

KARWOWSKI Krzysztof¹
MIZAN Mirosław²

System monitoringu odbieraków prądu pojazdów kolejowych w aspekcie bezpieczeństwa i ciągłości ruchu

WSTĘP

Bezpieczeństwo, niezawodność i efektywność transportu kolejowego stanowią najważniejsze kryteria, decydujące o jego perspektywach rozwojowych i roli w gospodarce narodowej. Ze względów konstrukcyjnych i z uwagi na zmienne warunki eksploatacji, w trakcji elektrycznej kluczowe znaczenie dla zapewnienia wymaganego poziomu tych parametrów ma właściwe funkcjonowanie systemu odbioru prądu z sieci trakcyjnej przez poruszające się pojazdy [23]. Na jakość odbioru prądu wpływają dwa czynniki związane z infrastrukturą i pojazdami:

- konstrukcja sieci jezdnej i konstrukcja odbieraków prądu,
- jakość utrzymania i regulacja tych dwóch elementów systemu odbioru prądu.

O jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną w głównej mierze decydują: nacisk odbieraka na sieć jezdnią, stan elementów zawieszenia (sprężyn i tłumików) części ruchomych odbieraka oraz stan powierzchni nakładek ślizgowych [13, 20, 22]. Zbyt mały nacisk odbieraka na sieć prowadzi do powstawania przerw stykowych i pojawienia się zjawisk łukowych, natomiast zbyt duży – do nadmiernego wypierania sieci jezdnej, a w konsekwencji do ryzyka uszkodzeń mechanicznych (zaczepienia o elementy podwieszenia) i nadmiernego zużycia nakładek stykowych. Nierównomierność lub nadmierne zużycie nakładek ślizgowych jest przyczyną powstawania sił poprzecznych, które mogą doprowadzić do drgań lub nawet zerwania przewodów jezdnych. Niewłaściwy stan lub zła regulacja części kinematycznej odbieraka z reguły prowadzi do większych tętnień siły stykowej i w konsekwencji zwiększonej amplitudy pionowych drgań przewodów jezdnych podczas przejazdu pociągu.

PKP Polskie Linie Kolejowe SA (PLK), jako podmiot zarządzający publiczną infrastrukturą kolejową, utrzymuje i udostępnia przewoźnikom drogi kolejowe. Po otwarciu rynku transportowego na liniach PLK pojawiły się pojazdy trakcyjne wielu przewoźników. Kompleksowe usługi utrzymania sieci trakcyjnej realizuje PKP Energetyka SA, w szczególności wykonywane są cykliczne przeglądy przy wykorzystaniu wagonów diagnostycznych [7]. W zakresie kontroli stanu technicznego odbieraków prądu, która leży w gestii przewoźników eksploatujących tabor, problem rozwiązywany jest różnymi metodami, polegającymi m.in. na ręcznym pomiarze nacisku statycznego odbieraka na sieć jezdnią oraz na wizualnej ocenie stanu nakładek ślizgowych. Kontrola taka wykonywana jest okresowo w ramach procedur obsługi technicznej pojazdu w zakładzie taboru. Uszkodzenia odbieraków zwykle następują jednak już po wyjeździe pojazdu na szlak. Brak wczesnego wykrycia niesprawności może skutkować zakłóceniami w ruchu, a nawet uszkodzeniem sieci jezdnej. Na podstawie analiz przyczyn uszkodzeń sieci trakcyjnej prowadzonych przez PLK po każdym tego typu zdarzeniu, stwierdzono w latach 2009-2011 prawie 400 uszkodzeń sieci wywołanych niewłaściwym stanem technicznym odbieraka prądu. Daje to przeciętnie prawie 130 uszkodzeń rocznie. Prócz kosztów związanych z naprawą lub wymianą odbieraka i naprawą uszkodzonej sieci trakcyjnej, powstają straty materialne wywołane długotrwałym zakłóceniem (głównie opóźnieniem) w ruchu pojazdów, gdyż czas naprawy uszkodzonej sieci wynosi przeciętnie kilka godzin. Wczesne wykrywanie niesprawności odbieraków prądu ma zatem największe znaczenie w aspekcie ciągłości ruchu kolejowego. Kilka lat temu podjęto decyzję o wdrożeniu pilotażowego

¹ Dr hab. inż. Krzysztof Karwowski, tel. 48 58 347 11 58, krzysztof.karwowski@pg.gda.pl

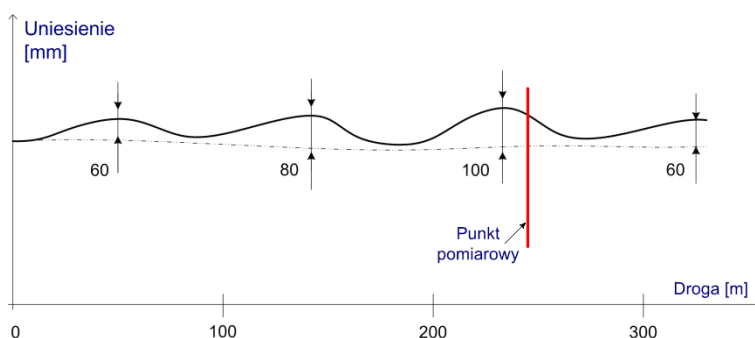
² Dr inż. Mirosław Mizan, tel.: 48 58 347 15 02, miroslaw.mizan@pg.gda.pl

Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska, 80-233 Gdańsk, ul. G. Narutowicza 11/12

stanowiska monitoringu odbieraków prądu na linii kolejowej o dużym natężeniu ruchu. Opracowania koncepcji i realizacji prototypowego systemu podjął się zespół Katedry Inżynierii Elektrycznej Transportu Politechniki Gdańskiej, mający w tym zakresie doświadczenia badawcze.

1. KONCEPCJA SYSTEMU MONITORINGU ODBIERAKÓW PRĄDU W RUCHU KOLEJOWYM

Efektom statycznego i dynamicznego oddziaływania odbieraka na sieć jezdnią jest pewne uniesienie sieci w punkcie jej styku z odbierakiem, co przedstawiono na rysunku 1 [11, 16].



Rys. 1. Przykładowa trajektoria punktu styku odbieraka z siecią przy dużej prędkości jazdy pojazdu

Uniesienie to zależy głównie od konstrukcji sieci – w szczególności od jej elastyczności, właściwości konstrukcyjnych odbieraka, jego stanu technicznego – zwłaszcza siły stykowej F . Jest ona zależna głównie od nastawionej w odbieraku siły statycznej F_s , oraz – ze względu na siłę aerodynamiczną F_{ae} – od prędkości jazdy [3, 8, 11, 19, 22]. Siły tarcia w przegubach ramion odbieraka F_t oraz siła dynamiczna F_d wynikająca z pionowego ruchu odbieraka w pewnym stopniu zwiększają lub zmniejszają wartość siły stykowej F :

$$F = F_s \pm F_t + F_d + F_{ae} \quad F_{ae} = \alpha v^2 \quad F_d = m_o a \quad (1)$$

gdzie:

- m_o – masa zastępcza części ruchomych odbieraka,
- a – przyspieszenie pionowego ruchu odbieraka,
- α – współczynnik,
- v – prędkość jazdy.

Ponadto nieznaczny wpływ na wartość chwilową siły F mogą mieć też takie czynniki, jak stan torowiska, stan zawieszenia pojazdu, oraz – w nieco większym stopniu – siła wiatru.

W przypadku obserwacji uniesienia przewodów w stałym, ściśle określonym miejscu sieci, jej właściwości nie podlegają istotnym zmianom. Zatem wynik pomiaru uniesienia przewodów wraz z pomiarem prędkości pojazdu, umożliwiają oszacowanie wartości siły statycznej odbieraka. Potwierdzeniem tej tezy są zarówno wyniki analiz symulacyjnych oddziaływań dynamicznych układu sieć – odbierak [1, 2, 4, 5, 10, 11, 14, 20], przeprowadzone badania na laboratoryjnym modelu fizycznym takiego układu, jak również badania eksperymentalne w układzie rzeczywistym [8, 11]. Siła statyczna jest dogodnym parametrem diagnostycznym, gdyż jej wyznaczoną wartość można bezpośrednio porównać z wynikami zmierzonymi podczas przeglądu i regulacji odbieraka w zakładach taboru oraz z wymaganiami normatywnymi [6, 19]. Wyznaczenie siły opiera się na analizie przebiegu uniesienia przewodów jezdnych wywołanego naciskiem odbieraka i uwzględnieniu korekty od składowej aerodynamicznej, obliczoną w oparciu o zmierzoną wartość prędkość pojazdu. Zakłada się przy tym ograniczony wpływ pozostałych składowych siły. Takie podejście pozwala na oszacowanie siły statycznej z dokładnością wystarczającą do wykrycia tych odbieraków, których nastawy znacznie odbiegają od wartości normatywnych.



Oparcie działania systemu na pomiarze uniesienia przewodów ma także inne przyczyny. Obowiązujące w Unii Europejskiej techniczne specyfikacje dla interoperacyjności (TSI) w odniesieniu do podsystemu „energia” [6], jak i odpowiednie normy [18, 19], w celu sprawdzenia parametrów pracy systemu odbioru prądu wymagają m.in. pomiaru uniesienia przewodu jezdnego pod konstrukcją wsporczą podczas przemieszczania pantografu. Przepisy te precyzują także zasady, dotyczące użytkowania w pociągu większej liczby czynnych odbieraków – wymagane jest m.in. zapewnienie odpowiedniej odległości pomiędzy nimi, aby uniknąć nadmiernego uniesienia przewodów jezdnych wskutek kumulacji siły ich oddziaływania na sieć. Jak wykazuje praktyka eksploatacyjna, zasady te nie zawsze są przestrzegane przez maszynistów. Zadaniem stanowiska monitoringu jest także wykrywanie takich przypadków.

Czynnikiem, który także wpływa na przebieg siły stykowej i w konsekwencji na zapewnienie ciągłości styku nakładek ślizgacza odbieraka prądu z przewodami jezdnyymi sieci trakcyjnej, jest stan elementów sprężystych i tłumiących odbieraka. Zarówno prowadzone badania eksperymentalne, jak również wyniki badań symulacyjnych wykazały, że analiza harmoniczna wymuszonych drgań przewodów jezdnych w obecności stykającego się z nimi odbieraka prądu, umożliwia wykrycie uszkodzeń elementów odbieraka, decydujących o jego własnościach dynamicznych [15, 17]. Takie wymuszone drgania przewodów powstają podczas przejazdu każdego pociągu z uniesionym odbierakiem prądu. Można zatem postawić tezę, że ciągły monitoring odbieraków prądu pojazdów kolejowych bezpośrednio na linii, polegający na rejestracji i analizie ruchu przewodów jezdnych sieci trakcyjnej w określonym punkcie na sieci kolejowej, wywołanego oddziaływaniem odbieraka przejeżdżającego pociągu, umożliwi wykrycie egzemplarzy będących w złym stanie technicznym.

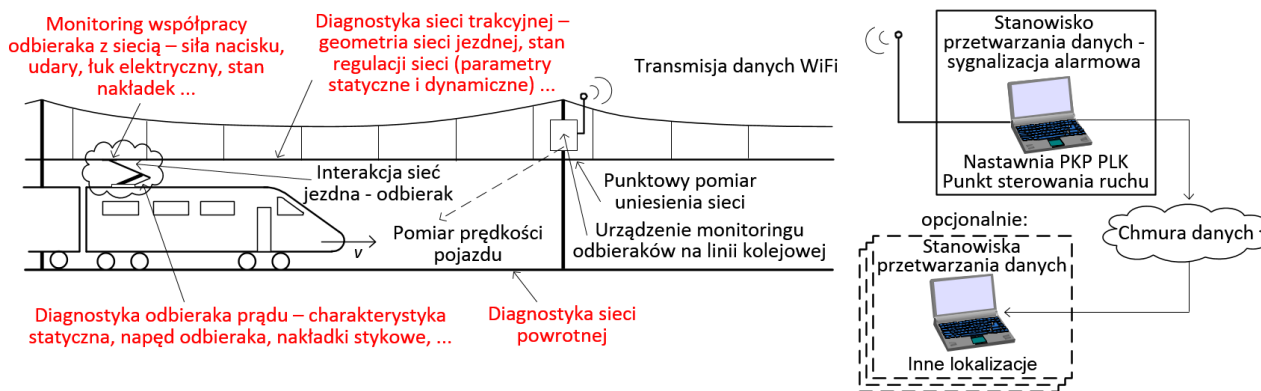
Ważną cechą systemu w aspekcie zwiększenia bezpieczeństwa i ciągłości ruchu, jest jego ciągła praca i natychmiastowe dostarczanie informacji o wykrytych nieprawidłowościach do punktu, w którym mogą być podjęte skuteczne działania dotyczące dalszego ruchu pociągu.

W oparciu o uproszczony model matematyczny zespołu kinematycznego odbierak – sieć jezdna przeprowadzono obliczenia symulacyjne, na podstawie których wyznaczono spodziewany zakres zmian uniesienia przewodu jezdnego przy różnych wartościach siły nacisku statycznego odbieraka i różnych prędkościach przejazdu, dla kilku lokalizacji punktu pomiaru w ramach przęsła zawieszenia sieci. Stwierdzono, że wzbudzone drgania własne sieci w niewielkim stopniu wpływają na wartość maksymalnego uniesienia przewodu, występującego w chwili przejazdu odbieraka przez punkt pomiaru. Przyjęto, że punkt pomiarowy powinien znajdować się stosunkowo blisko punktu zawieszenia [14].

Przyjętą strukturę systemu monitoringu odbieraków prądu (MOP), przedstawiono na rysunku 2. System składa się ze stanowiska pomiarowego, zlokalizowanego na konstrukcji wsporczej sieci przy torze, oraz stanowiska przetwarzania danych, umieszczonego w nastawni, będącej punktem sterowania ruchem. Wyniki pomiarów przesyłane są natychmiast po przejeździe pociągu do stanowiska przetwarzania danych, gdzie po ich przetworzeniu generowany jest sygnał dźwiękowy – w przypadku wykrycia nieprawidłowej współpracy odbieraka z siecią. Umożliwia to podjęcie działań interwencyjnych – np. powiadomienia maszynisty o konieczności zmiany używanego odbieraka. Stanowisko przetwarzania danych jest również bramą dostępu do sieci Internet, co umożliwi przekazanie wyników poprzez chmurę danych do dodatkowych stanowisk przetwarzania danych o dowolnej lokalizacji. Rysunek 2 przedstawia rolę stanowiska MOP w szeroko rozumianym systemie monitoringu i diagnostyki układu odbioru prądu, który powinien integrować istniejące i projektowane urządzenia pomiarowe, służące do oceny stanu elementów infrastruktury i taboru. Powstanie takiego spójnego systemu, którego główne cztery grupy zadań obejmują:

- diagnostykę sieci jezdnej,
- diagnostykę sieci powrotnej,
- diagnostykę odbieraków prądu,
- monitoring współpracy odbieraków z siecią,

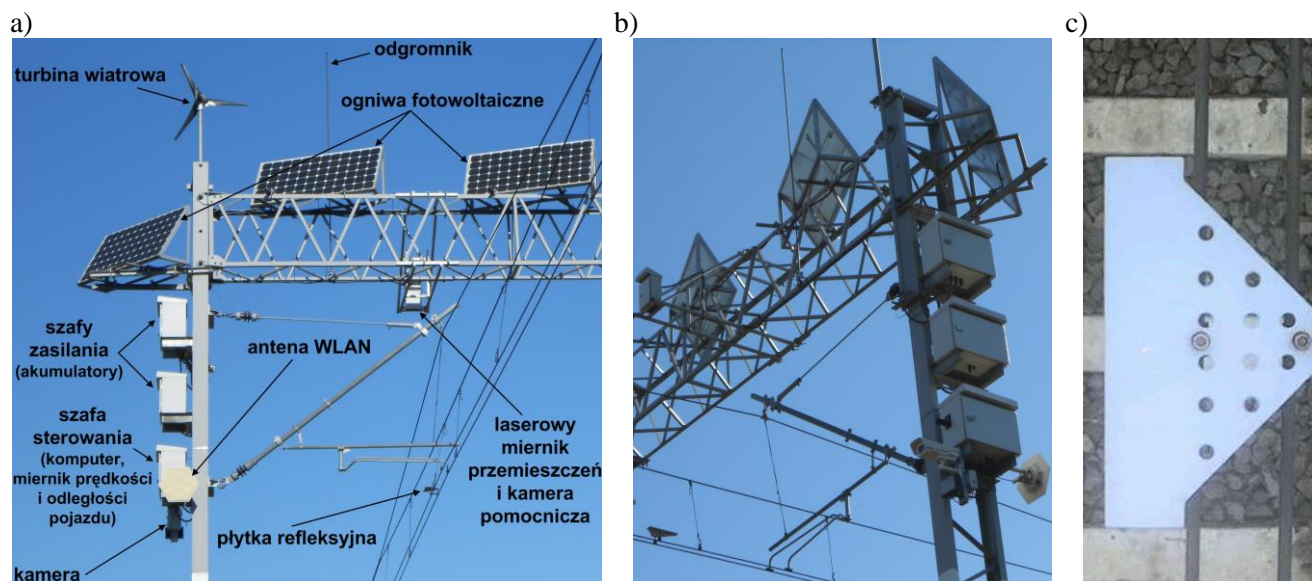
umożliwiłoby znacznie skuteczniejsze zapobieganie poważnym uszkodzeniom i ułatwiło ocenę przyczyn ewentualnych awarii.



Rys. 2. Ogólna struktura systemu MOP oraz podstawowe funkcje zintegrowanego systemu monitoringu i diagnostyki układu odbioru prądu

2. STANOWISKO POMIAROWE

Stanowisko pomiarowe usytuowano na nowo przebudowanej linii o dużym natężeniu ruchu na odcinku Gdańsk – Tczew; przeciętnie rejestrowanych jest tu ponad 70 pociągów na dobę na obsługiwanym torze. Urządzenia stanowiska pomiarowego umieszczono na konstrukcji bramkowej sieci jezdnej. Widok stanowiska przedstawiono na rysunku 3. Stanowisko wyposażono w autonomiczne zasilanie wykorzystujące zespół akumulatorów żelowych, turbinę wiatrową oraz zespół ogniw fotowoltaicznych. Możliwe jest opcjonalne zasilanie z sieci trakcyjnej poprzez przetwornicę energoelektroniczną 3 kV/24 V lub ze standardowej sieci elektroenergetycznej.



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe: a) widok wzdłuż toru; b) widok z boku; c) płytką refleksyjną

Do pomiaru uniesienia przewodu jezdnego wykorzystano szybki dalmierz laserowy działający na zasadzie odbiciowej, tzn. w oparciu o rejestrację czasu powrotu wyemitowanej i odbitej od obiektu wiązki promieniowania. Dalmierz umieszczono w szafie na wysięgniku przymocowanym do mostu konstrukcji bramkowej. Mierzy on odległość od płytki refleksyjnej przymocowanej do przewodów jezdnych. W skrzyni dalmierza umieszczona jest także kamera przeznaczona do kontroli stanu powierzchni płytki odbiciowej – widok płytki z widocznym miejscem podania wiązki laserowej przedstawia rysunek 3c. Ze względu na termiczny ruch przewodów jezdnych dobrano wymiary płytki.

Wykrycie i pomiar prędkości pojazdu realizowane jest przy użyciu laserowego przetwornika odległości i prędkości obiektu, działającego na zasadzie radaru, ale emitującego ukierunkowaną wiązkę laserową w zakresie podczerwieni. Przy użyciu kamery przemysłowej o wysokiej rozdzielczości, skierowanej wzdłuż toru, wykonywany jest sekwencyjnie zestaw fotografii

nadjeżdżającego pociągu. W przypadku wykrycia nieprawidłowej współpracy odbieraka z siecią, umożliwiają one określenie, który z odbieraków pojazdu był podniesiony. Przykładowe dwie kolejno wykonane fotografie podczas przejazdu pociągu typu ED250 przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przykład rejestracji fotograficznej dla nadjeżdżającego pojazdu

Działanie stanowiska pomiarowego jest nadzorowane przez komputer pomiarowy umieszczony w szafie sterowania. Realizowany przez ten komputer program pomiarowy bez jakiegokolwiek ingerencji obsługi wykrywa nadjeżdżający pociąg i uruchamia proces rejestracji uniesienia przewodu jezdnego. Utworzony plik z wynikami pomiaru uniesienia w funkcji czasu, wraz z plikami fotografii pociągu, przesyłane są bezprzewodowo do komputera w punkcie sterowania ruchem. Są one natychmiast przetwarzane automatycznie przez program analizy i oceny wyników, który – w oparciu o algorytmy obliczeniowe, oparte na wartościach wzorcowych zebranych podczas procedury skalowania stanowiska i wynikach prowadzonych badań modelowych – wykrywa i lokalizuje uniesione odbieraki w pociągu. Uwzględniając prędkość przejazdu, która wnosi dodatkowe oddziaływanie aerodynamiczne, oraz efekt łącznego oddziaływania kilku odbieraków, gdy w pociągu uniesiony jest więcej niż jeden i znajdują się one w niezbyt dużej odległości, program szacuje wartość siły statycznej każdego z odbieraków i porównuje ją z normatywnymi wartościami granicznymi. Dla przyspieszenia reakcji i ułatwienia ewentualnych decyzji przez operatora na stanowisku sterowania ruchem program – prócz wyznaczonej wartości siły, generuje kilkustopniowy sygnał alarmowy. Jeżeli stwierdzone przekroczenie siły nacisku odbieraka względem norm jest duże, włącza się ponadto sygnalizacja dźwiękowa. Przykładową bieżącą wizualizację wyników przetwarzania danych przedstawiono na rysunku 5a, naniesiono tam tekstowe objaśnienia ważniejszych elementów ekranu.



Rys. 5. Przykład wizualizacji wyników w programie przetwarzającym dane: a) okno podstawowe z automatyczną wizualizacją bieżącą; b) okno raportu okresowego

Program może też pracować w trybie obsługi „ręcznej”, gdzie pliki z wynikami przetwarzane są na żądanie operatora. Obsługa może włączyć również funkcję automatycznego podglądu fotografii pociągu. Przydatną funkcją może być także tworzenie okresowych raportów z monitoringu, co może ułatwiać szczególnie analizę przyczyn zaburzeń w ruchu pociągów wywołanych niewłaściwą współpracą odbieraków z siecią, po zaistnieniu zdarzeń o takim charakterze. Przykład tworzenia raportu dziennego z wyników działania stanowiska przedstawiono na rysunku 5b. Pociągi, w których wykryto przekroczenia szacowanej siły statycznej i wymagają sprawdzenia w zakładzie taboru, są wyróżnione kolorem czerwonym. Prócz rejestrowanych automatycznie parametrów takich jak: data i czas przejazdu, wyniki pomiarów i obliczeń, do raportu lub pliku wyników może być dodane opcjonalnie przez obsługę oznaczenie pojazdu tzn. typ i numer seryjny – na podstawie fotografii lub dokumentów nadzoru ruchu.

3. CHARAKTERYSTYCZNE WYNIKI POMIARÓW Z OKRESU EKSPLOATACJI SYSTEMU

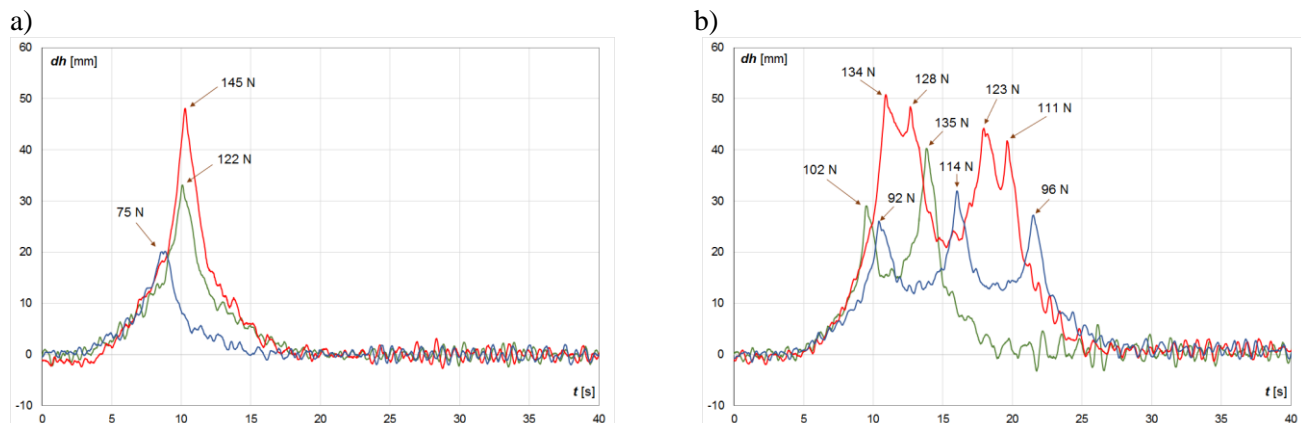
Kilkuletnia eksploatacja, podczas której rejestrowanych jest kilkadziesiąt pociągów dziennie, pozwoliła na szczegółową weryfikację działania systemu MOP. Podstawowym kryterium weryfikacji skalowania systemu MOP było porównanie wybranych wyników przetwarzania danych stanowiska monitoringu z pomiarami siły odbieraków wykonanymi w zakładach taboru. Jako dodatkowe narzędzie weryfikacji wykorzystano szereg zestawień wyników tych samych pociągów i odbieraków uzyskanych w kilkudniowych odstępach czasu przy przejazdach z różną prędkością oraz w różnych warunkach pogodowych. Uzyskano dobrą powtarzalność wyników. Poniżej przedstawiono charakterystyczne przebiegi uniesienia przewodów jezdnych, rejestrowane podczas przejazdu pociągów o zróżnicowanej liczbie podniesionych odbieraków prądu. Zestawiono porównawczo na rysunkach wyniki, które świadczą o bardzo dużej różnicy w nastawie siły statycznej – wartości tej siły oszacowane przez program analizy danych naniesiono tekstowo na rysunkach.

Rysunek 6a przedstawia przebiegi uzyskane przy przejazdach 3 różnych lokomotyw ze zbliżoną prędkością ok. 40 km/h, dla których uzyskano silnie zróżnicowane wartości maksymalnego uniesienia przewodów jezdnych. Obydwie lokomotywy – o największym jak i najmniejszym wywołanym uniesieniu – mają niewłaściwie wyregulowaną siłę statyczną odbieraka; program kwalifikuje je jako przeznaczone do pilnej kontroli i regulacji. Na rysunku 6b przedstawiono przebiegi uzyskane dla trzech pociągów o większej liczbie podniesionych odbieraków – od dwóch do czterech, przy różnych odległościach między sąsiednimi odbierakami; prędkość jazdy wynosiła tu także ok. 40 km/h. Na rysunkach przebiegi dla poszczególnych pociągów wykreślone są innym kolorem. Lokalne maksima na wykresach uniesienia odpowiadają chwilom przejścia kolejnego odbieraka przez punkt pomiaru; wartości szczytowe są podstawowym kryterium dla programu wyznaczającego siłę statyczną odbieraka. Warto podkreślić, że algorytm obliczeń uwzględnia efekt sumowania sił unoszących przewody jezdne, pochodzących od sąsiednich odbieraków, jak również ich wzajemną odległość. W takich przypadkach szacowana siła statyczna jest funkcją kilku parametrów – widać to na rysunku 6b, gdzie znacznie mniejszej wartości uniesienia przewodu może odpowiadać większa wartość wyznaczonej siły statycznej – por. drugie maksimum lokalne wykresu w kolorze niebieskim (114 N) i czwarte maksimum wykresu w kolorze czerwonym (111 N). Przy sąsiednich odbierakach odległych o mniej niż 50 m, przy prędkościach jazdy powyżej 100 km/h oszacowanie siły statycznej dla drugiego i kolejnych odbieraków w pociągu może być obarczone znacznym błędem ze względu na wpływ drgań własnych przewodów jezdnych, wzbudzonych przez pierwszy odbierak. Obserwacja ta jest zbieżna z publikowanymi wynikami badań, dotyczących układów opartych na podobnej koncepcji [21].

Stanowisko monitoringu – prócz wykrywania odbieraków o niewłaściwie nastawionej sile nacisku statycznego, może być wykorzystane również do stwierdzenia niezgodnej z przepisami eksploatacji pojazdów, polegającej na jeździe z kilkoma równocześnie podniesionymi odbierakami prądu rozmieszczonymi w zbyt małej odległości. Przepisy precyzują odpowiednie wymogi w tym zakresie, które nie zawsze są przestrzegane. W takich sytuacjach, nawet przy prawidłowych nastawach siły poszczególnych odbieraków, może dochodzić do zbyt silnego unoszenia przewodów. Wartość ta w

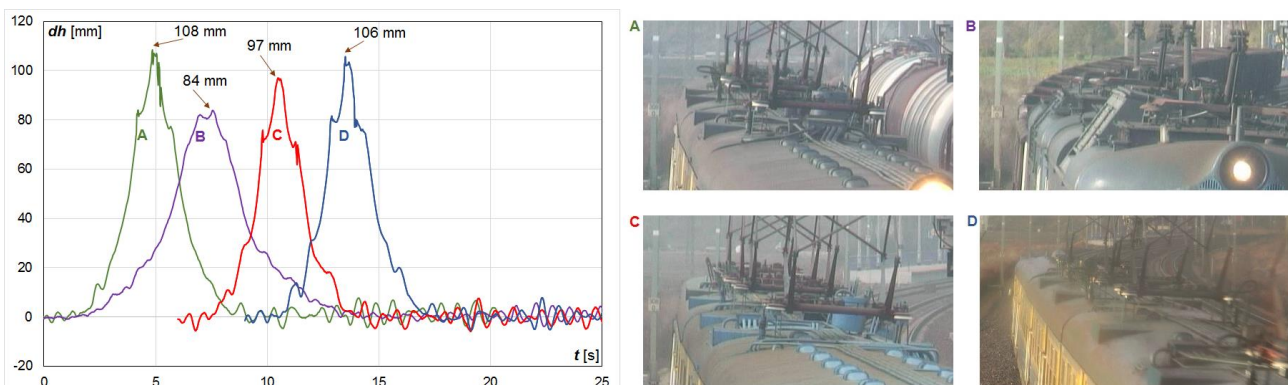


punktach podwieszenia nie powinna przekraczać 100 mm, znaczne przekroczenie tej wartości grozi uszkodzeniem sieci.



Rys. 6. Typowe przykłady rejestrowanych przez stanowisko monitoringu przebiegów uniesienia przewodów jezdnym przy zróżnicowanych wartościach siły nacisku statycznego: a) wyniki dla 3 pociągów z jednym podniesionym odbierakiem; b) wyniki dla trzech pociągów o kilku podniesionych odbierakach

Na rysunku 7 przedstawiono przykłady pomiaru wysokich wartości uniesienia, zbliżonych do wartości krytycznych wywołanych takim sposobem prowadzenia pociągu – potwierdzeniem są zarejestrowane za pomocą kamery fotografie. Należy zwrócić uwagę, że w takich nietypowych sytuacjach algorytm szacowania siły statycznej poszczególnych odbieraków nie daje wiarygodnych wartości, stąd na wykresach podano tylko maksymalne wartości uniesienia przewodów.



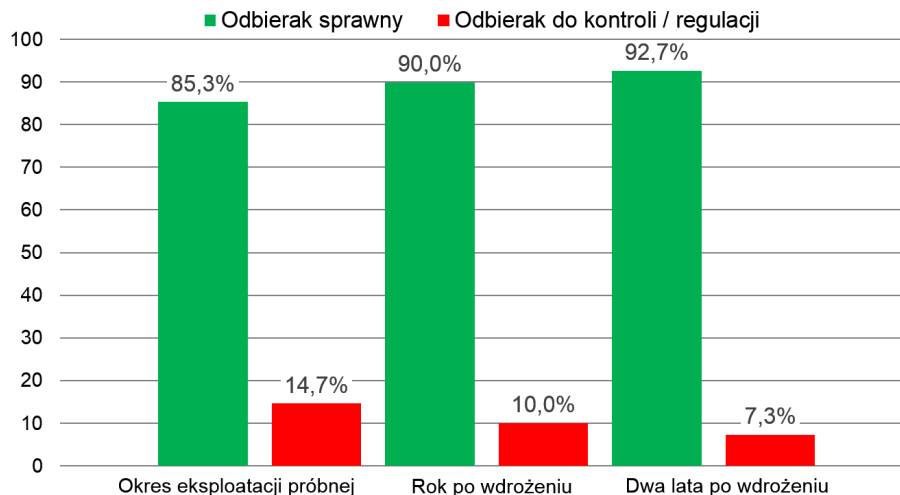
Rys. 7. Przykłady przypadków niewłaściwej eksploatacji taboru – przejazd ze zbyt dużą liczbą podniesionych odbieraków rozmieszczonych na krótkim odcinku: po lewej – przebiegi uniesienia przewodów jezdnym, po prawej – fotografie odbieraków dla poszczególnych pociągów

4. EFEKTY PRAKTYCZNE I ZAMIERZENIA ROZWOJOWE SYSTEMU

Zarówno podczas eksploatacji próbnej przed wdrożeniem, jak również w trakcie kilkuletniego użytkowania systemu, wykrywane były sporadycznie przypadki stwierdzenia znacznych przekroczeń siły nacisku odbieraka na sieć, które następnie weryfikowano w Zakładach Taboru odpowiedniego przewoźnika. W wielu przypadkach stwierdzano konieczność regulacji odbieraka lub jego wymiany. Dzięki zwiększeniu staranności czynności obsługowych przez służby techniczne właścicieli taboru stwierdzono statystycznie pewną poprawę jakości regulacji siły statycznej odbieraków. Na rysunku 8 przedstawiono zestawienie statystyczne wyników monitoringu dla ponad miesięcznych okresów krótko przed wdrożeniem, podczas tzw. eksploatacji próbnej, ok. rok po wdrożeniu oraz po blisko dwuletniej eksploatacji stanowiska. Dla ułatwienia oceny uzyskanych efektów odbieraki podzielono na wykresie na dwie główne grupy: te w których nie stwierdzono przekroczeń wartości siły nacisku lub stwierdzono przekroczenia nieznaczne, mogące wynikać z niedokładności szacowania siły



wskutek zastosowania pośredniej metody pomiaru – są one oznaczone jako sprawne (kolor zielony), oraz takie, dla których szacowana siła statyczna odbiega od wartości zalecanej o ponad 20% w górę lub w dół – są one oznaczone jako wymagające pilnej kontroli i regulacji (kolor czerwony). W każdym z trzech analizowanych okresów łączna liczba odbieraków ocenianych przez system monitoringu przekraczała 2,5 tysiąca, zatem wyniki porównania można uznać za reprezentatywne.

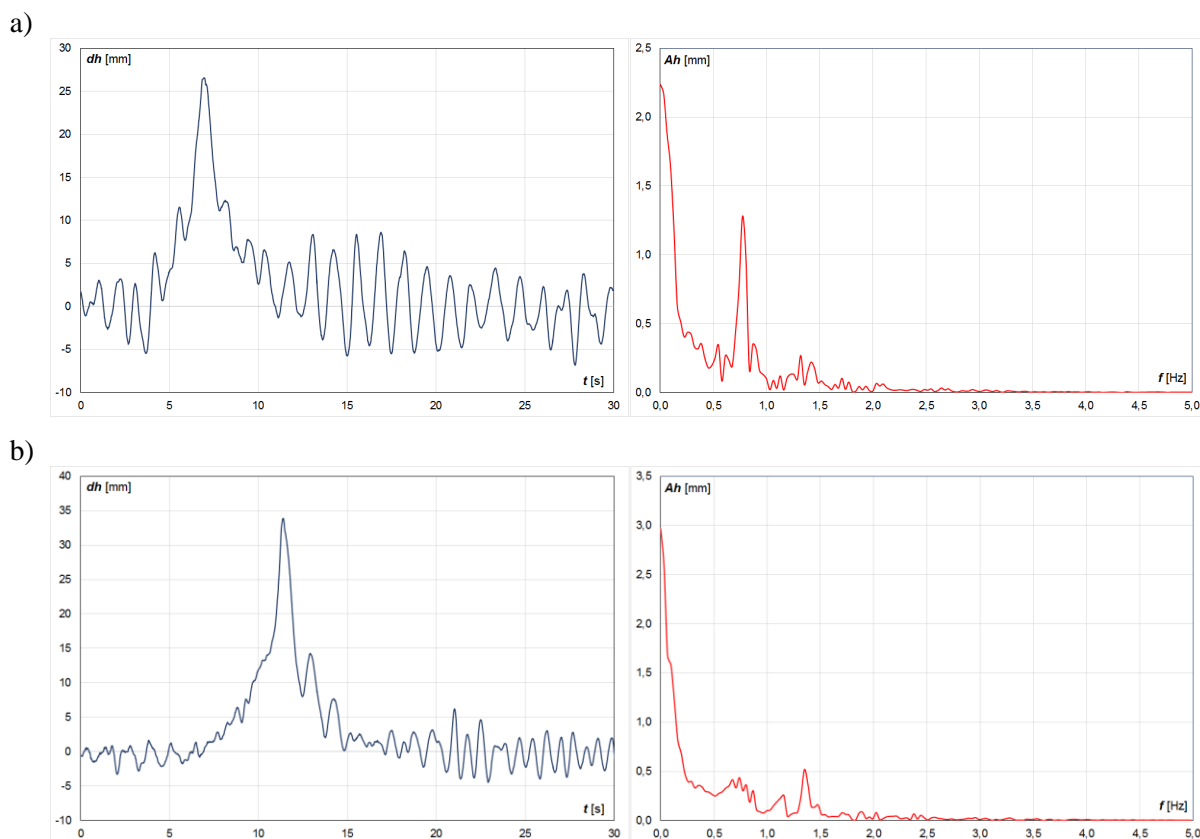


Rys. 8. Zestawienie statystyczne wyników oceny odbieraków na stanowisku monitoringu w ponad miesięcznych okresach przed i po wdrożeniu systemu do eksploatacji

Podczas dotychczasowej eksploatacji stanowiska prowadzono w sposób ciągły nadzór nad jego działaniem i pogłębioną analizę otrzymywanych wyników. Zaowocowało to obserwacją, że sporadycznie zdarzają się przypadki anomalnego przebiegu drgań przewodów jezdnych podczas przejazdu pociągu, szczególnie w czasie gdy odbierak prądu znajduje się stosunkowo blisko miejsca pomiaru. Należy podkreślić, że każdy przejazd wzbudza drgania pionowe przewodów, których amplituda zależy od prędkości jazdy i siły stykowej, jednak w pewnych przypadkach podstawowe cechy tych oscylacji – amplituda i kształt – odbiegają znacznie od wartości typowych dla analogicznych warunków. Wykorzystano doświadczenia z prowadzonych uprzednio badań symulacyjnych i eksperymentalnych nad wykrywaniem niesprawności elementów mechanicznych odbieraków prądu – sprężystych i tłumiących, decydujących o właściwej współpracy dynamicznej odbieraka z siecią. W badaniach tych stwierdzono wpływ stanu tych elementów zarówno na amplitudę, jak i rozkład widmowy wymuszonych drgań przewodów jezdnych sieci trakcyjnej w sytuacji, gdy w pobliżu punktu obserwacji tych drgań na przewody oddziaływał siłą nacisku diagnozowany odbierak prądu [15, 17]. W szczególności stwierdzono wówczas eksperymentalnie, że przy sprawnym mechanicznie odbieraku widmo drgań zawiera większy udział składowych o wyższych częstotliwościach niż częstotliwość drgań własnych przewodów sieci f_s , zaś przy złym działaniu wybranych elementów sprężysto-tłumiących wyraźnie dominuje składowa f_s .

W trybie badań pilotażowych przeprowadzono analizę harmoniczną z wykorzystaniem dyskretnej transformacji Fouriera dla wybranej grupy przebiegów zmian uniesienia przewodów jezdnych podczas przejazdu pociągu przez punkt pomiaru. Na rysunku 9a przedstawiono przebieg uniesienia oraz rozkład widmowy drgań dla całego odcinka czasu objętego pomiarem podczas przejazdu pociągu z uniesionym odbierakiem, który w następnym dniu podczas przeglądu okresowego w zakładzie taboru został zakwalifikowany jako niesprawny mechanicznie i wymieniony, zaś na rysunku 9b analogiczne wykresy uzyskane dla nowego odbieraka w innym pojeździe. Przedstawione tu wyniki są zgodne wnioskami wynikającymi z poprzednich prac badawczych, należy jednak zaznaczyć, że dotyczą one znacząco odmiennych warunków pomiaru. Dla odbieraka wadliwego zaobserwowano znacznie większą amplitudę wzbudzonych drgań, zaś w ich rozkładzie widmowym, prócz składowej stałej, wyraźnie dominuje częstotliwość drgań własnych przewodów jezdnych, która wynosi ok. 0,8 Hz; podobny efekt nie występuje dla odbieraka sprawnego. W trakcie eksploatacji stanowiska sporadycznie obserwowano przebiegi o zbliżonym charakterze jak na rysunku 9a, jednak nie było

możliwości wykonania badań potwierdzających zły stan odbieraka. Dla postawienia tezy, że taka analiza wyników może być wytyczną do stwierdzenia uszkodzeń zespołu kinematycznego odbieraka prądu, konieczne będzie wykonanie dłuższej serii badań eksperymentalnych.



Rys. 9. Przebiegi uniesienia przewodów jezdnych (z lewej) i wynik ich rozkładu widmowego z użyciem DFT (z prawej) przy przejeździe pojazdu z prędkością ok. 55 km/h z odbierakiem: a) o uszkodzonej części kinematycznej; b) sprawnym – fabrycznie nowym

W przyszłości planowane są prace, zmierzające do wykorzystania zaawansowanych modeli symulacyjnych sieci i odbieraka prądu dla stworzenia bardziej precyzyjnych algorytmów przetwarzania danych pomiarowych w celu zwiększenia dokładności estymacji siły statycznej, zwłaszcza w pociągach o większej liczbie podniesionych odbieraków i przy większych prędkościach jazdy [10]. Prowadzone są też prace koncepcyjne nad rozszerzeniem funkcji stanowiska monitoringu o wykrywanie innych niesprawności odbieraków np. uszkodzeń nakładek stykowych [9]. Wstępnie przewiduje się m.in. wykorzystanie akcelerometrów rozmieszczonych w pewnym obszarze sieci trakcyjnej, pracujących w strukturze bezprzewodowej sieci sensorowej [12].

WNIOSKI

Przedstawiony system monitoringu odbieraków prądu umożliwia wykrycie rozregulowanych i wadliwych odbieraków prądu w warunkach eksploatacyjnych. System opracowano wykorzystując nowe technologie pomiaru i transmisji danych.

Proces pomiaru jest całkowicie zautomatyzowany, stanowisko pomiarowe jest w zasadzie bezobsługowe. Przetwarzanie wyników także odbywa się automatycznie, tym niemniej pewne specyficzne przypadki powinny być weryfikowane przez operatora systemu. Może to jednak odbywać się zbiorowo – np. raz dziennie, lub wrywkowo – po zasygnalizowaniu przez program przetwarzający wykrycia znacznego przekroczenia dopuszczalnych wartości uniesienia przewodów.

System dedykowany jest do wykrywania odbieraków o sile stykowej znacznie przekraczającej dopuszczalny zakres. Program przetwarzający dane oblicza statyczną siłę statyczną odbieraka, jest to jednak wartość szacunkowa. Jest ona użyteczna dla oceny odbieraka, jednak – ze względu na



dopuszczalny błąd pośredniej metody pomiaru – nie powinna być traktowana na równi z dokładnym wynikiem pomiaru w zakładach taboru. System umożliwi także wykrycie nieprawidłowego sposobu eksploatacji pojazdu z podniesioną nadmierną liczbą odbieraków rozmieszczonych blisko siebie.

Odpowiednie wykorzystanie systemu może przyczynić się do zwiększenia ciągłości ruchu kolejowego poprzez ograniczenie liczby uszkodzeń sieci przez wadliwe lub niewłaściwie używane odbieraki prądu i w pewnym stopniu do poprawy stopnia bezpieczeństwa użytkowników tego rodzaju transportu. Już po pierwszych dwóch latach eksploatacji procentowy udział w ruchu liniowym odbieraków o znacznym odchyleniu siły statycznej od wartości normatywnej zmniejszył się o połowę.

Ze względu na złożone zależności, wykorzystywane podczas przetwarzania wyników, oraz wpływ na wartość uniesienia przewodów wielu czynników, spośród których część jest związana z konkretną lokalizacją stanowiska pomiarowego, algorytmy obliczeń implementowane w oprogramowaniu oparto w znacznej części na wynikach eksperymentalnych. Po dostrojeniu algorytmów uzyskano dobrą powtarzalność wyników przetwarzania dla różnych warunków atmosferycznych oraz szerokiego zakresu prędkości jazdy.

W oparciu o zebrane wyniki eksploatacyjne można sformułować hipotezę, że zaawansowana analiza rejestrowanych przebiegów uniesienia i drgań przewodów jezdnych może umożliwić detekcję innych stanów anomalnych odbieraka.

Streszczenie

Omówiono metodę monitorowania stanu technicznego odbieraków prądu w oparciu o pomiar uniesienia przewodów jezdnych sieci trakcyjnej w czasie przejazdu pociągu. Opisano konstrukcję i zasadę działania wdrożonego na linii kolejowej pilotażowego stanowiska monitoringu. Przedstawiono metodę analizy i sposób wizualizacji wyników pomiarów. Zastosowany algorytm szacowania siły statycznej odbieraka uwzględnia prędkości pociągu i działanie innych uniesionych pantografów w pociągu. Podano przykładowe wyniki dla różnych konfiguracji podniesionych pantografów w składzie pociągu, obejmujących odbieraki z prawidłowo i nieprawidłowo nastawioną wartością siły statycznej. Podstawą dla oceny efektów działania systemu są wyniki z kilkuletniego okresu jego eksploatacji. W tym czasie kilkadziesiąt tysięcy pociągów przejechało przez stanowisko monitoringu, co pozwala na sformułowanie reprezentatywnych statystycznie wyników. Wdrożenie systemu monitorowania zaowocowało już wyraźną poprawą średniego stanu technicznego odbieraków prądu w eksploatowanym taborze. Planowany jest dalszy rozwój systemu, co powinno przyczynić się do wzrostu bezpieczeństwa i ciągłości ruchu oraz obniżenia kosztów eksploatacji.

Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, odbieraki prądu, monitoring stanu technicznego

Monitoring system of railway vehicles current collectors in terms of traffic safety and continuity

Abstract

The paper discusses the principle of the current collector monitoring based on the measurement of the uplift of catenary contact wires during the passage of a train. Construction and operation of the implemented monitoring system is described and method of analysis and visualization of the measurement results are presented. The algorithm for estimating the collector's static force takes into account the train speed and the influence of other raised pantographs on the train. Exemplary results for some different combinations of train pantograph setting are compared, including current collectors with properly and wrongly adjusted static force. The basis for the assessment of the effects of the system are the results of several years of its operation. During this time many thousands of current collectors were evaluated, thus it allows for the formulation of reliable statistical conclusions. The implementation of the monitoring system has already resulted in higher average level of technical condition of current collectors. Planned further development of the system will contribute to an even greater increase of traffic continuity and safety, and to reduction of exploitation cost.

Keywords: electric traction, current collector, condition monitoring

BIBLIOGRAFIA

1. Alberto A., Benet J., Arias E., Cebrian D., Rojo T., Cuartero F., *A high performance tool for the simulation of the dynamic pantograph–catenary interaction*. Mathematics and Computers in Simulation, vol. 3 (79), Elsevier 2008.

2. Ambrósio J., Pombo J., Pereira M., Antunes P., Mósca A., *A Computational Procedure for the Dynamic Analysis of the Catenary-Pantograph Interaction in High-Speed Trains*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 50, No. 3, 2012.
3. Balestrino A., Bruno O., Landi A., Sani L., *Innovative Solutions for Overhead Catenary-Pantograph System: Wire Actuated Control and Observed Contact Force*. Vehicle System Dynamics, 33 / 2000.
4. Benet J., Cuartero N., Cuartero F., Rojo T., Tendero P., Arias E., *An advanced 3D-model for the study and simulation of the pantograph catenary system*. Transportation Research Part C 36/ 2013.
5. Cho Y. H., *Numerical simulation of the dynamic responses of railway overhead contact lines to a moving pantograph, considering a nonlinear dropper*. Journal of Sound and Vibration, vol. 315, no. 3, Aug. 2008.
6. *Commission Decision of 23 July 2012 amending Decisions 2006/679/EC and 2006/860/EC concerning technical specifications for interoperability* (notified under document C(2012) 4984) 2012/464/EU.
7. Giętkowski Z., Karwowski K., Mizan M., *Diagnostyka sieci trakcyjnej*. Wydaw. PG, 2009.
8. Heland J., Rick F., Sarnes B., Puschmann R., *Fahrdrahtlage und Kontaktkräfte – Messungen an Hochgeschwindigkeitsstrecken in China*. Elektrische Bahnen 110 (2012), H.7.
9. Jarzebowicz L., Judek S., *3D Machine Vision System for Inspection of Contact Strips in Railway Vehicle Current Collectors*. International Conference on Applied Electronics (AE), Pilsen, 2014.
10. Kaczmarek P., Karwowski K., Kuciński M., Michna M., Skibicki J., Wilk A., *Model referencyjny sieci trakcyjnej – koncepcja modelowania*. ZN WEiA Politechniki Gdańskiej Nr 40, 2014.
11. Kaniewski M., *Symulacja uniesienia przewodów jezdných sieci trakcyjnej pod wpływem przejazdu wielu pantografów*. Czasopismo Techniczne, T. 108, Zesz. 13 (2011).
12. Karwowski K., Kuciński K., *Sieci sensorowe wykorzystywane w monitoringu i diagnostyce obiektów trakcji elektrycznej*. XVI Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej Semtrak'2014. Kraków: PiT, 2014.
13. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Schneider E., *Contact Lines for Electrical Railways: Planning – Design – Implementation – Maintenance*. Wiley VCH, 2009.
14. Mizan M., Karwowski K., Karkosiński D., *Monitoring odbieraków prądu w warunkach eksploatacyjnych na linii kolejowej*. Przegląd Elektrotechniczny, No. 12 (2013).
15. Mizan M., *Analiza komputerowa sygnałów w diagnostyce trakcyjnych odbieraków prądu*. Proc. of Conf. on Computer Applications in Electrical Engineering, Poznan, April 16-18, 2007.
16. Möller H., Grebner L., Hofman D., *Stromabnehmer im laufendem Betrieb durch stationäre anhubmessung*. Elektrische Bahnen 100 (2002), H.6.
17. Pazdro P., Mizan M., *Technical diagnostics of traction current collectors*. Proc. of International Conference on Ship Propulsion and Railway Traction Systems. Bologna, Italy, 4-6 October 2005.
18. *PN-EN 50318: Zastosowania kolejowe – Systemy odbioru prądu – Walidacja symulacji oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdną górną*. PKN, 2003.
19. *PN-EN 50367: Zastosowania kolejowe – Systemy odbioru prądu – Kryteria techniczne dotyczące wzajemnego oddziaływania między pantografem a siecią jezdną górną*. PKN, 2006.
20. Roman Z., *Symulacja współpracy odbieraka z siecią trakcyjną*. TTS, nr 7-8, 2001.
21. Schorno R., Schmidt C., Nietlispach U., *Zugkontrolleinrichtungen in der Schweiz*. Elektrische Bahnen 109 (2011), H.9.
22. Siemiński T., Jarosz T., *Odbieraki prądu i ich współpraca z siecią jezdną*. WKŁ, Warszawa 1989.
23. Szeląg A., Maciołek T., *A 3 kV DC electric traction system modernisation for increased speed and trains power demand - problems of analysis and synthesis*. Przegląd Elektrotechniczny, No 3a, 2013.