

## System sensorów do wykrywania i predykcji uszkodzeń układu jezdni wagonu towarowego taboru kolejowego

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono system służący do oceny stanu poszczególnych elementów towarowego taboru kolejowego w sposób zautomatyzowany. System służy do pomiaru kluczowych parametrów układu jezdni wagonu towarowego taboru kolejowego za pomocą sensorów. Dane pomiarowe przesyłane na serwer pozwalają na detekcję uszkodzeń. Dane pomiarowe, mogą służyć do predykcji stanów awaryjnych co pozwala na wyłączenie uszkodzonego składu z użytkowania zanim spowoduje on znaczne utrudnienia w ruchu kolejowym. System oprócz wymienionych funkcji spełnia również rolę geolokalizatora taboru stosowanego w celu optymalizacji zarządzania składami towarowymi.

**Abstract.** The article presents system which is used for evaluation, work conditions of rolling stock elements in automated way. System is used to measure key parameters of rolling stock elements with the use of five types of sensors. Measurement data located on server gives the possibility to detect damage. Measurement data also could be used to predict emergency state what gives possibility to stop and repair some elements of rolling stock and that could improve security of rail traffic. In order to optimize management of rolling stock, system has the functionality of geolocation. (A system of sensors for detecting and predicting damage to the running gear of a freight wagon of the rolling stock)

**Słowa kluczowe:** Geolokalizacja, Kolej, Internet Rzeczy, Sensor  
**Keywords:** Geolocalisation, Railway, Internet of Things, Sensor

### Wstęp

System opisany w niniejszym artykule ma na celu ciągły monitoring newralgicznych parametrów towarowego taboru kolejowego. Ciągły monitoring parametrów taboru kolejowego umożliwia wykrywanie oraz predykcję uszkodzeń układu jezdni wagonu towarowego co niweluje ryzyko spowodowania znacznych utrudnień w ruchu kolejowym.

System posiada również funkcjonalność geolokalizatora taboru kolejowego. Informacja o położeniu danego składu czy wagonu, która jest wysyłana na serwer danych, pozwala na optymalizację procesów zarządzania taborem kolejowym.

Kompletny system wyposażony jest w cztery typy sensorów oraz jednostkę centralną, która pełni równocześnie funkcję geolokalizatora. Wszystkie sensory komunikują się z jednostką centralną w sposób bezprzewodowy, wysyłając do niej dane pomiarowe. Jednostka centralna po odebraniu danych z wszystkich sensorów wysyła je, wraz z informacją o lokalizacji, na serwer. Odebrane dane prezentowane są w dedykowanej aplikacji webowej.[1]

Wszystkie składowe systemu przeznaczone są do ciągłej pracy przez osiem lat bez konieczności serwisowania. Cztery sensory zasilane są z baterii litowych oraz energii pozyskiwanej z panelu fotowoltaicznego. Jednostka centralna zasilana jest z dwóch akumulatorów litowo-jonowych, które również są doładowywane z panelu fotowoltaicznego.

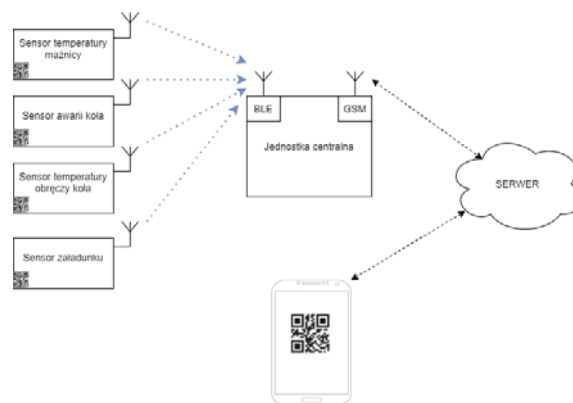
### Opis systemu

Kompletny system składa się z pięciu składowych: czterech rodzajów sensorów oraz jednostki centralnej. Wyróżniamy następujące typy sensorów: Sensor sygnału wibracyjnego, sensor temperatury łożyska osiowego zestawu kołowego, sensor temperatury koła pojazdu kolejowego oraz sensor pomiaru odległości zawieszenia wagonu od toru. Jednostka centralna pełni również rolę sensora geolokalizacyjnego.

Sensory komunikują się z jednostką centralną z wykorzystaniem interfejsu Bluetooth Low Energy (BLE). W

założeniu system ma działać w sposób ciągły bez konieczności serwisowania przez osiem lat.

Jednostka centralna po zebraniu danych pomiarowych ze wszystkich czujników oraz określeniu lokalizacji, przy wykorzystaniu modułu GSM, wysyła wszystkie dane na serwer gdzie są one poddawane dalszej analizie. Na rysunku 1 w sposób graficzny przedstawiono koncepcję systemu.



Rys.1. Graficzne przedstawienie koncepcji systemu

Pełna analiza danych pomiarowych jest dokonywana w serwerze centralnym. Analiza wykorzystuje mechanizmy sztucznej inteligencji, które umożliwiają wykrywanie pewnego rodzaju anomalii co pozwoli na predykcję uszkodzeń.

### Sensor sygnału wibracyjnego

Sensor sygnału wibracyjnego nazywany też sensorem wibracji czy awarii koła ma na celu dostarczenie danych, które pozwolą na predykcję poważnych uszkodzeń nawierzchni tocznej zestawu kołowego.

Sensor wykorzystuje akcelerometr do zbierania danych, które następnie są wstępnie analizowane i wysyłane do jednostki centralnej, a następnie na serwer.

Sensor awarii koła zasilany jest z dwóch źródeł zasilania. Pierwszym jest bateria litowa o pojemności 3800

mAh, drugim natomiast panel fotowoltaiczny o napięciu znamionowym 5V i mocy 1W. Zaprojektowano dedykowany układ analogowy, który zasila sensor energią z panelu fotowoltaicznego jeżeli jest ona dostępna, w przeciwnym wypadku energia dostarczana jest z baterii litowej.

Średnice kół taboru kolejowego przyjmują jedną z następujących wartości: 1250, 1100, 1000, 960, 950, 940, 920, 900, 860, 850, 840 lub 750mm. Wartości te odpowiadają długości obwodu koła od 3,9 do 2,36m. W tabeli 1 przedstawiono częstotliwości (w Hz) z jakimi obracają się koła o różnej średnicy przy różnej prędkości jazdy pociągu.

Tabela 1. Parametry czujnika

Prędkość Średnica	Prędkość					
	10 km/h	30 km/h	50 km/h	70 km/h	90 km/h	110 km/h
1,25m	0,7	2,12	3,54	4,95	6,37	7,78
1,05m	0,84	2,53	4,21	5,9	7,58	9,26
0,96m	0,92	2,76	4,61	6,45	8,29	10,13
0,94m	0,94	2,82	4,7	6,58	8,47	10,35
0,9m	0,98	2,95	4,91	6,88	8,84	10,81
0,85m	1,04	3,12	5,2	7,28	9,36	11,44
0,75m	1,17	3,54	5,89	8,25	10,61	12,97

Akcelerometr znajdujący się w sensorze wibracji został skonfigurowany tak, że częstotliwość próbkowania wynosi 104 Hz i zbierane jest 240 próbek. Na podstawie tych danych można określić, że rozdzielczość transformaty Fouriera (wykonywanej w sensorze) wynosi 0,43 [Hz]. Na podstawie tych danych oraz danych zawartych w tabeli 1, można stwierdzić, że wyznaczane jest widmo sygnału wibracyjnego w pełnym zakresie prędkości jego obrotów.

Na rysunku 2 przedstawiono widmo sygnału z poprawną detekcją maksymalnych wibracji w okolicy 6 Hz.



Rys.2. Widmo sygnału z akcelerometru

Sensor oprócz danych dotyczących wibracji koła przesyła również do jednostki centralnej napięcie baterii zasilającej sensor.

Istotnym zagadnieniem przy pomiarze wibracji koła jest umiejscowienie sensora na wózku wagonu kolejowego. Musi on znajdować się możliwie blisko zestawu kołowego tak aby w możliwie najlepszy sposób odczytywał wibracje, którym poddane jest koło zestawu kołowego. Sposób montażu sensora przedstawiono na rysunku 3.

### Sensor temperatury łożyska osiowego

Sensor temperatury łożyska osiowego ma na celu badanie poprawności funkcjonowania łożysk w zestawie kołowym. Nadmierny wzrost temperatury w obszarze łożyska osiowego wymaga natychmiastowego wycofania wagonu z eksploatacji i wykonania serwisu wagonu. Istotną przewagą systemu opisywanego w niniejszym artykule w porównaniu do rozwiązań obecnie dostępnych komercyjnie, jest fakt, że monitoring temperatury łożyska odbywa się w sposób ciągły, a co za tym idzie, jest możliwe szybkie wycofanie uszkodzonego elementu taboru z eksploatacji.



Rys.3. Umiejscowienie sensora wibracji oraz sensora temperatury łożyska osiowego

Sposób montażu sensora temperatury łożyska osiowego przedstawiono na rysunku 3. Podobnie jak w przypadku sensora wibracji wynika to ze sposobu pomiaru interesującej nas wielkości, czyli w tym przypadku temperatury.

Śruba do której zamocowany jest sensor temperatury łożyska osiowego jest śrubą pokrywki tego właśnie łożyska. Sensor jest zamocowany przy wykorzystaniu śruby z oczkiem w której zamocowany jest termistor, za pomocą którego dokonywany jest pomiar temperatury.

Sposób zasilania i komunikacji z jednostką centralną jest taki sam dla wszystkich sensorów, również sensor temperatury łożyska osiowego jest zasilany z wykorzystaniem baterii litowej bądź panelu fotowoltaicznego, a komunikacja przeprowadzona jest z wykorzystaniem interfejsu BLE. W danych wysyłanych do sensora przesyłana jest informacja o napięciu baterii zasilającej sensor oraz temperatura zmierzona przez termistor.

Na rysunku 4 przedstawiono obudowę obu sensorów, zarówno sensora wibracji jak i temperatury łożyska osiowego.



Rys.4. Sensor wibracji oraz sensora temperatury łożyska osiowego

### Sensor temperatury koła pojazdu kołowego

Sensor temperatury koła ma na celu monitorowanie poprawności działania hamulców. W trakcie hamowania istnieje ryzyko zaciśnięcia się szczęk hamulcowych na kole zestawu kołowego wagonu kolejowego, co za tym idzie wydzielania znacznych ilości ciepła. Zaciśnięcie się szczęk hamulcowych na kole może doprowadzić do uszkodzenia zestawu kołowego, a w konsekwencji do zmniejszenia bezpieczeństwa eksploatacji danego wagonu towarowego.

Ze względów mechanicznych zastosowano bezstykowy pomiar temperatury z wykorzystaniem pirometru cyfrowego. Sensor pomiaru temperatury koła pojazdu kołowego umiejscowiony jest od wewnętrznej strony wózka kolejowego, tak aby pirometr mógł być skierowany na koło. Z takiego umiejscowienia sensora wynika problem jego zasilania z panelu fotowoltaicznego. Sensor temperatury koła jest opracowany w wersji dwuczęściowej. Jedna część odpowiada za pomiar temperatury oraz wysłanie jej z wykorzystaniem interfejsu BLE do jednostki centralnej, druga natomiast jest źródłem zasilania. Część zasilająca jest na zewnątrz wózka i połączona z częścią pomiarową za pomocą przewodu odpornego na warunki atmosferyczne. Kolejno na rysunku 5 oraz 6 przedstawiono umiejscowienie obu części sensora temperatury koła pojazdu kołowego na wózku kolejowym.



Rys.5. Umiejscowienie sensora temperatury koła na wózku kolejowym (część zasilająca)



Rys.6. Umiejscowienie sensora temperatury koła na wózku kolejowym (część wykonawcza)

### Sensor załadunku

Sensor pomiaru odległości zawieszenia od toru ma na celu weryfikację dwóch parametrów. Pierwszym jest określenie poziomu załadunku wagonu z dokładnością 30%. Informacja o poziomie załadunku jest informacją tylko i wyłącznie orientacyjną, która pozwala określić czy wagon jest załadowany lub czy jest próżny. Oprócz poziomu załadunku sensor w systemie spełnia również rolę weryfikatora poprawności rozłożenia towaru na całej powierzchni wagonu. Dane o poziomie załadunku zbierane są z 4 punktów każdego wagonu (sensory zamontowane są na obu osiach każdego wózka po obu stronach wagonu), a następnie wysyłane, za pośrednictwem jednostki centralnej, na serwer danych. Na serwerze przeprowadzana jest

analiza czy towar rozłożony jest równomiernie na powierzchni całego wagonu.

Podobnie jak sensor temperatury koła pojazdu kołowego, sensor załadunku również jest dwuczęściowy. Pierwsza część sensora odpowiada za pomiar poziomu załadunku oraz wysłanie danych do jednostki centralnej. Druga część sensora to nakładka w której umieszczony został magnes - nakładka ta umiejscowiona jest na tzw. „tętce” wózka kolejowego. Zasada działania sensora załadunku opiera się na pomiarze pola magnetycznego. Nakładka w której umiejscowiony jest magnes jest źródłem pola magnetycznego, natomiast część odpowiedzialna za pomiar jest wyposażona w układy sensoryczne natężenia pola. „Tetka” na której umiejscowiono nakładkę zmienia swoje położenie względem wagonu w zależności od poziomu załadunku, a co za tym idzie pole magnetyczne mierzone przez układy sensoryczne, sensora załadunku.[2] Na rysunku 7 przedstawiono sposób montażu sensora na wózku kolejowym.

Sensor załadunku analogicznie do pozostałych sensorów, zasilany jest w sposób dualny: bateryjnie oraz wykorzystując energię pobieraną z paneli fotowoltaicznych. Interfejsem, który posłużył do komunikacji jest również Bluetooth Low Energy.

### Jednostka centralna – sensor geolokalizacyjny

Sensorem, który łączy cały system w całość, jest sensor geolokalizacyjny pełniący jednocześnie funkcję jednostki centralnej. Jednostka centralna z wykorzystaniem modułu GPS, który znajduje się na jej pokładzie, określa położenie danego wagonu i przesyła je do serwera w postaci współrzędnych geograficznych.



Rys.7. Umiejscowienie sensora załadunku wagonu na wózku kolejowym

Wykorzystując już wcześniej wspomniany interfejs BLE, jednostka centralna odbiera dane od wszystkich sensorów, a następnie wraz z informacją o położeniu formuje je w określonej ramkę danych. Po odpowiednim przygotowaniu danych, jednostka wysyła je na serwer przy pomocy modułu GSM. Na serwerze przeprowadzana jest dalsza obróbka danych.

Konfiguracja systemu polega na przypisaniu konkretnych sensorów, na podstawie ich adresów MAC, do konkretnej jednostki centralnej. W typowym wagonie towarowym instalowane są: 4 sztuki sensora wibracyjnego, 4 sztuki sensora temperatury łożyska osiowego, 8 sztuk sensora temperatury koła pojazdu kołowego oraz 4 sztuki sensora załadunku. W zależności od specyficznych potrzeb lub typu wagonu liczba instalowanych sensorów może być inna. Sensory wraz z jednostką centralną, po skonfigurowaniu tworzą kompletny system.

Jednostka centralna/sensor geolokalizacyjny montowana może być w sposób dwojaki albo na bocznej burcie wagonu towarowego, albo na bocznej części wózka kolejowego. Jednostka centralna powinna być montowana w połowie długości wózka, tak aby swobodnie mogła odbierać dane pomiarowe ze wszystkich sensorów pomiarowych. Na rysunku 8 przedstawiono jednostkę centralną zamontowaną na burcie wagonu kolejowego.

Ry



s.8. Jednostka centralna zamontowana na wagonie kolejowym wraz z sensorem temperatury koła pojazdu kołowego



A Rys.9. Droga jednego z wagonów przedstawiona na serwerze

#### plikacja internetowa

Po przetworzeniu danych wejściowych z sensorów na serwerze i ich analizie, są one wyświetlane z wykorzystaniem aplikacji internetowej, do której dostęp jest możliwy z wykorzystaniem dowolnej przeglądarki internetowej. Aplikacja wizualizuje położenie wszystkich sensorów lokalizacyjnych oraz wyświetla dane nt. wielkości zmierzonych (temperatury, poziom załadunku). Na rysunku 9 przedstawiono drogę jednego z pociągów zwizualizowaną na serwerze.

#### Systemy dostępne na rynku

Zaawansowane rozwiązania techniczne opisywanego systemu stanowią o jego konkurencyjności i przewadze nad systemami, które obecnie dostępne są na rynku. Najczęściej obecnie stosowanym systemem w Polsce, który odpowiada za opomiarowanie stanu wagonów towarowych, jest system dSAT. Jeśli chodzi o weryfikację sytuacji awaryjnych to oba systemy, system dSAT oraz ten opisany w niniejszym artykule, weryfikują te same potencjalne stany awaryjne, czyli: zgrzane łożyska, zgrzane hamulce, deformacje kół oraz nacisk wywierany przez pojazd szynowy.

Istotną przewagą opisanego systemu, w porównaniu do systemu dSAT jest częstotliwość pomiaru. System dSAT jest systemem punktowym, który w zależności od typu linii kolejowej, rozlokowany jest co kilkadziesiąt kilometrów, a co za tym idzie pomiar dokonywany jest z niewielką częstotliwością. Prezentowany system pozwala na ciągłą weryfikację stanu taboru kolejowego i w razie sytuacji awaryjnej umożliwia natychmiastowe wycofanie składu z eksploatacji.

Kolejną wartością dodaną, którą prezentuje przedstawiony system jest informacją o położeniu składu. Taka informacja pozwala na lepsze zarządzanie całymi składami towarowymi, a co za tym idzie minimalizuje koszty związane z przestojami wagonów.

**Autorzy:** mgr inż. Szymon Czerwiński, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul Ratuszowa 11, 03-450, E-mail: [szymon.czerwinski@itr.lukasiewicz.gov.pl](mailto:szymon.czerwinski@itr.lukasiewicz.gov.pl); mgr inż. Mariusz Kucharek, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul Ratuszowa 11, 03-450, E-mail: [mariusz.kucharek@itr.lukasiewicz.gov.pl](mailto:mariusz.kucharek@itr.lukasiewicz.gov.pl); inż. Łukasz Walas, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul Ratuszowa 11, 03-450, E-mail: [lukasz.walas@itr.lukasiewicz.gov.pl](mailto:lukasz.walas@itr.lukasiewicz.gov.pl); mgr inż. Karol Makowiecki, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul Ratuszowa 11, 03-450, E-mail: [karol.makowiecki@itr.lukasiewicz.gov.pl](mailto:karol.makowiecki@itr.lukasiewicz.gov.pl); mgr inż. Przemysław Wiszniewski, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul Ratuszowa 11, 03-450, E-mail: [przemyslaw.wiszniewski@itr.lukasiewicz.gov.pl](mailto:przemyslaw.wiszniewski@itr.lukasiewicz.gov.pl)

#### LITERATURA

- [1] Lisowiec A., Makowiecki K., Gacek A., Kalinowski A., Kowalski G., Michalski P., Dobrowiecka B., Kucharek M., Walas Ł., Czerwiński S., *Technologie IoT w energetyce odnawialnej*, Wiadomości Elektrotechniczne 88, (2020), nr 9, 21-24
- [2] Sobaś M., *Problematyka usprężynowania wózków wagonów towarowych typu Y25*, Pojazdy Szynowe (2014), nr1, 37-49