

# MECHATRONICZNE SYSTEMY DIAGNOSTYKI I OCENY STANU TECHNICZNEGO STALOWYCH KONSTRUKCJI NOŚNYCH

## MECHATRONIC SYSTEMS OF DIAGNOSTICS AND TECHNICAL STATE EVALUATION OF STEEL LOAD-BEARING STRUCTURES

Jerzy Alenowicz – Poltegor-Instytut IGO Górnictwa, Wrocław

Przedstawiono przyczyny rozwoju i wzrostu zastosowania systemów diagnostyki i oceny stanu technicznego stalowych konstrukcji nośnych dużych obiektów inżynierskich typu: mosty, dźwigi, żurawie, suwnice, maszyny górnictwa odkrywkowego. Podano przykład systemu diagnostyki konstrukcji mostu wraz ze szczegółowym opisem. Zaprezentowano pierwsze w kraju systemy diagnostyki i oceny stanu technicznego konstrukcji nośnych maszyn górnictwa odkrywkowego. Wskazano na korzyści wynikające z wdrożenia powyższych systemów.

Reasons for development and utilization of diagnostics and technical state evaluation systems of steel load-bearing structures of large engineering objects, like: bridges, lifts, cranes, over head traveling cranes and opencast mining machines have been described in the paper. Furthermore, examples of system of bridge construction diagnostics along with detailed description have been presented. First in the country, system of diagnostics and technical state assessment of load-bearing constructions in opencast mining machines have been discussed. Advantages resulting from application of above mentioned systems have been pointed out.

### Wstęp

Systemy diagnostyki i oceny stanu technicznego stalowych konstrukcji nośnych zostały zastosowane dotychczas na szeroką skalę w odniesieniu do konstrukcji mostów. Na fakt ten wpłynęło przede wszystkim projektowanie coraz większych i bardziej skomplikowanych konstrukcyjnie nowych tego typu obiektów oraz wzrastający poziom obciążeń mostów dotychczas eksploatowanych.

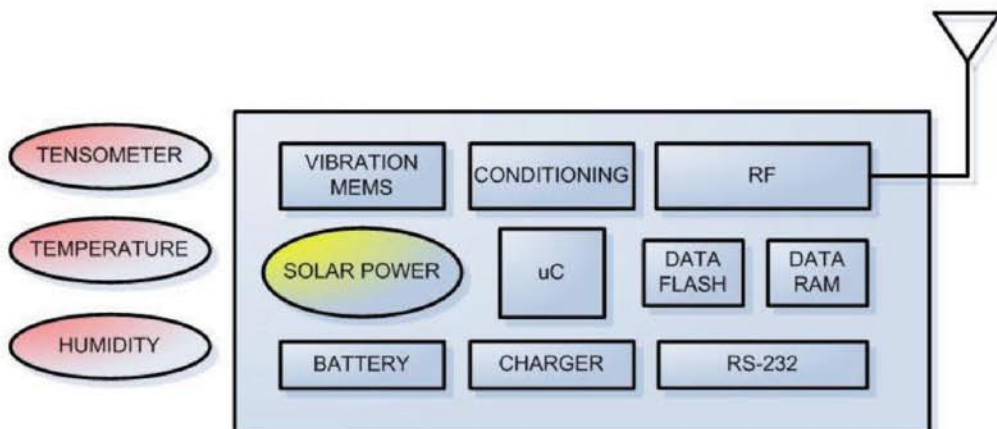
Również w ostatnich latach daje się zauważyć wzrost zastosowania systemów diagnostyki i oceny stanu technicznego stalowych konstrukcji nośnych pozostałych dużych obiektów inżynierskich jakimi są: dźwigi, żurawie portowe, suwnice, statki morskie oraz maszyny górnictwa odkrywkowego. W tych przypadkach spowodowane jest to głównie starzeniem się powyższych obiektów, a z drugiej strony koniecznością ich dalszej eksploatacji ze względu na bardzo wysoki koszt budowy nowych. Tym samym wymusza to na użytkownikach podejmo-

wanie działań zmierzających do przedłużenia ich trwałości, a podstawę do tego typu zamierzeń stanowi zawsze ocena stanu technicznego eksploatowanych konstrukcji.

### Systemy diagnostyki i oceny stanu technicznego konstrukcji mostów

Jako przykład systemu monitorowania konstrukcji mostu przedstawiono poniżej system opracowany w firmie EC Electronics [1]. Przeznaczeniem systemu jest bezinwazyjne określenie parametrów monitorowanej konstrukcji mostu. Monitoring prowadzony jest w sposób ciągły co pozwala znacznie zwiększyć jego dokładność i wiarygodność oraz z odpowiednim wyprzedzeniem podejmować działania zapobiegające ewentualnym awariom a nawet katastrofom np. na skutek przeciążenia.

Moduły pomiarowe rozmieszczone są na całej konstrukcji mostu, wyniki pomiarów są przetwarzane za pomocą zaimplementowanej formuły obliczeniowej oraz przesyłane drogą



Rys. 1. Schemat blokowy modułu pomiarowego [1]

Fig. 1 Block diagram of measurement module [1]



bezprzewodową do jednostki centralnej systemu. Jednostka centralna synchronizuje dane pochodzące z modułów pomiarowych. Zadaniem jednostki centralnej jest również gromadzenie danych oraz przesyłanie ich do centrum pomiarowego. Zaimplementowane algorytmy obliczające dostarczają kompleksowych i dokładnych danych na temat parametrów statycznych i dynamicznych konstrukcji.

Rozmieszczenie elementów pomiarowych w obrębie całej konstrukcji pozwala na rzetelne określenie jej stanu. Dzisiejszy stan technologiczny pozwolił na zaprojektowanie systemu składającego się z samodzielnych, niskomocowych modułów pomiarowych. Moduły służą do pomiaru najważniejszych wielkości określających stan konstrukcji, tj. drgań, naprężeń, odkształceń, temperatury i wilgotności. Ponadto rolą modułu pomiarowego jest przetwarzanie danych do postaci cyfrowej, przeprowadzenie obliczeń wg zaimplementowanej formuły, kompresja danych oraz przesył danych do jednostki centralnej.

Pierwszym elementem systemu jest moduł pomiarowy (rys. 1, 2). Cechą modułu jest możliwość przyłączenia wielu czujników zarówno cyfrowych jak i analogowych.

Rozmieszczenie czujników jest uzależnione od konkretnego obiektu pomiarowego, projekt implementacji i konfiguracji systemu jest zawsze indywidualnym rozwiązaniem. Mierzone dane są wzmacniane i (w przypadku pomiarów analogowych) przetwarzane do postaci cyfrowej.



Rys. 2. Modelowy widok modułu pomiarowego oraz jego wykonanie rzeczywiste [1]

Fig. 2 Scheme of measuring module and view in the reality [1]

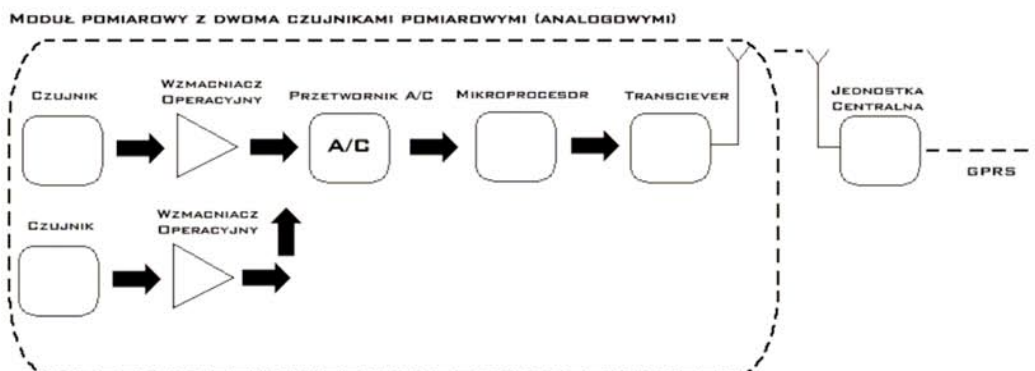
Dane pomiarowe w postaci cyfrowej poddawane są obróbce przez mikroprocesor, na podstawie zaimplementowanej formuły obliczeniowej, np. w przypadku pomiaru drgań bazującej na metodzie analizy modalnej. Zaletą tego rozwiązania jest rzetelna obróbka pomiarów już na początku toru pomiarowego, co pozwala na uniknięcie strat w jakości i zmniejszenie rozmiaru danych przesyłanych do dalszych elementów systemu. Tak przygotowane wyniki przekazywane są do transceivera odpowiedzialnego za komunikację modułu pomiarowego z jednostką centralną. Za komunikację odpowiada nowoczesny zintegrowany nadajnik/odbiorca (transceiver) danych cyfro-

wych (rys. 3). Moduł pracuje z programowaną mocą nadajnika do 10 dBm, co pozwala na przesyłanie danych na odległość 250 m. Układ charakteryzuje się niskim poborem mocy.

Dane pomiarowe z modułów przekazywane są do jednostki centralnej. Rolę jednostki centralnej pełni w systemie komputer przemysłowy. Takie rozwiązanie charakteryzuje się wystarczającą mocą obliczeniową przy zachowanej niskomocowości oraz umożliwia zastosowanie praktycznie każdej metody komunikacji bezprzewodowej.

Założenia budowy przedstawionego powyżej systemu są stosowane w niezmienionej lub nieznacznie zmodyfikowanej formie do monitorowania konstrukcji mostów na całym świecie, stąd zamieszczono jego opis. Modyfikacje dotyczą głównie źródeł zasilania i sposobu przesyłania oraz wykorzystania otrzymywanych sygnałów. Sygnały te, zaczynając od prostej sygnalizacji stanów alarmowych, aż po pełne obwiednie widm sygnałów drganiowych (analiza modalna) mogą być transmitowane na drodze radiowej lub poprzez coraz bardziej powszechny system telefonii komórkowej GSM. Jednostka sterująca zostaje wówczas wyposażona w odpowiedni modem pozwalający na jej komunikację z zewnętrznym użytkownikiem. Automatyzacja procesów wizualizacji odbywa się poprzez sygnalizację zagrożeń bezpośrednio do służb nadzoru obiektu lub poprzez interfejs użytkownika dostępny w formie stron html, zaimplementowanych w serwerze. Stąd też, mając dostęp do Internetu oraz znając hasło dostępu, można śledzić pracę konstrukcji mostu w trybie on-line. W ostatnich latach coraz częściej sygnały otrzymywane w wyniku ciągłego monitoringu konstrukcji mostów wykorzystywane są w układach sterujących zabezpieczeń np. w przypadku kładek dla pieszych, które ze względu na swoją niewielką masę są szczególnie podatne na oddziaływania dynamiczne pochodzące od dużych grup przechodzących ludzi, stosuje się aktywne tłumiki drgań, które są sterowane na podstawie sygnałów pochodzących z ciągłego monitoringu konstrukcji nośnej. Ponadto na podstawie powyższych sygnałów wprowadza się coraz częściej automatyczne sterowanie natężeniem ruchu samochodowego, ogranicza dozwoloną prędkość pojazdów znajdujących się na moście itp. Tak więc systemy ciągłego monitoringu konstrukcji mostów stają się coraz częściej systemami mechatronicznymi.

Obecnie można podać wiele przykładów ciągłego monitoringu konstrukcji mostów prowadzonych na świecie. Monitoring ten znalazł najszerze zastosowanie w USA, stąd większość podanych przykładów pochodzi z tego kraju. Należy do nich m. in. monitoring następujących obiektów: Sundial Bridge California, Rolling Bascule Floryda, Royal



Rys. 3. Schemat modułu pomiarowego z czujnikiem analogowym i cyfrowym [1]

Fig. 3 Scheme of measuring module with analog and digital sensor [1]



Park Bridge Florida, South Broadway Overpass Kansas, US 24 Pottawatomie County Kansas, Shawnee County Bridge Kansas, Manhattan Bridge New York, Kemper Arena Construction Missouri, Confederation Bridge Utah, Highway Bridge Virginia, Kishwaukee River Bridge Illinois, Rock Island Arsenal Illinois, Buy Bridge Floryda, Orange County Bridge California, Bronx Whitestone Bridge New York.

Do obiektów monitorowanych w Europie możemy zaliczyć:

Most Oresund łączący Danię ze Szwecją, Rion Antirion Bridge Grecja, Steinbatal Bridge Niemcy, Arsta Railway Bridge Szwecja, Ponte Nanin Bridge Szwecja, Blackfriars Bridge Anglia, Medway Bridge Anglia, Humber Bridge Anglia, Krk Bridge Chorwacja, Thielle Bridge Szwajcaria, Vaux Bridge Szwajcaria.

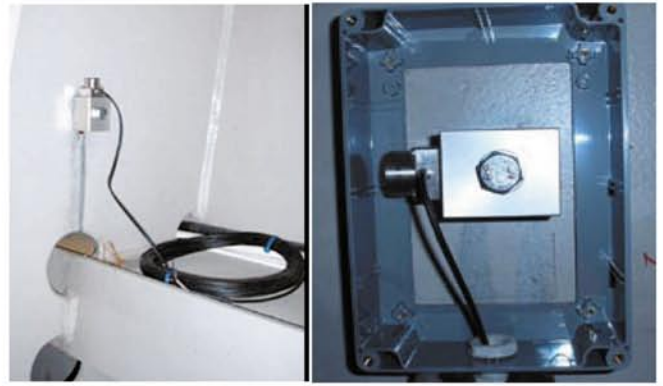
W Polsce ciągły monitoring konstrukcji mostów stawia dopiero pierwsze kroki. Do prac w tym kierunku możemy zaliczyć: monitoring mostu Wandy oraz mostu M1 w Szczecinie wykonany przez AGH Kraków, gdzie przy pomocy systemu monitoringu bezprzewodowego dokonano oceny drgań w oparciu o analizę modalną [1], monitoring procesu montażu konstrukcji mostu Siekierkowskiego w Warszawie gdzie prowadzono kontrolę reakcji i przemieszczeń na podporach oraz pomiar stanu naprężeń i rejestrację deformacji środnika, monitoring ciągły odkształceń, przemieszczeń, temperatury i wilgotności oraz prędkości i kierunku wiatru największego w Polsce podwieszonego mostu w Płocku [2] (rys. 4), a także monitoring ostatnio oddanego do użytku mostu na Wiśle w Puławach [3] (rys. 5). W tym ostatnim przypadku zastosowano rozbudowany system monitoringu obejmujący trzy podsystemy a mianowicie monitoringu konstrukcji, meteorologicznego i wizyjnego (rys. 6 i 7).



Rys. 4. Nowo zbudowany most podwieszany nad Wisłą [2]  
Fig. 4 Newly constructed cable-stayed bridge crossing Vistula River [2]



Rys. 5. Widok przęsła lukowego mostu w Puławach [3]  
Fig. 5 Arch bridge in Puławy [3]



Rys. 6. Widok czujnika drgań przed i po zamontowaniu hermetycznej obudowy [3]

Fig. 6 Vibration sensor before and after installation of air-tight casing [3]



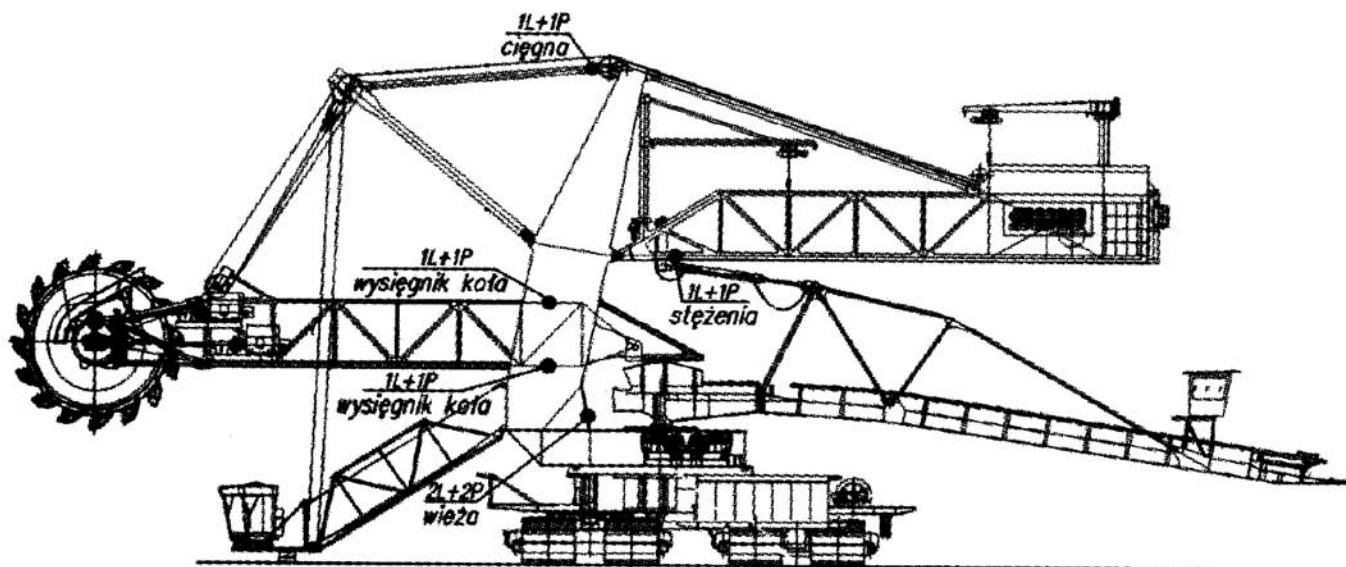
Rys. 7. Widok wnętrza serwera lokalnego zlokalizowanego na moście [3]  
Fig. 7 Inside view of local server localized on a bridge [3]

### Systemy diagnostyki i oceny stanu technicznego konstrukcji nośnych maszyn górnictwa odkrywkowego

W Polsce pierwszy system ciągłego monitoringu ustroju nośnego powyższych maszyn został zaprojektowany i wdrożony przez firmę „SKW” Zgorzelec na koparce KWK 910 eksploatowanej w Kopalni Węgla Brunatnego „Turów” S.A. [4]. Zasadniczym zadaniem powyższego systemu jest bieżąca modyfikacja parametrów siłowych koparki decydujących o wartościach i rozkładzie naprężeń w ustroju nośnym, w celu zapewnienia pożądanej trwałości projektowej w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej. Przesłanką do takiego podejścia był fakt, że wartości obciążeń eksploatacyjnych koparek kołowych (szczególnie pracujących w tzw. gruntach trudno urabialnych), ich zmienność w czasie oraz efekt ich oddziaływania przetworzony przez ustrój nośny na naprężenia stanowi obszar dużej niepewności dla projektanta, nie dający się określić żadnymi normami. Ostateczne wartości naprężeń w konstrukcji i ich rozkład statystyczny możliwe są do określenia dopiero w trakcie eksploatacji maszyny.

Identyfikacja intensywności eksploatacji ustroju nośnego prowadzona jest w punktach referencyjnych. Polega ona na ciągłym rejestrowaniu naprężeń eksploatacyjnych, wyodrębnieniu cykli zmęczeniowych i sporządzeniu ich opisu co do zakresu zmienności i liczności. Punkty referencyjne zostały wybrane w pobliżu węzłów konstrukcyjnych o zasadniczym znaczeniu, w których pęknięcia stanowią zagrożenia dla integralności





Rys. 8. Lokalizacja punktów referencyjnych na tle ustroju nośnego koparki KWK-910 [4]  
 Fig. 8 Localization of reference points on the load bearing structure of KWK-910 excavator [4]

całej konstrukcji nośnej (rys. 8). Dla koparki z nadwoziem w układzie C te węzły to:

- połączenie wieży z platformą obrotową
- posadowienie wysięgnika koła czerpakowego na wieży (rejon wysięgnika i wieży)
- konstrukcja wysięgnika koła czerpakowego
- ciągną przednie łączące maszt z wieżą
- połączenie wysięgnika przeciwwagi z wieżą.

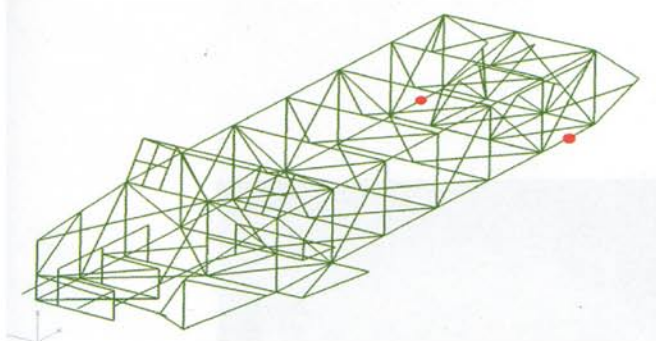
Intensywność eksploatacji koparki mierzona wartościami i rozkładem naprężeń w konstrukcji jest ściśle powiązana z możliwościami siłowymi głównych mechanizmów i parametru nastaw ich zabezpieczeń. W przypadku koparki KWK 910 główne mechanizmy takie jak mechanizm napędu koła czerpakowego, mechanizm obrotu nadwozia i mechanizm zwodzenia wysięgnika urabiającego zostały wyposażone w czujniki tensometryczne umożliwiające prowadzenie rejestracji wartości obciążenia eksploatacyjnego i ustalenie wartości szczytowej obciążenia w momencie zadziałania zabezpieczenia danego mechanizmu.

Zasadę działania systemu przedstawiono na przykładzie zabezpieczeń mechanizmu obrotu nadwozia koparki.

Boczna siła kopania generowana jest przez mechanizm obrotu nadwozia z napędem hydraulicznym. Maksymalny moment napędowy tego mechanizmu wynika z poziomu nastaw ciśnienia w zaworach przelewowych pomp zasilających silniki hydrauliczne. Obciążenie mechanizmu obrotu nadwozia zależne jest od szeregu czynników i niezbyt precyzyjnie definiuje wartość bocznej siły kopania. W związku z tym na belkach pasa dolnego wysięgnika koła czerpakowego zabudowana została para czujników tensometrycznych (rys. 9, 10).

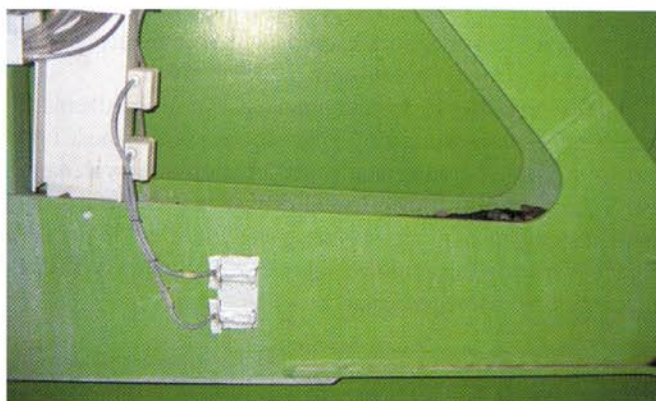
Mierzone przez nie wartości naprężeń wprowadzone są do układu sterownika koparki i na ich podstawie wyznaczane jest boczne obciążenie wysięgnika koła czerpakowego. W momencie osiągnięcia naprężeń odpowiadających wartościom przyjętym jako graniczne w obliczeniach trwałościowych następuje zmniejszenie prędkości obrotowej nadwozia i ograniczenie obciążeń bocznych koła czerpakowego.

System ten jest zatem w pełni systemem mechatronicznym



Rys. 9. Lokalizacja mierników naprężeń na konstrukcji nośnej wysięgnika koła czerpakowego[4]

Fig. 9 Localization of stress measuring instruments on the load bearing structure of bucket wheel outrigger [4]

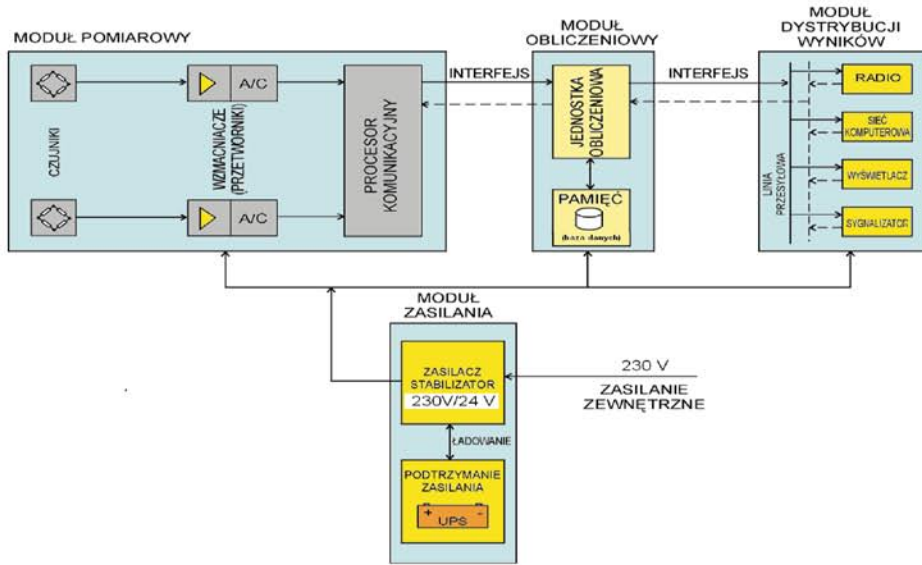


Rys. 10. Miernik naprężeń zastosowany na konstrukcji pasa dolnego wysięgnika koła czerpakowego. Powyżej widoczny czujnik wykorzystywany w układzie rejestracji naprężeń [4]

Fig. 10 Stress measurement instrument located at lower part of bucket wheel outrigger construction. Sensor applied in stress registering system visible above. [4]

gdzie na podstawie zmierzonych wielkości naprężeń dokonuje się analizy ich wartości, a następnie przekazuje się odpowiedni sygnał do układu sterowania koparki.





Rys. 11. Schemat systemu ciągłej diagnostyki wyężenia ustrojów nośnych maszyn górnictwa odkrywkowego [7]  
 Fig. 11 Diagram of system of constant diagnosis of load bearing structure efforts in opencast mining machines

### Ocena stanu wyężenia konstrukcji nośnych w zakresie przewidywanego bezpiecznego czasu eksploatacji

Jak podano w poprzednim punkcie artykułu, głównym zadaniem ciągłego monitoringu stanu wyężenia ustroju nośnego było tam zapewnienie wymaganej trwałości projektowej w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej. Było to więc działanie zmierzające do przedłużenia obliczeń projektowych w oparciu o rzeczywiste wartości naprężeń eksploatacyjnych. Ze względów podanych we wstępie, w praktyce coraz częściej zachodzi konieczność prognozowania przewidywanego dalszego czasu bezpiecznej eksploatacji obiektu [5] [6].

W odniesieniu do maszyn górnictwa odkrywkowego oznacza to konieczność oceny stanu wyężenia ustroju nośnego głównie w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej. W tym celu w Poltegor-Instytut IGO zaprojektowano system ciągłej diagnostyki stanu wyężenia ustrojów nośnych powyższych maszyn [7].

System ten składa się z czterech modułów rozmieszczonych na konstrukcji badanego ustroju nośnego. Są to moduł pomiarowy, obliczeniowy, dystrybucji wyników i zasilania (rys. 11).

Zadaniem modułu pomiarowego jest zbieranie informacji o naprężeniach z punktów diagnostycznych, wstępne ich przygotowanie i zamiana na postać cyfrową umożliwiającą ich dalsze przetwarzanie. Moduł pomiarowy składa się z czujników pomiarowych, urządzeń wzmacniających przesyłających i dopasowujących sygnały pomiarowe oraz układów cyfryzacji.

Jako czujniki pomiarowe do pomiaru wartości naprężeń używane są tensometry elektrooporowe, które mocowane są bezpośrednio na konstrukcji, mogą też być użyte tensometry światłowodowe. Następnie sygnały w postaci cyfrowej są wprowadzane do modułu obliczeniowego.

Moduł obliczeniowy składa się z komputera wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie podstawowe i obliczeniowe, urządzeń (baz) gromadzenia danych oraz interfejsów komunikacyjnych. Oprogramowanie podstawowe to system uruchomieniowy i zarządzający procesami obliczeniowymi. Zadaniem tego systemu jest uruchomienie startowe i po przywróceniu zasilania rozruch i nadzór pracy oprogramowania obliczeniowego i innego niezbędnego do zarządzania systemem monitorowania. Oprogramowanie obliczeniowe stanowią programy przetwarzające i analizujące dane pomiarowe i są one opracowane w ramach

systemu ciągłego monitoringu.

Głównym zadaniem modułu obliczeniowego jest ocena zasobu trwałości zmęczeniowej na podstawie przekształconych sygnałów z układu pomiarowego. W tym celu zliczane są cykle zmienne (zmęczeniowe) naprężeń, wyznaczane są widma amplitud naprężeń i na podstawie uzyskanych widm dokonywana jest ocena trwałości zmęczeniowej.

Zliczane cykle zmienne są gromadzone w tablicy (bazie) widma obciążeń zmiennych. Widmo obciążeń zmiennych jest poddawane korekcie o wartość naprężeń wstępnego sprzężenia konstrukcji (naprężenia od ciężaru własnego) ustroju nośnego.

Dla maszyn już eksploatowanych system monitorowania będzie wyposażony w tablicę widma obciążeń pierwotnych. Tablica ta będzie opracowana jednorazowo dla każdego monitorowanego ustroju nośnego przed uruchomieniem systemu po przeprowadzeniu odpowiednich pomiarów i analiz zgodnie z opracowaną w ramach systemu metodą wyznaczania widma obciążeń pierwotnych.

Po uwzględnieniu: widma obciążeń zmiennych i obciążeń pierwotnych oraz rodzaju karbu i własności materiałowych, wyznaczany jest zasób trwałości zmęczeniowej ustroju nośnego jako czas pracy do możliwości wystąpienia awarii. Wartość tego czasu jest wyprowadzana z systemu monitorowania jako podstawowa informacja wyjściowa. Jest ona wartością najmniejszej trwałości dla całego ustroju nośnego maszyny. Dodatkowo w zależności od ewentualnych konkretnych aplikacji, system może generować inne informacje np. dotyczące kolizji maszyny, okresowych przeciążeń konstrukcji, czasie zaistnienia awarii itp.

Zadaniem modułu dystrybucji wyników jest przekazywanie informacji wyjściowych o stanie wyężenia ustroju nośnego do użytkownika lub obsługi maszyny. Informacje te mogą być przekazywane za pomocą wyświetlaczy, sygnalizatorów, modemów (np. GSM) lub sieci komputerowych (np. Ethernet).

Zadaniem modułu zasilania jest dostarczenie energii elektrycznej do poszczególnych modułów systemu. Składa się on z zasilacza 230/24V i urządzenia do podtrzymania zasilania w razie przerw w dopływie energii.

Powyższy system jest również przeznaczony do oceny stanu wyężenia ustroju nośnego w zakresie wytrzymałości doraźnej. Spowodowane jest to specyfiką pracy maszyn górnictwa odkrywkowego, gdzie w praktyce dochodzi nierzadko do przekroczenia



wartości naprężeń od obciążeń doraźnych (np. w wyniku kolizji wysięgników: roboczych, przeciwwagi i załadowniczych ze skarpą, kolizji poszczególnych zespołów roboczych pomiędzy sobą, kolizji poszczególnych maszyn współpracujących ze sobą w ciągu technologicznym), które mogą spowodować odkształcenia plastyczne lub zniszczenie elementów ustroju nośnego. Do oceny stanu wyężenia w zakresie wytrzymałości doraźnej wykorzystywane są te same układy pomiarowe jak w przypadku oceny wytrzymałości zmęczeniowej. Sygnały pomiarowe po ich obróbce i przekształceniu na postać cyfrową są wprowadzane do modułu obliczeniowego, gdzie po korekcie o wartość wstępnego sprężenia konstrukcji obliczane są naprężenia zastępcze i porównywane z wartościami naprężeń dopuszczalnych. Wartość naprężeń zastępczych jest sprawdzana na bieżąco bez gromadzenia w bazie systemu monitorowania. W przypadku możliwości przekroczenia wartości naprężeń dopuszczalnych z systemu monitorowania wyprowadzany jest sygnał ostrzegawczy. Sygnał ten jest przesyłany do użytkownika i obsługi maszyny. Przewidywana jest możliwość wykorzystania sygnału ostrzegawczego w układzie sterowania koparki, tak aby w sposób automatyczny można było zapobiec ewentualnym uszkodzeniom poszczególnych elementów ustroju nośnego. Wymaga to jednak uprzedniego sprawdzenia poprawności działania systemu co nastąpi w trakcie badań eksploatacyjnych.

Ponadto, w przypadku uszkodzeń poszczególnych elementów ustroju nośnego może w niektórych punktach pomiarowych wystąpić gwałtowna zmiana naprężeń lub brak (zanik) zmian tych naprężeń. Sytuacje takie lub podobne mogą świadczyć o uszkodzeniu elementów układu pomiarowego lub elementów monitorowanych. Stąd też system ten posiada również możliwość sygnalizowania wystąpienia takich sytuacji.

## Podsumowanie

W ostatnich latach następuje szybki rozwój i wzrost zastosowania systemów diagnostyki i oceny stanu technicznego stalowych konstrukcji nośnych dużych obiektów inżynierskich do których możemy zaliczyć mosty, dźwigi, żurawie portowe, suwnice, statki morskie oraz maszyny górnictwa odkrywkowego. Spowodowane to jest projektowaniem coraz większych i bardziej skomplikowanych konstrukcji nośnych (w których na etapie projektowania nie można określić precyzyjnie wielkości wszystkich obciążeń), starzeniem się obiektów eksploatowanych dotychczas oraz znacznym wzrostem natężenia ich eksploatacji.

## Literatura

- [1] Uhl T., Hanc A., Tworkowski Ł., Sękiewicz K., Opis systemu monitorowania mostu z wykorzystaniem analizy modalnej. Wyd. AGH Kraków 2007
- [2] [www.skyscrapercity.com.pl](http://www.skyscrapercity.com.pl)
- [3] [www.ssk.com.pl](http://www.ssk.com.pl)
- [4] Kowalczyk M., Sterowanie intensywnością obciążeń eksploatacyjnych konstrukcji nośnej. Górnictwo Odkrywkowe nr 6, 2009
- [5] Alenowicz J., Badania diagnostyczne konstrukcji nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego. Górnictwo Odkrywkowe nr 2, 2004
- [6] Augustynowicz J. Dudek D., Prognozowanie okresu bezpiecznej eksploatacji maszyn górniczych. Rozważania o degradacji obiektu. Wyd. Górnictwo i Geoinżynieria. Rok 31. Zeszyt 2. AGH Kraków 2007.
- [7] Alenowicz J., Onichimiuk M., Wygoda M., Mechatroniczny system ciągłej diagnostyki wyężenia ustroju nośnego maszyn górnictwa odkrywkowego. Górnictwo Odkrywkowe nr 6, 2010

Powyższe systemy coraz częściej działają w sposób ciągły co znacznie zwiększa ich dokładność i wiarygodność i pozwala z odpowiednim wyprzedzeniem podejmować działania zapobiegające ewentualnym awariom a nawet katastrofom. W tym celu sygnały pochodzące z monitoringu konstrukcji wykorzystywane są coraz częściej w układach sterujących pracą obiektów np. natężeniem ruchu czy poziomem zabezpieczeń, tak więc systemy te stają się systemami mechatronicznymi. Dotychczas znalazły one najszerze zastosowanie w odniesieniu do konstrukcji mostów szczególnie w USA, Europie Zachodniej, Chinach i Japonii. W Polsce znajdują się one w fazie wstępnego rozwoju, aczkolwiek coraz więcej mostów, szczególnie nowo budowanych jest wyposażonych jest w systemy do ciągłego monitoringu konstrukcji.

W odniesieniu do maszyn górnictwa odkrywkowego pierwszy w Polsce system ciągłego monitoringu konstrukcji nośnej został zastosowany na koparce KWK 910 eksploatowanej w KWB „Turów” przez firmę SKW Zgorzelec. Zasadniczym zadaniem powyższego systemu jest bieżąca modyfikacja parametrów siłowych koparki na podstawie sygnałów uzyskanych w wyniku ciągłego pomiaru wartości naprężeń (odkształceń) wybranych elementów konstrukcji nośnej. Można zatem stwierdzić, że system ten jest w pełni systemem mechatronicznym.

W praktyce coraz częściej zachodzi konieczność prognozowania przewidywanego dalszego czasu bezpiecznej eksploatacji maszyn górnictwa odkrywkowego. W tym celu w ostatnich kilku latach zaprojektowano i skonstruowano w Poltegor-Instytut IGO system ciągłej diagnostyki wyężenia ustroju nośnego maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego. Głównym zadaniem powyższego systemu jest ocena stanu monitorowanej konstrukcji w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej, system posiada również zdolność do oceny stanu wyężenia w zakresie wytrzymałości doraźnej. Przewidywana jest możliwość wykorzystania tej ostatniej w układzie sterowania maszyny, tak aby można było zapobiec ewentualnym uszkodzeniom poszczególnych elementów konstrukcji nośnej na skutek przeciążenia.

Obecnie system ten jest testowany na jednej z koparek nadkładowych eksploatowanych w KWB „Bełchatów”.

*Artykuł zrealizowano w ramach projektu pt. „Mechatroniczny system sterowania, diagnostyki i zabezpieczeń w maszynach górnictwa odkrywkowego, nr umowy UDA-POIG.01.03.01-00-043/08-00, Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka 2007-2013. Projekt 1, Działanie 1.3. Poddziałanie 1.3.1.*