

## PRZETWARZANIE DANYCH W CENTRUM DIAGNOSTYKI PKP POLSKIE LINIE KOLEJOWE S.A. – NOWE INICJATYWY<sup>1</sup>

---

### Ludwik Madej

mgr inż., Naczelnik Działu ds. Pomiarów Diagnostycznych, Centrum Diagnostyki PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., ul. Szczęśliwicka 62, 02-353, Warszawa, tel: +48 600 084 911, e-mail: ludwik.madej@plk-sa.pl

---

### Piotr Gołąbek

dr inż., Wydział Transportu i Informatyki, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie, ul. Projektowa 4, 20-209, Lublin, tel: +48 604 304 260, e-mail: piotr.golabek@cilantro.com.pl

---

**Streszczenie.** *Burzliwy rozwój technologii informatycznych pozwala na pozyskiwanie, przetwarzanie i automatyczną analizę wielkich ilości danych diagnostycznych. Umożliwia to realizację optymalnych pod względem efektywności i kosztu strategii utrzymania infrastruktury kolejowej. Centrum Diagnostyki PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. utrzymuje obszerny zbiór danych diagnostycznych i podejmuje działania ku przekształceniu go w wydajną bazę do działań analitycznych, zgodnie ze współczesnymi trendami, znanymi pod hasłem Big Data Analytics. Częścią aktywności w tym zakresie jest pozyskiwanie nowych źródeł danych diagnostycznych. Przykładem jest projekt pilotażowy wdrożenia sieci autonomicznych sensorów bezprzewodowych do monitorowania temperatury szyn. Artykuł opisuje podjęte i planowane działania wraz z koniecznym kontekstem technologicznym.*

**Słowa kluczowe:** *utrzymanie predykcyjne, Big Data, sieci sensorowe, WSN, diagnostyka kolejowa*

### 1. Utrzymanie infrastruktury kolejowej

Stała infrastruktura kolejowa – tory, trakcja elektryczna, itd. są obiektem procesów utrzymaniowych, podobnie jak maszyny i urządzenia. Jednak czynności utrzymaniowe dotyczące linii kolejowych mają swoją specyfikę. Charakteryzują się bardzo wysokim kosztem, związanym nie tylko z technologią naprawy, ale także z koniecznym czasowym wyłączeniem fragmentu linii z ruchu. Z drugiej strony kategorycznym imperatywem jest zawsze bezpieczeństwo procesu transportowego. Dlatego też dominującą częścią utrzymania linii kolejowych jest rozbudowana, kosztowna, diagnostyka stanu infrastruktury.

Centrum Diagnostyki PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. jest jednostką prowadzącą szeroko zakrojone badania diagnostyczne infrastruktury torowej przy użyciu metod badań nieniszczących (defektoskopia ultradźwiękowa, laserowe pomiary geometrii, diagnostyka wizyjna, itp.). Zasoby pomiarowe obejmują specjalizowane pojazdy diagnostyczne, wózki pomiarowe, bazę laboratoryjną oraz liczną

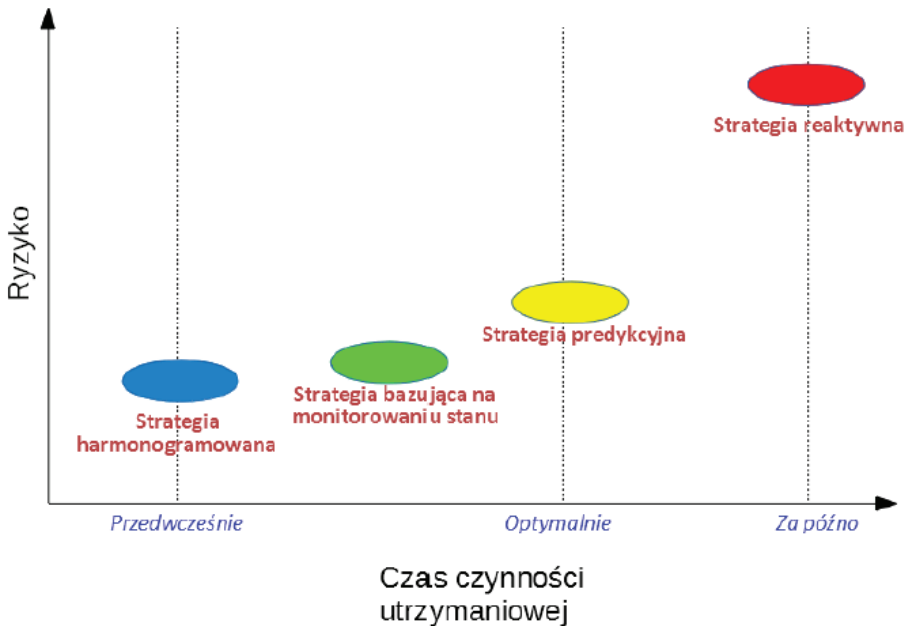
---

<sup>1</sup> Wkład autorów w publikację: Madej L. 40%, Gołąbek P. 60%

kadre wykwalifikowanych diagnostów. Centrum nadzoruje procesy spawalnictwa nawierzchni kolejowej i dokonuje odbiorów technicznych materiałów nawierzchniowych. Do zadań Centrum oprócz realizacji badań należy także gromadzenie, przetwarzanie, analiza i dystrybucja wyników działań diagnostycznych.

## 2. Predykcyjna strategia utrzymaniowa

Czynności utrzymaniowe mogą być prowadzone wg różnych strategii. Rys. 1 ilustruje spektrum możliwości.



Rys. 1 Taksonomia strategii utrzymaniowych

Strategia harmonogramowana – inspekcja w ustalonych interwałach czasowych, jest najbardziej zachowawczym i nieoptymalnym ze względu na koszty podejściem. Strategia reaktywna – prowadzenie interwencji przywracającej sprawność po powstaniu i wykryciu defektu jest najbardziej kosztownym podejściem, a w kontekście zapewnienia bezpieczeństwa – bardzo ryzykownym. Bardzo dobra strategia, opierająca się na ciągłym monitorowaniu stanu obiektu podlegającego utrzymaniu zakłada dostępność odpowiednich diagnostycznych środków technicznych i podejmuje prewencyjne czynności utrzymaniowe. Strategia predykcyjna również opiera się na monitorowaniu stanu, ale jest bardziej agresywna w optymalizacji, planując czynności utrzymaniowe na podstawie predykcji czasu wystąpienia uszkodzenia.

Stosowana w utrzymaniu linii kolejowych strategia jest mieszanką strategii harmonogramowanej oraz reaktywnej z elementami predykcji. Realizowany jest

pewien regularny harmonogram czynności diagnostycznych, pochłaniający wiele zasobów (czas, kadry). Ich rezultatem jest czasem wykrycie fatalnej degradacji elementów toru (pęknięcie szyny, przekroczenie dopuszczalnych odchyłek geometrii, itp.). Występuje wtedy konieczność bezzwłocznej interwencji, co zbliża strategię utrzymaniową do reaktywnej. Diagnostyka ujawnia także defekty niekrytyczne, które jednak mogą rozwinąć się do niebezpiecznej postaci. W takich sytuacjach stosowane są utrzymaniowe działania prewencyjne, jak np. szlifowanie powierzchni tocznej szyny dla neutralizacji wad powierzchniowych, czy, w szczególnych przypadkach, obniżenie prędkości ruchu. Działania te oparte są o wypracowany przez lata zasób wiedzy dotyczący typowego przebiegu rozwoju wad i oparte na tym przewidywania co do zbliżającej się fatalnej degradacji toru. Stanowi to pewną postać predykcyjnej strategii utrzymaniowej.

Dla utrzymania linii kolejowych czysta strategia predykcyjna byłaby ideałem. Zakłada ona ciągły, bogaty strumień danych diagnostycznych, poddawany przetwarzaniu przy użyciu modelu predykcyjnego (w surowej postaci – zakumulowana wiedza o procesach degradacji), celem wypracowania werdyktów dotyczących czynności utrzymaniowych. Działania nie są podejmowane przedwcześnie, a dopiero wtedy, kiedy ryzyko fatalnej degradacji osiągnie pewien poziom, jednak na tyle wcześnie, by do niej nie dopuścić. Zakłada się też elastyczność modelu predykcyjnego, tzn. jego dostosowywanie się do zmieniającego się obrazu diagnostycznej sieci. Zaletami tej strategii są, m.in. ([1]):

- optymalizacja harmonogramu planowanych czynności utrzymaniowych,
- minimalizacja wyłączenia fragmentów linii kolejowych z ruchu,
- optymalizacja czynności diagnostycznych (optymalizacja harmonogramu i priorytetyzacja lokalizacji).

Zaawansowane wdrożenia strategii predykcyjnej zakładają ponadto elastyczny, adaptacyjny model predykcyjny, uaktualniany w drodze intensywnej analizy danych diagnostycznych, oferujący sprzężenie zwrotne, dotyczące strumienia danych wejściowych. W takim wariancie pozytywne efekty są jeszcze bogatsze i obejmują m.in.: kształtowanie procesu diagnostycznego poprzez inkorporację nowych metod, wykrywanie głębokich przyczyn powstawania defektów, włączanie do analizy dodatkowych zbiorów danych, niezwiązanych bezpośrednio z procesem diagnostycznym (np. dane ruchowe, meteorologiczne, itp.).

Oczywistym efektem jest redukcja kosztów związanych z procesem utrzymaniem oraz negatywnymi konsekwencjami degradacji toru. Przykładem mogą być efekty wprowadzenia strategii predykcyjnej w utrzymaniu taboru przez fińskiego przewoźnika VR Group ([2]). Firma stosowała tradycyjnie harmonogramowaną strategię dla istotnych elementów mechaniki (koła, wózki), mniej ważne elementy, jak np. drzwi podlegały strategii reaktywnej. Po wyposażeniu floty pojazdów w czujniki diagnostyczne, zbierane przez pewien czas dane (ok. 30000 serii pomiarowych na każdy pociąg) zostały użyte przez oprogramowanie analityczne do budowy modelu predykcyjnego. Realizowany przy jego użyciu proces utrzymaniowy przyniósł redukcję kosztów o 1/3.

### 3. Gromadzenia danych podstawą konstrukcji modelu predykcyjnego

Zgromadzona wiedza o procesach degradacji toru nie jest wystarczającą podstawą do konstrukcji modelu predykcyjnego. Tory kolejowe są w ciągłej złożonej interakcji z taborem. Współzależność jest dwukierunkowa. Degradacja torów oddziałuje negatywnie na tabor (w skrajnym przypadku – wykolejenia), zły stan taboru pogarsza stan toru. Jednocześnie oba te składniki procesu transportowego podlegają nadzorowi odrębnych jednostek organizacyjnych, co wprowadza konieczność stosowania środków diagnostycznych, dotyczących komplementarnego składnika. W diagnostyce utrzymaniowej linii kolejowej stosuje się rutynowo przytorową aparaturę diagnostyczną, mającą za zadanie wykrywać fatalne dla toru degradacje stanu taboru: zatarte maźnice, zakleszczone hamulce, zdeformowane koła, itd.

Sytuację komplikuje fakt, że wraz z rozwojem gospodarczym, zmienia się profil użytkowania linii kolejowych. Zwiększa się obciążenie, podwyższana jest częstość przejazdów i prędkość jazdy. Zmienia to przebieg procesów degradacyjnych. Np. wraz z pojawieniem się szybkich pociągów, wzrosła zauważalnie częstość występowania wad powierzchni szyny typu squat (rys. 2). Zwiększyły się wymagania co do niezawodności, punktualności procesu transportowego, okna czasowe na czynności utrzymaniowe znacznie się zmniejszyły. Z drugiej strony pojawiły się też nowe możliwości diagnostyczne, dostarczające bogatszych danych.

Wszystko to sprawia, że ugruntowany w tradycyjnej wiedzy model predykcyjny jest niepełny i konieczna staje się jego ciągła aktualizacja w drodze analizy danych diagnostycznych.



Rys. 2. Przykład wady powierzchniowej typu squat

Oczywiście elementy analizy danych, określania zauważalnych zmian oraz kształtowanie czynności utrzymaniowych jest jak najbardziej obecne w aktualnych procedurach PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Okresowa sprawozdawczość

oraz analiza oparta o statystyczne wskaźniki jakości oraz reguły decyzyjne, pozwalają na priorytetyzację działań utrzymaniowych. Jednak postępująca digitalizacja wszystkich aspektów procesu transportowego daje do dyspozycji bogaty treściowy i niezmiernie obszerny zasób danych. Podobnie rozwój technologii diagnostycznych tworzy techniki wytwarzające gigantyczne woluminy danych pomiarowych, żeby wspomnieć chociażby o diagnostyce wizyjnej. Przykładem niech będą specjalizowane pojazdy diagnostyczne eksploatowane w Centrum Diagnostyki. Wcześniejsze generacje pojazdu do ultradźwiękowej diagnostyki szyn bazowały na rejestracji danych tworzących tzw. zobrazowanie B-Skan (max. amplitudy sygnału w wybranych bramkach pomiarowych dla każdego przekroju pomiarowego), co tworzyło strumień danych rzędu 100 MB na typową jazdę pomiarową. Obecnie eksploatowany pojazd posługuje się aparaturą, która rejestruje oprócz danych B-Skan także obrazy wideo szyn, co zwiększa typowy rozmiar wyników do kilkadziesiąt GB na jazdę. Przygotowywana nowa wersja pojazdu diagnostycznego, w zakresie diagnostyki ultradźwiękowej, rejestruje dodatkowo pełen zapis sygnału ultradźwiękowego dla każdej akcji pomiarowej, co generuje dodatkowe kilka GB danych.

Do przetworzenia tak dużych woluminów niezbędne są automatyczne procedury analizy danych oraz automatyczne systemy predykcyjno-decyzyjne.

### *Big Data Analytics*

Wskazany powyżej trend do reprezentowania obiektów, podlegających czynnościom utrzymaniowym przez bezpośrednio lub pośrednio z nimi związane bogate, heterogeniczne zbiory danych w połączeniu z rozwijanymi przez lata metodami analizy danych – wnioskowaniem statystycznym, filtracją adaptacyjną, uczeniem maszynowym (czy ogólniej: sztuczną inteligencją), tworzą konglomerat, który współcześnie często określa się terminem Big Data Analytics. Podejście to operuje na danych, charakteryzowanych w pięciu wymiarach (tzw. 5xV, [3]):

- wolumin danych (*Volume*) - przetwarzane są duże zbiory danych,
- różnorodność (*Variety*) – dla stworzenia bogatego kontekstu analitycznego oraz bogatej bazy potencjalnych atrybutów predykcyjnych, brane są pod uwagę dane z różnych źródeł, również nie związanych bezpośrednio z diagnozowanym obiektem,
- szybkość uzupełniania danych (*Velocity*) – dzięki automatycznemu przetwarzaniu, brane mogą być pod uwagę dane z monitorowania stanu obiektu w trybie ciągłym,
- wiarygodność (*Veracity*) – pochodzenie danych z różnych źródeł pociąga za sobą nieuchronne konsekwencje w postaci zróżnicowania wiarygodności, dokładności, aktualności, itp.; konieczne jest operowanie metadefinicjami zbiorów danych, określającymi te i inne atrybuty,
- wartość (*Value*) – poszczególne składniki danych różnią się znacznie swoją „mocą” predykcyjną – diagnozowany fenomen może być praktycznie niez-

leżny od pewnych komponentów danych, z kolei inne zbiory mogą zawierać kluczowe atrybuty predykcyjne, bez których analiza jest niemożliwa.

#### 4. Repozytorium danych diagnostycznych Centrum Diagnostyki

Egzemplifikacją naturalnej ewolucji ku wdrożeniu Big Data Analytics (BDA) w realiach polskich jest repozytorium o nazwie Baza Danych Diagnostycznych (BDD), utrzymywane przez Centrum Diagnostyki PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

Jest to system informatyczny, wspomagający przetwarzanie danych, wdrożony w 2010 r. Stanowi konglomerat rozwiązań informatycznych:

- skalowalna baza serwerowa, pod kontrolą systemu operacyjnego Linux,
- wielodostępna, relacyjna baza danych typu SQL,
- spójny, rozszerzalny model danych, opisujących wszystkie aspekty procesu gromadzenia danych pomiarowych – opis infrastruktury, jednostki organizacyjne, zasoby, definicje źródeł pomiarów, zbiory danych pomiarowych, itd.; model jest otwarty na rozszerzenie, został już kilkakrotnie uzupełniony o moduły opisujące nowe segmenty danych,
- centralny serwer aplikacji, wymagający do obsługi jedynie warstwy klasy „thin client”, tj. zapewniający pełny funkcjonalny dostęp z poziomu uniwersalnej przeglądarki internetowej,
- dodatkowe oprogramowanie off-line dla badaczy terenowych, umożliwiające wprowadzanie danych bez połączenia z serwerem, wraz z procedurami synchronizującymi import i eksport danych,
- rozbudowany system kontroli dostępu na poziomie podmiotowym (uwierzytelnienie dostępu), przedmiotowym (ograniczenia dostępu do określonych fragmentów infrastruktury) i funkcjonalnym (definicje ról funkcjonalnych w systemie, ograniczające dostęp do pewnych operacji),
- podstawowe wsparcie dla działań analitycznych – rozbudowanie mechanizmu filtracji, sortowania i wyszukiwania, raportowanie, eksport danych w ujednoliconych formatach.

System w fazie wdrażania przejął dane z wcześniej wykorzystywanych, fragmentarycznych rozwiązań informatycznych oraz dokumentów papierowych. Dane te zostały pozbawione wielu niedoskonałości stojących na przeszkodzie do sprawnego przetwarzania, np. błędów wynikających z braku mechanizmów walidacyjnych. Obecnie Baza obejmuje miliony rekordów danych z procesów pomiarowych realizowanych już od 2005 r. Źródłami danych są defektoskopowe pomiary szyn wózkami jednotokowymi oraz wagonem pomiarowym, pomiary geometrii torów, dane o złamaniach i wymianach szyn, wyniki diagnostyki urządzeń DSAT (Diagnostyka Stanów Awaryjnych Taboru).

Jak wspomniano, ewolucja BDD wpisuje się w schemat dojrzewania realizacji procesu utrzymaniowego do wdrożenia Big Data Analytics. Jednocześnie spojrze-

nie na rozwój BDD z tej syntetycznej perspektywy pozwala na lepsze zaprojektowanie dalszych działań rozwojowych.

Inicjatywa zebrania pofragmentowanych, niespójnych danych, pochodzących z różnych specyficznych systemów informatycznych wynika z naturalnej potrzeby zapanowania nad chaosem wczesnego etapu informatyzacji oraz stworzenia zdrowej bazy dla działań diagnostycznych. Odpowiadała na zapotrzebowania w dwóch wymiarach: rosnącej liczby danych (wolumin) oraz potrzebie spójności (wiarygodność). Z czasem rozwoju BDD coraz wyraźniej dawał o sobie znać wymiar różnorodności – do repozytorium włączane były kolejne zbiory danych, czasem dość od siebie semantycznie odległe. Model scentralizowanego serwera z dostępem za pośrednictwem web-interfejsu zaoferował możliwość bezzwłocznej dystrybucji danych, co nawiązuje do wymiaru szybkości uaktualniania. Jednocześnie perspektywa Big Data Analytics pozwala na klarowne wskazanie deficytów rozwoju systemu motywowanego bieżącymi potrzebami oraz zdefiniowanie działań prowadzących ku przekształceniu BDD w solidną bazę analityczną:

1. Zauważalnie przyrastający wolumin danych diagnostycznych wymaga otwarcia perspektywy skalowalności. Cenne jest przetransferowanie systemu do środowiska wirtualizacyjnego, w ramach coraz popularniejszego paradygmatu Cloud Computing.
2. W zakresie szybkości uaktualniania danych, należy dokonać pełnej transformacji systemu na elektroniczny obieg dokumentów. Obecnie utrzymywany jest asekuracyjny model zdublowanej - papierowej i elektronicznej wymiany danych, przy czym przetwarzanie dokumentów papierowych dyktuje interwały formalnej rejestracji danych.
3. Wymiary różnorodności i wiarygodności danych wymagają opracowania zuniwersalizowanej metadefinicji zbioru danych, charakteryzującej zarówno jego zawartość jak i cechy analityczne. Do BDD z sukcesem włączono do tej pory kilka nowych zbiorów danych, jednak stało się to w drodze rozszerzania specyficznego modelu danych. Wyraźnie widoczna perspektywa stosowania nowych metod diagnostycznych oraz włączania dodatkowych danych, nie związanych bezpośrednio z diagnostyką, wymaga zuniwersalizowania definicji, tak, aby nowe źródła danych były dodawane w drodze konfiguracji, a nie rozszerzania implementacji. Istotnym szczegółowym czynnikiem w zakresie wiarygodności danych jest też nałożenie rygorów dokładności na komponent geolokalizacyjny we wszystkich przetwarzanych zbiorach.
4. W wymiarze wartości predykcyjnej, obecna zawartość BDD nie pokrywa w całości cyklu życia obiektów objętych procesem utrzymania. W szczególności brak jest wdrożonej rejestracji czynności odnawiających stan - wymian szyn, szlifowania itp. Tego rodzaju niespójność treściowa znacznie utrudnia lub wręcz uniemożliwia rejestrację zmian defektów w czasie, a co za tym idzie, niemożliwość budowania temporalnego modelu rozwoju wad – jednego z ważniejszych składników modelu predykcyjnego.

## 5. Sieci sensorowe

Opisane powyżej uogólnienia i rozszerzenia BDD osadzają rozwój repozytorium w kontekście Big Data Analytics, kreśląc perspektywę użycia zgromadzonych danych. Jednak współczesne trendy technologiczne przynoszą jeszcze jedną płodną perspektywę – wykorzystanie w diagnostyce sieci sensorowych.

Przez lata narosło sporo terminologii związanej z czujnikami osadzonymi w monitorowanych obiektach i przesyłających dane o statusie za pomocą łączności cyfrowej. Terminy takie, jak: inteligentne czujniki, bezprzewodowe sieci sensorowe, systemy cyberfizyczne, ostatnio – IoT (*Internet of Things*), lub IIoT (*Industrial IoT*) oraz wiele innych, mają swoje specyficzne znaczenia, czasem już tylko historyczne, ale są też świadectwem długoletniego i wielodrożnego rozwoju konceptów i technologii, dzięki którym wykształciła się pula dojrzałych, gotowych do wdrożenia rozwiązań. W kontekście bliskim zagadnieniu diagnostyki infrastruktury kolejowej, szczególnie często używane są obecnie terminy WSN oraz IoT. Koncept sieci czujników bezprzewodowych WSN (*ang. wireless sensor network*) dotyczy wszystkich aspektów konstruowania sieci komunikacji bezprzewodowej między prostymi węzłami sensorowymi. W ramach WSN zdefiniowane są topologie takich sieci, sposób przekazywania informacji między węzłami (*routing*), mechanizmy bezpieczeństwa, protokoły komunikacyjne, itp. Termin IoT ma w literaturze wiele definicji, ale wskazują one zawsze na pewien wspólny podzbiór cech ([4]):

- IoT polega na osadzeniu „tożsamości wirtualnej” w obiektach fizycznych. Obejmuje ona zwykle warstwę sensoryczną dla samoobserwacji, komponent identyfikacyjny oraz środki komunikacji. Na określenie takiej hybrydy używa się określenia „obiekt cyberfizyczny”.
- IoT wyposaża obiekt fizyczny w pewną moc obliczeniową, umożliwiającą realizację specyficznych procesów decyzyjnych lub procedur przetwarzania danych (tzw. „edge processing”).
- Komunikacja używana w architekturach IoT jest wydajna energetycznie, co pozwala na wysoką mobilność węzłów IoT, czyli rzeczywiste związanie ich z obiektami fizycznymi.
- Użycie IoT oznacza zawsze włączenie obiektów cyberfizycznych do skordynowanej sieci komunikacyjnej. W założeniach IoT posługuje się protokołem transmisyjnym IP, włączającym węzły bezpośrednio do Internetu. Jednak w praktyce często stosowana jest hybryda z architekturą WSN, używającą krótkozasięgowej, ekstremalnie energooszczędnej łączności bezprzewodowej oraz danych koordynacyjnych węzła klasy IoT, włączonych do sieci Internet za pomocą komunikacji dalekosiężnej.
- Nieodłącznym składnikiem IoT jest warstwa cyber-bezpieczeństwa, chroniąca przed sabotażem.

Burzliwy rozwój elektroniki i informatyki przyniósł w ostatnich latach paletę konkretnych rozwiązań, umożliwiających wdrożenie konceptu sieci sensorowych w szerokiej skali. Należy wspomnieć tu o rozwiązaniach takich, jak mikrokontrolery o ultraniskim poborze mocy ([5]), sensory mikromechaniczne MEMS



([6]) oraz rozwój dopasowanych do rozwiązań WSN protokołów komunikacyjnych wszystkich warstw, od fizycznej po aplikacyjną, takich, jak ZigBee, LoRa czy 6LoWPAN ([7]).

## 6. Sieci sensorowe w transporcie kolejowym

W kontekście transportu kolejowego, koncept zastosowania sieci sensorowych do diagnostyki jest intensywnie badany i wdrażany. Szczególnie zaawansowana jest diagnostyka taboru kolejowego. Na opisanie tego procesu ukuty został nawet specjalny termin - „*Internet of Trains*”. Przykładem wdrożenia jest Dynamiczny System Zarządzania Utrzymaniem Pojazdów, wdrożony przez włoskiego przewoźnika TrenItalia [8]. Tabor liczący blisko 1700 pociągów został wyposażony w liczne węzły sensorowe (500 do 1000 na pociąg), dokonujące pomiaru naprężeń, temperatury silnika, napięcia w liniach zasilających, itp. Dokonując pomiarów do 5000 razy na sekundę, czujniki te generują olbrzymi strumień danych, magazynowany w chmurze, w bazie przygotowanej na przyjęcie 1000 TB danych rocznie. Analizą danych i konstrukcją modelu predykcyjnego zajmuje się wysoko wydajne oprogramowanie SAP HANA. Wdrożenie tego systemu pozwala zaoszczędzić ok. 10% rocznych wydatków na utrzymanie taboru, tj. prawie 150 mln Euro. Podobne projekty przytaczane są także przez innych przewoźników lub wiodących producentów sprzętu. Przegląd zawarty jest w publikacji [9].

W odróżnieniu od taboru kolejowego, wdrożenia sieci sensorowych w zakresie diagnostyki infrastruktury stałej nie są jeszcze tak daleko posunięte, natomiast widoczny jest intensywny proces badawczy. Np. publikacja [10] podaje systematyczny i bogaty przegląd badań prowadzonych w zakresie zastosowania WSN do monitorowania stanu drogi i taboru kolejowego. Przytoczone są rezultaty projektów w zakresie monitorowania szyn pod kątem pęknięć i wyboczeń, kontrolowania stanu łubków, podtorza, zespoły czujnikowe do detekcji zniekształconych kół, mierzące prędkość przejazdu i zliczające osie, czy wreszcie dozór nad strukturami mostów i wiaduktów.

## 7. Projekt wdrożenia sieci sensorowych do diagnostyki infrastruktury kolejowej

Centrum Diagnostyki PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. zainicjowało w tym roku projekt pilotażowy zastosowania sieci bezprzewodowych czujników do monitorowania infrastruktury kolejowej. Projekt został zaproponowany jako jeden z tematów badawczych w ramach konkursu BRIK (Badania i Rozwój w Infrastrukturze Kolejowej) ogłoszonego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (Program Operacyjny Inteligentny Rozwój). Jest odpowiedzią na naturalną i oczywistą potrzebę ciągłego monitorowania temperatury szyn w torach bezстыkowych.

Temperatura jest zasadniczym czynnikiem wpływającym na naprężenia w szynach kolejowych, a co za tym idzie, na bezpieczeństwo ruchu kolejowego. Duże zmiany temperatury spowodowane zarówno cyklem rocznym jak i dziennym, powodują rozszerzanie i kurczenie metalu, co w ekstremalnych przypadkach skutkować może pęknięciami i złamaniami szyn kolejowych. Oznacza to, że konieczne jest ciągle monitorowanie temperatury, w celu określania i przewidywania potencjalnych zagrożeń oraz podejmowania odpowiednich działań zapobiegawczych. Obecnie pomiar ten realizowany jest manualnie poprzez operatorów, którzy w określonych interwałach czasowych mierzą temperaturę szyn i na tej podstawie określają ryzyko wystąpienia uszkodzenia. Rozwiązanie to ma szereg wad, z których największe to:

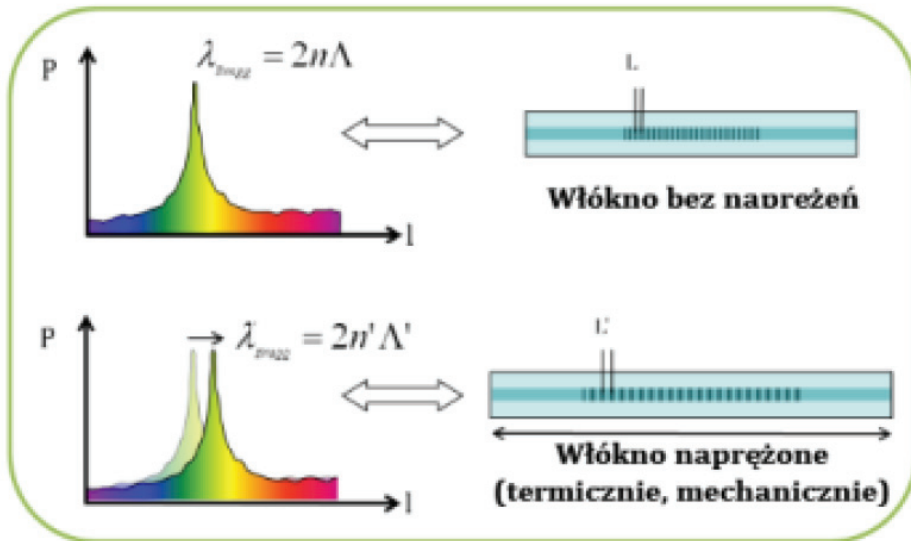
- Brak centralnej bazy danych pomiarowych – pomiary temperatury przechowywane są lokalnie przez operatorów i nie istnieje scentralizowana baza, zawierająca informacje o aktualnej temperaturze.
- Ograniczenia w ilości i umiejscowieniu punktów pomiarowych – temperatura szyn mierzona jest jedynie w miejscu gdzie przebywa operator. Obszary oddalone od stacji i przejazdów nie są kontrolowane na bieżąco.
- Konieczność angażowania operatora do pomiaru temperatury – personel kolei poświęca czas na wykonywanie pomiarów, które mogłyby być wykonywane w sposób automatyczny.

Wyselekcjonowana i zaakceptowana propozycja realizacji projektu zakłada innowacyjne użycie sensorów światłowodowych do pomiaru temperatury. Sam pomysł pomiaru temperatury lub naprężenia mechanicznego za pomocą światłowodów nie jest nowy. Klasyczną jego implementacją jest użycie światłowodu z siatką Bragga (FBG). Idea pomiaru jest zilustrowana na rys. 3. W rdzeniu światłowodu typu FBG wytworzony jest ciąg prążków (tzw. siatka), odbijający falę o określonej długości. Emisja światła o równomiernym spektrum do światłowodu FBG da w rezultacie selektywne odbicie fali świetlnej o wąskim spektrum, odpowiadającym skokowi siatki. Układ analizy spektralnej umożliwia określenie dominującej częstotliwości spektrum. Jeżeli światłowód zostanie poddany naprężeniom, to odległość prążków w siatce zmieni się i odbijana będzie fala o innej częstotliwości. Dominująca częstotliwość światła odbitego staje się miarą termicznego lub mechanicznego odkształcenia światłowodu.

Na podobnych zasadach można realizować pomiary przemieszczenia, przyspieszenia, odkształcenia, oraz szereg pokrewnych. Artykuł [11] opisuje np. interesujący eksperyment terenowy, w którym sensory światłowodowe naprężenia zostały zainstalowane na uczęszczanej linii kolejowej i wykorzystane z dobrymi rezultatami do detekcji zniekształconych kół kolejowych. Jako zmienna decyzyjna, wykorzystany został wskaźnik charakteryzujący wysokoczęstotliwościową część spektrum sygnału zarejestrowanego przez czujnik światłowodowy. Przywoływany już artykuł [10] podaje jeszcze kilka prób zastosowania takich sensorów w diagnostyce toru i podtorza.

Czujniki światłowodowe mają w zastosowaniach kolejowych szereg zalet. Przede wszystkim są niewrażliwe na zakłócenia EMI, w odróżnieniu od wielu innych sensorów. Na jednym światłowodzie można rozmieścić wiele obszarów sensorowych (sygnał pomiarowy rozseparowany częstotliwościowo). Głowica emisyjno-odbiorcza

może być umieszczona w dużej odległości od punktu zamocowania sensora (rzędu kilku kilometrów), co ułatwia doprowadzenie zasilania i zapewnienie komunikacji, np. dla sensorów monitorujących infrastrukturę w tunelu kolejowym. Technologia światłowodowa ma wysoki potencjał innowacyjny, a zastosowana w dużej skali jest tania.



Rys. 3. Idea pomiaru przy pomocy sensora światłowodowego typu FBG

## 8. Realizacja projektu

W ramach projektu zostanie przygotowana technologia sensora światłowodowego, dostosowana do warunków kolejowych, zostaną też skonstruowane i przebadane w warunkach terenowych prototypy urządzeń pomiarowych, skomunikowanych za pomocą łączności bezprzewodowej. Stworzone zostaną środki informatyczne umożliwiające integrację sieci sensorowej jako źródła danych w Bazie Danych Diagnostycznych. Zostaną zrealizowane badania symulacyjne transmisji danych z dużej sieci sensorowej.

Przed projektem stoi wiele wyzwań technologicznych.

W zakresie mechaniki należy opracować nieinwazyjny sposób przytwierdzenia urządzeń do szyny, zapewniający w szczególności dobry transfer cieplny między szyną a sensorem. Obudowa musi być odporna na warunki atmosferyczne i udary mechaniczne. Projekt przytwierdzenia musi zapewniać dobre warunki propagacji dla łączności radiowej.

Pod względem zasilania, urządzenie musi zapewniać ultra niski pobór energii, przede wszystkim po to, aby mogło pracować bezobsługowo przez długi czas. Źródło zasilania musi mieć odpowiednią pojemność i być niewrażliwe na warunki środowiskowe, przede wszystkim na niskie temperatury. Wymóg niskiego poboru energii

nie jest prosty do spełnienia ze względu na to, że węzły mają generalnie pracować w topologii sieciowej typu mesh. W konfiguracji tej przekazują one sobie nawzajem komunikaty przy użyciu krótkozasięgowej łączności niskiej mocy. Efektywnie pełnią więc dla siebie wzajemnie rolę lokalnych routerów, co znacznie zwiększa niezawodność i redundancję ścieżek komunikacji, ale zarazem komplikuje użycie jednego z podstawowych narzędzi ograniczania poboru energii, mianowicie polityki przechodzenia między stanem uśpienia i czuwania. Węzeł pomiarowy nie może już realizować prostej strategii raportowania w stałych interwałach czasowych. Podlega złożonemu protokołowi dynamicznego przekierowywania wiadomości i musi być gotów na to, by w losowym momencie przyjąć funkcję lokalnego routera. Zresztą ten aspekt niezwłocznej reaktywności jest też wymagany do realizacji innych podstawowych funkcji, jak reakcje alarmowe, zdalna diagnostyka lub rekonfiguracja.

Jednym z najistotniejszych elementów projektu jest warstwa komunikacji. Jak już wspomniano, zakłada się dwupoziomową strukturę, w której węzły pomiarowe będą tworzyły lokalną, krótkozasięgową sieć o topologii siatki, z wyróżnionymi węzłami bazowymi, wyposażonymi w środki łączności dalekosiężnej. Do łączności krótkozasięgowej używana będzie jedna z technologii małej mocy, jak np. ZigBee czy LoRa, natomiast do łączności dalekosiężnej – technologia komórkowa LTE. Bardzo istotny jest protokół komunikacyjny w warstwie aplikacyjnej, od niego bowiem w dużym stopniu zależy zużycie energii przez węzły pomiarowe. Ponadto, komunikacja musi być zrealizowana jako bezpieczna, tj. odporna na przekłamania i sabotaż, w sensie normy bezpieczeństwa EN50159 ([12]).

Sieć sensorowa zostanie informacyjnie zintegrowana z Bazą Danych Diagnostycznych. Wiąże się to z opracowaniem uogólnionego modelu danych dla sensorów. Zakładane jest podejście generalizujące, tzn. model obejmie swoją definicją całe spektrum możliwych do zastosowania sensorów. Zasadniczym elementem modelu będzie definicja źródła danych, określająca rodzaj sensora (np. czy dane pomiarowe mają charakter skalarny, wektorowy, macierzowy, hybrydowy), lokalizację, dokładność, harmonogram komunikacji, dane diagnostyczne, itd.

Integracja sieci sensorowej z BDD zostanie przetestowana w trybie symulacyjnym. Przy użyciu jednego z obecnych na rynku narzędzi do symulacji systemów telekomunikacyjnych przeprowadzone zostanie szereg eksperymentów testujących masową - obejmującą kilkadziesiąt tysięcy węzłów - wymianę danych z repozytorium oraz szereg scenariuszy awaryjnych, zakładających degradację warunków komunikacyjnych, usterki sieci sensorowej i inne.

## 9. Efekty projektu

Rozplanowany na 3 lata projekt przyniesie Centrum Diagnostyki wysoką wartość dodaną. Wymiernymi efektami projektu będą:

- skonstruowanie środków dla bezobsługowych pomiarów diagnostycznych infrastruktury kolejowej,

- przygotowanie i przetestowanie informatycznej platformy akwizycji danych z sieci sensorowych,
- stworzenie - w ramach Bazy Danych Diagnostycznych - uogólnionego modelu danych dla nowych źródeł danych, z unormowaną postacią, odpowiednią dla zaaplikowania metod analityki Big Data,
- terenowe testy autonomicznych, bezobsługowych węzłów pomiarowych,
- terenowe testy sensorów światłowodowych.

Przykładem jednego z pierwszych, konkretnych działań zaplanowanych w projekcie jest zagadnienie wytypowania lokalizacji dla testów terenowych. Prototypy urządzeń powinny być testowane w lokalizacjach, w których spodziewać się należy ekstremalnych warunków atmosferycznych. Aby wytypować takie miejsca, potrzebne będzie archiwum danych meteorologicznych z kilku lat dla obszaru całego kraju. Źródłem takich danych może być np. Interdyscyplinarne Centrum Modelowania. Wprawdzie dane, które oferuje ta jednostka to archiwum wyników modelu predykcyjnego, a nie rzeczywiste pomiary z klatek meteorologicznych, ale predykcje są dość dokładne i mają relatywnie dużą rozdzielczość przestrzenną (siatka 4 km) i czasową (12 pomiarów na dobę). Analiza wahań dobowych, miesięcznych, rocznych pozwoli na wytypowanie odpowiednich lokalizacji. Jednak działanie będzie miało też znaczący efekt uboczny. Zbiór w Bazie Danych Diagnostycznych utworzony z danych temperaturowych zostanie użyty do korelacyjnej analizy rejestracji złamań i pęknięć szyn. Repozytorium takie jest utrzymywane w BDD od kilku lat, jednak analiza możliwych przyczyn degradacji pozbawiona jest zasadniczego wymiaru – danych meteorologicznych. Docelowy efekt projektu, sieć sensorowa, ma być źródłem tych danych, ale już w fazie przygotowawczej możliwe jest przeprowadzenie wstępnych eksperymentów analitycznych.

## 10. Konkluzje

Działanie Centrum Diagnostyki PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. w zakresie gromadzenia danych diagnostycznych miały do tej pory charakter stopniowej, aczkolwiek konsekwentnej ewolucji. Czynnikiem decydującym o kształcie zmian były przede wszystkim naturalne potrzeby operacyjne w ramach ustalonych procedur przetwarzania danych. Mimo to rozwój repozytorium danych jest niewątpliwie zbieżny z trendami, które przyniósł w tym czasie burzliwy rozwój technologii z obszaru Big Data Analytics. Dostępność i dojrzałość współczesnych narzędzi informatycznych z tego zakresu jest tak wysoka, że przed Centrum Diagnostyki rysuje się obecnie obiecująca wizja przededefiniowania profilu użytkowania Bazy Danych Diagnostycznych. Baza może się stać bogatą platformą analizy danych, oferującą wydajne narzędzia analityczne, wspomagające wydobywanie wiedzy o procesach degradacji i ich optymalnym zapobieganiu. Aby to osiągnąć, należy podjąć pewne działania transformacyjne, wyznaczone przez perspektywę Big Data. Jednym z najistotniejszych jest wzbogacenie zbioru danych, zwłaszcza o ciągłe strumienie

danych, pochodzące z sieci sensorowych, monitorujących stan infrastruktury. Zainicjowany przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. w ramach konkursu BRIK projekt opracowania technologii bezobsługowego pomiaru temperatury szyn idealnie wpisuje się w tę perspektywę. Buduje on środki terenowe do gromadzenia danych diagnostycznych za pomocą sieci sensorowych oraz uogólnia i rozszerza narzędzia informatyczne BDD, przygotowując ją na bogate, różnorodne źródła danych o wysokim potencjale analitycznym.

## Bibliografia

- [1] Lugara A., Use IoT to advance railway predictive maintenance, dokument firmy Hitachi Vantara, dostępny pod adresem; <https://www.hitachivantara.com/en-us/pdfd/white-paper/use-iot-to-advance-railway-predictive-maintenance-whitepaper.pdf>, dostęp: 15-10-2018.
- [2] IoT and predictive maintenance keep trains rolling, raport firmy SAS, dostępny pod adresem [https://www.sas.com/en\\_us/customers/vr-group-fi.html](https://www.sas.com/en_us/customers/vr-group-fi.html), dostęp: 15-10-2018.
- [3] McAfee A., Brynjolfsson E., Big Data: the management revolution, Harvard Business Review, October 2012.
- [4] Winchcomb T., Massey S., Beastall P., Review of latest developments in the Internet of Things, raport firmy Cambridge Consultants, dostępny pod adresem: [https://www.ofcom.org.uk/\\_data/assets/pdf\\_file/0007/102004/Review-of-latest-developments-in-the-Internet-of-Things.pdf](https://www.ofcom.org.uk/_data/assets/pdf_file/0007/102004/Review-of-latest-developments-in-the-Internet-of-Things.pdf), dostęp: 15-10-2018.
- [5] Dang D. et al., Designing an Ultra-Low-Power (ULP) Application With SimpleLink™ MSP432™ Microcontrollers, raport firmy Texas Instruments, dostępny pod adresem: <http://www.ti.com/lit/an/slaa668a/slaa668a.pdf>, dostęp 15-10-2018.
- [6] Smart Grid & Energy Solutions Guide, dokument firmy Texas Instruments, dostępny pod adresem: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=slym071>, dostęp: 11-12-2017.
- [7] A Comprehensive Look at Low Power, Wide Area Networks, dokument firmy LinkLabs, dostępny pod adresem: [www.link-labs.com](http://www.link-labs.com), dostęp 15-10-2018.
- [8] Trenitalia: Creating a Dynamic Maintenance Management System Powered by SAP HANA, raport firmy SAP, dostępny pod adresem: <http://www.sap.com/italy/assetdetail/2015/12/b6caea0d-507c-0010-82c7-eda71af511fa.html>, dostęp 15-10-2018.
- [9] Fraga-Lamas P, Fernández-Caramés TM, Castedo L., Towards the Internet of smart trains: a review on industrial IoT-connected railways, *Sensors*. 2017; 17(6):1457.

- 
- [10] Hodge V. J. et al., Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 1088-1106, 2015.
  - [11] Wei, Chuliang, et al., Real-Time Train Wheel Condition Monitoring by Fiber Bragg Grating Sensors. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Jan. 2012.
  - [12] Norma EN 50159:2010, Railway applications - Communication, signaling and processing systems - Safety-related communication in transmission systems.

