

Monitorowanie stanu wyęczenia stalowych ustrojów nośnych maszyn i urządzeń

Jerzy Alenowicz

1. Wstęp

Wzrastający poziom obciążeń oraz starzenie się większości konstrukcji stalowych w dużych obiektach inżynierskich (mosty, dźwigi, żurawie, suwnice, maszyny górnictwa odkrywkowego), a z drugiej strony konieczność ich eksploatacji ponad czas normatywny przewidziany przez producenta (ze względu na wysokie koszty budowy nowych) wymuszają prowadzenie badań dotyczących ich stanu technicznego. Ze względu na opisaną sytuację celem tych badań oprócz oceny bieżącej stanu technicznego staje się coraz częściej prognozowanie przewidywanego dalszego czasu bezpiecznej eksploatacji obiektu. Intensywny rozwój tego typu badań w ostatnich kilkunastu latach doprowadził nawet do powstania nowej dziedziny wiedzy pn. „Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji” skrót MSK (ang. *Structural Health Monitoring*).

2. Monitorowanie stalowych konstrukcji mostów

Metodę MSK zastosowano po raz pierwszy na szeroką skalę do oceny stanu technicznego konstrukcji mostów. Spowodowane to zostało zwiększeniem w ostatnich kilkunastu latach natężenia ruchu, a zatem obciążeń dynamicznych oddziałujących na konstrukcję mostów, budową coraz dłuższych i większych obiektów oraz starzeniem się większości mostów wzniesionych dotychczas. Metoda ta charakteryzuje się ciągłym pomiarem, rejestracją i analizą oceny mierzonych wielkości oraz wysyłaniem sygnałów o przekroczeniu stanów alarmów, np. stanu wyęczenia konstrukcji, do odpowiednich służb nadzoru obiektu. Nadal nie w pełni rozwiązany problem jest zagadnienie prognozowania dalszego bezpiecznego czasu eksploatacji konstrukcji. Najczęściej mierzonymi wiel-

kościami w przypadku stalowych konstrukcji mostowych są: odkształcenia (naprężenia) konstrukcji, zmiany szerokości dylatacji, wydłużenia lub skrócenia elementów, osiadanie podpór (przyczółków), przechyły i wychylenia elementów konstrukcji, częstotliwość i amplituda drgań. Do pomiaru wielkości dodatkowych należy zaliczyć pomiary: temperatury konstrukcji i otoczenia, siły i kierunku wiatru, nasłonecznienia i opadów [1]. Pomiary odkształceń (naprężeń) prowadzone są w większości przypadków za pomocą czujników tensometrycznych (tensometry elektrooporowe lub coraz częściej światłowodowe). Jak wspomniano na wstępie, pomiary prowadzone są w sposób ciągły, co pozwala znacznie zwiększyć ich dokładność i wiarygodność. Jest to szczególnie istotne przy ocenie zmęczeniowej konstrukcji. Systemy monitorowania konstrukcji mostowych ze względu na bardzo wysoki koszt i trudności z okablowaniem stają się coraz częściej systemami bezprzewodowymi. Jeżeli jeszcze są wyposażone w niezależne zasilanie, np. z energii słonecznej lub wiatru, stają się systemami całkowicie bezobsługowymi.

2.1. Przykład zastosowania

Jako przykład systemu monitorowania konstrukcji mostu przedstawiono poniżej system opracowany w firmie EC Electronics [2].

Przeznaczeniem systemu jest bezwzględne określenie parametrów monitorowanej konstrukcji mostu. System został zaprojektowany tak, aby umożliwić łatwą jego adaptację dla różnorodnych konstrukcji. Efekt taki uzyskano dzięki zaprojektowaniu autonomicznych, niskomocowych modułów pomiarowych. Moduły pomiarowe są rozmieszczone na całej konstrukcji mostu, wyniki pomiarów są przetwarzane za pomocą za-

Streszczenie: W artykule przedstawiono przesłanki prowadzenia monitoringu stanu wyęczenia stalowych ustrojów nośnych dużych obiektów inżynierskich. Podano sposób realizacji badań oraz wykorzystania ich wyników. Zamieszczono przykłady badań stalowych ustrojów nośnych mostów i maszyn górnictwa odkrywkowego. Przedstawiono specyfikę badań ustrojów nośnych maszyn górnictwa odkrywkowego. Wskazano na dalsze kierunki badań ustrojów nośnych tych maszyn.

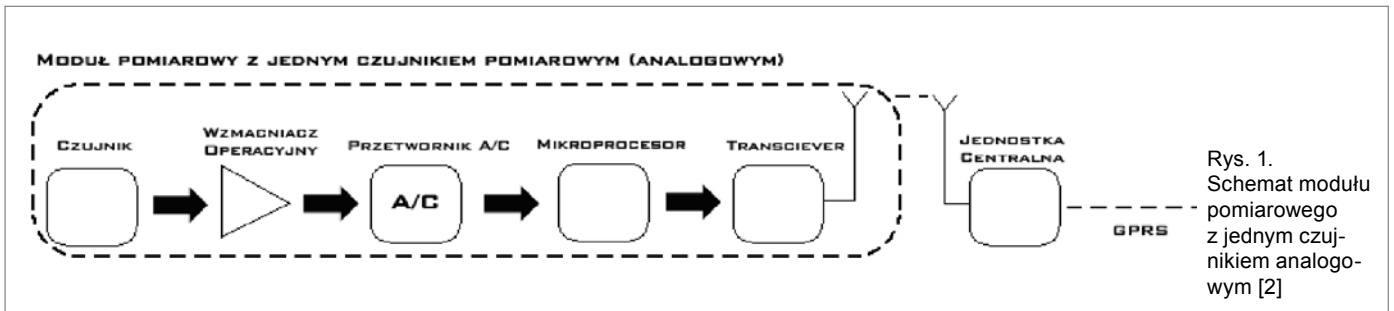
Słowa kluczowe: ustrój nośny, wyęczenie, badania, mosty, maszyny górnictwa odkrywkowego.

MONITORING OF EFFORT CONDITION OF STEEL STRUCTURES IN MACHINES AND DEVICES

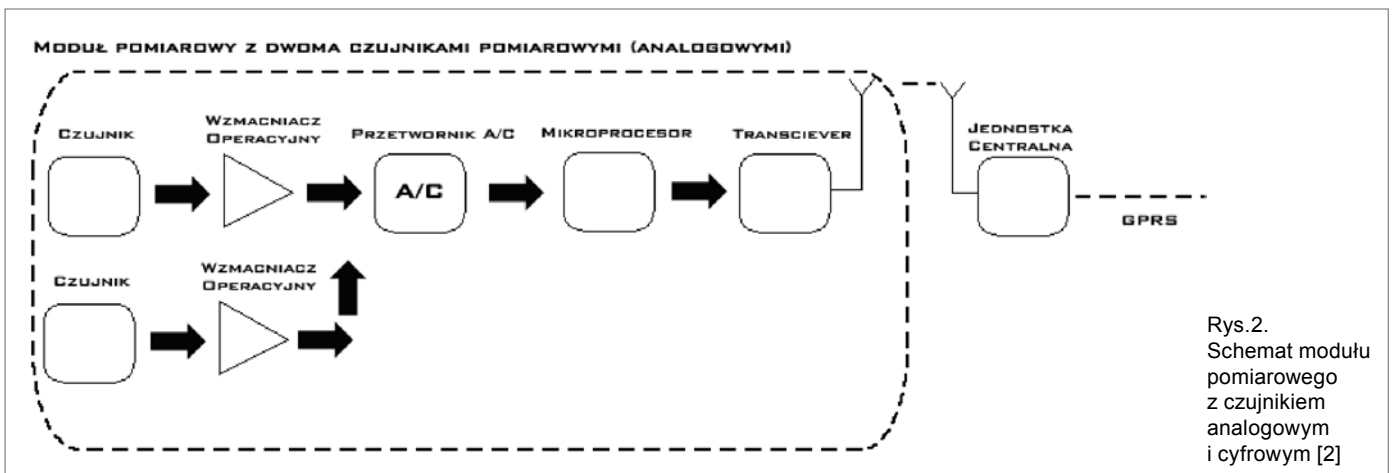
Abstract: Reasons of monitoring conduction of effort condition of steel structures in large engineering objects have been presented in the paper. Furthermore, methodology of research and results usage has been discussed. Examples of tests of steel structures of bridges and opencast mining machines have been presented. Specificity of tests of opencast mining machines steel structures has been described. Future trends of tests of machines steel structures have been discussed.

Key words: steel structure, effort, research, bridges, opencast mining machines.

implementowanej formuły obliczeniowej oraz przesyłane drogą bezprzewodową do jednostki centralnej systemu. Jednostka centralna synchronizuje dane pochodzące z modułów pomiarowych. Za-



Rys. 1. Schemat modułu pomiarowego z jednym czujnikiem analogowym [2]



Rys. 2. Schemat modułu pomiarowego z czujnikiem analogowym i cyfrowym [2]

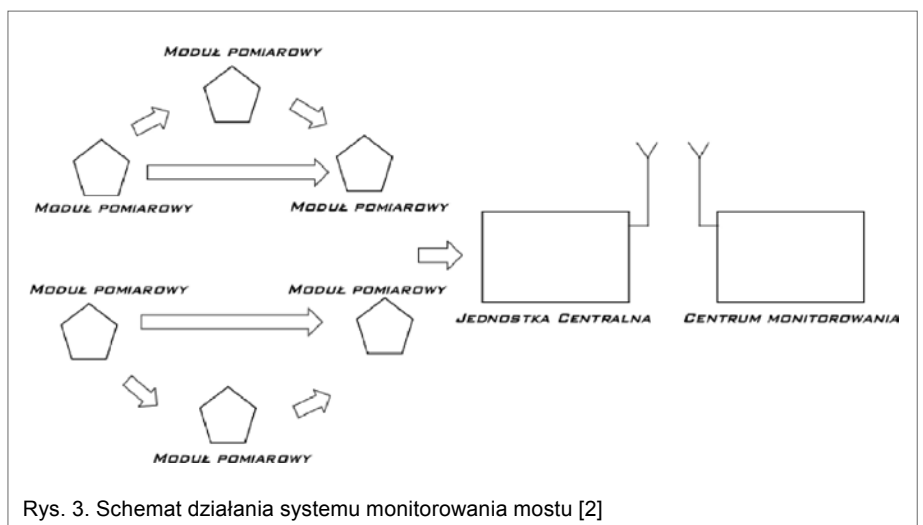
daniem jednostki centralnej jest również gromadzenie danych oraz przesyłanie ich do centrum pomiarowego. Zaimplementowane algorytmy obliczające dostarczają kompleksowych i dokładnych danych na temat parametrów statycznych i dynamicznych konstrukcji.

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.

Dane pomiarowe w postaci cyfrowej poddawane są obróbce przez mikroprocesor, na podstawie zaimplementowanej formuły obliczeniowej, 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/odbiornik (*transceiver*) danych cyfrowych (rys. 1, 2). Moduł pracu-



Rys. 3. Schemat działania systemu monitorowania mostu [2]

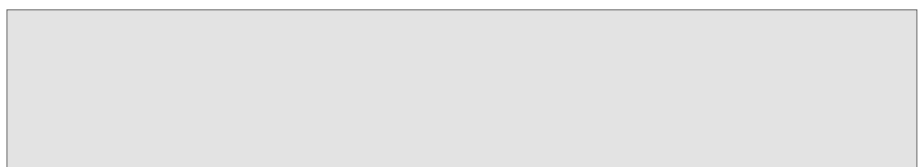
je z programowaną mocą nadajnika do 10 dBm, co pozwala na przesyłanie danych na odległość 250 m. Układ charakteryzuje się niskim poborem mocy.

Dane pomiarowe z modułów przekazywane są do jednostki centralnej. Rolę jednostki centralnej pełni w systemie komputer przemysłowy. Takie rozwiązanie charakteryzuje się wystarczającą mo-

cią obliczeniową przy zachowanej niskomocowości oraz umożliwia zastosowanie praktycznie każdej metody komunikacji bezprzewodowej.

Ciągły monitoring pozwala na szybką reakcję w razie niebezpieczeństwa dla użytkowników mostu, pozwala szybko i skutecznie wykryć miejsce awarii (rys. 3).

reklama





Rys. 4. Nowo budowany most I35W w Minneapolis [3]



Rys. 5. Akcelerometr do pomiarów drgań na konstrukcji mostu [3]



Rys. 6. Rejestrator danych poziomu drgań i temperatury [3]



Rys. 7. Nowo zbudowany most podwieszany nad Wisłą [4]



Rys. 8. Koparka SchRs 4000 firmy Orenstein & Koppel [12]

Ciągły monitoring konstrukcji stalowych mostów znalazł jak dotychczas największe zastosowanie w USA, Japonii i Europie Zachodniej. Jako przykład podano nowo budowany most I35W w Minneapolis (rys. 4, 5, 6).

W Polsce pierwszym mostem wyposażonym w system ciągłego monitoringu konstrukcji jest most na Wiśle w Płocku, oddany do użytku w 2009 roku (rys. 7).

3. Monitorowanie stanu wyężenia ustrojów nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego

Maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego (koparki i zwalowarki) są największymi maszynami lądowymi produkowanymi przez człowieka. Ich masy własne dochodzą do kilkunastu tysięcy ton, a wymiary gabarytowe do kilkuset metrów (rys. 8).

Spowodowane jest to głównie znacznymi wysięgami roboczymi tych maszyn, co związane jest z technologią wydobywania węgla metodą odkrywkową.

Powyższe maszyny narażone są na występowanie znacznych obciążeń dynamicznych o ponadnormatywnych wielkościach, często o charakterze losowym [5]. Ponadto do cech charakterystycznych tych maszyn należy bardzo długi okres ich eksploatacji (ok. 30–50 lat), jednostkowe wykonanie (praktycznie każda maszyna jest prototypem) oraz poruszanie się po podłożach o niewielkiej nośności, nieodwodnionych i zawierających dużą ilość kamieni. Najbardziej newralgicznym zespołem ze względu na jego praktyczną niewymienialność podczas całego okresu eksploatacji, przeniesienie wymienionych powyżej obciążeń dynamicznych oraz stosunkowo dużych obciążeń statycznych (co związane jest z dużą masą własną) jest ustrój nośny [6]. Dlatego też ustrój ten jest z reguły poddawany najbardziej różnorodnym i złożonym badaniom, mającym za zadanie określenie aktualnego i przewidywanego stanu technicznego, a ze względu na przytoczonych powyżej związane jest to w dużej mierze z oceną stanu jego wyężenia.

Ciągły monitoring stanu wyężenia ustrojów nośnych maszyn górnictwa odkrywkowego nie był dotychczas prowadzony. Decydowały o tym głównie ograniczenia sprzętowe (dotyczące zapisu, archiwizacji i przesyłania ogromnych ilości danych), brak było również jednoznacz-

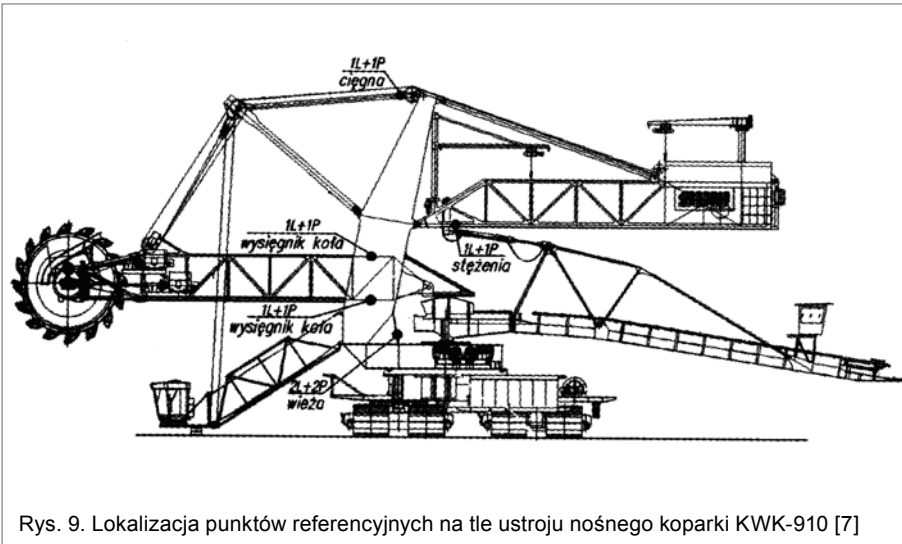
nej metody analizy i oceny tych danych.

W ostatnich latach ze względu na bardzo dynamiczny rozwój rynku mikrokomputerów i oprogramowania ograniczenia sprzętowe zostały wyeliminowane, natomiast metody analizy oceny i wykorzystania wyników – pomimo ich stałego rozwoju i doskonalenia – nadal nie są jednoznaczne, jednak ocenia się że dla prowadzenia tego typu badań wystarczające. Badania takie prowadzono dotychczas w Niemczech na koparce SRs 6300, rejestrując w sposób ciągły odkształcenia lokalne w kilku punktach ustroju nośnego koparki. Z przeglądu literatury światowej nie wynika jednak, aby osiągnięto wiarygodne wyniki lub przeprowadzono ich analizę i opublikowano wnioski. Prace tego typu prowadzono również w b. ZSRR, ale brak jest publikacji jakichkolwiek rezultatów.

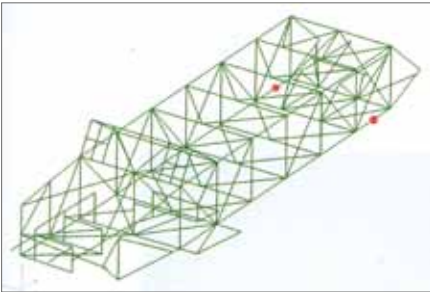
3.1. Wykorzystanie ciągłego monitoringu stanu wyężenia ustroju nośnego do sterowania poziomem zabezpieczeń głównych mechanizmów koparki

W Polsce pierwszy system ciągłego monitoringu ustroju nośnego omawianych wyżej maszyn został zaprojektowany i wdrożony przez firmę „SKW” Zgorzelec na koparce KWK 910 eksploatowanej w Kopalni Węgla Brunatnego „TURÓW” SA [7]. Zasadniczym zadaniem tego 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, niedający 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 pobli-



Rys. 9. Lokalizacja punktów referencyjnych na tle ustroju nośnego koparki KWK-910 [7]



Rys. 10. Lokalizacja mierników naprężeń na konstrukcji nośnej wysięgnika koła czerpakowego [8]



Rys. 11. Miernik naprężeń zastosowany w konstrukcji pasa dolnego wysięgnika koła czerpakowego. Powyżej widoczny czujnik wykorzystywany w układzie rejestracji naprężeń [8]

żu węzłów konstrukcyjnych o zasadniczym znaczeniu, w których pęknięcia stanowią zagrożenia dla integralności całej konstrukcji nośnej (rys. 9). 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;
- ciężna 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 [7].

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. 10, 11).

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 ogra-

niczenie obciążeń bocznych koła czerpakowego. W ten sposób zrealizowano precyzyjne zdefiniowanie wartości obciążeń bocznych działających na wysięgnik koła czerpakowego, nie w oparciu o możliwości siłowe mechanizmu obrotu, a o skutki działania obciążeń w postaci naprężeń.

Efektywność działania opisanego systemu zabezpieczeń została potwierdzona w trakcie eksploatacji koparek w różnych warunkach geologicznych [8]. Naprężenia eksploatacyjne zostały skutecznie ograniczone do poziomu uwzględnianego na etapie wymiarowania konstrukcji. Ilustruje to histogram przedstawiony na rys. 12.

Układ ten nie ogranicza możliwości eksploatacyjnych maszyny w odniesieniu do pojedynczych parametrów (wartość bocznej siły kopania, praca na pochyleniu maksymalnym, obciążenie urobkiem na przenośniku), ale zapobiega przekraczaniu naprężeń obliczeniowych na skutek niekorzystnego skojarzenia tych obciążeń działających równocześnie. Ten rodzaj zabezpieczeń nowej generacji wykorzystujących pomiar naprężeń w konstrukcji do sterowania pracą maszyny zapewnia wysoki poziom precyzji definiowania wartości obciążeń zmiennych dla potrzeb analiz wytrzymałościowych konstrukcji w zakresie trwałości.

3.2. Ocena stanu wytężenia ustrojów nośnych

Jak podano w poprzednim punkcie artykułu, głównym zadaniem ciągłego monitoringu stanu wytężenia 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 eksploatacji obiektu.

W odniesieniu do maszyn górnictwa odkrywkowego oznacza to konieczność oceny stanu wytężenia ustroju nośnego głównie w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej. Określenie tego stanu jest zadaniem skomplikowanym przede wszystkim ze względu na dużą zmienność i stochastyczny charakter obciążeń dynamicznych koparek (szczególnie pracujących w utworach tzw. trudno urabialnych) oraz ze względu na nie do końca poznane i zdefiniowane zjawisko zmę-

czenia metali (skutkuje to m.in. istnieniem wielu hipotez i metod oceny tego zjawiska, które w praktyce dają całkowicie odmienne wyniki) [9].

W Polsce prace dotyczące oceny stanu wyężenia ustrojów nośnych maszyn górnictwa odkrywkowego prowadzone są przede wszystkim na Politechnice Wrocławskiej, w AGH Kraków i w Poltegor-Instytut. Badania realizowane są głównie z wykorzystaniem tensometrii elektrooporowej, chociaż coraz częściej stosuje się inne metody, takie jak metoda elastoptyczna czy coraz bardziej rozwijająca się metoda termowizyjna. Wyniki przetwarzane są w układach cyfrowych za pomocą specjalnych systemów pomiarowych, umożliwiających dalszą obróbkę komputerową. Przykładowy algorytm prowadzenia badań eksploatacyjnych ustrojów nośnych koparek kołowych zamieszczono na rys. 13.

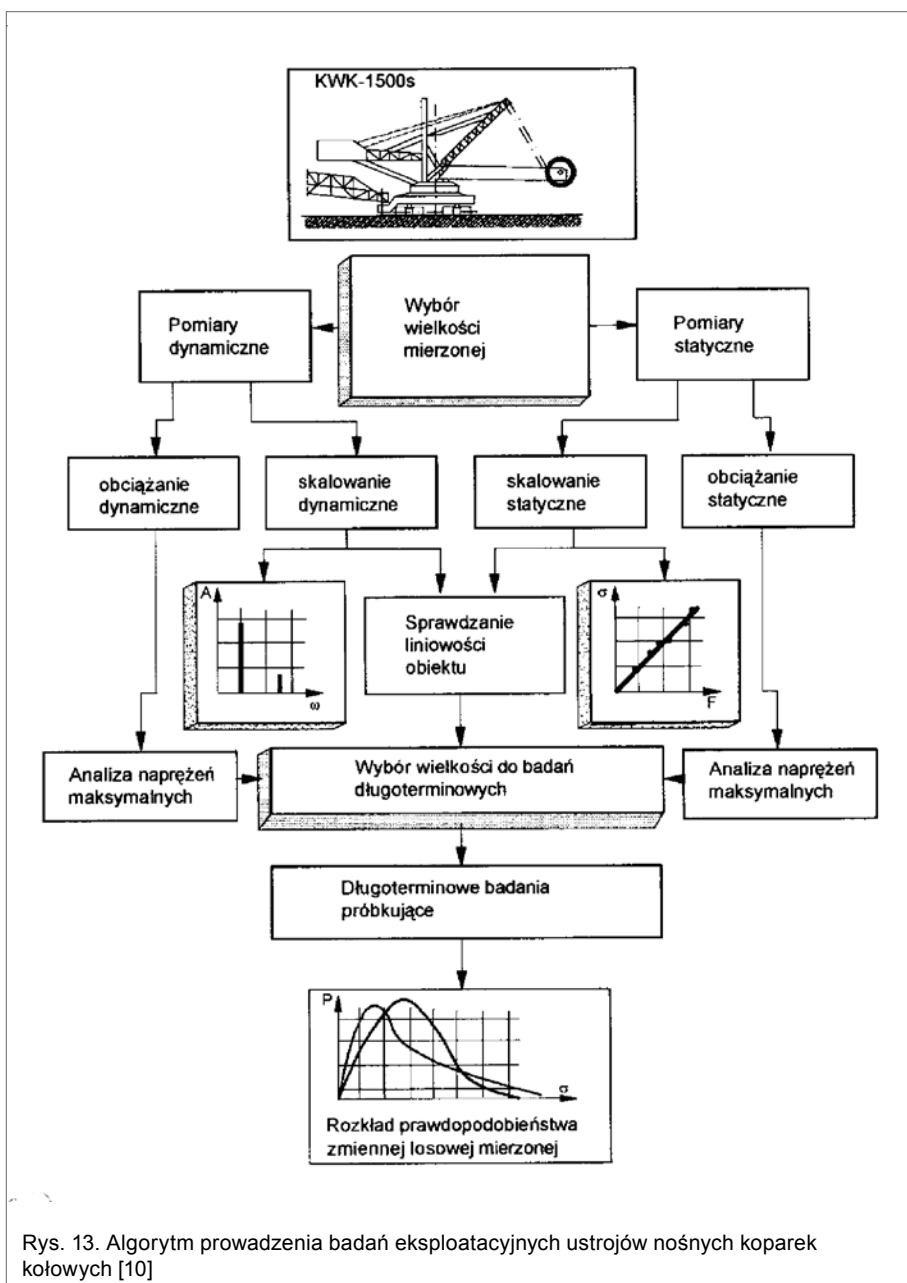
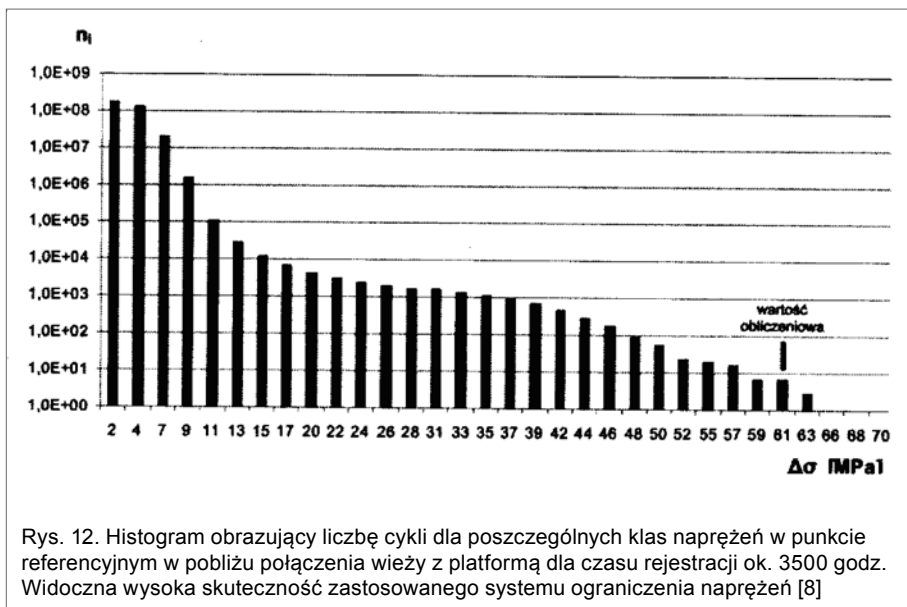
Algorytm ten można przedstawić w postaci następującego ciągu czynności [10]:

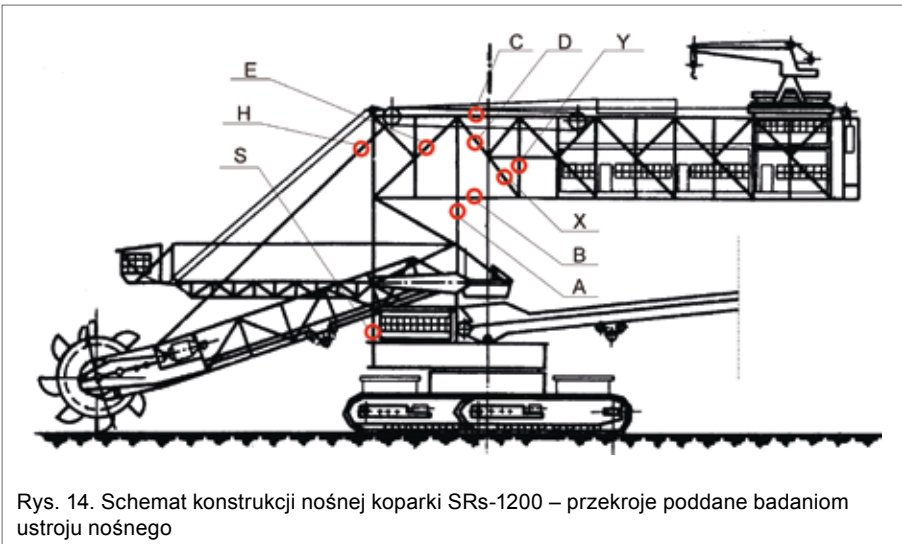
- wybór, na podstawie zewnętrznych przesłanek, wielkości mierzonych – istotnych dla prowadzonych badań;
- skalowanie statyczne i dynamiczne wielkości mierzonych;
- krótkoterminowe pomiary ciągłe w trakcie eksploatacji maszyny;
- analiza harmoniczna i korelacyjna przebiegów dynamicznych wywołanych procesem urabiania;
- określenie współzależności pomiędzy poszczególnymi mierzonymi wielkościami;
- wybór określonych wielkości mierzonych do badań długoterminowych;
- długoterminowe pomiary próbkujące;
- statystycznie uzasadniony i zweryfikowany dobór hipotez o wyborze odpowiednich rozkładów prawdopodobieństwa.

Jako przykład realizacji powyższych badań podano badania stanu wyężenia konstrukcji przeciwwagi koparki SRs-1200 [11]. Na rys. 14 przedstawiono schemat ustroju nośnego koparki z zaznaczonymi przekrojami poddanymi badaniom, a na rys. 15 przykład otrzymanych oscylogramów przyrostów naprężeń dynamicznych.

Następnie – w oparciu o otrzymane wyniki – dokonano oceny stanu wyężenia powyższej konstrukcji, co przedstawiono w tabeli 1.

Realizowane dotychczas badania, których przykłady podano powyżej, były prowadzone zwykle w okresach od kilku dni do kilku miesięcy (w zależności

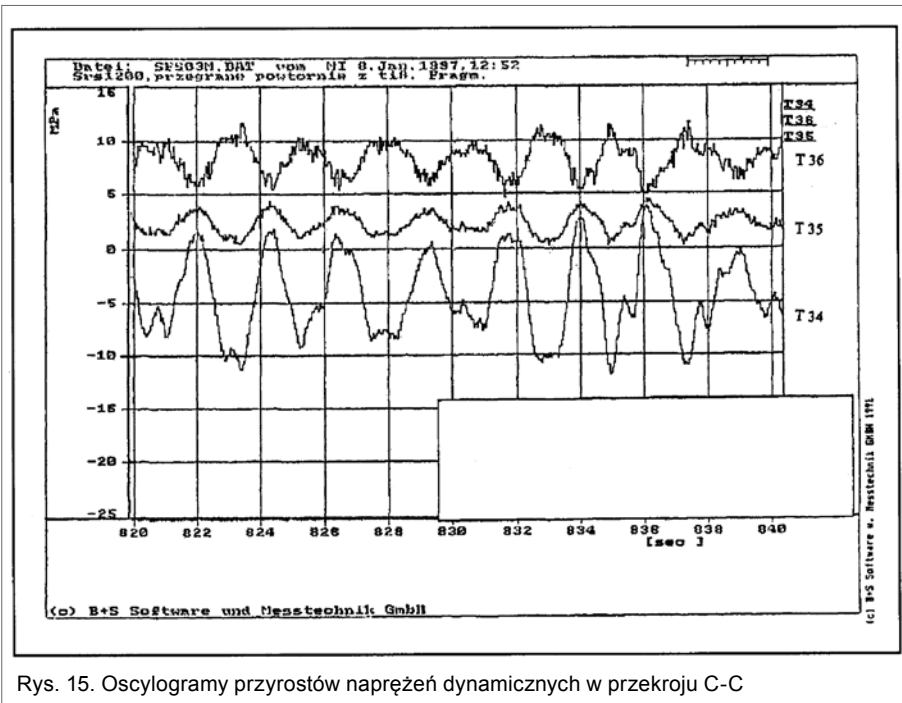




od potrzeb), a uzyskane wyniki były analizowane po zakończeniu badań. Badania te, jakkolwiek bardzo cenne w zakresie oceny stanu wyężenia konstrukcji, nie w pełni pozwalają na jego dalszą prognozę. Stąd też obecnie prowadzone są prace zmierzające do ciągłego monitoringu ustrojów nośnych, co pozwoli na znacznie bardziej precyzyjną ocenę stanu ich wyężenia, szczególnie w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej.

4. Podsumowanie

Wzrastający poziom obciążeń oraz starzenie się większości ustrojów nośnych dużych obiektów inżynierskich wymusza prowadzenie badań dotyczących ich stanu technicznego, głównie pod kątem przewidywania możliwości dalszej bezpiecznej eksploatacji. Do realizacji tego celu najlepiej nadają się badania prowadzone w sposób ciągły. Ciągły monitoring stanu technicznego znalazł dotychczas najszersze zastosowanie w stalowych konstrukcjach mostów. Jest on już powszechnie stosowany w USA, Japonii i Europie Zachodniej, w Polsce stawia dopiero pierwsze kroki. Systemy monitorowania konstrukcji mostowych są głównie systemami rozproszonymi z odpowiednio dużą ilością niezależnych modułów pomiarowych rozmieszczonych w najbardziej niewaligicznych miejscach konstrukcji. Systemy te, ze względu na bardzo wysoki koszt i trudności z okablowaniem, stają się coraz częściej systemami bezprzewodowymi, ponadto wyposażane są w niezależne zasilanie (np. fotopogniwa, energia wiatru), co czyni je całkowicie bezobsługowymi.



Rys. 15. Oscylogramy przyrostów naprężeń dynamicznych w przekroju C-C

Tabela 1. Wytrzymałość zmęczeniowa najbardziej obciążonych elementów konstrukcji przeciwwagi koparki

Punkt pomiarowy	Przekrój wg (rys.1 i 2)	Naprężenie statyczne (od ciężaru własnego wg [1]) [MPa]	Prognozowane ekstremalne naprężenia dynamiczne [MPa]		Prognozowane ekstremalne naprężenia wypadkowe [MPa]		Współczynnik zmienności $\kappa = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$	Dopuszczalne naprężenia zmęczeniowe wg ISO 5049/1 (dla karbu k2) [MPa]	Współczynnik wykorzystania elementu $w = \frac{ \sigma_{\max} }{\sigma_{\text{dop}}}$
			minimum	maksimum	minimum	maksimum			
T 34	C - C _p	123,23	-19,4	5,3	103,83	128,53	0,808	240	0,536
T 31	C - C _l	-117,04	-19,1	23,3	-136,14	-93,54	0,687	240	0,567
T 12	B - B _p	-112,91	-4,8	23,5	-117,71	-89,41	0,760	240	0,490
T 18	E - E _l	96,84	-26,6	34,8	70,24	131,64	0,534	177	0,744
T 19	E - E _p	93,75	-24,3	10,8	69,45	104,55	0,664	206	0,507
T 8	B - B _l	-92,86	-21,2	4,8	-114,06	-88,06	0,772	240	0,475
T 35	C - C _p	-92,13	-2,8	5,9	-94,93	-86,23	0,908	240	0,395

Maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego, ze względu na specyfikę ich pracy, są największymi i najcięższymi maszynami lądowymi produkowanymi przez człowieka. Najbardziej newralgicznym zespołem każdej maszyny podstawowej, decydującym o jej dalszej przydatności eksploatacyjnej, jest ustrój nośny. Dlatego też niezmiernie istotne w praktyce eksploatacyjnej jest poddawanie go różnorodnym badaniom, mającym za zadanie ocenę stanu technicznego. Ze względów przytoczonych w powyższym artykule do najważniejszych badań ustroju nośnego maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego należą badania jego stanu wyłączenia.

Ciągły monitoring stalowych ustrojów nośnych maszyn górnictwa odkrywkowego nie był dotychczas prowadzony. Decydowały o tym głównie ograniczenia sprzętowe oraz brak jednoznacznych metod analizy i oceny danych pomiarowych. W ostatnich latach powyższe trudności zostały w dużej mierze wyeliminowane, głównie na skutek szybkiego rozwoju technik komputerowych. Stąd też zarówno na świecie, jak i w Polsce prowadzone są obecnie prace badawcze zmierzające do budowy i instalacji systemów ciągłego monitoringu na ustrojach nośnych maszyn górnictwa odkrywkowego. Pracami tymi w kraju zajmują się głównie Politechnika Wroclawska, AGH Kraków, Poltegor-Institut i ostatnio firma „SKW” Zgorzelec. Firma ta jako pierwsza w kraju zaprojektowała i wdro-

żyła system ciągłego monitoringu stanu wyłączenia ustroju nośnego przeznaczanego do sterowania poziomem zabezpieczeń głównych mechanizmów koparki KWK 910 eksploatowanej w Kopalni Węgla Brunatnego „TURÓW” SA.

Literatura

- [1] CZUDEK H., WYSZKOWSKI A.: *Trwałość mostów drogowych*. Wyd. W.K.L., Warszawa 2005.
- [2] UHL T., HANC A., TWORKOWSKI L., SĘKIEWICZ K.: *Opis systemu monitorowania mostu z wykorzystaniem analizy modalnej*. Wyd. AGH, Kraków 2007.
- [3] www.smartec.ch/Bibliografy
- [4] www.skyscrapercity.com 2009.10.03
- [5] ALENOWICZ J., ONICHIMIUK M., WYGODA M.: *Obciążenia ekstremalne w procesie projektowania i eksploatacji koparek kołowych przeznaczonych do pracy w gruntach trudno urabialnych kopalń odkrywkowych węgla brunatnego*. Kwartalnik „Górnictwo i Geoinżynieria”, 2/2009.
- [6] ALENOWICZ J.: *Badania diagnostyczne konstrukcji nośnych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego*. „Górnictwo Odkrywkowe”, 2/2004.
- [7] KOWALCZYK M.: *Wykorzystanie zasobu trwałości zmęczeniowej spawanych konstrukcji nośnych maszyn górnictwa odkrywkowego*. „Górnictwo Odkrywkowe”, 3–4/2007.
- [8] KOWALCZYK M.: *Sterowanie intensywnością obciążeń eksploatacyjnych kon-*

strukcji nośnej. „Górnictwo Odkrywkowe”, 6/2009.

- [9] KOCANDA S., SZALA J.: *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*. PWN, Warszawa 1991.
- [10] DUDEK D.: *Elementy dynamiki maszyn górnictwa odkrywkowego*. Oficyna wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, Wrocław 1994.
- [11] ALENOWICZ J., MUSIAŁ W.: *Badania naprężeń w ustroju nośnym dla oceny trwałości zmęczeniowej konstrukcji koparek w oparciu o pomiary wykonane w warunkach eksploatacyjnych*. „Węgiel Brunatny”. Wyd. Spec. 2000.
- [12] DUDA Z. I INNI.: *Wykorzystanie metod CAD/FEM do modelowania przestrzennego konstrukcji stalowych*. www.autor.com.pl.

Artykuł zrealizowano w ramach projektu pt. „Mechatroniczny system sterowania diagnostyki i zabezpieczeń w maszynach górnictwa odkrywkowego” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007–2013.

Jerzy Alenowicz – Poltegor-Institut IGO,
Wrocław

artykuł recenzowany