

VII Ogólnopolska Konferencja Mostowców – Konstrukcja i Wyposażenie Mostów Wiśła, 28-29 maja 2015 r.

Piotr BĘTKOWSKI¹
Łukasz BEDNARSKI²
Rafał SIENKO³

PRAWIDŁOWA IDENTYFIKACJA ZAGROŻEŃ JAKO ELEMENT MONITORINGU PEWNEGO MOSTU KOLEJOWEGO

W referacie opisano podstawowe zasady budowy systemów monitorowania obiektów mostowych. Zwrócono uwagę na różnorodne funkcje, jakie może pełnić system monitorowania: kontrola założeń projektowych, lepsze poznanie pracy konstrukcji (istotne w rozwiązaniach nowatorskich i programach badawczych), kontrola pracy wybranych elementów np. łożysk, cięgien podwieszonych, kontrola obciążeń działających na obiekt, pomiar wartości wybranych przemieszczeń, wychyleń. Na praktycznym przykładzie pokazano, że prawidłowo skonfigurowany system monitorowania, dzięki ciągłej kontroli wybranych wielkości fizycznych, może stać się istotnym elementem oceny bezpieczeństwa konstrukcji. Konieczna jest jednak prawidłowa identyfikacja zagrożeń i właściwe określenie wartości granicznych mierzonych paramentów. W referacie podano przykład zrealizowanego, działającego sytemu monitorowania: identyfikację zagrożeń, konfigurację systemu, wyniki pomiarów oraz ich interpretację.

1. Cele monitorowania

W referacie terminem *monitoring* określano zespół działań związanych z ciągłym pomiarem wybranych wielkości fizycznych, realizowanym automatycznie przez czujniki elektroniczne wraz z procedurami postępowania na wypadek przekroczenia wartości alarmowych. Oczekiwane zmienności mierzonych parametrów muszą być wstępnie określone na etapie projektowania systemu monitorowania.

Punktem wyjścia podczas projektowania systemu monitorowania zawsze powinna być konstrukcja, konkretny obiekt. Pierwszym krokiem jest określenie celów, opisanie problemów oraz sformułowanie zadań stawianych systemowi. Zadania te powinny być określone świadomie i precyzyjnie tak, aby wykonany pomiar dał wartościową odpowiedź [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Przykładowe cele monitorowania to:

- kontrola założeń projektowych w przypadku nowatorskich konstrukcji, takich jak duże mosty podwieszane,
- lepsze poznanie pracy konstrukcji czy metod modelowania pewnych zjawisk (problemy badawcze),
- kontrola pracy wybranych elementów np. łożysk, cięgien podwieszonych,
- kontrola obciążeń działających na obiekt (np. czy nie są ponadnormatywne),
- nadzór nad bezpieczeństwem konstrukcji, np. poprzez pomiar wartości wybranych wielkości fizycznych oraz automatyczne porównanie ich do określonych wcześniej wartości granicznych (alarmowych).

Rejestrowane przez system monitorowania wartości parametrów mogą być odnoszone do wartości określonych wcześniej na podstawie rozwiązania modelu numerycznego lub np. na podstawie prognoz górniczych. Sam pomiar, bez porównania wartości mierzonych z wartościami granicznymi nazywać będziemy *obserwacją*.

Należy wybrać wielkości fizyczne, które będą najbardziej istotne np. z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji czy weryfikacji modeli obliczeniowych (w zależności od postawionych

¹ Dr inż., Politechnika Śląska
² Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
³ Dr inż., Politechnika Krakowska

celów monitorowania. Instalacja czujników bez zdefiniowania celu pomiaru to nie tylko dodatkowy koszt, ale nadmiar danych, problem z ich przetwarzaniem i właściwym wnioskowaniem.

Aby określić wielkości fizyczne, które chcemy mierzyć, należy je najpierw zidentyfikować, analizując wpływ tych wielkości na bezpieczeństwo konstrukcji lub niepewność ich wyznaczenia na podstawie modelu numerycznego. Następnie należy wskazać najbardziej reprezentatywne miejsca pomiarów oraz spodziewane wartości parametrów.

Kolejny etap obejmuje konfigurację systemu monitorowania polegającą na doborze elementów pomiarowych (czujników), określeniu ich zakresów pomiarowych oraz sposobu rejestracji danych. W przypadku systemów nadzorujących bezpieczeństwo konstrukcji pomiar, dostęp do wyników pomiarów oraz porównywanie z wartościami granicznymi muszą odbywać się automatycznie, a wyniki analiz powinny być przesyłane w czasie "rzeczywistym" do osoby nadzorującej pracę systemu.

2. Przykład działającego systemu monitorowania

2.1. Informacje ogólne

W referacie opisano system monitorowania zainstalowany na jednym z mostów kolejowych na Śląsku na obszarze poddanym wpływowi górniczych deformacji terenu. Celem systemu jest przede wszystkim zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji mostu kolejowego przez pomiar i sprawdzenie, czy wartości wybranych wielkości fizycznych nie przekraczają wartości alarmowych.

W pierwszym etapie konieczne było określenie interakcji obiektu mostowego z deformującym się podłożem. Kolejny etap to zdefiniowanie odporności obiektu na wpływy górnicze – analizowano układ łożysk, możliwość i zakres wzajemnych przemieszczeń przęseł i podpór, stan techniczny obiektu, szczegóły konstrukcyjne, takie jak szerokość szczelin dylatacyjnych, szerokość ław podłożyskowych.

W wyniku prowadzonej eksploatacji górniczej dochodzi do deformacji powierzchni terenu. W przypadku obiektów liniowych, takich jak obiekty mostowe, ważne jest wzajemne położenie względem siebie poszczególnych elementów mostu, takich jak przęsła, filary, podpory. Elementy te to bryły, które w przypadku popularnego na terenach górniczych w konstrukcjach mostowych schematu statycznego belki swobodnie podpartej (model MES), mogą się względem siebie przemieszczać [8, 9, 10]. Na przemieszczanie się tych elementów ma wpływ zarówno charakter deformacji terenu, jak i układ ułożyskowania. Łożyska stabilizują i regulują pracę układu przęsło-podpora. W wyniku działania górniczych deformacji terenu może dojść do obrotu podpór względem przęseł. Łożyska jednokierunkowe, typowe dla mostów kolejowych, mogą wówczas ulec zablokowaniu. Wtedy może dojść do "ścięcia" łożysk i niekontrolowanego ruchu przęseł, a w przedmiotowym moście nawet do zsunięcia się przęsła z filara i katastrofy budowlanej. Znaczne siły poziome generowane przez tabor kolejowy to dodatkowe zagrożenie dla uszkodzonej konstrukcji.

Podstawą kontroli stanu technicznego obiektu jest informacja o zachodzących w nim zmianach. Pozyskiwanie takich informacji jest możliwe na drodze regularnych przeglądów, pomiarów geodezyjnych oraz poprzez instalację automatycznego systemu monitorowania [2, 3, 4, 6, 7]. Wrażliwa na deformacje terenu konstrukcja mostu wymaga stałej kontroli. Zastosowanie automatycznego systemu monitorowania pozwala na zwiększenie jakości i dokładności informacji o zmianach zachodzących w obiekcie przy jednoczesnym obniżeniu nakładu pracy na pozyskiwanie i analizę tych danych, co przekłada się w istotny sposób na wzrost bezpieczeństwa analizowanej konstrukcji [1, 5]. Istotna jest tu przede wszystkim duża częstotliwość pomiarów (np. co 15 min), co pozwala na szybką identyfikację zagrożeń.

2.2. Opis mostu

Opisywany obiekt to most kolejowy pod dwutorową zelektryfikowaną linią PKP. Pod mostem przebiega droga lokalna i potok. Most składa się z dwóch części, będących odrębnymi konstrukcjami:

- pod torem nr 1 znajduje się obiekt stalowy nitowany (most zachodni) (rys. 1),
- pod torem nr 2 znajduje się obiekt stalowy spawany (most wschodni) (rys. 2).

Każda z części składa się z dwóch stalowych przęseł. Każde przęsło pracuje statycznie jak belka swobodnie-podparta. W przęsłach można wyróżnić dwa dźwigary blachownicowe, pomost otwarty.

Most zachodni (nitowany) wybudowano w 1946 roku. Pasy dźwigarów mają zmienną grubość (zastosowano nitowane nakładki). Konstrukcja mostu składa się z dwóch dłuższych przęseł głównych (23,7 m każde) i dwóch krótkich, niższych przęseł "pośredniczących" o długości całkowitej 2,0 m. Przęsła "pośredniczące" ze względu na swoją małą długość, niewielką masę i sztywność pracują jak

wsporniki dźwigarów głównych – są z tymi dźwigarami sztywno połączone. Łożyska dowolnie-kierunkowo przesuwne na zewnętrznych końcach przęseł "pośredniczących" ograniczają ich ugięcia.

Geometria obiektu:

- światło poziome: 2 x 20,7 m (dwa przęsła główne),
- długość całkowita każdego z przęseł: 26,9 m (łącznie z przęsłem "pośredniczącym")
- światło pionowe: 8,15 m (nad jezdnią),
- długość eksploatacyjna mostu: ok. 60,00 m (z przyczółkami).



Rys. 1. Widok od strony zachodniej na most pod torem nr 1

Most wschodni wzniesiono w 1973 roku. Elementy konstrukcyjne stalowe są spawane. Pasy dźwigarów mają stałą grubość.

Geometria obiektu:

- światło poziome: 2 x 22,5 m,
- długość całkowita każdego z przęseł: 27,50 m,
- światło pionowe: 8,20 m (nad jezdnią),
- długość eksploatacyjna mostu: ok. 60,00 m (z przyczółkami).

Most wschodni jako sztywniejszy i dodatkowo położony od strony niecki osiadań gwałtownie reagował na przeszłości na wpływy górnicze (deformacje terenu) stąd, mając na uwadze ograniczenia finansowe, system monitoringu zainstalowano tylko na tym obiekcie.



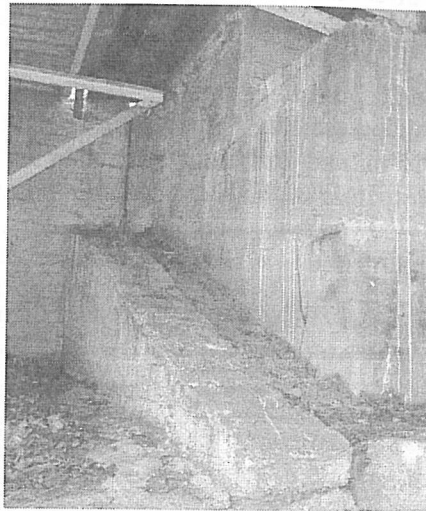
Rys. 2. Widok od strony wschodniej na most pod torem nr 2

Podporę pośrednią (filar) i skrajne wykonano z betonu.

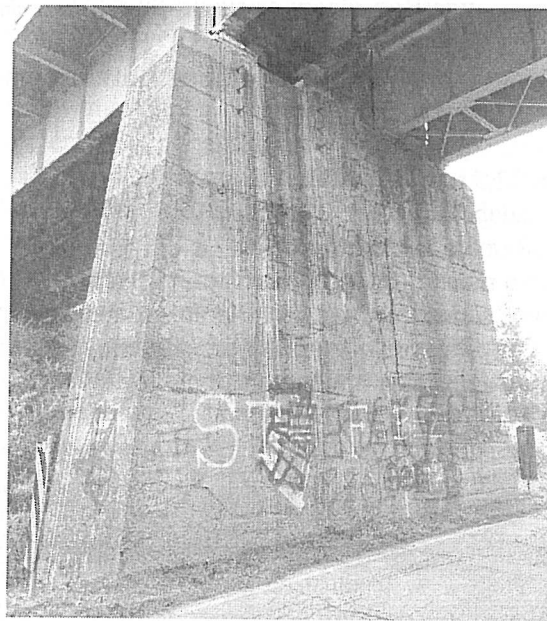
Przyczółki posadowione są wysoko na nasypie kolejowym, skrzydła wykonano jako równoległe do osi toru kolejowego. Przyczółki żelbetowe nowszego mostu są oddylatowane od przyczółków starego obiektu (rys. 3), co sprawia, że możliwe są niewielkie przemieszczenia przyczółków względem siebie wskutek górniczych deformacji terenu.

Podpora pośrednia mostu nowszego (pod torem nr 2) została dobudowana do filara mostu starszego w 1973 roku, pomimo szczeliny dylatacyjnej tworzy ze starym filarem jedną konstrukcję (rys. 4). Filar ma ponad 8 m wysokości. Na filarze widoczne są głębokie rysy poziome przechodzące przez cały filar. Są to rysy o szerokości przekraczającej lokalnie 1 mm. Rysy zaczęły pojawiać się kilkadziesiąt lat temu. Są one aktywne, widoczne są świeże ślady wykruszeń na krawędziach zarysowań. Na pracę rys mają wpływ zarówno górnicze deformacje terenu, jak i tabor kolejowy (przęsła pod obydwojoma torami mają pomost otwarty, bez amortyzującej drgania warstwy podbudowy/tłuczni).

Obserwacje wskazują, że ze względu na znaczną szerokość trzonu filara, w chwili obecnej rysy nie zagrażają bezpieczeństwu konstrukcji, jednak zmniejszają odporność filara na siły poziome.



Rys. 3. Szelina dylatacyjna przyczółków po południowej stronie obiektu



Rys. 4. Filar centralny

Obiekt był wielokrotnie naprawiany z tytułu szkód górniczych, m.in wymieniono część łożysk, kilkakrotnie je rektyfikowano oraz poszerzono szczeliny dylatacyjne na przyczółkach poprzez wykucie wnęk w ściankach zapleczych. Działania związane z utrzymaniem obiektu na terenie górniczym i z zabezpieczeniem ciągłości ruchu kolejowego opisane zostały w publikacji [8].

2.3. Eksploatacja górnicza w rejonie mostu

Eksploatacja górnicza w rejonie obiektu prowadzona była od 1973 roku. Zmierzone geodezyjnie osiadania od maja 1973 do grudnia 2014 roku wynosiły:

- przyczółek północny ok. 2,8 m,
- przyczółek południowy ok. 2,6 m.

Przemieszczenia poziome od marca 1994 (wcześniej nie wykonywano pomiarów przemieszczeń poziomych) do grudnia 2014:

- most wschodni, krawędź zachodnia: -121 mm,
- most wschodni, krawędź wschodnia: -126 mm,
- most zachodni, krawędź zachodnia: -105 mm,
- most zachodni, krawędź wschodnia: -131 mm,

Zaobserwować można zbliżanie się przyczółków i ich skrócenie (zwłaszcza na moście zachodnim) względem osi mostu.

Do roku 2020 prognozowana jest III kategoria górniczych deformacji terenu, a nowe osiadania mogą przekroczyć 2 m.

Obecnie w rejonie mostu prowadzona jest eksploatacja w ścianie W4, pokład 361 na głębokości ok. 900 m p.p.t. Miąższość wybieranego pokładu to 2,6 m. Prognozowane wartości wskaźników deformacji terenu w związku z eksploatacją górniczą przedmiotowej ściany to:

$w = -0,40$ m (osiadania terenu),

$T_{II} = 1,0$ mm/m (wychylenie w płaszczyźnie równoległej do osi toru w kierunku południowym),

$T_{\perp} = -1,7$ mm/m (wychylenie w płaszczyźnie prostopadłej do osi toru w kierunku wschodnim),

$\varepsilon_{II} = -1,2$ mm/m (spełzania w płaszczyźnie osi mostu/toru),

$\varepsilon_{\perp} = -0,6$ mm/m (spełzania w płaszczyźnie prostopadłej do osi mostu).

Eksploatowana ściana zbliżała się jesienią 2013 roku do obiektu od północy (mierzono rozpełzania terenu). Wiosną (kwiecień) 2014 roku eksploatacja przeszła pod obiektem (oś ściany znajdowała się na wschód od mostu). Zakończenie eksploatacji w ścianie W4 nastąpiło na początku 2015 roku. Środek niecki osiadań związanej ze ścianą W4 zlokalizowany jest na południowy wschód od obiektu, a most znajduje się na zboczu górniczej niecki osiadań. Niecka w ostatecznym kształcie powinna wytworzyć się do końca 2015 roku. Czas ujawniania się wpływów eksploatacji na powierzchni to od ok. 2 miesiące do nawet 1,5 roku. Czasookres ten zależy od budowy geologicznej zalegającego nad pokładem górotworu – im większa wytrzymałość skał, tym później ujawniają się wpływy górnicze na powierzchni i na ogół przyrost deformacji jest szybszy. Docelowo, w związku z eksploatacją ściany W4 (pokład 361) oszacowano, że możliwe jest zbliżenie przyczółków o ok. 60 mm [6, 7].

Wg pomiarów geodezyjnych prowadzonych przez Kopalnię obiekt osiadł w okresie od marca 2014 roku do grudnia 2014 o około 200 mm po stronie południowej i 207 mm po stronie północnej. Przemieszczenia poziome od marca 2014 do grudnia 2014 (spełzanie terenu) na podstawie pomiarów geodezyjnych wynosiły:

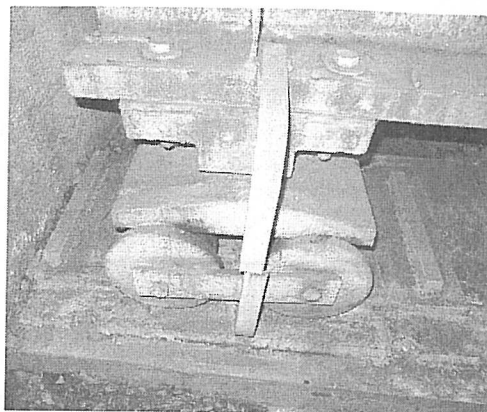
- most wschodni, krawędź zachodnia: -35 mm,
- most wschodni, krawędź wschodnia: -42 mm,
- most zachodni, krawędź zachodnia: -33 mm,
- most zachodni, krawędź wschodnia: -47 mm.

Nastąpiło zbliżanie się przyczółków i ich skrócenie względem osi mostu. Skrócenie przyczółków sprawiło, że łożyska jednokierunkowe umieszczone na przyczółkach nie są równoległe do osi przęsła.

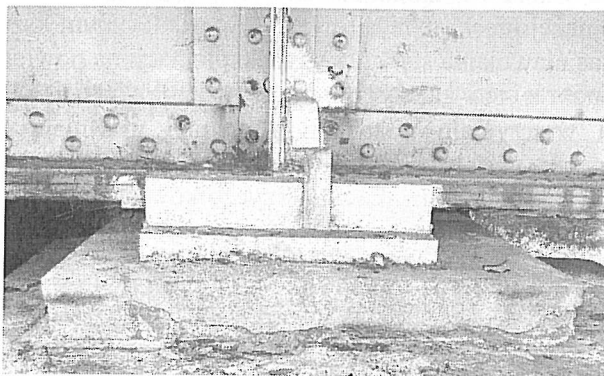
2.4. Identyfikacja zagrożeń

Celem monitoringu jest zapewnienie bezpiecznej eksploatacji obiektu poprzez wykrywanie zagrożeń zanim dojdzie do awarii mostu. Stąd konieczna jest wcześniejsza identyfikacja zagrożeń poprzez analizę pracy mostu na podłożu deformującym się wskutek prowadzonej eksploatacji górniczej. Zidentyfikowano następujące zagrożenia.:

- Prognozowane są spełzania (ściskanie) terenu, co powodować będzie zbliżanie się przyczółków, dalsze zwężanie szczelin dylatacyjnych (szerokość szczelin na przyczółku północnym nie przekracza 80 mm). Szerokość szczelin dylatacyjnych może ulec zmniejszeniu nie tylko wskutek spełzań terenu, ale także wychyleń filara. Zdecydowano się na pomiar przemieszczeń poziomych nad łożyskami jednokierunkowymi na przyczółkach. Graniczna szerokość szczelin to wartość alarmowa parametru. System monitorowania przekazuje informacje pozwalające na określenie aktualnego położenia łożysk.
- Może dojść do zablokowania łożysk jednokierunkowo-przesuwnych wskutek skrócenia przyczółków – w przedmiotowym obiekcie są to łożyska wałkowe (rys. 5) i ślizgowe (rys. 6). łożyska jednokierunkowe tylko wtedy zachowują się prawidłowo, jeżeli przemieszczenia realizowane są wzdłuż osi ich pracy. W analizowanym przypadku kierunek głównej deformacji jest skośny do obiektu, przyczółki i filar mogą być zatem skręcane względem osi mostu. W przypadku blokady łożysk może dojść do powstania nowych zarysowań na filarze i przyczółkach. Możliwe jest również uszkodzenie lub nawet zniszczenie łożysk nieprzesuwnych (stałych) zlokalizowanych na środkowej podporze. Zainstalowane tam czujniki przemieszczeń rejestrują ruch pomostów względem głowicy filara. Wystąpienie przemieszczeń większych od wartości alarmowych informować będzie o "zerwaniu" łożyska i konieczności natychmiastowej interwencji służb odpowiedzialnych za utrzymanie ruchu kolejowego. W przypadku przedmiotowego mostu łożyska stałe położone są bardzo blisko krawędzi filara (rys. 7, 8), po "zerwaniu" łożysk możliwe jest zsuniecie się przęsła z filara.

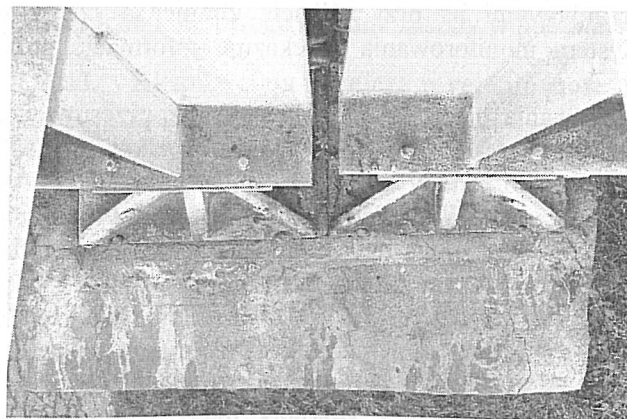


Rys. 5. Most pod torem Nr 2 – łożisko wałkowe na przyczółku od południowym

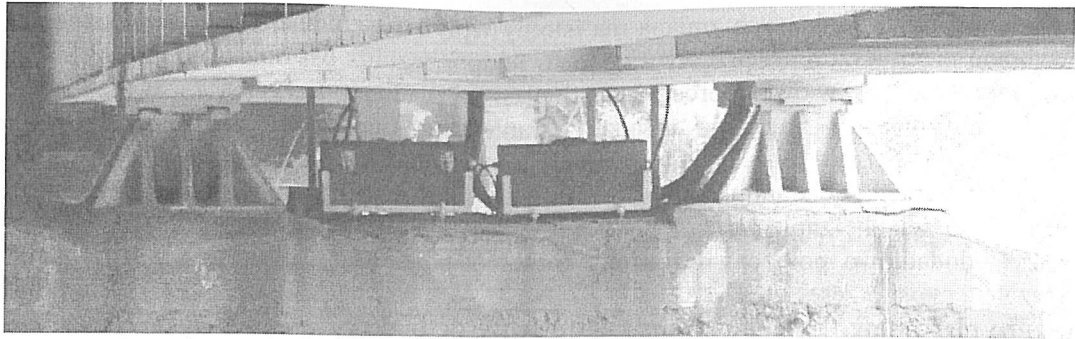


Rys. 6. Most pod torem Nr 1 – łożisko jednokierunkowe na przyczółku północnym

- Wysoki spękany filar żelbetowy jest podatny na wychylenia i siły poziome. Obiekt jest wrażliwy na prognozowane skręcanie przyczółków, gdyż łożyska jednokierunkowo-przesuwne ulegają szybkiemu zaklinowaniu w przypadku jednoczesnego obrotu i przemieszczenia liniowego skrajnych podpór. Na skutek tego zjawiska przęsła traci możliwość niezależnego przemieszczania się względem przyczółka, co powoduje powstanie sił poziomych. Przęsła są nieprzygotowane do przenoszenia momentów zginających pojawiających się w płaszczyźnie poziomej. Spękany filar jest nieodporny na siły ścinające powstające w płaszczyźnie płyt dolnych łożysk. W celu zapewnienia bezpieczeństwa obiektu ważne jest zatem wykonywanie w odpowiednim terminie rektyfikacji płyt dolnych łożysk, aby wyeliminować wpływ skręcenia przyczółków na przęsło. System monitorowania będzie mierzyć wychylenie przyczółków i filara w dwóch płaszczyznach. Górnice deformacje terenu narastają powoli, dzienne przyrosty wychyleń nie przekraczają na ogół $\Delta\alpha=0,0001$ rad. Gwałtowane zmiany mierzonych wychyleń będą z pewnością skutkiem uszkodzenia konstrukcji lub osunięcia nasypu.



Rys. 7. Most pod torem Nr 2 – łożyska stałe na filarze (widok z pomostu)



Rys. 8. Most pod torem Nr 2 – łożyska stałe na filarze

Zaletą pomiarów automatycznych jest duża częstotliwość zbierania danych – tylko wykonywany często pomiar może wychwycić uszkodzenie konstrukcji zanim dojdzie do awarii lub katastrofy badanego obiektu. Uszkodzenia konstrukcji mogą pojawić się nagle, w wyniku uwolnienia energii skumulowanej w konstrukcji w dłuższym okresie czasu w wyniku powolnego działania wymuszeń górniczych.

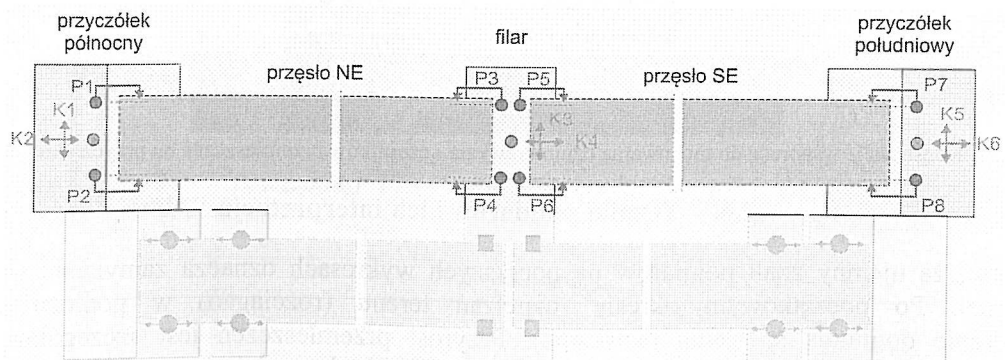
Ze względu na złożone warunki geotechniczne w rejonie obiektu (dolina potoku, teren wyżynny pagórkowaty z dużą ilością glin poprzedzielanych piaskami), charakter deformacji jest trudny do wiarygodnego prognozowania. Filar posadowiony jest na gruntach rodzimych (w podłożu przeważają piaski gliniaste, piaski pylaste, gliny). Z filara na grunt przenoszone jest znaczne obciążenie (duży ciężar własny, połowa ciężaru obu przęseł, tabor). Przyczółki natomiast posadowione są na nasypie, mają duże wymiary płyt fundamentowych, są niskie i przenoszą obciążenie tylko z połowy przęsła każdy. W rejonie mostu prowadzona jest eksploatacja wielokrotna na różnych kierunkach.

Powyższe czynniki sprawiają, że prognozowane wartości przemieszczeń poziomych w przeszłości w sposób istotny różniły się od wartości mierzonych, stąd określenie odporności obiektu na wpływy górnicze na podstawie prognoz górniczych może być niewystarczające.

Praca konstrukcji z uwagi na liczne uszkodzenia i imperfekcje (np. powyginanie pasy dźwigarów stalowych) jest trudna do modelowania analitycznego. Często bezpośredni pomiar pozwala ocenić obecny stan konstrukcji oraz umożliwia szybką identyfikację zdarzeń istotnych dla bezpieczeństwa konstrukcji.

2.5. System monitorowania stanu konstrukcji

W październiku 2013 roku na wschodniej części obiektu został zainstalowany automatyczny system monitorowania konstrukcji. System ten składa się z podsystemu obserwacyjnego odpowiedzialnego za zbieranie informacji i przesyłanie danych oraz podsystemu ostrzegawczego odpowiedzialnego za analizę pozyskiwanych wyników pomiarów i informowanie użytkownika o nadchodzących zagrożeniach. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na obiekcie pokazane zostało na rys. 9. Budowę systemu monitorującego od strony technicznej szerzej opisano w [6]. Prognozowane i mierzone deformacje terenu oraz interpretację wyników szerzej omówiono w [7]. W publikacjach tych zmarginalizowano problem prawidłowej identyfikacji zagrożeń oraz nie podano zasad budowy systemów monitorujących.



Rys. 9. Rozmieszczenie punktów pomiarowych: P – pomiary przemieszczeń, K – pomiary kątów

Jako wielkości fizyczne, których zmiana ma istotny wpływ na zmianę stanu technicznego obiektu, zostały wybrane przemieszczenia przęseł względem podpór wzdłuż osi obiektu oraz przemieszczenia kątowe podpór (przechyły) w dwóch prostopadłych płaszczyznach pionowych.

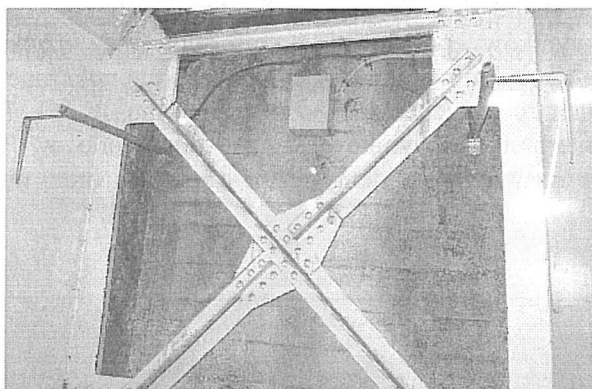
System monitorowania, mając na uwadze ograniczenia finansowe, zainstalowano na moście wschodnim (rys. 10, 11). Na moście tym szerokość szczelin dylatacyjnych przęseł i przyczółków jest mniejsza niż na moście zachodnim o ok. 50 mm, stąd tutaj najpierw może dojść do zakleszczenia przęseł (oparcia o ściankę zapleczną). Wpływ górniczych deformacji terenu na most wschodni jako sztywniejszy i dodatkowo położony od strony niecki osiadań jest większy, przyczółki są mocniej skręcane względem osi przęseł.

Z uwagi na planowany, 10 letni okres monitorowania, do budowy systemu wykorzystano strunowe czujniki (przetworniki) przemieszczeń o zakresie pomiarowym 200 mm oraz strunowe czujniki kąta. System zasilany jest z akumulatorów, wymienianych w czasie okresowych przeglądów obiektu. Wskazania czujników odczytywane są co 15 minut, a następnie raz na dobę za pośrednictwem sieci GSM przesyłane są do serwera pomiarowego, gdzie następuje ich przetwarzanie i automatyczna analiza. System generuje codzienne raporty o pracy konstrukcji i wysyła je do osób odpowiedzialnych za jej bezpieczeństwo. Warto wspomnieć, że do tej pory nie doszło na obiekcie do sytuacji awaryjnej.

Oprócz funkcji kontrolnej system monitorowania dostarcza informacji pozwalających weryfikować prognozy górniczych deformacji terenu. Może to być narzędzie pomocne w rozstrzygnięciu sporów z tytułu szkód górniczych. Teren poddany górniczym deformacjom spełza i rozpełza w miarę zbliżania się i przechodzenia frontu eksploatacji górniczej pod obiektem. Pomiary geodezyjne nie zawsze wykonywane są w momencie ujawnienia się ekstremalnych wartości deformacji, czyli tych wartości, które należy brać pod uwagę oceniając wpływ dokonanej eksploatacji górniczej na obiekt.



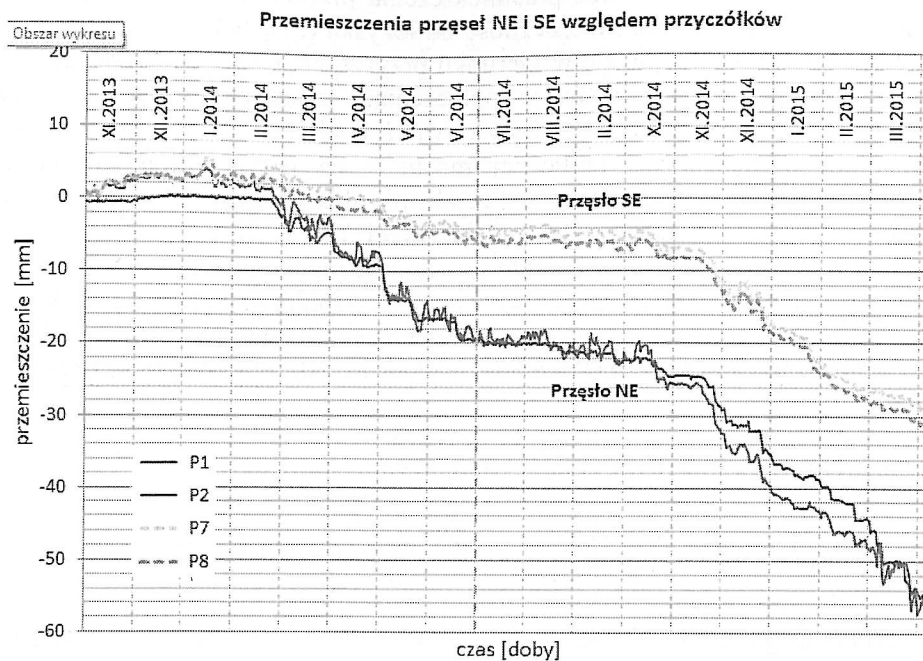
Rys. 10. Konstrukcje wsporcze do mocowania czujników kąta i czujników przemieszczeń na podporze środkowej



Rys. 11. Konstrukcje wsporcze do mocowania czujników kąta i czujników przemieszczeń na przyczółku północnym

2.6. Wyniki pomiarów i ich interpretacja

Przyjęto, że ujemny znak pomiarów na poniższych wykresach oznacza zamykanie się szczeliny dylatacyjnej. Po początkowym okresie rozpełzań terenu (rozciągania) w podłożu gruntowym zdecydowanie dominują spełzania (ściskanie). Przyrost przemieszczeń jest szczególnie widoczny na przyczółku północnym (czujniki P1 i P2 na rys. 12). Obiekt podobnie reagował na wymuszenie górnicze w przeszłości: przy podobnej lokalizacji eksploatowanych ścian i podobnym charakterze eksploatacji górniczej (eksploatacja na zawał) spełzania po północnej stronie obiektu były większe.

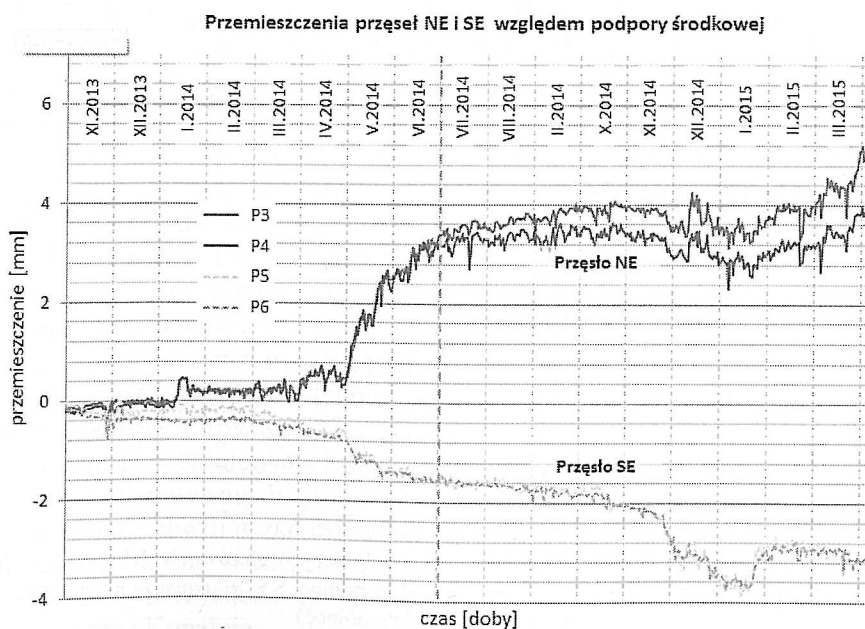


Rys. 12. Wykres przemieszczeń wzdłuż osi obiektu przęseł NE i SE względem przyczółków

Brak wyraźnego powiązania przemieszczeń rejestrowanych przez czujnik P2 (rys. 12) ze zmianami temperatury może wskazywać na klinowanie się lub trwałe uszkodzenie łożyska przesuwne (znacznym opór wskutek nierównej powierzchni płyty dolnej łożyska lub wałka) na przyczółku północnym.

Szerokość szczelin dylatacyjnych pomiędzy przęsłem i ścianką żwirową na przyczółku północnym wynosiła w połowie kwietnia 2015 roku ok. 80 mm. W okresie od połowy października 2013 do połowy kwietnia 2015 roku szerokość ta (czujniki P1 i P2) zmalała o ok. 60 mm. Na przyczółku południowym szczelina dylatacyjna również uległa zmniejszeniu o ok. 30 mm. Za różnicę przemieszczeń na przeciwnych przyczółkach tylko częściowo odpowiada wychylenie wysokiego filara w kierunku północnym – wpływ może mieć kierunek eksploatacji górniczej (z północy na południe) oraz zmienna miąższość warstw glin plastycznych zalegających w kilku warstwach od kilku do kilkudziesięciu metrów pod powierzchnią terenu.

Wyniki wykonanych tradycyjnie pomiarów geodezyjnych (ok. raz na kwartał) oraz wartości uzyskane na podstawie wskazań systemu monitorowania były bardzo zbliżone (takie porównanie ma na celu m.in walidację systemu).



Rys. 13. Wykres przemieszczeń wzdłuż osi obiektu przęseł NE i SE względem podpory środkowej

Co ciekawe, zaobserwowano również przemieszczenia pręseł względem nieprzesuwnej podpory środkowej (filara) o wartości 3÷5 mm w zależności od łożyska (rys. 13). Wartości dodatnie dla pręsa NE świadczą o jego przemieszczeniu się w kierunku przyczółka. Część zmierzonego przemieszczenia związana jest z wyczerpywaniem luzów w połączeniach między blachownicą mostu, stalowym łożyskiem stałym a filarem żelbetowym. Może również dochodzić do deformacji korpusów łożysk oraz skręcania filara względem osi podłużnej mostu – na przyczółkach zainstalowano łożyska jednokierunkowe, na filarze są łożyska stałe. Przęsło nie może zatem przemieszczać się swobodnie względem skręcanego filara i przyczółków (taki układ łożysk jest prawidłowy i ma zapewnić niezmienną położenia toru na i poza obiektem – kompensatory podłużne zabudowane w tor poza obiektem przenoszą jedynie przemieszczenia w osi toru, co współgra z układem łożysk).

Na rejestrowane niewielkie przemieszczenia na łożyskach stałych wpływa także zarysowanie podlewek pod tymi łożyskami (rys. 7). Przemieszczenia te, jak wykazały obserwacje, nie zagrażają przedmiotowej konstrukcji.

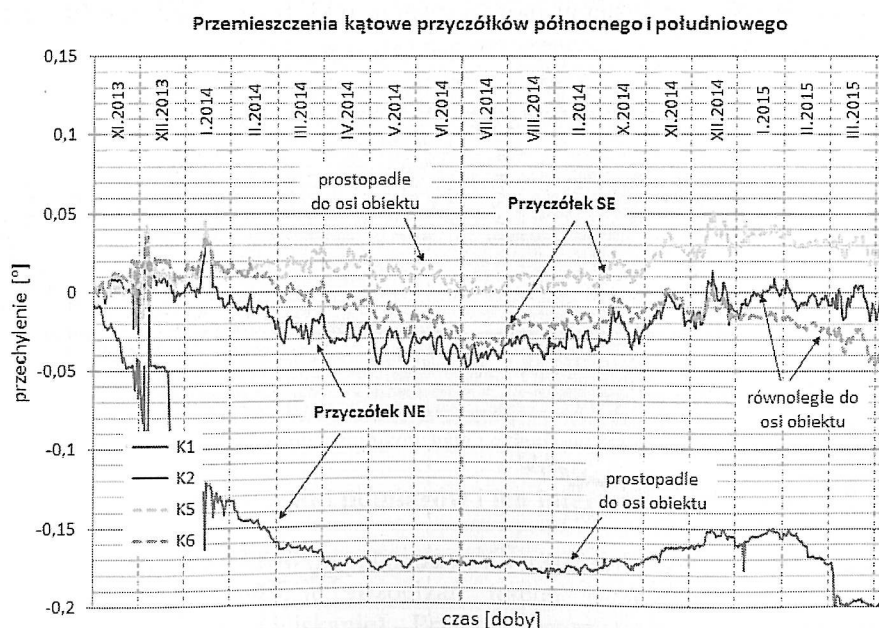
System monitorowania należy tak skonfigurować, aby te niewielkie i "bezpieczne" przemieszczenia nie były elementem generowania przez system komunikatów alarmowych.

Zaobserwowane przemieszczenia liniowe potwierdzone zostały pomiarami przemieszczeń kątowych przyczółków i filara. W analizie tych pomiarów, elementy mostu traktowane były jako bryły sztywne [9, 10].

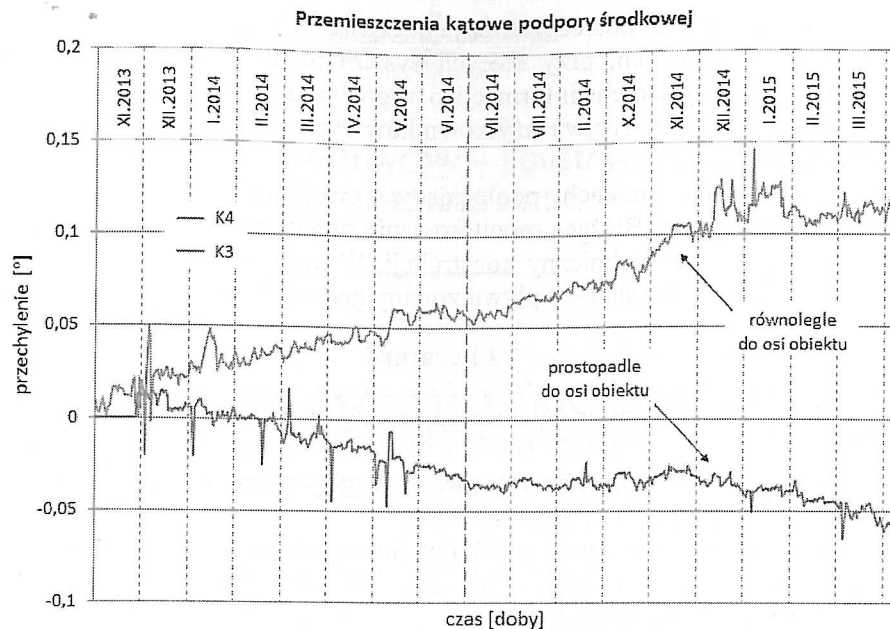
Na rys. 14 pokazane zostały wykresy zmian przechyłów przyczółka północno-wschodniego i południowo-wschodniego w okresie od połowy października 2013 do połowy kwietnia 2015 roku. Analiza w płaszczyźnie pionowej równoległej do osi obiektu wartości przemieszczeń kątowych (czujniki K2 i K6) łącznie z wartościami przemieszczeń pręseł względem przyczółków pomierzonymi czujnikami P1 i P2 oraz P7 i P8 pozwala stwierdzić, że przyczółki uległy zbliżeniu. Wartość tego zbliżenia w poziomie fundamentu jest większa niż w poziomie oparcia pomostu.

Ważną obserwacją stanowi pomiar przechyłu przyczółka północno-wschodniego w płaszczyźnie prostopadłej do osi toru. Wartość zmierzonego kąta wynosi obecnie $K1 \approx -0,21^\circ$. Oznacza to, że przyczółek pochylał się w kierunku zachodnim (nie jest ono zgodne z prognozowanym wskaźnikiem deformacji, który w tej płaszczyźnie wynosi $T_{\perp} = -1,7\text{mm/m}$, tzn. wychylenie w płaszczyźnie prostopadłej do osi mostu w kierunku wschodnim). Filar natomiast pochylał się w kierunku wschodnim: wartość zmierzonego kąta wynosi obecnie $K3 \approx 0,06^\circ$. Takie zachowanie się północno-wschodniej podpory może skutkować obserwowanym kleszczeniem się (klinowaniem) łożyska jednokierunkowego (czujnik P2).

Znamienny jest fakt, że przyczółek południowo-wschodni praktycznie nie podlega przechyłom w płaszczyźnie prostopadłej do osi mostu.



Rys. 14. Przechylenie przyczółka północnego i południowego w płaszczyznach równoległej i prostopadłej do osi mostu (K1 "–" oznacza przechył na zachód; K2 "–" oznacza przechył na północ; K5 "+" oznacza przechył na zachód; K6 "+" oznacza przechył na północ)



Rys. 15. Przechylenie podpory środkowej w płaszczyźnie równoległej do osi obiektu K4 ("+" oznacza przechył na północ) oraz prostopadłej do osi obiektu K3 ("+" oznacza przechył na wschód)

Pomiar przechyłu podpory środkowej w płaszczyźnie osi obiektu i do niej prostopadłej (rys. 15) wskazuje, że filar przechylił się w kierunku północnym tak, że przemieszczenie jego głowicy wynosi obecnie ok. 16 mm oraz w kierunku wschodnim powodując ruch poziomy głowicy rzędu 8 mm.

3. Podsumowanie i wnioski

W referacie podano przykład sytemu monitorowania istniejącego obiektu mostowego zlokalizowanego w obszarze objętym wpływem deformacji górniczej. Omówiono identyfikację zagrożeń, konfigurację systemu, wyniki pomiarów oraz ich interpretację. Zainstalowany w październiku 2013 roku system dostarczył już bardzo wielu istotnych informacji. Została m.in. uchwycona chwila, w której deformacje terenu spowodowały niewielką, skokową zmianę geometrii mostu (początek grudnia 2013r.). Konstrukcja uległa odprężeniu i dalej przemieszczenia narastały "płynnie", co spowodowało, że nie doszło do awarii obiektu. Sam fakt nagłego uwolnienia skumulowanej w konstrukcji energii jest ważny do odnotowania – klasyczne obserwacje metodami geodezyjnymi prowadzone np. raz w miesiącu nie dają możliwości obserwacji takiego zjawiska. Konstrukcja zatem mogła ulec uszkodzeniu (pomimo wykonywania pomiarów geodezyjnych) np. poprzez pęknięcie rdzenia filara lub ścięcie łożysk stałych. Kolejne obserwacje prowadzone przy wykorzystaniu systemu monitorowania pokazały, że nie dochodzi do wychyleń podpór i przemieszczeń większych niż mierzone dotychczas, co pozwoliło bezpiecznie prowadzić ruch kolejowy po obiekcie bez wprowadzania ograniczeń prędkości przejazdu taboru.

Na bieżąco kontrolowane są przemieszczenia przęseł względem podpór, dzięki temu możliwe jest wskazanie podpory, w której dochodzi do blokowania przesuwu. Ruch w obrębie teoretycznie stałej podpory środkowej pozwala kontrolować stan techniczny stalowego wspornika podporowego, jak i samego filara żelbetowego. Kontrola wychyleń pozwala m.in. na ocenę stateczności podpór.

W analizowanym przypadku kierunek deformacji górniczej jest skośny do obiektu, co powoduje, że przyczółki i filar mogą być skręcane względem osi mostu. W przypadku blokady przesuwnych łożysk jednokierunkowych możliwe jest uszkodzenie lub nawet zniszczenie łożysk stałych i zsuniecie przęsła z wysokiego filara – dodatkowo niepokojący jest fakt, że łożyska nieprzesuwne położone są bardzo blisko krawędzi filara. System monitorowania realizuje pomiar przemieszczeń na łożyskach stałych. Jest to tzw. kontrola bezpieczeństwa. Wzrost przemieszczeń informuje o "zerwaniu" łożyska i konieczności natychmiastowej interwencji służb odpowiedzialnych za utrzymanie ruchu kolejowego.

Zaletą pomiarów automatycznych jest duża częstotliwość zbierania danych, co powoduje, że możliwe jest uchwycenie chwili uszkodzenia konstrukcji.

System monitorowania został skonfigurowany pod kątem kontroli bezpieczeństwa pracy obiektu. Możliwe jest również wykorzystanie go do weryfikacji prognoz dostarczanych administratorom obiektów mostowych przez Kopalnie.

Ciągły dostęp do pomiarów za pośrednictwem dedykowanej platformy pomiarowej oraz możliwość definiowania wartości alarmowych, przy których system monitorowania automatycznie podejmuje działania związane np. z rozsyłaniem informacji o zagrożeniu do osób odpowiedzialnych za obiekt, powoduje istotny wzrost bezpieczeństwa użytkowników mostu oraz umożliwia aktywne zarządzanie np. ruchem taboru kolejowego.

Obiekty posadowione na terenach podlegających wpływowi deformacji górniczych ulegają przemieszczeniom i przechyłom. Bieżące monitorowanie odpowiedzi obiektu na wymuszenia pozwala kontrolować ich wpływ na stan techniczny konstrukcji. W przypadku obiektów kolejowych, pomiary mogą umożliwiać dodatkowo określanie wpływu zmiany geometrii konstrukcji na torowisko.

Literatura

- [1] Bednarski Ł., Sieńko R.: Z monitoringiem bezpieczniej. Inżynier Budownictwa Nr 10/2013, s. 104-108.
- [2] Kadela M., Bednarski Ł.: Wytyczne obserwacji ciągłej obiektów zlokalizowanych na terenach górniczych. Przegląd górniczy nr 8/2014, s.78-84.
- [3] Kadela M.: Systemy monitorowania obiektów liniowych na terenach górniczych. Konferencja naukowo-techniczna zorganizowanej w ramach XII Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych, Brenna 2013, s. 163-172.
- [4] Parkasiewicz B.: Monitoring przemieszczeń elementów budowlanych w warunkach prowadzenia eksploatacji górniczej na przykładzie obserwacji wiaduktu w Rudzie Śląskiej. Przegląd Górniczy, nr 8/2012, s. 83-91.
- [5] Sieńko R.: Monitorowanie konstrukcji budowlanych a wzrost ich bezpieczeństwa. Przegląd budowlany nr 4/2007.
- [6] Bętkowski P., Bednarski Ł., Sieńko R. Doświadczenia z użytkowania systemu monitorowania konstrukcji mostu kolejowego poddanego oddziaływaniu eksploatacji górniczej. Przegląd Górniczy, nr 3/2015.
- [7] Bętkowski P., Bednarski Ł., Sieńko R. Automatic structural health monitoring of a rail bridge structure impacted by mining operation. Technical Transactions i.21, Civil Engineering i. 6-B/2014, Politechnika Krakowska, s.15-27.
- [8] Bętkowski P.: Obserwacja i naprawa dwuprzęsłowego stalowego mostu kolejowego położonego na terenach górniczych. Ochrona obiektów na terenach górniczych. Praca zbiorowa (monografia) pod red. Andrzeja Kowalskiego. Katowice Główny Instytut Górnictwa 2012, s. 17-25.
- [9] Rosikoń A.: Budownictwo komunikacyjne na terenach objętych uszkodzeniami górniczymi. Wyd. 1. Warszawa WKŁ 1979.
- [10] Salamak M.: Obiekty mostowe na terenach z deformującym się podłożem w świetle kinematyki brył. Gliwice Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2013.

THE CORRECT IDENTIFICATION OF THREATS AS THE ELEMENT OF MONITORING OF CERTAIN RAILWAY BRIDGE

In the paper are described fundamentals of buildings of monitoring systems (SHM - Structural Health Monitoring) in bridge objects. Attention is taken to diverse functions that system of the monitoring can fulfil: inspection of design establishments, better getting to know the work of the structure (essential in innovative solutions and research projects), inspection of the work of the selected elements e.g. bearings, bands of suspending, control of loads affecting on the object, measurement of the value of selected displacements, deviation. It is shown on the practical example, that correctly configured system of the monitoring, due to the continuous monitoring of chosen neuralgic parameters, can become the important element of the assessment of the safety structures. However, it is necessary a correct identification of threats and proper determining the boundary value of measured parameters. It is important to avoid the unnecessary expansion of system, so that addition excess of data doesn't becomes a logistic problem and a huge amount of sensors didn't influence the system reliability negatively. In the paper the example of real, working monitoring system is given: identification of threats, configuration of system, results of measurement, interpretation of measured results.