarki gazowej PG-3 do regulacji naprężeń w torze bezstykowym*. Przegląd Kolejowy Drogowy 5/1975.

[9] Brzozowski A., Koc W.: *Rzeczywisty charakter pracy toru bezstykowego*. Przegląd Kolejowy Drogowy 6/1975.

[10] Czyczuła W. i wsp.: *Long-term investigations of CWR track behaviour*. ERRI-D202 Committee, Report No. 8, Utrecht, December 1997.

[11] Czyczuła W., Massel A., Sołkowski J., Towpik K.: *Empirical investigation of longitudinal creep and breathing of tight curves*. Report for ERRI-D202 Committee, December 1996.

[12] Deputat J.: *Własności i wykorzystanie zjawiska elestoakustycznego do poniarów naprężeń własnych*. Prace IPPT-PAN, 28(1987). Warszawa 1987.

[13] *Development of apparatus for measuring the longitudinal forces in rails laid in the track*. Report Office for Research and Experiments (ORE) D 150 of the International Union of Railways (UIC).

[14] *Jak korygować temperaturę przytwierdzenia torów* (Dodatek szkoleniowy). Drogi Kolejowe 4/1982.

[15] Jamka M.: *Wpływ procesu technologicznego naprawy głównej na zmiany naprężeń w szynach*. Drogi Kolejowe 4-5/1989.

[16] Kish A., Samavedam G., Jeong, D.: *The neutral temperature variation of continuous welded rails*. Bulletin AREA, No. 712, November 1987.

[17] Kłosek K., Grabczyk J., Zając B., Jasiński I.: *Wykorzystanie urządzenia typu RailScan do pomiarów naprężeń w torze bezstykowym dla potrzeb PKP*. X Konferencja Naukowo-Techniczna „Drogi Kolejowe '99". Spała 1999.

[18] Koc W.: *Eksploatacyjne zmiany sił osiowych oraz analiza pracy szyny ciągłej spawanej w procesie regulacji naprężeń.* Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska 1976.

[19] Koc W., Wilk A., Grulkowski S.: *Możliwości wykorzystania pracy podbijarki w diagnostyce toru kolejowego*. Drugie Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Kolejowej. Gdańsk – Sycowa Huta 2000.

[20] Krużyński M.: *Pomiar naprężeń w torze bezstykowym*. Przegląd Kolejowy Drogowy 5/1973.

[21] Krużyński M.: *Pomiary naprężeń termicznych w szynach.* Drogi Kolejowe 7-8/1979.

[22] Krużyński M., Mazurkiewicz R.: *Diagnostyka nawierzchni kolejowej*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK w Krakowie, seria Materiały Konferencyjne nr 41 (zeszyt 84). Kraków 2000.

[23] *Materiały promocyjne firmy Grontmij*: http://www.grontmij.com/site/en-gb/projecten/rail+stress+test.htm

[24] *Miernik sił podłużnych w szynach MS-02*. Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg, Kolei i Mostów, Zakład Dróg Kolejowych (prospekt informacyjny).

[25] Müller Ch.: *InnoTrans: Rekordmesse der Branche*. Der Eisenbahningenieur, Heft 12, 2008, 17.

[26] *Ocena przydatności magnetycznego miernika sił podłużnych do pomiarów w torach bezstykowych.* Temat nr 3199/12, Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa. Warszawa 1986.

[27] Patent. Polska, nr 166733. *Sposób i urządzenie do pomiaru siły podłużnej powstającej w stalowych kształtownikach ustrojów nośnych, zwłaszcza w szynach kolejowych*. Politechnika Krakowska. Twórcy wynal.: M. Jamka, W Chełmecki, B. Bogdaniuk, 1995, WUP 06/95.
[28] Posgay G., Molnar P.: *Investigations using magnetic Barkhausen noise measurement*. NTD Methods and Equipment. MetalElectro, Hungary, 1997.
[29] Samavedam G., Kish A.: *Continuous welded rail track buckling safety assurance through field measurements of track resistance and rail force.* Transportation Research Record, No. 1289, 1995.
[30] Shrubsall, P. R., Webber, P. J.: *VERSE: Non-destructive stress-free temperature measurement of CWR.* Rail Engineering International, No. 4, 2001, 3-6.
[31] Sołkowski J.: *Badania porównawcze siły podłużnej w szynie*. Pierwsze Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Kolejowej na temat: "Pomiary nawierzchni kolejowej". Gdańsk – Wdzydze Kiszewskie 1999.
[32] Towpik K., Adamski M.: *Badania zmian temperatury neutralnej szyn w eksploatowanych torach bezstykowych*. IX Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Drogi Kolejowe". Kraków – Kościelisko 1997.
[33] *Wytyczne utrzymania torów bezstykowych*. Dyrekcja Generalna PKP, Naczelny Zarząd Utrzymania Kolei. Warszawa 1988.
[34] Zarembski A. M., McConnell D. P., Lovelace W. S.: *New car for measurement and evaluation of gage-widening resistance of track*. Bulletin AREA No. 680, Nov.-Dec. 1980.
[35] Koc W.: *Badania odkształceń i przemieszczeń eksploatowanej nawierzchni bezstykowej.* Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańkiej nr 245, Budownictwo Lądowe: Zeszyt XXVIII, 1976, s. 113–130.
[36] Koc W., Wilk A., Grulkowski S., Dobrowolski P., Kostro G.: *Diagnostyka toru kolejowego podczas procesu regulacji geometrycznej*. Sprawozdanie (Projekt badawczy KBN nr 8 T07E 027 21). Gdańsk, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej, 2003.

Autorzy
prof. dr hab. inż Władysław Koc
Katedra Inżynierii Kolejowej Politechniki Gdańskiej
dr inż. Andrzej Wilk
Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych Politechniki Gdańskiej
dr inż. Sławomir Grulkowski
Katedra Inżynierii Kolejowej Politechniki Gdańskiej
mgr inż. Piotr Chrostowski
Katedra Inżynierii Kolejowej Politechniki Gdańskiej

➢ *Dokończenie ze s. 69*

■ Modernizacja system naziemnego Loran C obejmuje przede wszystkim nowe sygnały nadawane przez stacje.

❑

Literatura

[1] El-Rabbany A.: *Introduction to GPS The Global Positioning System*. Artech House, Boston/London 2002.
[2] Gibbons G.: *GNSS Trilogy: Our Story Thus Far*. Inside GNSS, vol.1, no.1, 2006.
[3] Groves P.D.: *Principles of GNSS, Inertial, and multisensor integrated navigation systems*. Artech House, Boston/London 2008.
[4] Januszewski J.: *Systemy satelitarne GPS, Galileo i inne.* Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2006.
[5] Kaplan E.D., Hegarty C.J.: *Understanding GPS Principles and Applications*. Artech House, Boston/London 2006.
[6] Misra P., Enge P.: *Global Positioning System, Signals, Measurements, and Performance.* Ganga-Jamuna, Lincoln 2006.
[7] Seeber G.: *Satellite Geodesy*. de Gruyter, Berlin New York 2003.
[8] Spaans J.: *The Munich Satellite Navigation Summit 2007*. European Journal of Navigation, vol.5, No.2, 2007.
[9] www.navcen.uscg.gov

Autor
prof. dr. hab. inż. Jacek Januszewski
Akademia Morska, Wydział Nawigacyjny
al. Jana Pawła II 3, 81–345 Gdynia
+48 058 690 11 27, jacekjot@am.gdynia.pl