

## METODA WYZNACZANIA WARTOŚCI OSTRZEGAWCZYCH I KONTROLNYCH SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO Z WYKORZYSTANIEM KART KONTROLNYCH SHEWHARTA \*

Paweł MIKOŁAJCZAK, Arkadiusz RYCHLIK

Katedra Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Wydział Nauk Technicznych,  
Uniwersytet Warmiński – Mazurski w Olsztynie

10-718 Olsztyn ul. Oczapowskiego 11, e-mail: pawel.mikolajczak@uwm.edu.pl

### Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania wartości ostrzegawczych i kontrolnych sygnału drganiowego z wykorzystaniem Kart Kontrolnych Shewharta. Metoda ta została opracowana dla potrzeb diagnostyki wirówek cukrowniczych typu ACCW 1000.

Słowa kluczowe: Karty Kontrolne Shewharta, wartości graniczne, drgania, wirówka cukrownicza, diagnostyka.

### WARNING AND CONTROL VALUES ESTIMATION METHOD OF VIBRATION SIGNAL WITH SHEWHART CONTROL CARDS

#### Summary

In the paper there was presented the warning and control values estimation method of vibration signal with Shewhart control cards. The method was evaluated in purpose of diagnostic of sugar centrifuge type ACCW 1000.

Keywords: Shewhart Control Cards, boundary value, vibration, sugar centrifuge, diagnostic.

#### 1. WPROWADZENIE

W eksploatacji maszyn i urządzeń, czynnikiem stymulującym rozwój diagnostyki jest odpowiedzialność realizowanych funkcji przez te obiekty techniczne. Odpowiedzialność ta może być określana w różnych kategoriach np.: bezpieczeństwa, efektywności produkcji, niezawodności. Obecnie jednak zaczyna odgrywać znaczącą rolę kryterium ekonomiczne tzn. takie, które wymaga od wdrażanych metod diagnozowania pewności decyzji diagnostycznych, przy możliwie niskich nakładach finansowych ponoszonych na ich stosowanie. Spełnienie takich założeń jest szczególnie trudne dla maszyn małych i średnich maszyn, których liczba jest na ogół znacząca w danym systemie eksploatacji. W tym przypadku zastosowanie pełnego monitoringu jest nieopłacalne, a z kolei pozostawienie bez nadzoru diagnostycznego tych maszyn sprawia, że stają się niespełnione inne ważne kryteria.

Opracowując poszczególne metody diagnozowania, należy brać również pod uwagę wymagania zlecniodawcy związane z prostotą wykonania pomiarów i łatwością interpretacji ich wyników. Dopiero gdy faktycznie wymagana jest interwencja wyspecjalizowanego diagnosty (np.

potrafiącego odpowiednio zinterpretować wyniki analizy widmowo-częstotliwościowej drgań), powinien on być zaangażowany do takich działań. Ma to bezpośredni związek z polityką zatrudnienia, często na jednego inżyniera działu utrzymania maszyn przypada kilkadziesiąt maszyn, za których stan jest on odpowiedzialny. Muszą więc być włączeni do systemu zbierania informacji diagnostycznych inni pracownicy (np. działu produkcji), od których jednak nie można oczekiwać, że będą wdrażali złożone techniki diagnostyczne. Związany jest z tym problem wyznaczenia wartości ostrzegawczych i krytycznych sygnałów diagnostycznych, dla konkretnej grupy maszyn, eksploatowanych w określonych warunkach. Ponieważ w nowoczesnych przedsiębiorstwach wdrażane są systemy jakości, które wymagają kontroli procesów produkcyjnych i wykorzystuje się przy tym Karty Kontrolne Shewharta (KKS) [3], dokonano próby zastosowania tej metody dla celów diagnostycznych, tworząc KKS i linie kontrolne dla wartości średniokwadratowych amplitud prędkości drgań, generowanych przez wirówki cukrownicze eksploatowane w Cukrowni Głinojeck S.A.

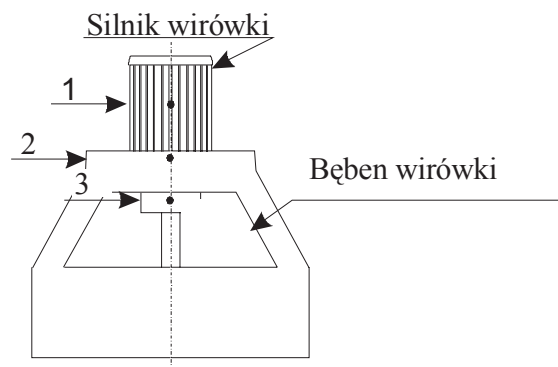
\* Pracę wykonano w ramach projektu badawczego KBN nr: 5T07B03622

## 2. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

Obiektami badań były wirówki cukrownicze typu ACWW 1000. Są to maszyny użytkowane kampanijnie, jednak w czasie trwania kampanii należy je zaliczyć do grupy maszyn funkcjonujących w sposób ciągły. Teoretycznie obciążenie tych wirówek powinno być stałe, jednak ze względu na ciągłe napełnianie i opróżnianie występują zmiany w rozłożeniu cukrzycy w bębnie, a tym samym zmienia się wartość sił odśrodkowych i emitowanych drgań. W czasie badań diagnostycznych, w okresie przygotowawczym do kampanii można z powodzeniem stosować kryteria określone w normie: „Metody pomiarów i oceny drgań” (PN-90/N-01358), przypisując wirówki ACCW 1000 do II grupy maszyn wg tej normy. Można wówczas uruchamiać pojedynczo wybraną wirówkę i przy stałym obciążeniu dokonywać odpowiednich pomiarów i analiz. Jednak w czasie użytkowania kampanijnego ocena stanu technicznego oparta na metodzie określonej w normie staje się utrudniona ze względu na:

- niestacjonarność sygnału,
- zmienność obciążeń,
- przenoszenie drgań z innych maszyn.

Na rys. 1 przedstawiono schemat badanych wirówek z zaznaczonymi punktami pomiarowymi. Natomiast w tab. 1 podano podstawowe ich dane techniczne.



Rys.1. Schemat wirówki ACWW 1000 z zaznaczonymi punktami pomiarowymi

Tab.1. Podstawowe dane techniczne wirówek ACWW 1000

Parametr techniczny	Wartość
Prędkość obrotowa wału	1750 obr/min
Moc silnika	55 kW
Ładowność bębna	200 kg
Rodzaj sprzęgła	nierozłączne, elastyczne

## 4. CEL BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Celem badań eksperymentalnych było wyznaczenie wartości ostrzegawczych i kontrolnych wartości średniokwadratowej amplitudy prędkości drgań w odbiorze szerokopasmowym (7-1100 Hz) dla grupy wirówek ACCW 1000 eksploatowanych w Cukrowni Głinojeck.

## 5. APARATURA POMIAROWA

W badaniach wykorzystano komputerowy analizator drgań KSD-400 (rys.2), który jest uniwersalnym układem pomiarowo-przetwarzającym i wnioskującym o stanach niezdatności maszyny na podstawie analizy sygnałów diagnostycznych np.: drgań, ciśnienia, temperatury, prędkości obrotowej (jednocześnie można wykorzystać 16 czujników pomiarowych). Zmierzone wartości sygnałów są przetwarzane przez multipleksowaną, szesnastowejściową kartę przetwornika analogowo – cyfrowego i przekazywane do mikroprocesora notebooka, gdzie na podstawie odpowiedniego oprogramowania są dalej przetwarzane. Szczegółowe informacje na temat danych technicznych można znaleźć na stronie internetowej: [www.sensor.pl](http://www.sensor.pl).



Rys. 2. Komputerowy analizator diagnostyczny KSD-400  
 1 – walizka z kartami przetwornikowymi, 2 – notebook , 3 – czujniki indukcyjne drgań,  
 4 – czujnik " foto ", 5 – czujnik piezoelektryczny, 6 – przewody, 7 – czujniki  
 wiroprowadowe z przewodami

## 6. WYBÓR METODY WYZNACZENIA WARTOŚCI OSTRZEGAWCZYCH I GRANICZNYCH

W literaturze przedmiotu (np.: [5]) można znaleźć słuszne stwierdzenie, że: stosowanie diagnostyki technicznej w zakresie określania granic stanu zdatności jest oparte na dwóch głównych zagadnieniach:

- wyznaczenia symptomu współmienniczego ze stanem technicznym maszyny;
- określenia wartości granicznych mierzonych symptomów.

Jednak należy również zwrócić uwagę, że warto wyznaczyć oprócz wartości granicznej, której przekroczenie oznacza wejście maszyny w stan przyspieszonego zużycia, cechującego się dużym prawdopodobieństwem awarii, wartość ostrzegawczą symptomu diagnostycznego. Wartość ta powinna sygnalizować, że istnieje możliwość rozwoju niezdatności i należy zwiększyć częstotliwość diagnostycznych badań kontrolnych lub zastosować bardziej złożone metody diagnostyczne w celu identyfikacji niezdatności.

W zagadnieniach diagnostyki bezpośredniej i w eksperymentach czynnych ustalenie wartości granicznej dla zorientowanych uszkodzeniowo symptomów stanu jest stosunkowo proste. Problem komplikuje się dla badań stanu w diagnostyce pośredniej, gdzie począwszy od wyboru punktu odbioru sygnału, zmiennej jakości wytwarzania i napraw tych samych maszyn, zmiennych warunków eksploatacji ujawniających te same uszkodzenia z różną intensywnością, a w przypadku wirówek cukrowniczych również zmienna gęstość masy (cukrzyca) wypełniającej - ustalenie stanu

granicznego na podstawie symptomu jest niepomernie trudniejsze.

Realizowane najczęściej w praktyce przemysłowej bierne i biernoczynne eksperymenty diagnostyczne dostarczają symptomów stanu, które porównywane są podczas wnioskowania z wartościami granicznymi dostępnymi w wielu normach krajowych, zagranicznych, branżowych lub z danymi z własnych doświadczeń. Gdy jednak dla badanej maszyny brak jest takich norm z pomocą może tu przyjść statystyczny opis losowego procesu eksploatacji za pomocą gęstości rozkładu lub częstości występowania obserwowanego symptomu.

Oszacowanie wartości granicznej symptomu dla bezpiecznego wyłączenia maszyny przed uszkodzeniem można zrealizować za pomocą metod statystycznych lub przy pomocy niezawodności symptomowej, wykorzystującej stosowaną politykę naprawczą określającą dopuszczalny spadek niezawodności funkcjonalnej. Formułę na wyznaczenie  $S_{gr}$  minimalizującą prawdopodobieństwo awarii przy zadanym, dopuszczalnym prawdopodobieństwie zbędnej naprawy  $P_N$  (wg.Neymana-Pearsona) można zapisać w postaci:

$$P_g \int_{S_{gr}}^{\infty} \left( \frac{S}{X_g} \right) dS = P_N,$$

Według Birgera[1]: wartość  $P_n = k(1-P_g)$ , gdzie:  $k$ -współczynnik zapasu ( $k = 1-3$  dla uszkodzeń zwykłych,  $k = 3-10$  dla uszkodzeń niebe-

zpiecznych),  $P_g$  - gotowość maszyn wyznaczana z zależności  $P_g = N_z / (N_z + N_n)$ , gdzie:  $N_z$  - liczba maszyn zdalnych,  $N_n$  - liczba maszyn niezdatnych.

Po przekształceniach [2] otrzymujemy zależność:

$$S_{gr} = \bar{X} + \sigma \sqrt{\frac{P_g}{2P_N}}$$

gdzie  $\bar{X}$  - wartość średnia sygnału,  $\sigma$  - odchylenie standardowe.

Otrzymane oszacowanie wartości granicznej symptomu oparte na wartości średniej, dyspersji i polityce naprawczej stwarza dobre podstawy do prostego wyznaczania wartości granicznych badanych miar stanu w praktyce przemysłowej. Jednak w przypadku maszyn kampanijnych, funkcjonujących bez rezerw niezawodnościowych należało by przyjąć, że każde uszkodzenie jest wysoce niebezpieczne ze względu na zaburzenia ciągłości produkcji oraz pożądana jest wysoka gotowość  $P_g$ , co w konsekwencji prowadzi do wyznaczenia wartości  $S_{gr}$ , która nieznacznie będzie się różniła od wartości średniej sygnału. Przyjęcie takiej wartości granicznej może spowodować, że będzie występowała nieuzasadniona, nadmierna liczba alarmów diagnostycznych.

W diagnostyce procesów przemysłowych wykorzystuje się często Karty Kontrolne Shewharda (KKS) [3]. Ze względu na to, że generacja drgań w wirówkach cukrowniczych uwarunkowana jest stanem technicznym maszyn oraz stanem procesu produkcyjnego (gęstość cukrzycy, zmienna ilość podawanego surowca w jednostce czasu) wydaje się uzasadnionym dokonanie próby zastosowania tej metody do wyznaczenia wartości ostrzegawczych i kontrolnych amplitudy prędkości drgań w odbiorze szerokopasmowym (7-1100 Hz). Spośród rodzajów KKS [4] najbardziej odpowiednią do realizacji tego

zadania wydaje się karta typu „ $\bar{X} - \sigma$ ”. Oczywiście w przypadku analizy drgań sens ma wyznaczenie jedynie górnych granic ostrzegawczych i kontrolnych, które definiowane są w następujący sposób:

- górna linia ostrzegawcza –  
UWL =  $\bar{X} + 2\sigma$ ,
- górna linia kontrolna (graniczna) –  
UCL =  $\bar{X} + 3\sigma$ .

Ważnym przy doborze wartości zmiennych losowych jest uwzględnienie wartości sygnału odpowiadającym różnym stanom technicznym, jednak nie powinno się brać do wyznaczenia UWL i UCL wartości, które towarzyszyły awaryjnym wyłączeniom z ruchu badanych maszyn. Przyjęcie ich może spowodować, że wyznaczone wartości ostrzegawcze i graniczne będą zbyt mało rygorystyczne.

## 7. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W celu wyznaczenia wartości zmiennej losowej (badanego sygnału diagnostycznego) występujących w warunkach eksploatacyjnych wykorzystano formę bierną i bierno-czynną eksperymentu diagnostycznego [4]. Badania przeprowadzono na grupie 13 wirówek ACWW 1000, dokonując pomiarów wartości RMS amplitudy prędkości drgań ( $V_{RMS}$ ) w punktach pomiarowych pokazanych na rys.1. Otrzymane wyniki pochodzą z dwóch kampanii cukrowniczych (2001 i 2002 r.). Pomiary powtarzano trzykrotnie w czasie trwania tych kampanii (na początku kampanii, w drugim miesiącu i na końcu kampanii). W tab.2. podano wyniki obliczeń wartości  $S_{gr}$  oraz UWL i UCL dla  $V_{RMS}$  uzyskane na podstawie uśrednionych wyników pomiarów z wszystkich powtórzeń, dla każdej z badanych wirówek, z dwóch okresów eksploatacji, dla punktów pomiarowych 1,2 i 3.

Tab.2. Wyniki obliczeń wartości  $S_{gr}$ , UWL i UCL dla  $V_{RMS}$ , dla trzech punktów pomiarowych

Parametr statystyczny	$V_{RMS}$ w punkcie pomiarowym nr 1 [mm/s]	$V_{RMS}$ w punkcie pomiarowym nr 2 [mm/s]	$V_{RMS}$ w punkcie pomiarowym nr 3 [mm/s]
$\bar{X}$	5,98	3,98	3,90
$\sigma$	3,19	1,81	1,89
<b>UWL</b>	<b>12,36</b>	<b>7,60</b>	<b>7,69</b>
<b>UCL</b>	<b>15,55</b>	<b>9,41</b>	<b>9,58</b>
$P_g$	0,9	0,9	0,9
$P_n$	0,05	0,05	0,05
<b><math>S_{gr}</math></b>	<b>6,46</b>	<b>4,25</b>	<b>4,19</b>

Jak wynika z uzyskanych obliczeń, znacznie różni się wartości  $S_{gr}$  od UCL, których interpretacja powinna być analogiczna – wykonać diagnostykę z wykorzystaniem złożonych metod i wyłączyć maszynę z ruchu. Przyjęcie wartości  $S_{gr}$  za

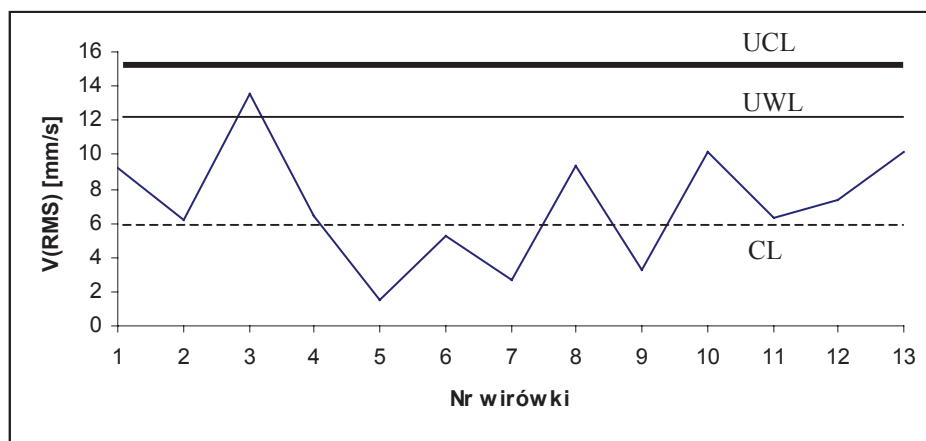
graniczną spowodowało by nadmierną liczbę zatrzymań wirówek, o których wiadomo z praktyki eksploatacyjnej, że spełniają swoją funkcję i zachowany jest odpowiedni poziom bezpieczeństwa. Porównując również wieloletnie

wyniki badań wibroakustycznych można stwierdzić, że poziom amplitudy drgań ( $V_{RMS}$ ) wirówek ACWW 1000 zawierający się w przedziale 4-7 mm/s jest zadawalającym, natomiast przekraczając wartość 12 mm/s były konieczne interwencje naprawcze. Świadczy to o tym, że wyznaczona wartość graniczna na podstawie wartości średniej, dyspersji i polityce naprawczej nie jest odpowiednia dla rozpatrywanej grupy maszyn, natomiast obliczone wartości UWL i UCL dobrze dopasowują alarm ostrzegawczy i graniczny do eksploatacyjnej praktyki wirówek cukrowniczych. Warto również zauważyć, że wyznaczone wartości ostrzegawcze i kontrolne różnią się dla punktu pomiarowego nr 1 od 2 i 3.

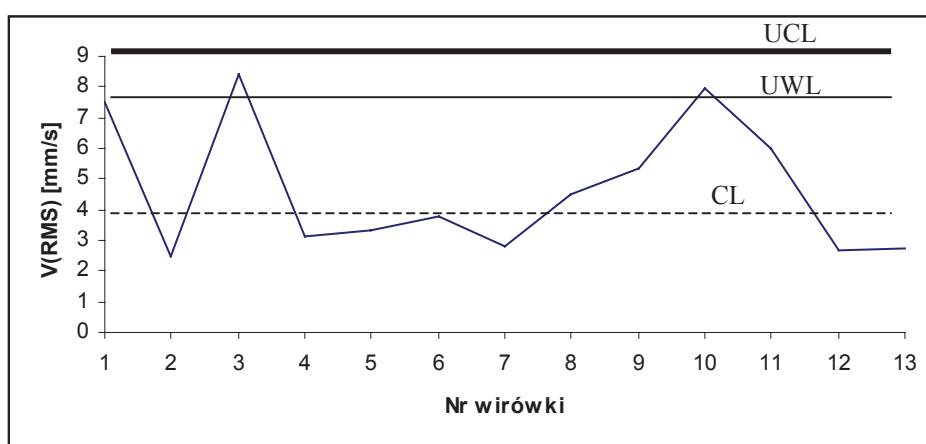
Ma to związek ze znacznym wpływem obciążenia pochodzącego od masy wirującej na drgania dolnego łożyska. Należy dlatego w opracowywaniu normy dla wirówek typu ACWW uwzględnić tą różnicę.

Na rys. 2-4 podano przykłady KKS dla badanej grupy wirówek z zaznaczonymi liniami ostrzegawczymi i kontrolnymi dla poszczególnych punktów pomiarowych.

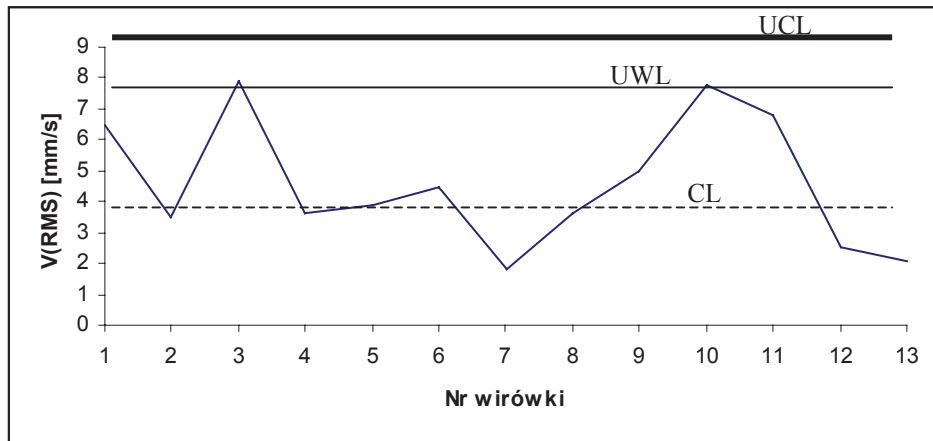
W innym sposobie konstruowania KKS można odnosić się tylko do wybranej maszyny, zaznaczając wartości mierzonego sygnału dla kolejnych pomiarów (wartości  $V_{RMS}$  w funkcji czasu). Przykład takiej karty podano na rys.5.



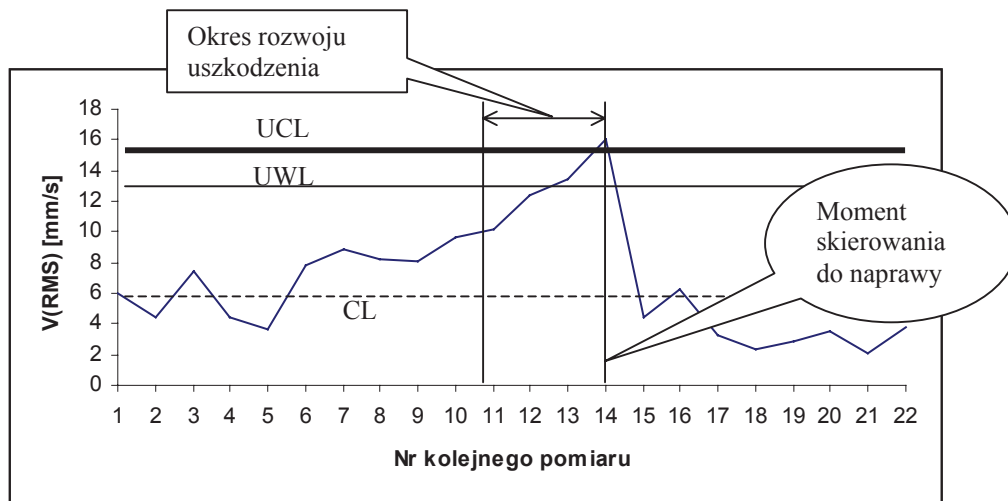
Rys.2. Wartości RMS amplitudy prędkości drgań dla 13 wirówek pomierzone na koniec kampanii 2002 r., - punkt pomiarowy nr1



Rys.3. Wartości RMS amplitudy prędkości drgań dla 13 wirówek pomierzone na koniec kampanii 2002 r., - punkt pomiarowy nr2



Rys.4. Wartości RMS amplitudy prędkości drgań dla 13 wirówek pomierzone na koniec kampanii 2002 r., - punkt pomiarowy nr3



Rys.5. Wartości RMS amplitudy prędkości drgań dla 22 kolejnych pomiarów wirówki nr 6 - punkt pomiarowy nr 1

Z rys. 2-4 wynika, że żadna z badanych wirówek nie wymaga awaryjnego zatrzymania, natomiast wirówki nr: 3 i 10 wymagają częstszej kontroli diagnostycznej. Przykład podany na rys. 5, pokazuje możliwość wykorzystania KKS do analizy zmian wartości badanego sygnału i podjęcie w odpowiednim momencie działań naprawczych.

#### 8. METODA DIAGNOZOWANIA WIRÓWEK ACWW 1000 Z UWZGLĘDNIENIEM WARTOŚCI OSTRZEGAWCZYCH I KONTROLNYCH WYZNACZONYCH NA PODSTAWIE KKS

Na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych dotyczących wyznaczania wartości kontrolnych i ostrzegawczych sygnału drganiowego, opracowano metodę diagnozowania

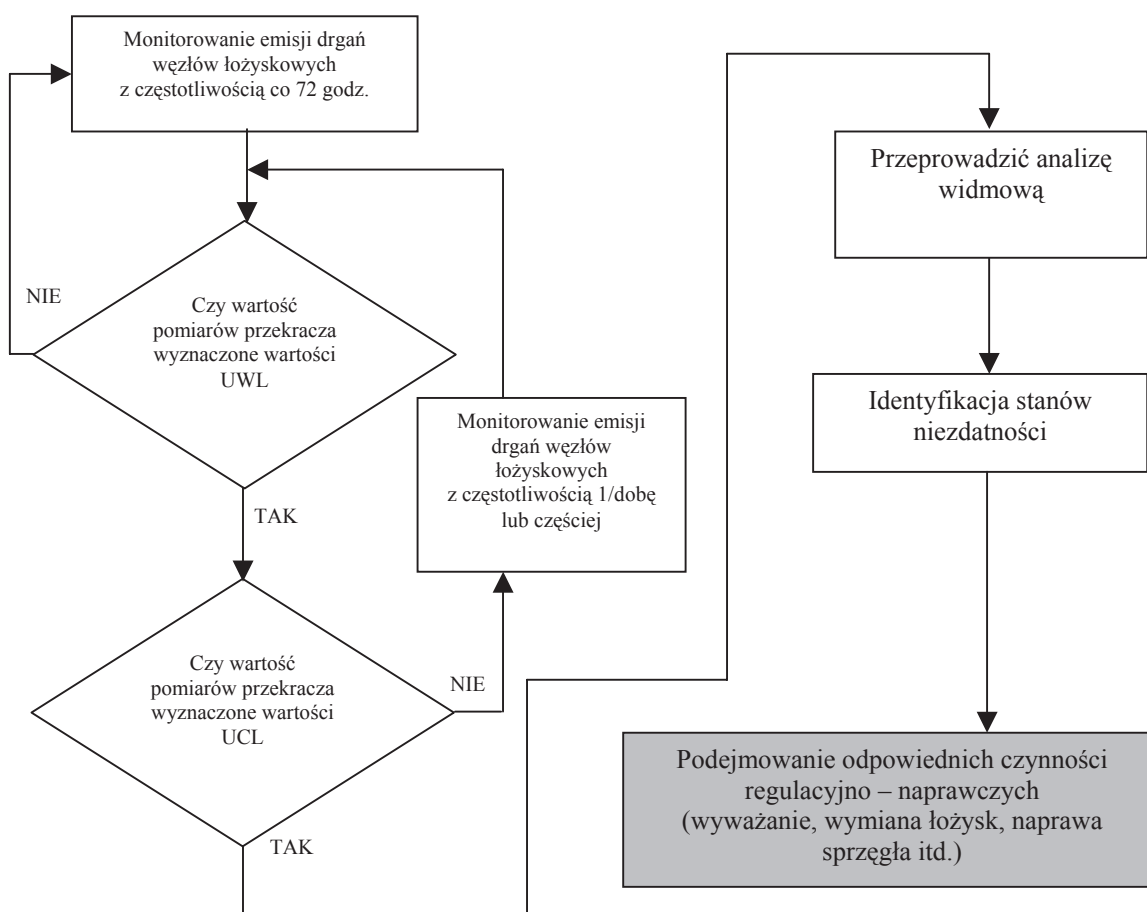
stanu wirówek ACWW 1000, w czasie trwania kampanii cukrowniczej, której ideę przedstawiono w postaci algorytmu pokazanego na rys. 5.

W przedstawionej metodzie zaproponowano wykonywanie podstawowych, kontrolnych pomiarów drgań z częstością co 72 godz. pracy wirówek. Na podstawie prowadzonych wieloletnich badań wirówek tego typu nie stwierdzono przypadku, w którym rozwój uszkodzeń związanych z normalnym, eksploatacyjnym zużywaniem się części wykazywał się intensywnością mogącą w ciągu trzech dni doprowadzić ze stanu zdatności do stanu krytycznego wirówki, który mógłby zagrozić procesom produkcyjnym lub bezpieczeństwu ludzi. Należy zaznaczyć, że wirówki są pod stałą kontrolą personelu działu produkcyjnego i losowe,

nieprzewidziane zdarzenia są natychmiast zgłaszane do działu utrzymania maszyn.

W przypadku przekroczenia wartości ostrzegawczych zaleca się prowadzenie pomiarów diagnostycznych ze zwiększoną częstotliwością (1 raz dziennie), których celem jest stwierdzenie, czy podwyższenie wartości sygnału było chwilowym, czy też utrzymuje się dłużej. W sytuacji

przekroczenia wartości granicznej lub utrzymywania się wartości badanego sygnału powyżej wartości ostrzegawczej, należy przeprowadzić analizę amplitudowo – częstotliwościową. Wyniki tej analizy pozwalają na ogół zidentyfikować większość niezdatności występujących w rozpatrywanych maszynach.



Rys. 6. Algorytm metody diagnozowania stanu wirówek ACWW 1000

## 8. PODSUMOWANIE

Podsumowując pracę należy stwierdzić, że na podstawie wyznaczonych wartości ostrzegawczych i kontrolnych (granicznych) opracowano oryginalną metodę identyfikacji stanu wirówek ACWW 1000. Umożliwia ona zredukowanie czasu diagnozowania przy zastosowaniu prostych przyrządów diagnostycznych – miernika wartości RMS amplitudy drgań. Przyrządami tymi mogą posługiwać się pracownicy, niekoniecznie będący wykwalifikowanymi diagnostami. Dopiero po stwierdzeniu przekroczenia wartości kontrolnych badanych sygnałów, w opracowanej metodzie znajduje zastosowanie bardziej zaawansowana

diagnostyka wibroakustyczna, gdzie wymaga się od diagnostów znajomości identyfikacji stanów na podstawie analizy widma amplitudowo-częstotliwościowego. Wyznaczone wartości graniczne (linie kontrolne) UWL i UCL dobrze dopasowują alarmy diagnostyczne do rzeczywistego stanu wirówek, na ich podstawie można opracować normę odpowiadającą konkretnym warunkom eksploatacyjnym.

**LITERATURA**

- [1] Birger I.Y.: *Technical diagnostics*, Nauka Moscov 1978.
- [2] Cempel C.: *Wibroakustyka stosowana*, PWN Warszawa 1989.
- [3] Hamrol A., Mantura W.: *Zarządzanie jakością. Teoria i praktyka*. PWN, Warszawa – Poznań, 1998.
- [4] Szkoda J.: *Wykorzystanie kart kontrolnych Shewharda do diagnozowania stanów statystycznego uregulowania procesów produkcyjnych*; Diagnostyka nr 26, PTDT Olsztyn 2002.
- [5] Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn*; Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1996.
- 



Dr inż. Paweł Mikołajczak pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Eksploatacji i Pojazdów i Maszyn Wydziału Nauk Technicznych UWM w Olsztynie. Od wielu lat zajmuje się diagnostyką wibroakustyczną, jest autorem wielu artykułów i ekspertyz z tego zakresu. Jest również głównym projektantem i wykonawcą systemu informatycznego wspomagającego utrzymanie maszyn w grupie cukrowni w Polsce wchodzących w skład British Sugar.



Mgr inż. Arkadiusz Rychlik absolwent Wydziału Mechanicznego ART w Olsztynie. Obecnie jest asystentem w Katedrze Eksploatacji Pojazdów i Maszyn na Wydziale Nauk Technicznych, UWM w Olsztynie. W pracy zajmuje się zagadnieniami eksploatacji pojazdów i maszyn.