

Opracowanie algorytmu systemu antykradzieżowego sieci jezdnej w transporcie szynowym

Valeriy KUZNETSOV¹, Artur ROJEK², Waldemar SZULC³

Streszczenie

W artykule opisano działanie systemu antykradzieżowego sieci jezdnej, którego zastosowanie ograniczy przypadki kradzieży przewodów jezdnych i lin nośnych oraz elementów układów naprężających. Wdrożenie systemu umożliwi nie tylko ograniczenie strat finansowych powodowanych dewastacją i kradzieżami infrastruktury, ale również zdecydowanie poprawi bezpieczeństwo pracowników, pasażerów i osób postronnych. Stały monitoring parametrów sieci jezdnej oraz przekazywanie (w czasie rzeczywistym) sygnałów alarmowych do odpowiednich służb (SOK i Policja) zapewni wysoką skuteczność systemu. Dodatkowo, stworzenie układu zasilania urządzeń montowanych na sieci jezdnej (lub w jej pobliżu), który nie ma galvanicznego połączenia z siecią trakcyjną zwiększy niezawodność i dyspozycyjność systemów zasilania trakcji elektrycznej.

Słowa kluczowe: sieć jezdna, kradzież, bezpieczeństwo, monitoring

1. Wstęp

Kradzież elementów sieci trakcyjnej jest poważnym problemem zarówno dla zarządców infrastruktury, jak i przewoźników oraz pasażerów. Działania przestępcze skutkują znaczącymi materialnymi stratami, związanymi z:

- koniecznością naprawy sieci trakcyjnej,
- koniecznością naprawy uszkodzonego taboru,
- opóźnieniami pociągów,
- uruchomieniem komunikacji zastępczej.

Każdy przypadek kradzieży elementów nośno-przewodzących sieci jezdnej powoduje ogromne straty materialne, znacznie przewyższające wartość ukradzionych lub zniszczonych elementów oraz niemierzalne straty społeczne wynikające z opóźnień pociągów. Uszkodzona sieć jezdna często powoduje zniszczenie pantografów pojazdów trakcyjnych oraz dalsze zniszczenia pozostałych elementów sieci trakcyjnej. Jest również zagrożeniem dla zdrowia i życia ludzi – pracowników kolei, pasażerów oraz osób postronnych w wyniku porażenia prądem elektrycznym o napięciu ponad 3000 V. Z tego powodu stale monitoruje się stopień zjawiska kradzieży i dewastacji infrastruktury kolejowej.

Na poziomie krajowym utworzono wspólną inicjatywę trzech urzędów regulacyjnych: Urzędu Komunikacji Elektronicznej, Urzędu Regulacji Energetyki i Urzędu Transportu Kolejowego. Z inicjatywy tych urzędów wystosowano memorandum w celu podjęcia wspólnych działań zmierzających do ograniczenia i przeciwdziałania kradzieżom i dewastacji urządzeń infrastruktury technicznej, przewodów oraz urządzeń telekomunikacyjnych, energetycznych i kolejowych [1]. Poziom zjawiska kradzieży i dewastacji struktury kolejowej jest stale monitorowany i co roku jest gromadzona informacja statystyczna od zarządców infrastruktury. Jak wynika z danych przekazanych w 2017 r. [2], w sektorze kolejowym najczęściej dochodzi do kradzieży i dewastacji urządzeń bezpieczeństwa ruchu kolejowego (urządzeń sterowania ruchem kolejowym, urządzeń elektroenergetyki kolejowej, urządzeń teleinformatyki kolejowej) i elementów nawierzchni torowej. Według danych uzyskanych z PKP PLK S.A. w latach 2008–2012 na sieci kolejowej zarejestrowano 2048 kradzieży i dewastacji górnej sieci jezdnej, w czasie których wycięto i ukradziono ponad 380 km lin nośnych oraz prawie 387 km przewodów jezdnych. Dzięki działaniom Straży Ochrony Kolei (SOK) w 2020 roku udało się

¹ Dr hab. inż., prof. IK; Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki; e-mail: vkuznetsov@ikolej.pl.

² Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki, e-mail: arojek@ikolej.pl.

³ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Ośrodek Eksploatacji Toru Doświadczalnego w Żmigrodzie; e-mail: wszulc@ikolej.pl.

zmniejszyć o 14,49% liczbę przestępstw i wykroczeń popełnianych na obszarze kolejowym (z 7535 w 2019 roku do 6443 w 2020 roku, tj. o 1092 zdarzenia mniej) [3]. W 2020 roku doszło do 1309 zdarzeń związanych z kradzieżami infrastruktury kolejowej (m.in. elementów toru lub sieci jezdnej), wykryto zaś 159 zdarzeń. W 2013 roku było ich ponad 3,5 tys., a w 2014 niecałe 3,2 tys.

Analizując te dane widać, że liczba kradzieży spada [4, 5], jednak dalej jest ich dużo, a większość z nich pozostaje niewykryta. Autorzy pracy [6] przeanalizowali poziom kradzieży elementów sieci jezdnych na podstawie danych katowickiego Zakładu Linii Kolejowych PLK S.A. oraz założenia do systemu ochrony antykradzieżowej. Analiza rozwiązań technicznych monitorujących stan sieci trakcyjnej w wielu europejskich zarządkach kolejowych pokazuje, że główna idea zastosowana w tych rozwiązaniach polega na zapewnieniu poprawnej pracy sieci i bezpieczeństwa w przypadku zerwania, a nie diagnostyki antykradzieżowej. Z tego powodu na rynku istnieje niewiele rozwiązań, które pomagają wykrywać próby kradzieży oraz tzw. inteligentnej kradzieży (np. wtedy, gdy złodziej kradnie tylko przewód jezdny lub tylko linę nośną). Tego typu kradzieże nie są wykrywane przez dotychczasowe systemy, które reagują tylko na fakt zaniku napięcia. Oprócz strat materialnych związanych z samym faktem kradzieży, „inteligentna” kradzież ma jeszcze jeden ważny wymiar. Obniżona wysokość sieci trakcyjnej w wyniku kradzieży może uszkodzić odbierak prądu na lokomotywie, co dodatkowo jest zagrożeniem bezpieczeństwa i powoduje straty finansowe związane nie tylko z koniecznością wykonania napraw (koszty odtworzeniowe), ale również opóźnieniami i wstrzymaniem ruchu. Z tego powodu, opracowanie systemu wykrywającego próby kradzieży oraz kradzież przeprowadzoną w sposób „inteligentny” (np. kradzież ciężarów naprężających lub samej liny nośnej albo samego przewodu jezdne) jest sprawą priorytetową. System antykradzieżowy sieci jezdnej został opracowany przez konsorcjum z udziałem Instytutu Kolejnictwa (lider konsorcjum) oraz Przedsiębiorstwa Wdrożeniowo-Produkcyjnego NEEL Sp. z o.o.

2. Opracowanie algorytmów do wykrywania anomalii w układzie sieci jezdnej

Opracowane scenariusze i algorytmy stanowią kluczowy element nowego systemu, ponieważ ich zadaniem jest analizowanie danych pomiarowych zgromadzonych przez rejestratory systemu i generowanie na ich podstawie alarmów. Poprawność algorytmów, przy założeniu uzyskania poprawnego pomiaru

parametrów sieci (warstwa sprzętowa), jest niezbędna do wiarygodnego przewidywania i detekcji anomalii pojawiających się w układzie sieci jezdnej.

Na podstawie danych określono związki przyczynowo skutkowe pomiędzy oddziaływaniem zewnętrznym na elementy sieci a zmianą naprężeń przewodów jezdnych i lin nośnych oraz występowaniem drgań i zaników napięcia w sieci trakcyjnej. W scenariuszach i algorytmach generowania alarmów, o uszkodzeniu lub próbie uszkodzenia sieci jezdnej wzięto pod uwagę zjawiska, ich wartość i zmienność, które mogą występować podczas normalnej eksploatacji sieci jezdnej. System antykradzieżowy (AntyX) musi przeprowadzić wiele analiz dotyczących:

- zmiany napięcia przewodów jezdnych i lin nośnych w przypadku uszkodzenia urządzeń naprężających,
- zmiany napięcia przewodów jezdnych i lin nośnych w przypadku przecięcia przewodu jezdne lub liny,
- przyczyny zaniku napięcia w sieci trakcyjnej,
- zmiany parametrów sieci jezdnej w normalnej eksploatacji;
- występowania drgań sieci jezdnej wywołanych innymi czynnikami niż współpraca z pantografem,
- korelacji zmian parametrów sieci jezdnej w wyniku ingerencji zewnętrznej.

Dodatkowo system musi powiązać informację z czujników systemu w celu generowania alarmów lub ostrzeżeń.

2.1. Uszkodzenie urządzenia naprężającego

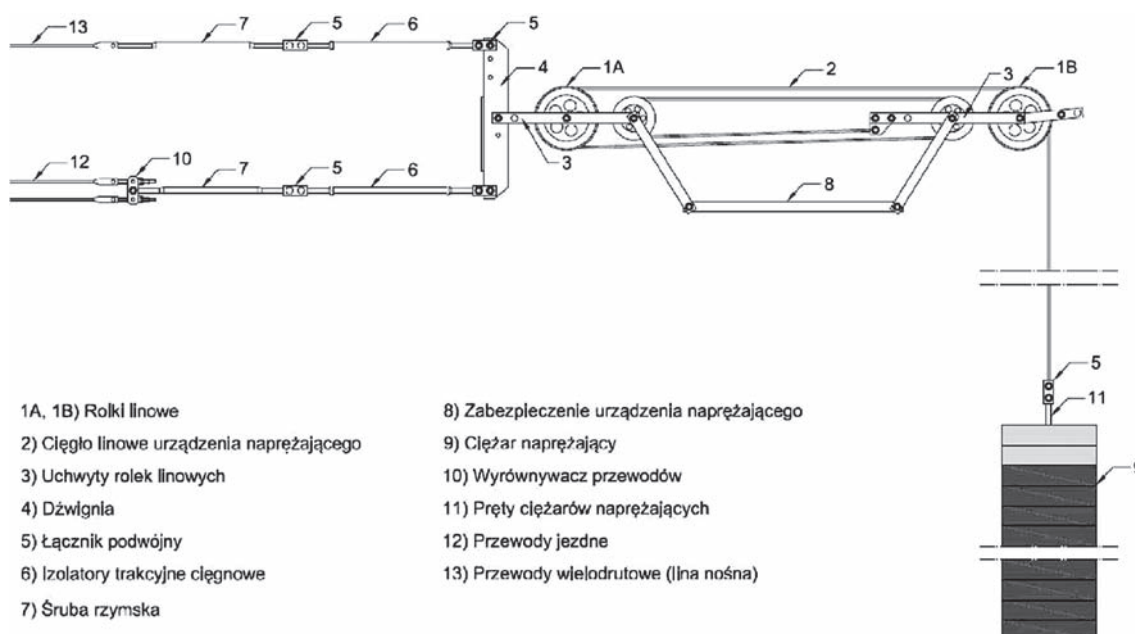
Rodzaj uszkodzenia urządzenia naprężającego zależy od jego konstrukcji – ciężarowe lub beciężarowe (sprężynowe, gazowe itp.).

W urządzeniach ciężarowych (rys. 1) zmiany siły naciągu przewodów jezdnych lub/i lin nośnych mogą być spowodowane przez:

- zerwanie cięgła linowego,
- zmniejszenie liczby ciężarów – kradzież,
- zatarcie rolek linowych lub ich łożysk,
- spadnięcie cięgła linowego z prowadnic rolek.

Zerwanie cięgła linowego spowoduje całkowity brak siły naprężającej przewody jezdne lub/i linę nośną, a wysokość ich zawieszenia zmniejszy się o wartość wynikającą z wydłużenia zabezpieczenia urządzenia naprężającego, tzw. sierżanta. Czujnik lub czujniki siły wchodzące w skład systemu antykradzieżowego AntyX wskażą spadek wartości siły naprężenia do wartości wynikającej z masy przewodów lub liny na odcinku od kotwienia do pierwszego podwieszenia.

Zmniejszenie liczby ciężarów naprężających wywoła spadek siły naprężenia proporcjonalny do tej liczby.



Rys. 1. Urządzenie naprężające ciężarowe; opracowanie własne według [7, 8]

W przypadku dużej liczby ciężarów w stosie, jak np. w urządzeniu naprężającym dwa przewody i linę, zmniejszenie siły naciągu poszczególnych elementów sieci może być porównywalne ze zmianą siły wynikającą z przycięcia rolek linowych. W celu wykrycia zmniejszenia liczby ciężarów o 1, system AntyX, oprócz analizy siły naciągu, będzie analizował szybkość jej zmian. W przypadku kradzieży jednego ciężaru zmiana siły naciągu może być nieznaczna, lecz następować niemal skokowo.

W ciężarowych urządzeniach naprężających, w rolkach linowych stosowane są różnego rodzaju łożyska, których elementy odkształcają się pod wpływem sił oddziałujących punktowo. Dodatkowo, łożyska oraz same rolki mogą zostać zanieczyszczone np. pyłem z klocków hamulcowych. Powoduje to, że nieznaczna zmiana długości przewodów jezdnych lub lin wynikająca z rozszerzalności cieplnej może nie być kompensowana przez urządzenie naprężające, co w konsekwencji wywołuje zmiany naprężenia przewodów i lin. Zmiany te będą zachodzić narastająco w tempie zmian temperatury przewodów i lin do chwili, w której różnica sił nie będzie większa od siły potrzebnej na przełamanie zatarcia. Czujnik lub czujniki siły wchodzące w skład systemu antykradzieżowego AntyX wskażą zmianę wartości siły naprężenia, a w przypadku, gdy zmiany będą większe od dopuszczalnych zostanie wygenerowany alarm.

W urządzeniach naprężających z rolkami równoległymi ciągło linowe jest wprowadzane na prowadnicę rolek pod niewielkim kątem. To oraz błędy w montażu urządzenia mogą być przyczyną spadnięcia ciągła linowego z rolek i zakleszczenie urządzenia. W tym

przypadku siły naciągu przewodów i lin będą się zmieniać wraz ze zmianą ich długości wynikającą z rozszerzalności termicznej. Sieć będzie się zachowywała jak nieskompensowana lub półskompensowana. Czujnik lub czujniki siły wchodzące w skład systemu antykradzieżowego AntyX wskażą zmianę wartości siły naprężenia, a w przypadku, gdy zmiany będą większe zostanie wygenerowany alarm.

W beczkarowych – sprężynowych urządzeniach naprężających, których przykład pokazano na rysunku 2, zmiany siły naciągu przewodów jezdnych lub/i lin nośnych mogą być spowodowane przez zerwanie elementów urządzenia lub uszkodzenie sprężyny.



Rys. 2. Sprężynowe urządzenie naprężające [fot. P. Kwaśniewski]

Zerwanie elementu urządzenia spowoduje całkowity brak siły naprężającej przewody jezdne lub/i linę nośną, a wysokość ich zawieszenia zmniejszy się o wartość

wynikającą z wydłużenia zabezpieczenia urządzenia naprężającego, tzw. sierżanta. Czujnik lub czujniki siły wchodzące w skład systemu antykradzieżowego AntyX wskażą spadek wartości siły naprężenia do wartości wynikającej z masy przewodów lub liny na odcinku od kotwienia do pierwszego podwieszenia.

Uszkodzenie sprężyny polegające na jej pęknięciu lub utracie właściwości mechanicznych spowoduje zmniejszenie siły naciągu poszczególnych elementów proporcjonalnie do uszkodzenia. Ponieważ pęknięcie sprężyny jest zjawiskiem dynamicznym może być ono stwierdzone przez analizę zmian siły w czasie. Zmiany siły wynikające ze zmian właściwości mechanicznych sprężyn zachodzą w długim czasie, a system antykradzieżowy powinien wygenerować alarm, gdy zmiany sił naciągu będą większe od dopuszczalnych.

W hydraulicznych (gazowych) urządzeniach naprężających może wystąpić rozszczelnienie urządzenia. W takim przypadku zmiana – szybkość zmniejszenia się siły naciągu przewodów lub lin będzie zależna od rozmiaru uszkodzenia. Również w urządzeniach tego typu można zakładać zerwanie elementu przenoszącego siłę. Zerwanie elementu urządzenia spowoduje brak siły naprężającej przewody jezdne lub/i linę nośną, a wysokość ich zawieszenia zmniejszy się o wartość wynikającą z wydłużenia zabezpieczenia urządzenia naprężającego.

2.2. Przecięcie przewodu jezdnego lub liny nośnej

Przecięcie przewodu jezdnego lub liny nośnej spowoduje gwałtowny spadek siły naciągu w uszkodzonym elemencie. W przypadku sieci z dwoma przewodami lub linami, drugi nie uszkodzony element przejmie całą siłę naciągu, co spowoduje prawie dwukrotny wzrost tej siły. W zależności od miejsca przecięcia przewodu lub liny, siła wskazywana przez czujnik zamontowany w uszkodzonym elemencie będzie większa od zera. Ta siła zależy od masy uszkodzonego elementu i od czujnika do miejsca przecięcia, pomniejszona o siły wynikające z podwieszenia oraz przenoszenia naprężenia innych lin i przewodów przez elementy sieci, takie jak złączki, wieszaki ramiona odciągowe itp.

2.3. Przyczyny zaniku napięcia w sieci trakcyjnej

Przyczyny zaniku napięcia w sieci trakcyjnej można podzielić na wyłączenia planowe i awaryjne. Wyłączenia planowe są dokonywane przez pracowników obsługi podstacji trakcyjnych lub sieci trakcyjnej. Wyłączenie napięcia następuje przez manewrowe otwarcie wyłącznika szybkiego w podstacji trakcyjnej lub/i kabinie sekcyjnej lub otwarcie odłącznika/rozłącznika w układzie sekcjonowania sieci jezdnej.

Wyłączenie awaryjne napięcia w sieci trakcyjnej następuje przez wyłączniki szybkie w podstacjach trakcyjnych i kabinach sekcyjnych. Wyłączenie awaryjne może być spowodowane zwarcie w układzie sieci trakcyjnej lub podstacji trakcyjnej, przeciążeniem pola zasilacza lub zadziałaniem ochrony podnapięciowej w podstacji. Bezpośrednio po wyłączeniu awaryjnym następuje próba linii, czyli podanie napięcia do sieci trakcyjnej przez opornik, w celu sprawdzenia, czy nie występuje zwarcie w układzie sieci trakcyjnej. Zgodnie z wymaganiami zawartymi w Technicznych Specyfikacjach Interoperacyjności dla podsystemu Energia, próba linii powinna być realizowana po 5 sekundach od zaniku napięcia w sieci.

Wymienione przyczyny zaniku napięcia w sieci trakcyjnej są związane ze standardową eksploatacją sieci i systemu jej zasilania. Kradzież elementów sieci jezdnej może być dokonywana przy załączonym lub wyłączonym napięciu. Wyłączenie napięcia odbywa się przez dokonanie zwarcia lub otwarcie odłącznika. W przypadku zwarcia wykonanego najczęściej przez zarzucenie na sieć jezdnią przewodu, tzw. zarzutki, nastąpi wyłączenie napięcia przez wyłącznik szybki. Po wyłączeniu napięcia i wykonaniu próby linii z wynikiem negatywnym, zwarty odcinek sieci zostanie bez napięcia. Fakt wyłączenia napięcia i negatywny wynik próby linii jest zarejestrowany w systemie sterowania podstacjami oraz jest widoczny dla personelu nastawni.

Otwarcie odłącznika za pomocą jego napędu również jest widoczne dla personelu nastawni. Inaczej jest, gdy otwarcie odłącznika odbywa się bez wykorzystania napędu, np. przez uniesienie drążka dźwigni odłącznika po jego odłączeniu (odcięciu) od napędu. W tej sytuacji rozwierane są styki główne odłącznika, a styki pomocnicze, z których pochodzi sygnał o stanie odłącznika, wciąż pokazują, że odłącznik jest zamknięty.

2.4. Zmiany parametrów sieci jezdnej w normalnej eksploatacji

Siec skompensowana nie powinna zmieniać swoich parametrów w czasie normalnej eksploatacji. Wszelkie zmiany długości przewodów jezdnych i lin nośnych w wyniku ich rozszerzalności termicznej powinny być skompensowane przez urządzenia naprężające.

W sieciach półskompensowanych naciąg przewodów jezdnych powinien być stały, niezależnie od ich temperatury. W przypadku lin nośnych ich naciąg będzie się zmieniał w zależności od ich temperatury. Przedział zmian naciągu (zwiększenie w porze zimowej i zmniejszenie w porze letniej) wynika z długości odcinka naprężenia – im odcinek dłuższy, tym większy przedział zmian.

W czasie normalnej eksploatacji, niezależnie od typu sieci jezdnej, parametry sieci mogą ulec zmianie w wyniku nieprawidłowego działania urządzeń naprężających opisanych w poprzednim punkcie oraz

zbyt dużych oporów ruchu systemów podwieszonych. Przy prawidłowym procesie utrzymania sieci te czynniki powinny być eliminowane.

W normalnej eksploatacji źródłem drgań sieci jezdnej jest jej współpraca z pantografem. W czasie jazdy pantograf oddziałuje na przewód jezdny i wypiera go do góry, a następnie przez reakcje przewodu jezdnego wywołuje falę mechaniczną poprzeczną. Prędkość propagacji tej fali w stosunku do sieci trakcyjnej jest określona w p. 5.2 normy PN-EN 50119 [9]. Prędkość propagacji fali w przewodzie jezdny jest wprost proporcjonalna do naciągu w przewodzie a odwrotnie proporcjonalna do masy przewodu. Prędkość propagacji fali v_c jest równa pierwiastkowi kwadratowemu ze stosunku tych wielkości według wzoru:

$$v_c = \sqrt{\frac{\sum z}{\sum m}}, \quad (1)$$

gdzie:

$\sum z$ – suma naciągów przewodu/ów jezdnych [N],
 $\sum m$ – suma masy jednostkowej przewodu jezdnego [kg/m].

Na sieci PKP PLK S.A. eksploatuje się 37 podstawowych typów sieci jezdnych, które różnią się liczbą przewodów jezdnych (1 lub 2) i naciągami. Parametry tych sieci wraz z prędkością propagacji fali v_c zestawiono w tablicy 1, zgodnie z którą należy liczyć się z prędkością propagacji fali od około 151 do ponad 478 km/h.

Odbierając prąd z sieci trakcyjnej i przemieszczając się wzdłuż toru, pantograf pojazdu wykonuje ruch postępowy wzdłuż toru, a także ruch zmienny pionowy wywołany zmienną elastycznością sieci jezdnej, zmiennym oddziaływaniem aerodynamicznym i nierównościami toru. Jednakowa rozpiętość przęsła jest również czynnikiem wymuszenia drgań. Częstotliwość drgań f_0 układu pantografu – sieć jezdna jest wyrażona wzorem:

$$f_0 = \frac{v}{3,6 \cdot L}, \quad (2)$$

gdzie:

v – prędkość jazdy,
 L – długość przęsła.

Tablica 1

Zestawienie parametrów sieci jezdnych

Nr według katalogu	Typ sieci	Liczba przewodów jezdnych	Nominalny naciąg [N]	Masa jednostkowa przewodu jezdnego [kg/m]	Prędkość propagacji fali v_c [km/h]
1	YpC120-2C	2	19 620	0,89	336,4
2	YpC95-2C	2	19 620	0,89	336,4
3	C120-2C	2	14 050	0,89	284,7
4	C95-2C	2	12 740	0,89	271,1
10	C95-C	1	9560	0,89	332,1
11	2C120-2C	2	19 060	0,89	331,5
14	2C120-2C-1	2	14 000	0,89	284,1
20	YC120-2C150	2	26 480	1,335	478,6
21	YC150-CS150	1	12 710	1,335	468,9
23	C120-2C150	2	18 600	1,335	401,1
24	C150-C150	1	12 210	1,335	459,6
26	YwsC120-2C	2	19 180	0,89	332,6
30	YwsC120-2CM	2	19 060	0,89	174,7
32	2C120-2C-3	2	21 180	0,89	184,2
35	2C120-2C-4	2	19 060	0,89	174,7
36	YC150-2CS150	2	29 660	1,335	267,0
37	YC120-2CS150	2	29 660	1,335	267,0
–	YC120-2C	2	14 340	0,89	151,6
–	YC95-2C	2	17 740	0,89	168,6

[Opracowanie własne].

Ze wzoru (2) wynika, że częstotliwość drgań pantografu zależy od prędkości jazdy i długości przęsła. Jest wprost proporcjonalna do prędkości jazdy, a odwrotnie do długości przęsła. W przypadku, gdy częstotliwość drgań pantografu będzie zbliżona do częstotliwości drgań własnych sieci trakcyjnej nastąpi zjawisko rezonansu, a więc zwiększenia amplitudy drgań. Częstotliwość własną sieci jezdnej f_s , a właściwie jej pierwszą harmoniczną można obliczyć z zależności:

$$f_s = \frac{ws}{L} \cdot \sqrt{\frac{X+N}{m_{ln} + m_{Djp}}}, \quad (3)$$

gdzie:

ws – współczynnik uwzględniający konstrukcję sieci jednej: $ws = 0,435$ dla sieci z zawieszeniem uelastyczniającym i $ws = 0,5$ dla sieci bez zawieszenia uelastyczniającego,

L – długość przęsła [m],

X – naciąg lin nośnych [N],

N – naciąg przewodów jezdnych [N],

m_{ln} – masa 1 m liny nośnej,

m_{Djp} – masa 1 m przewodu jezdneho.

Jak wynika ze wzoru (3) częstotliwość sieci trakcyjnej jest funkcją sześciu zmiennych. Z punktu widzenia wykonywanej analizy istotna jest liczba 19 typów sieci różniących się masą i siłą naciągów w przewodzie jezdny i linie nośnej wymienionych w tablicy 2. Każdy typ sieci jezdnej ma przęsła zawieszenia o różnych długościach od 24 do 74 m, co stanowi 50 możliwych długości. Należy więc liczyć się, że może wystąpić $50 \times 19 = 950$ różnych wartości częstotliwości własnych sieci trakcyjnej. Zestawienie obliczeń minimalnych i maksymalnych wartości częstotliwości f_s sieci trakcyjnej dla skrajnych długości przęsła przelotowego, dla różnych typów sieci jezdnych podano w tablicy 2.

Uwzględniając teorię fal, sieć jezdnią można traktować jako układ wzajemnie powiązanych strun. W wyniku oddziaływania przemieszczającego się pantografu podczas jego współpracy z działaniami sił aerodynamicznych, wytwarzane są fale mechaniczne poprzeczne biegnące. Przemieszczające się wzdłuż sieci fale napotykając punkt o zmienionym parametrze impedancji mechanicznej mogą ulec całkowitemu lub częściowemu odbiciu. Miejscem w sieci trakcyjnej w którym następuje zmiana parametru jest miejsce zawieszenia przewodu i liny nośnej pod słupem.

Kolejnym źródłem drgań wynikających ze współpracy pantografu z siecią jezdnią jest styk nakładek z przewodem. Amplituda tych drgań wynika z głębokości nierówności nakładek, a częstotliwość od ziarnistości – stanu powierzchni nakładek i prędkości jazdy. Ocenia się, że częstotliwość drgań, wywołanych

tarciem nakładek o przewód jezdny, wynosi od kilkuset do kilku tysięcy Hertzów.

Tablica 2

Częstotliwość własna sieci jezdnych [13]

Nr według katalogu	Typ sieci	f_{smax} [Hz]	f_{smin} [Hz]
1	YpC120-2C	2,507	0,662
2	YpC95-2C	2,427	0,665
3	C120-2C	2,591	0,684
4	C95-2C	2,489	0,681
10	C95-C	3,218	0,765
11	2C120-2C	3,07	0,711
14	2C120-2C-1	2,547	0,590
20	YC120-2C150	2,288	0,664
21	YC150-CS150	2,849	0,689
23	C120-2C150	2,347	0,681
24	C150-C150	2,814	0,681
26	YwsC120-2C	2,545	0,691
30	YwsC120-2C-M	2,545	0,78
32	2C120-2C-3	3,133	0,782
35	2C120-2C-4	2,854	0,777
36	YC150-2CS150	2,454	0,739
37	YC120-2CS150	2,373	0,777
–	YC120-2C	2,281	0,602
–	YC95-2C	2,375	0,650

Oprócz opisanych drgań w sieci jezdnej mogą występować drgania o źródłach zewnętrznych. Jednym z nich mogą być przedmioty, które spadają na sieć lub się o nią obijają, np. gałęzie drzew. Drgania wywołane tymi źródłami będą miały niską częstotliwość, zbliżoną do częstotliwości wynikającej z uniesienia przewodów przez pantograf. Lokalizacja tego źródła będzie stała, a charakter zaburzenia będzie losowy. Oś drgań w tym przypadku będzie pozioma lub pionowa, w zależności od kąta, z jakim przedmiot uderza w sieć. Podstawowa harmoniczna drgań będzie miała częstotliwość zbliżoną do określonej z zależności:

$$f = \frac{1}{2L} \cdot \sqrt{\frac{F}{m}}, \quad (4)$$

gdzie:

f – częstotliwość drgań,

L – odległość pomiędzy konstrukcjami wsporczy,

F – siła naciągu przewodu lub liny,

m – masa przewodu lub liny.

Innym naturalnym źródłem drgań sieci jezdnej jest wiatr. Oś drgań wywołana przez wiatr jest głównie pozioma, a ich częstotliwość niska, określona wzorem (4), z tym że F – wypadkowa siła naciągu sieci jezdnej, a m – masa sieci jezdnej. Maksymalna amplituda drgań sieci w wyniku oddziaływania wiatru jest równa maksymalnemu wychyleniu sieci od parcia wiatru. Amplitudę tę można wyznaczyć korzystając ze wzorów zamieszczonych np. w Iet-107 [10] lub przedstawionych w [11]. Opisane drgania są tłumione w takim samym stopniu jak te, które pochodzą od współpracy sieci z pantografem.

Zewnętrzny źródłem są również drgania wywołane przecinaniem przewodu lub liny piłą, w tym tarczową. W procesie przecinania powstają drgania o małej amplitudzie i wysokiej częstotliwości. Częstotliwość ta wynika z szybkości przesuwania się ząbków piły po przecinanym elemencie. Przykładowo, przy 90 zębach na tarczy obracającej się z prędkością 2000 obr./min., podczas przecinania przewodów częstotliwość drgań będzie miała wartość około 3 kHz. Drgania wywołane przecinaniem mechanicznym przewodu lub liny nośnej rozchodzą się w niej z prędkością ponad 100 razy większą niż w powietrzu. Przenoszone są głównie wewnętrznymi strukturami przewodu lub linii, przez co są słabo tłumione przez wszelkiego rodzaju uchwyty. Podczas przecinania przewodu jezdnej lub liny nośnej narzędziami nożycowymi nie występują drgania wysokich częstotliwości, lecz jedynie wywołane uderzeniem narzędzia o element sieci. W takim przypadku nie jest możliwe wykorzystanie rejestracji drgań do wykrywania uszkodzenia sieci jezdnej.

2.5. Korelacja zmian parametrów sieci jezdnej w wyniku ingerencji zewnętrznej

W wyniku ingerencji zewnętrznej w układ sieci jezdnej zmianie ulegają naciągi przewodów jezdnych i lin nośnych oraz napięcie w sieci trakcyjnej. Działania zewnętrzne polegające na przecięciu przewodu lub liny są poprzedzane zanikiem napięcia, lecz nie we wszystkich przypadkach. Odnotowano zdarzenia, w których wycięcie przewodu lub liny odbyło się pod napięciem. Dodatkowo, uwzględniając że wyłączenie napięcia może wynikać z normalnej eksploatacji sieci (np. wyłączenie przeciążenia), zanik napięcia nie jest warunkiem jednoznacznie wskazującym na ingerencję zewnętrzną.

Jak opisano we wcześniejszych rozdziałach, zmiany napięcia elementów sieci jezdnej mogą być wywołane usterkami urządzeń naprzężających oraz ingerencją zewnętrzną. O tym, jakie jest źródło zmian naciągu elementów sieci może świadczyć wartość, a także szybkość tych zmian. Jeżeli naciąg przewodów lub/i lin zmniejszy się o ponad 10% w ciągu

kilku, kilkunastu sekund najprawdopodobniej świadczy to o zdjęciu części ciężarów naprzężających. W takim przypadku powinien być wygenerowany alarm ingerencji zewnętrznej.

3. Generowanie alarmów i ostrzeżeń

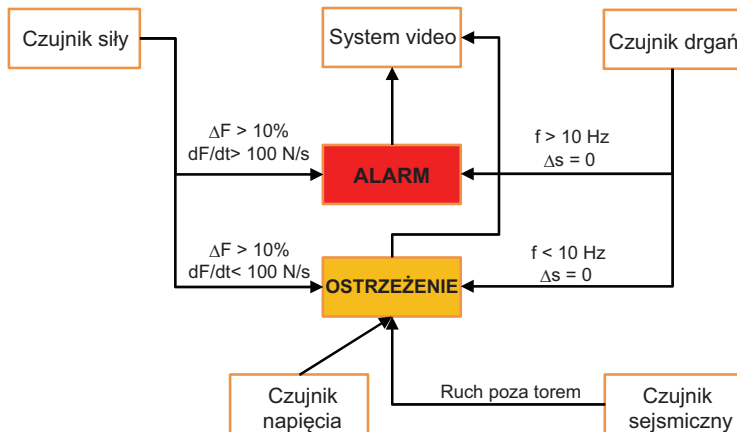
System antykradzieżowy AntyX jest wyposażony w:

- czujniki siły naciągu indywidualne dla każdego przewodu i liny,
- czujniki drgań indywidualne dla każdego przewodu i liny,
- czujnik napięcia w sieci trakcyjnej,
- system wizyjny,
- sensory sejsmiczne (opcjonalnie).

Zależnie od rodzaju czujnika i wartości przekroczenia akceptowalnych parametrów system AntyX generuje alarmy lub ostrzeżenia. Sygnał alarmu jest przekazywany do pracowników prowadzących nadzór nad eksploatacją linii kolejowej (nastawnie) oraz do służb Straży Ochrony Kolei i policji. Sygnał alarmu świadczy, że sieć jest uszkodzona w wyniku kradzieży jej elementów. Sygnał ostrzeżenia będzie generowany, gdy parametry sieci lub działania w jej otoczeniu powinny być zweryfikowane. Schemat generowania alarmów i ostrzeżeń przez system AntyX przedstawiono na rysunku 3.

System kamer będących częścią systemu AntyX stale nagrywa obraz, który jest zapisywany w podstawowej pamięci wewnętrznej systemu. Po wyczerpaniu pojemności tej pamięci pliki wizyjne są nadpisywane na najstarsze. Decyzja o pojemności pamięci podstawowej może być podjęta z uwzględnieniem stanowiska zarządcy infrastruktury. Możliwe jest wykorzystanie systemu kamer do rejestracji przejazdu każdego pociągu, a w przypadku awarii sieci lub pantografu zarejestrowany materiał może być pomocny w wykrywaniu przyczyny zdarzenia.

System AntyX został wyposażony również w pamięć dodatkową wykorzystywaną do zapisu obrazu w każdym przypadku wygenerowania przez system ostrzeżenia lub alarmu. Zapisany obraz obejmuje pewien czas przed wygenerowaniem alarmu lub ostrzeżenia oraz po tym zdarzeniu. Niezależnie od tego, operator systemu w każdej chwili powinien mieć możliwość podglądu on-line sieci trakcyjnej i jej otoczenia z dowolnej kamery oraz sposobność pobierania plików zapisanych w pamięci systemu. O możliwości korzystania z tej funkcji będzie decydować rodzaj dostępnej łączności z systemem AntyX. Bez względu na różne przyczyny zaniku napięcia, sygnał z czujnika napięcia jest podstawą do wygenerowania ostrzeżenia. Operator systemu powinien wówczas zweryfikować przyczynę zaniku napięcia i ewentualnie podjąć dalsze działania.



Rys. 3. Schemat generowania alarmów i ostrzeżeń przez system AntyX [13]

Zgodnie z instrukcją Iet-2 [12] siła naciągu przewodów jezdnych i lin nośnych nie powinna być mniejsza o więcej niż 10% siły znamionowej. W normalnej eksploatacji sieci jezdnej te siły mogą również wzrastać. Z tego względu wzrost siły naciągu o 10% przyjęto jako dopuszczalny. W przypadku zmiany siły naciągu większej niż 10% istotne jest tempo tych zmian. Powolne zmiany, w których siła naciągu zmienia się w tempie mniejszym niż 100 N na sekundę, mogą świadczyć o usterkach sieci jezdnej, np. urządzenia naprężającego. W takim przypadku będzie generowane ostrzeżenie w celu analizy problemu. Zakłada się, że siła naciągu lin i przewodów, jak również inne parametry determinujące generowania ostrzeżeń i alarmów będą mogły być zdalnie zmieniane.

Awaria sieci, w tym przecięcie przewodu jezdnego lub linii nośnej powoduje szybkie zmiany naciągu tych elementów. Dlatego zmiana siły $dF/dt > 100$ N/s, zarejestrowana przez dowolny czujnik siły w systemie AntyX, jest podstawą do wygenerowania alarmu.

Przy zarejestrowaniu drgań sieci istotne jest to, czy ich źródło jest w stałym miejscu, czy się przemieszcza. Przemieszczanie się źródła drgań świadczy o jadącym pociągu. Źródłem drgań o stałej lokalizacji może być wiatr, przedmiot – gałąź na sieci lub próba przecięcia jej elementów.

Ze względu na to, że drgania o niskich częstotliwościach są silnie tłumione przez wszelkiego rodzaju podwieszania i złączki oraz dużą prędkość rozchodzenia się drgań wysokiej częstotliwości w metalu, analiza amplitudy drgań nie pozwoli na dokładne określenie miejsca ich powstawania, a tym samym określenia czy miejsce jest stałe, czy się przemieszcza. Z tego względu do identyfikacji poruszania się pociągu po linii zostaną wykorzystane dane z czujników sejsmicznych.

Czujnik drgań będzie określał ich częstotliwość, a czujnik sejsmiczny dostarczy dane o ruchu pociągu. W przypadku wykrycia drgań o niskiej częstotliwości oraz poruszającego się pociągu, system AntyX nie będzie reagował. Zarejestrowanie przez czujnik drgań sygnału o niskiej częstotliwości przy braku informacji o pociągu

z czujników sejsmicznych skutkuje wygenerowaniem ostrzeżenia. W takim przypadku, na podstawie obrazu z systemu kamer, możliwe jest zidentyfikowanie przyczyny drgań i ewentualne podjęcie dalszych działań.

Wykrycie drgań o wysokiej częstotliwości i jednoczesnym braku informacji z czujników sejsmicznych o poruszającym się pociągu wyzwała impuls skierowany do systemu AntyX do wygenerowania alarmu, gdyż z dużym prawdopodobieństwem świadczy to o przecinaniu przewodu lub linii za pomocą piły.

Czujniki sejsmiczne wykrywają drgania pochodzące z każdego kierunku, a na podstawie ich analizy mogą określać ich źródło – idący człowiek, jadący samochód, jadący pociąg itd. Właściwości te można wykorzystać nie tylko do monitoringu sieci jezdnej, lecz również do otoczenia linii kolejowej. Możliwe jest opracowanie algorytmów, z pomocą których będzie można identyfikować osoby przechodzące przez tory w miejscach niedozwolonych lub nietypowe zachowanie się pojazdów (np. zatrzymanie samochodu w nocy w bliskim sąsiedztwie linii kolejowej). Każde zdarzenie nietypowe lub określone jako niepożądane jest podstawą do wygenerowania ostrzeżenia przez system AntyX i obserwacji linii przez system kamer. Zakłada się, że poszczególne nastawy systemu będą mogły być zmieniane i aktywowane zdalnie.

System antykradzieżowy AntyX został zainstalowany na torze doświadczalnym Instytutu Kolejnictwa oraz torze dojazdowym łączącym tor doświadczalny ze stacją Żmigród. Sprawdzenia i analizy były wykonywane co miesiąc. Podczas badań eksploatacyjnych, przeprowadzonych w trzecim oraz czwartym kwartale 2023 r. wykonano następujące analizy pracy systemu antykradzieżowego:

- 1) pracy urządzeń monitorujących sieć trakcyjną, które zamontowano na torze dojazdowym oraz torze doświadczalnym IK,
- 2) generowanych alarmów,
- 3) skuteczności pracy urządzeń,
- 4) wydajności oraz poprawności działania układu zasilania systemu.

Analiza generowanych alarmów pokazała, że system antykradzieżowy prawidłowo generuje alarmy oraz ostrzeżenia, zgodnie ze scenariuszami oraz algorytmami generowania alarmów i ostrzeżeń opracowanych podczas czwartego etapu projektu i przedstawionych w tym artykule.

Badania eksploatacyjne systemu antykradzieżowego wykazały, że ciągle monitorowanie stanu sieci trakcyjnej na podstawie danych z czujników naciągu, drgań, napięcia w sieci trakcyjnej w połączeniu z systemem wizyjnym umożliwia:

- skuteczną identyfikację granicznych odchyłek siły naciągu lin nośnych i przewodów jezdnych,
- odróżnienie normalnych trybów pracy sieci trakcyjnych od awaryjnych,
- wykrycie prób cięcia lin nośnych i przewodów jezdnych.

4. Podsumowanie

1. Analiza stanu problemu kradzieży elementów sieci trakcyjnej pokazała, że na obecnym rynku praktycznie nie ma rozwiązań wykrywających próby kradzieży lub kradzież części sieci trakcyjnej (np. tylko jednego przewodu jezdnej, tylko liny nośnej itp.). Do wykrywania tego typu kradzieży potrzebne są rozbudowane algorytmy z uwzględnieniem zmian siły naciągu przewodów, drgań oraz zarejestrowanego obrazu przez kamery z miejsca próby kradzieży układu napięciowego.
2. W celu zareagowania na próby cięcia przewodów sieci trakcyjnej oraz innych typów ingerencji zewnętrznej, zaproponowano system antykradzieżowy składający się z: indywidualnych czujników siły naciągu dla każdego przewodu i liny, czujników drgań przeznaczonych dla każdego przewodu i liny, czujnika napięcia w sieci trakcyjnej, systemu wizyjnego i opcjonalnie sensorów sejsmicznych. Zależnie od rodzaju czujnika i wartości przekroczenia akceptowalnych parametrów, system antykradzieżowy będzie generował alarmy lub ostrzeżenia.
3. Jeżeli zmiany siły naciągu przewodów sieci jezdnej zachodzą w tempie porównywalnym do szybkości zmian temperatury przewodów i lin, wówczas z dużym prawdopodobieństwem można przyjąć, że są one wywołane nieprawidłową pracą urządzeń naprzężających. W takim przypadku powinna być wygenerowana informacja o nieprawidłowościach, gdy siły naciągu sieci zmieniają się więcej niż 10%.
4. W przypadku szybkich (i o dużych wartościach) zmian naciągu przewodów lub lin można przyjąć,

że elementy te zostały przecięte lub zerwane. Wówczas bez względu na to czy uszkodzenie nastąpiło podczas normalnej eksploatacji (np. pęknięcie zużytego lub przegrzanego przewodu), czy w wyniku ingerencji zewnętrznej powinien być wygenerowany alarm o uszkodzeniu sieci.

Literatura

1. Memorandum: Raport o skali incydentów kradzieży i dewastacji infrastruktury telekomunikacyjnej, energetycznej i kolejowej za 2016 r. Fundacja na rzecz przeciwdziałania kradzieży i dewastacji infrastruktury. 8 p.
2. Coraz mniej kradzieży infrastruktury kolejowej [Electronic resource] // Urząd Transportu Kolejowego. 2018. URL: <https://utk.gov.pl/pl/aktualnosci/14474,Coraz-mniej-kradziezy-infrastruktury-kolejowej.html> [dostęp: 15.06.2022].
3. Raport roczny za 2020 rok, PKP PLK S.A., 2020. 87 p.
4. Bednarek A.: *PKP PLK: kradzieży jest mniej, bo lepiej chronimy* [Electronic resource] // Spider's web. 2022. URL: <https://spidersweb.pl/2022/04/zlodzieje-kradna-tory-pkp.html> [dostęp: 19.06.2022].
5. Informacja o stanie bezpieczeństwa na obszarze kolejowym za 12 miesięcy 2020 roku, Straż Ochrony Kolei, 2021.
6. Mikulski J., Młyńczak J., Pawelak M.: *Ochrona antykradzieżowa sieci trakcyjnej* // Logistyka. 2010. nr 6.
7. Katalog sieci trakcyjnej, Podwieszenia rurowe, Kolprojekt, Warszawa, 2010.
8. Katalog sieci trakcyjnej. Sieć trakcyjna PKP. Podwieszenia rurowe, Kolprojekt, 2004.
9. EN 50119:2020: Railway applications – Fixed installations – Electric traction overhead contact lines: EN 50119:2020. CENELEC, 03-Apr-2020. 109 p.
10. Wytyczne projektowania i warunki odbioru sieci trakcyjnej z uwzględnieniem standardów i wymogów dla linii interoperacyjnych Iet-107. 2019.
11. Kaniewski M., Kucińska M.: *Odchylenie poprzeczne przewodu jezdnej sieci trakcyjnej na prostej w procesie certyfikacji*, TTS Technika Transportu Szynowego, 2018, Vol. 25, nr 11. s. 45–48.
12. Instrukcja utrzymania sieci trakcyjnej Iet-2. 2019, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.
13. Opracowanie i wdrożenie elementów systemu antykradzieżowego sieci jezdnej w transporcie szynowym Projekt nr POIR.04.01.01-00-0018/17-00 Etap 4. Opracowanie scenariuszy i algorytmów generowania alarmów. Praca nr: 03/000002/12. 2020.

Podziękowania: artykuł został napisany na podstawie wyników uzyskanych podczas realizacji projektu nr POIR 04.01.01-00-0018/17 pt.: „Opracowanie i wdrożenie elementów systemu antykradzieżowego sieci jezdnej w transporcie szynowym”, współfinansowanego z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.