

---

# WYBRANE PROBLEMY INŻYNIERSKIE

ZESZYTY NAUKOWE  
INSTYTUTU AUTOMATYZACJI PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH  
I ZINTEGROWANYCH SYSTEMÓW WYTWARZANIA

---

## TENSOMETRIA OPOROWA W BADANIACH KONSTRUKCJI NOŚNEJ KOPAREK WIELONACZYNIOWYCH

Krzysztof Dudek<sup>1</sup>, Weronika Huss<sup>2</sup>, Lech Prus<sup>3</sup>

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Zakład Inżynierii Niezawodności i Diagnostyki

<sup>1</sup>krzysztof.dudek@pwr.wroc.pl, <sup>2</sup>veronika.huss@pwr.wroc.pl, <sup>3</sup>lech.prus@pwr.wroc.pl

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano strategię przeprowadzania pomiarów diagnostycznych konstrukcji koparek wielonaczyiniowych za pomocą przetworników tensometrycznych. Przedstawiono zmodyfikowaną rozetę tensometryczną do szacowania metodą otworkową obciążeń od ciężaru własnego ustroju. Omówiono wielkości, związane z obciążeniami dynamicznymi, istotne podczas analizowania stanu konstrukcji oraz sposób przeprowadzania ich pomiaru.

### 1. Wstęp

Koparki kołowe, pracujące w polskich kopalniach węgla brunatnego, to w zdecydowanej większości maszyny znajdujące się w eksploatacji od połowy ubiegłego wieku. Część z nich jest produkcji polskiej, część pochodzi z dawnych NRD i RFN. Ich planowany czas eksploatacji to 25–30 lat. Łatwo więc zauważyć, że dawno już minął przewidywany dla nich okres eksploatacji. Mimo to remontowane i modernizowane, nadal stanowią podstawę potencjału wydobywczego w polskich kopalniach. Takie wydłużenie czasu ich bezpiecznego użytkowania możliwe jest dzięki stałemu monitorowaniu stanu tych stalowych konstrukcji. Wśród stosowanych w tym celu różnorodnych metod pomiarowych (pomiarы wibroakustyczne, czujniki przyspieszeń, termowizja) szczególne znaczenie ma tensometria oporowa. Przetworniki tensometryczne, w kontekście koparek kołowych, znajdują zastosowanie zarówno do pomiarów wielkości statycznych, jak i dynamicznych, doraźnie oraz w pomiarach krótko- i długoterminowych. Niniejszy artykuł zawiera przegląd najważniejszych zastosowań metody tensometrycznej w diagnozowaniu stanu konstrukcji nośnych koparek kołowych do węgla brunatnego.

### 2. Szacowanie obciążeń statycznych metodą otworkową

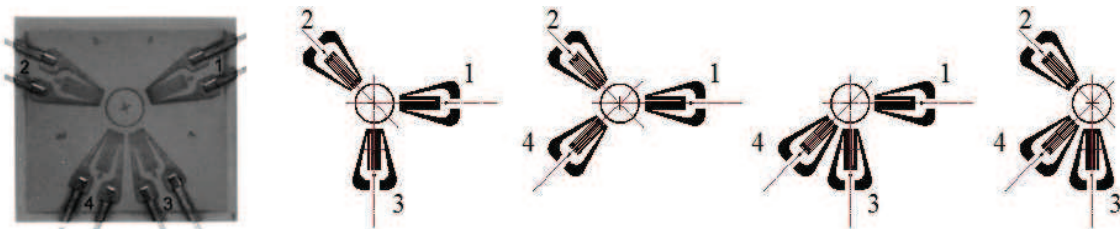
Punktem wyjściowym podczas badań diagnostycznych ustroju nośnego maszyn roboczych jest próba oszacowania naprężeń, pochodzących od ciężaru własnego. W przypadku obiektów o tak dużych gabarytach, jak koparki lub zwałowarki, znajdujących się w ciągłej eksploatacji na ogół nie ma możliwości zamocowania tensometrów na konstrukcji w stanie nieobciążonym. Jediną możliwością wówczas jest miejscowe odciążenie konstrukcji i zmierzenie różnicy w ten sposób wywołanym odkształceniu. W tym celu stosuje się, tak zwaną metodę otworkową (*hole-drilling method*).

Podczas oceny obciążenia masą własną konstrukcji koparek i zwałowarek z użyciem metody otworkowej należy jednak pamiętać o jej ograniczeniach. Taki pomiar naprężeń powierzchniowych uwzględnia także naprężenia, powstające w wyniku procesu produkcyjnego bezpośrednio wykorzystywanych elementów oraz obciążenia, będące skutkiem procesu eksploatacyjnego (niejednorodne odkształcenia plastyczne). Jednocześnie sama metoda obarczona jest błędem, wynikającym z uplastycznienia materiału w pobliżu

otworu odciążającego (lokalna koncentracja naprężeń). Z tej przyczyny o wiarygodności wyniku badań decyduje umiejętny dobór miejsca wykonania pomiaru i staranne jego przeprowadzenie. Wiąże się to z utrudnionym dostępem do wytypowanych w konstrukcji miejsc.

Mając na uwadze powyższe trudności, w Zakładzie Inżynierii Niezawodności i Diagnostyki opracowano modyfikację tradycyjnej rozety tensometrycznej do badań metodą otworkową. Do trzech przetworników tensometrycznych dodany został czwarty, tworzy to układ czterech oddzielnych rozet trójczujnikowych (rys. 1.). Takie rozwiązanie zwiększa dokładność pomiaru i stanowi zabezpieczenie w razie uszkodzenia jednego z przetworników podczas montażu układu lub wiercenia otworu relaksacyjnego. Dla zaprojektowanego układu, eksperymentalnie ustalono wartości współczynników redukcyjnych ( $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ), określono optymalną wartość średnicy otworu odciążającego oraz opracowano wzory korekcyjne dla każdego z tensometrów w rozecie (uwzględnienie niewspółosiowości otworu odciążającego i środka rozety) [1].

Jak wynika z badań eksperymentalnych, obciążenia statyczne pochodzące od ciężaru własnego koparek wielokrotnie przewyższają obciążenia dynamiczne (tab. 1.).



Rys. 1. Rozeta czteroczujnikowa TFrw-2/120 i jej możliwe interpretacje w postaci rozet trójczujnikowych

### 3. Diagnostyka stanu konstrukcji obciążanej dynamicznie

Koparki kołowe są obiektami przestrzennymi, rozległymi i złożonymi, a wypadkowy wektor sił oddziałujących na nie jest losowo zmienny, zarówno co do kierunku, jak i modułu. Mimo tego faktu możliwe jest – między innymi w celach diagnostycznych - sprowadzenie wszystkich sił zewnętrznych do trzech wektorów wzajemnie do siebie prostopadłych. Siły te to:

- moment skręcający w płaszczyźnie pionowej;
- moment skręcający w płaszczyźnie poziomej;
- siła wzdłużna.

Takie zamodelowanie obciążeń umożliwia analizę zjawisk dynamicznych zachodzących w konstrukcji. Przebiegi tych niezależnych od siebie wartości uzyskuje się w wyniku odpowiedniego rozmieszczenia i połączenia czujników tensometrycznych.

Wybór punktów pomiarowych dokonywany jest na podstawie statycznej analizy konstrukcji i oddziałujących sił zewnętrznych. Wybierane są miejsca, w których spodziewane jest otrzymanie maksymalnych wartości momentów zginających, a tym samym wyraźne oddzielenie sygnału pomiarowego od zakłóceń. Podstawowy przekrój pomiarowy znajduje się na wysięgniku urabiającym. Podyktowane jest to bliskością miejsca przyłożenia obciążenia zewnętrznego, a co za tym idzie, możliwością otrzymania sygnału relatywnie niezakłóconego filtracyjnym oddziaływaniem pozostałych elementów konstrukcji. Podobne układy pomiarowe są również instalowane w wielu innych punktach ustroju. Przeprowadzenie szeregu takich pomiarów na koparkach różnych konstrukcji, połączone z analizą korelacyjną uzyskanych wskazań, pozwoliło na zminimalizowanie liczby punktów pomiarowych [2] i w większości przypadków sprowadzenie ich do trzech (rys. 2).



Rys. 2. Orientacyjne rozmieszczenie podstawowych przekrojów pomiarowych

Następnym krokiem podczas analizy dynamiki konstrukcji koparki wieloczerpakowej jest wyznaczenie wartości jej częstotliwości własnych. W tym celu poddaje się ustrój tzw. skalowaniu, to jest działaniu siły o znanej wartości maksymalnej i przebiegu zbliżonym do delty Diraca. Siłę tę przykłada się w miejscu właściwym dla pojawiania się sił wymuszających – na kole czerpakowym. W ten sposób wzbudzone zostaje wystarczająco rozległe widmo częstotliwości, z którego podczas swobodnych drgań obiektu wyłaniają się wartości charakterystyczne dla danej maszyny. Ze względu na wspomniane wcześniej uprzywilejowane znaczenie wysięgnika urabiającego takie przeprowadzenie skalowania konstrukcji koparki kołowej pozwala również potraktować wysięgnik ten jako swego rodzaju dynamometr. Dzięki temu możliwa jest interpretacja wartości pojawiających się w przebiegach drgań, rejestrowanych podczas krótko- i długoterminowych pomiarów.

Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów (długoterminowych) przeprowadza się pomiary krótkoterminowe. Ich wyniki służą głównie do weryfikacji analizy korelacji przeprowadzonej na podstawie skalowania oraz do wstępnego oszacowania wielkości charakteryzujących przebieg obciążenia.

Prowadzone w ostatnim etapie badań pomiary długoterminowe mają na celu dostarczenie danych do oszacowania parametrów rozkładów prawdopodobieństwa wartości, przyjmowanych przez ustalone wcześniej wielkości, charakteryzujące przebieg obciążenia w czasie. Powtarzanie tych pomiarów w późniejszym czasie i porównywanie informacji z nich wynikających stanowi podstawę diagnostyki stanu konstrukcji koparki.

Rezultatem tak przeprowadzonych badań jest zestaw wielkości, zawierający wartości naprężeń, częstotliwości i tłumień charakterystycznych dla każdej maszyny. Część z nich, dotyczącą wysięgnika koła czerpakowego, przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie wartości naprężeń oraz parametrów drgań pionowych wysięgnika urabiającego wybranych koparek kołowych

	$\sigma_{st}$ [MPa]	$\sigma_{dyn}$ [MPa]	$f_{01}$ [Hz]	$f_{02}$ [Hz]	$f_{w1}$ [Hz]	$f_{w2}$ [Hz]	$\delta$
SchRs-900	143	56	0,42	1,43	0,38	1,40	0,06
KWK-1200M	78	8	0,87	–	0,63	3,94	0,11
SchRs-4600/30	173	28,8	0,39	1,30	0,56	1,13	0,05

$\sigma_{st}$  – naprężenia statyczne,  $\sigma_{dyn}$  – naprężenia dynamiczne,  $f_{01}$ ,  $f_{02}$  – częstotliwości własne,  $f_{w1}$ ,  $f_{w2}$  – częstotliwości drgań wymuszonych,  $\delta$  – bezwymiarowy współczynnik tłumienia

#### 4. Techniczne aspekty realizacji pomiarów drgań koparek kołowych

Koparki do węgla brunatnego tworzą grupę największych ruchomych konstrukcji naziemnych skonstruowanych przez człowieka. Jest to w równym stopniu powód do dumy, co przyczyna problemów, również związanych z diagnozowaniem ich stanu technicznego. Punkty pomiarowe rozłożone są przestrzennie i rozległe, a niektóre z nich przemieszczają się względem siebie. W tej sytuacji pierwszym nasuwającym się rozwiązaniem jest zastosowanie przewodów, łączących wszystkie czujniki z jednostką rejestrującą. Takie rozwiązanie powoduje jednak zwiększone zakłócenia w rejestrowanych sygnałach, sprzyja awaryjności i utrudnia eksploatację układu. Wymienione trudności były inspiracją do zaprojektowania systemu, który pozwalałby na prowadzenie monitoringu całej konstrukcji, a jednocześnie charakteryzował się łatwością obsługi, wysoką jakością rejestrowanego sygnału i niskim kosztem wykonania oraz użytkowania. W rezultacie powstał rozproszony system do akwizycji danych. Składa się on z dowolnej (w zależności od potrzeb) liczby lokalnych rejestratorów, z których każdy wyposażony jest w 11 wejść (analogowych i dwustanowych), oryginalnie przewidzianych na przetworniki tensometryczne, akcelerometry i czujniki impulsowe. Niezbędne okablowanie ograniczone jest do podłączenia czujników do odpowiednich wejść lokalnego rejestratora. Rejestratory takie, rozmieszczone w najdalszych częściach maszyny i podłączone do dowolnego rodzaju czujników, mogą być zsynchronizowane ze sobą za pomocą tak zwanej metki czasowej. Dane mogą być zapisywane na pamięci typu flash lub przesyłane do rejestratora głównego poprzez połączenie radiowe na częstotliwości 2,5 GHz. Możliwy jest również przesył informacji w przeciwną stronę - do wszystkich lub tylko do wybranych rejestratorów lokalnych. Konstrukcja tych rejestratorów umożliwia jednoczesne próbkowanie na każdym kanale sygnału do częstotliwości 1 kHz oraz wykonywanie wstępnej analizy danych. Zainstalowany zegar czasu rzeczywistego jest pomocny przy interpretacji wydarzeń zaobserwowanych w sygnale.

Do sterowania pracą całego systemu diagnostycznego opracowano specjalne oprogramowanie pozwalające na rejestrację i przetwarzanie sygnałów takich jak: częstotliwość próbkowania, długość czasu zapisu, wartości wzmacnień, parametry filtra. Umożliwia ono również nałożenie żądanych warunków na rozpoczęcie/zakończenie rejestracji lub przesłanie sygnału alarmującego (na przykład: przekroczenie wartości określonych wielkości w sygnale). Pozwala także na podgląd rejestrowanych przebiegów oraz dostarcza informacji na temat stanu funkcjonowania całego zestawu - wypełnienie pamięci, poprawność działania kanałów, monitoring stanu zasilania.

System ten został zapoczątkowany w latach osiemdziesiątych i, ewoluując wraz z postępem elektroniki, jest stale wykorzystywany w Zakładzie Inżynierii Niezawodności i Diagnostyki do krótko- i długoterminowego monitorowania stanu konstrukcji maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego.

#### 5. Podsumowanie

Przetworniki tensometryczne stanowią podstawowe narzędzie pomiarowe przy wnioskowaniu o stanie technicznym ustrojów nośnych koparek wieloczerpakowych. W tym celu stosowane są przez Zakład Inżynierii Niezawodności i Diagnostyki od połowy lat siedemdziesiątych zeszłego wieku. Do ich obsługi i akwizycji uzyskiwanych przy ich użyciu danych, szczególnie w warunkach konstrukcji koparek do węgla brunatnego, rozwinięto system rozproszonej akwizycji danych. System ten, wraz z przetwornikami tensometrycznymi lub dowolnymi wymaganymi czujnikami, może również znaleźć zastosowanie w diagnozowaniu stanu innych obiektów wielkogabarytowych.

## Literatura

1. Dudek K.: Dokładność metody otworkowej w ocenie poziomu naprężeń własnych w elementach ustrojów nośnych maszyn roboczych. „Problemy maszyn roboczych” 2004, z. 24.
2. Dudek D.: Minimalizacja wektora parametrów mierzalnych w symulacyjnym modelu procesu obciążenia koparek kołowych. Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej Nr 64, seria „Konferencje” Nr 19. Wrocław 1991.
3. Babiarsz S., Dudek D.: Kronika awarii i katastrof maszyn podstawowych w polskim górnictwie odkrywkowym. Wrocław: Ofic. Wyd. Pol. Wroc. 2007.
4. Huss W., Kopczyk J., Prus L.: Monitoring stanu eksploatacyjnego maszyn przy pomocy rozproszonego systemu akwizycji danych. „Górnictwo Odkrywkowe” 2009, Vol. 4-5, s. 57-59
5. Dudek D.: Elementy dynamiki maszyn górnictwa odkrywkowego : akwizycja sygnałów, analiza układów. Wrocław : Ofic. Wyd. Pol. Wroc.1994.

## STRAIN GAUGES IN INSPECTION OF BUCKET-WHEEL EXCAVATOR'S STEELWORK CONDITION

**Summary:** The article presents a strategy of conducting diagnostic measurements of main structure of bucket-wheel excavators using strain gauge transducers. A modified strain rosette was introduced, for estimating the burden of the own weight of the system by the hole-drilling method. The quantities connected with dynamic loads, which are significant for analysis of structure state and the way of conducting their measurement, were described.



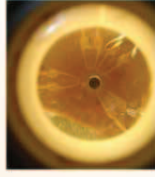
# Tensometria oporowa w badaniach konstrukcji nośnej koparek wielonaczyniowych

Krzysztof Dudek<sup>1</sup> Weronika Huss<sup>2</sup> Lech Prus<sup>3</sup>

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Zakład Inżynierii Niezawodności i Diagnostyki  
<sup>1</sup>krzysztof.dudek@pwr.wroc.pl <sup>2</sup>weronika.huss@pwr.wroc.pl <sup>3</sup>lech.prus@pwr.wroc.pl

## Metoda Otworkowa

- ◆ szacowanie obciążeń od ciężaru własnego
- ◆ ocena poprawności wykonania obróbki cieplnej



## Tensometryczny pomiar drgań konstrukcji

- ◆ diagnostyka stanu konstrukcji
- ◆ obciążenia ekstremalne



## Dodatkowe pomiary

- ◆ akcelerometry
- ◆ wibrometr



Politechnika Wrocławska  
Wydział Mechaniczny



Zakład Inżynierii Niezawodności i Diagnostyki