

# Prognozowanie stanu obrabiarek skrawających na podstawie wyników badań ich dokładności

MICHAŁ STYP-REKOWSKI

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania standardowych badań dokładności obrabiarek skrawających do prognozowania ich stanu w przyszłości. Takie ujęcie zagadnienia znacznie rozszerza przydatność badań diagnostycznych i może być bardzo przydatnym narzędziem w planowaniu napraw i remontów obrabiarek. W znacznym stopniu ogranicza także niebezpieczeństwo nieprzewidzianych awarii.

## Wprowadzenie

Obrabiarki skrawające to grupa maszyn technologicznych bardzo licznie użytkowanych w przemyśle – praktycznie we wszystkich jego gałęziach. Tak duże nasycenie przemysłu tymi maszynami powoduje więc, że ich diagnozowanie jest istotnym zagadnieniem. Zasadniczym elementem diagnozowania obrabiarek jest badanie ich dokładności. Jest to cecha będąca podstawowym kryterium oceny ich jakości, a wielkości używane jako miary dokładności pozwalają na porównanie obrabiarek różnych producentów. Przytoczone argumenty spowodowały, że diagnozowanie tej grupy maszyn technologicznych stanowi bardzo ważny aspekt ich eksploatacji.

Celem badań diagnostycznych wszelkich obiektów technicznych, w tym oczywiście także maszyn technologicznych jest przede wszystkim określenie ich bieżącego stanu technicznego. Badania takie powinny ponadto umożliwić ustalenie genezy stwierdzonego stanu a także jego prognozę. Ta ostatnia faza wymaga znajomości historii wyników badań diagnostycznych i umożliwi oszacowanie czasu niezawodnego

użytkowania maszyny i/lub wartości wykonanej przez nią w przyszłości pracy w przyjętych jednostkach (liczba sztuk, ich objętość, ciężar itp.). Prognozowanie jest więc bardzo istotnym elementem diagnostyki niezbędnym do podejmowania decyzji dotyczących planowanych napraw i remontów w przyszłości.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono rozważania dotyczące wykorzystania badań dokładności obrabiarek jako podstawy do prognozowania ich stanu. Wiele elementów wspólnych występujących w diagnozowaniu i wspomnianych badaniach potwierdza hipotetyczne możliwości praktycznego zastosowania omawianych badań w diagnostyce, zwłaszcza eksploatacyjnej.

## Wielkości opisujące stan obrabiarki

Rozpatrując obrabiarkę jako całość, w jej strukturze można zidentyfikować szereg zespołów funkcyjnych [5]. Stan techniczny wszystkich zespołów wpływa na rezultaty działania obrabiarki, jednak w zależności od różnych czynników, np. rodzaju obrabiarki, złożoności jej budowy, wpływ ten jest zróżnicowany.

Rozpatrując zadania i funkcje najistotniejszych zespołów obrabiarek można ustalić hierarchię ich znaczenia. Stosując kryteria diagnostyczne jest ona następująca:

- korpus – zespół nośny,
- wrzeciennik,
- zespół przemieszczania narzędzi lub przedmiotu obrabianego.

Zespoły te występują we wszystkich rodzajach obrabiarek i mają bezpośredni wpływ na rezultaty ich pracy, m.in. na dokładność wykonania obrabianego elementu.

Dla każdego z wymienionych zespołów inne są wielkości istotne dla opisu ich bieżącego stanu technicznego, przydatne w procesie diagnozowania obrabiarek a także poszczególnych ich zespołów.

Pierwszym z wymienionych jest zespół nośny. Może on występować w formie korpusu, ramy lub mieć inną postać konstrukcyjną. Podstawową cechą wymaganą od dobrze skonstruowanego korpusu są:

- jego sztywność rozumiana jako odporność na działanie sił zewnętrznych,
- niezmienność wymiarów czyli odporność na działanie czynników termicznych i czasu.

\* Prof. dr hab. inż. M. Styp-Rekowski, Bydgoska Szkoła Wyższa, e-mail: m.styprekowski@wp.pl.

Ponieważ sztywność korpusu wykonanego z określonego tworzywa konstrukcyjnego zależy głównie od jego geometrycznych cech konstrukcyjnych (odpowiednie przekroje ścianek, wzmocnienia w miejscach występowania dużych obciążeń) cechy te określane są w fazach projektowania i konstruowania. Dla ich zapewnienia istotny jest natomiast etap wytwarzania gdyż struktura materiału (w przypadku korpusów odlewanych) oraz wytrzymałość połączeń elementów korpusów spawanych jest rezultatem działań w tym właśnie etapie istnienia wytworu.

We współczesnych obrabiarkach bardzo często korpus stanowi zbiór elementów. Połączone są one ze sobą w sposób rozłączny lub trwały, tworząc strukturę przestrzenną w formie np. ramy. Podział wynika przede wszystkim z optymalizacji postaci konstrukcyjnej korpusu przy kryteriach technologicznych. W takim przypadku sztywność tego zespołu jako całości zależy dodatkowo od połączeń – ich sztywności i trwałości cech (skuteczności połączenia).

Inną pożądaną cechą zespołów nośnych – niezmienność wymiarową, określaną w funkcji temperatury i czasu, kształtuje się w fazie projektowania. Odbywa się to poprzez dobór tworzywa konstrukcyjnego spełniającego wspomniane wyżej wymagania, oczywiście przy uwzględnieniu również innych czynników, wynikających np. z założeń konstrukcyjnych i eksploatacyjnych.

Przedstawione powyżej cechy korpusów wszelkich maszyn technologicznych stanowią podstawowe wielkości, które determinują dokładność wytwarzanych na nich elementów, a tym samym jakość całych maszyn, w których strukturze występują. Wielkości te można zatem uznać za diagnostyczne elementy etapów projektowania i konstruowania a więc elementy diagnostyki konstrukcyjnej [1].

Drugi z wymienionych zespołów funkcyjnych – wrzeciennik, to zespół o bardzo dużym znaczeniu dla jej możliwości technologicznych. Służy do odbioru momentu od źródła napędu i przekazanie do przedmiotu obrabianego lub/i narzędzia w końcowym fragmencie łańcucha kinematycznego obrabiarki oraz do nadawania ruchu obrotowego przedmiotowi obrabianemu lub narzędziu.

Funkcja ta determinuje bezpośrednio rodzaj i wydajność obróbki, jaką na danej obrabiarence można realizować, a pośrednio – także jakość wykonywanych elementów.

Zadania, jakie realizuje zespół wrzecienny wyznaczają wielkości istotne dla prawidłowego działania wrzeciennika. W aspekcie diagnozowania dokładności obrabiarek za istotne cechy diagnostyczne należy uznać następujące:

- prędkość obrotową wrzeciona,
- jego dokładność ruchową,
- sztywność zespołu.

Graniczna prędkość obrotowa, jaką może uzyskiwać wrzeciono, a także dokładność tego ruchu zależą przede wszystkim od węzłów łożyskowych. Rodzaj zastosowanych łożysk (np.: ślizgowe, toczne, magnetyczne), typ (np.: hydrostatyczne, hydrodynamiczne bądź kulkowe lub wałeczkowe) oraz odmiana konstrukcyjna (poprzeczne, skośne, wzdłużne, jedno- lub wielorzędowe) wyznaczają obszary prawidłowego działania węzłów, a tym samym całego wrzeciennika.

W przypadku wirujących wałów ich bicie jest funkcją sztywności podparcia oraz niewyrównoważenia wynikającego m.in. z odchyłek wykonawczych. W celu zminimalizowania niekorzystnego wpływu bicia poprzecznego i wzdłużnego na dokładność obrabianych elementów, wrzeciona obrabiarek łożyskowane są za pomocą łożysk wrzeciennowych zaliczanych do grupy łożysk specjalnych. W stosunku do łożysk typowych charakteryzują się one zwiększonymi graniczną prędkością obrotową i sztywnością. Uzyskuje się to w rezultacie zastosowania innych tworzyw konstrukcyjnych (o mniejszej gęstości) oraz większej dokładności wykonania elementów łożysk [4]. Cechy te kształtuje się w fazie konstruowania obrabiarek, można więc działania te uznać za kolejne elementy diagnostyki konstrukcyjnej.

Warunkiem koniecznym i niezbędnym do zaistnienia obróbki na obrabiarkach skrawających jest przemieszczanie się narzędzia względem obrabianego przedmiotu. W zależności od rodzaju obrabiarki ruch wykonuje narzędzie lub przedmiot obrabiany. W szczególnych przypadkach obydwa ruchy występują

jednocześnie. Z takiej kinematyki wynika istotność znaczenia zespołu przemieszczającego narzędzie lub/i obrabiany przedmiot w procesie obróbki. W ocenie parametrów ruchu można przyjąć następujące cechy diagnostyczne:

- stałość prędkości (jej równomierność),
- dokładność ruchu po założonej trajektorii,
- opory ruchu.

Zadawalający poziom tych cech uzyskuje się obecnie stosując prowadnice toczne. Oprócz wymienionych cech ruchowych charakteryzują się one dużą sztywnością, wykazują także satysfakcjonującą (większą niż prowadnice ślizgowe) trwałość. Bardzo istotna jest także podatność naprawcza tego rodzaju prowadnic.

Analizując działanie zespołu przemieszczania narzędzi lub/i przedmiotu obrabianego w aspekcie diagnozowania obrabiarki jako całości, jako sygnały diagnostyczne można przyjąć wielkości, które opisują odchyłki rzeczywistego toru przemieszczeń od nominalnego. Funkcjonowanie tego właśnie zespołu oraz wrzeciennika determinuje bardzo silnie końcowy rezultat obróbki, a więc stan produktu finalnego.

W przypadku diagnozowania stanu obrabiarek bardzo przydatne okazują się badania dokładności obrabiarki polegające na obróbce przedmiotu próbnego o ściśle zdefiniowanej postaci konstrukcyjnej i porównaniu uzyskanych geometrycznych cech konstrukcyjnych z wartościami nominalnymi. Porównanie takie pozwala wnioskować o aktualnym stanie technicznym jej zespołów funkcyjnych, a tym samym całej obrabiarki.

Wyniki cyklu takich badań, przeprowadzonych w pewnych odstępach czasowych proponuje się wykorzystywać do prognozowania stanu obrabiarki.

### Diagnozowanie stanu obrabiarki

Stan zespołów roboczych obrabiarek bezpośrednio wpływa na ich możliwości obróbkowe, zarówno zakresie dokładności obrabianych elementów jak i wydajności obróbki. Szczególnie istotny jest pierwszy z wymienionych aspektów, stąd też duża waga, jaką przykłada się

do badań obrabiarek w tym zakresie. W celu ujednoczenia wymagań stawianych obrabiarkom wytwarzanym przez różnych producentów i umożliwienia porównania ich jakości, procedury badań dokładności poszczególnych rodzajów obrabiarek znormalizowano. Zawarte są one w normach krajowych, np. [3] i międzynarodowych, np. [2].

Dla pełnego diagnozowania dokładności obrabiarek skrawających należy określić standardowe cechy ich stanu:

- parametry geometryczne obrabiarek jako całości,
- dokładność przemieszczeń poszczególnych ruchowych zespołów funkcyjnych obrabiarek,
- parametry stereometryczne przedmiotów obrabianych w określonych warunkach i porównanie ich z wartościami nominalnymi (tzw. próba praca).

Dwie pierwsze grupy pomiarów geometrycznych polegają na sprawdzaniu wymiarów, kształtów, położenia oraz względnych ruchów zasadniczych zespołów i części składowych w odniesieniu do nominalnych linii i powierzchni teoretycznych. Wyniki tych badań mogą niewątpliwie stanowić element oceny jakości obrabiarki. Dla celów diagnostycznych rezultaty te mają jednak mniejsze znaczenie gdyż nie muszą bezpośrednio przekładać się na dokładność obrabianych przedmiotów. Odchyłki mogą bowiem sumować się lub odejmować, zniekształcając w ten sposób ocenę.

Trzeci rodzaj badań obrabiarek – próba pracą – ma odmienny charakter. Podczas tych badań obróbce poddaje się przedmioty próbne, a następnie porównuje się jej rezultaty. Sprawdza się zgodność uzyskanych wartości geometrycznych cech konstrukcyjnych z wartościami nominalnymi. Geometria przedmiotów próbnych dla poszczególnych rodzajów obrabiarek jest różna, a ich wymiary nie są ściśle określone. W normach podane są zwykle przedziały wymiarów, w których powinny się one zawierać gdyż obrabiarki produkowane są najczęściej w pewnych typoszeregach, w których zmienne są wielkości charakterystyczne dla określonego typu obrabiarek.

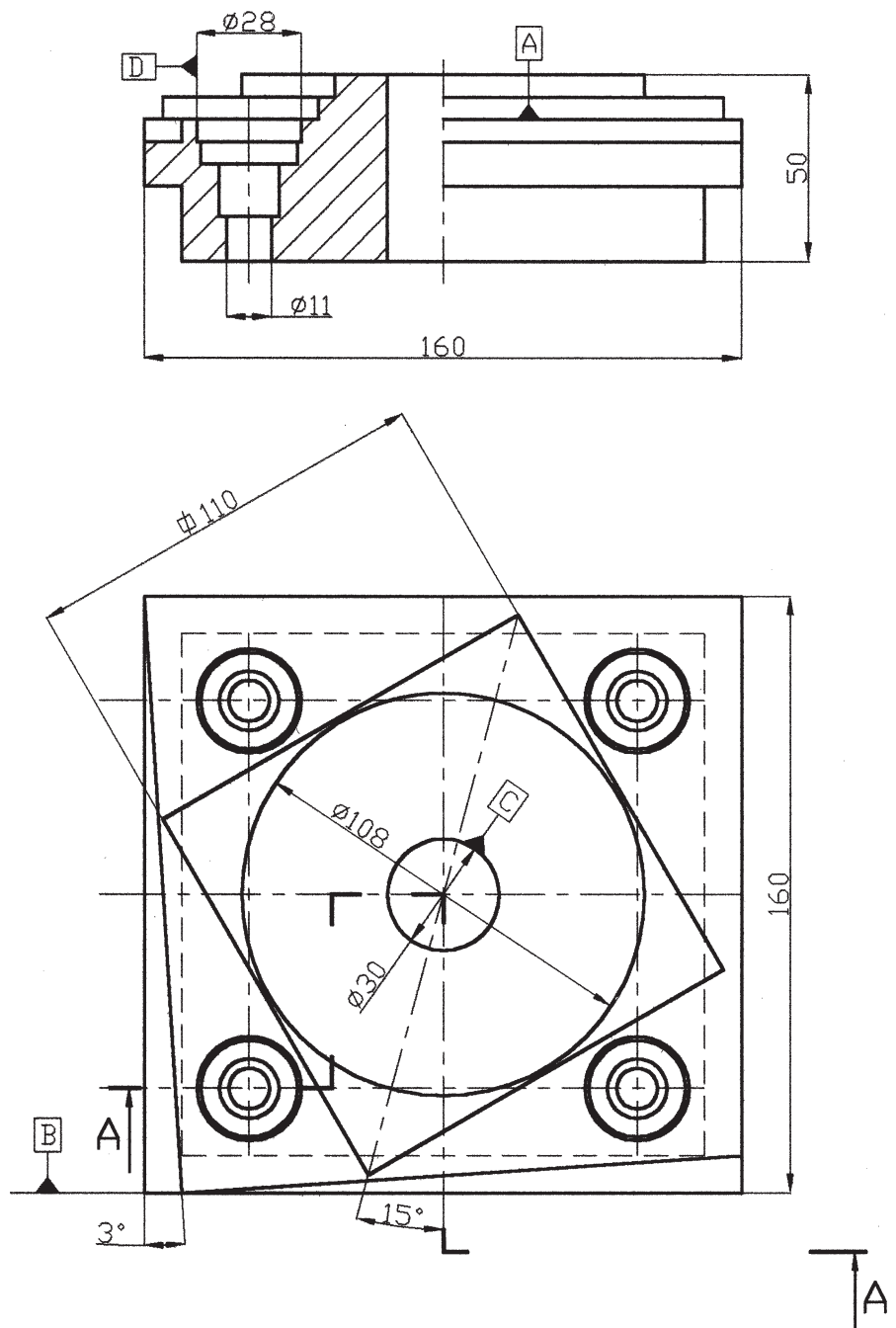
Na rys. 1 przedstawiono przedmiot próbny służący do badania praca centrum obróbkowego, a pomiary nie-

zbędne do sprawdzenia geometrycznych cech konstrukcyjnych przeprowadzane dla tego rodzaju przedmiotów zestawiono w tabeli 1.

Ten rodzaj maszyn technologicznych coraz częściej występuje w parkach maszynowych przedsiębiorstw wszelkich gałęzi przemysłu, gdyż łączą one możliwości obróbkowe kilku obrabiarek różnego typu. Z tego powodu struktura centrów obróbkowych jest rozbudowana, a trajektorie względnych ruchów narzędzi i przedmiotu obrabianego –

złożone. Wymienione czynniki powodują, że przedmiot próbny jest geometrycznie bardziej skomplikowany niż dla obrabiarek realizujących jeden podstawowy typ operacji technologicznych (tokarki, frezarki itp.). Powinny one umożliwić pomiar wszystkich wielkości istotnych dla oceny dokładności obróbki realizowanej na centrum.

Dla różnych odmian wymiarowych obrabiarek wartości poszczególnych wymiarów przytoczonych na rysunku mają różne wartości; różne są także ich



Rys. 1. Postać konstrukcyjna przedmiotu próbnego do badania praca centrów obróbkowych z zaznaczonymi bazami obróbkowymi [3]

Tabela 1. Zestawienie pomiarów obrabionych fragmentów przedmiotu próbnego [3]

Lp.	Mierzony fragment przedmiotu	Mierzona cecha
1.	Otwór środkowy	– walcowość – prostopadłość osi otworu do bazy A
2.	Kwadrat zewnętrzny	– prostoliniowość boków – prostopadłość przylegających boków do bazy B – równoległość przeciwległego boku do bazy B
3.	Kwadrat górny (15°)	– prostoliniowość boków – dokładność kąta 75° w stosunku do bazy B
4.	Okrąg	– okrągłość – współosiowość okręgu zewnętrznego i otworu wewnętrznego
5.	Powierzchnie skośne (3°)	– prostoliniowość czół – dokładność kąta w stosunku do bazy B
6.	Otwory pogłębione	– położenie otworów w stosunku do bazy C – współosiowość otworów pogłębionych i otworu wewnętrznego

wzajemne relacje. Normy zawierają także dopuszczalne wartości odchyłek wymiarów uzyskanych w rezultacie obróbki, które pozwalają uznać badaną obrabiarkę za sprawną.

W cytowanych normach przedmiotowych dla różnych obrabiarek, np. [3] podane są także warunki obróbki przedmiotów próbnych a w normie [2] zawarto ponadto informacje dotyczące przygotowania obrabiarki do prób oraz sposób przeprowadzania pomiarów. Ten zbiór informacji, łącznie z wynikami pomiarów, jest niezbędny do wnioskowania o aktualnym stanie obrabiarki. Zbiór tych pomiarów nazwano **podstawowym zadaniem diagnostyki operacyjnej (PZDO)** [5]. Do prognozowania odnośnie dalszej pracy obrabiarki potrzebny jest ponadto zbiór informacji o przebiegu zachodzących zjawisk, tzw. historia sygnału [6].

Wyniki badań dokładności rozpatruje się w układzie dwuwartościowym: dobre – złe, przy czym pierwszy przypadek zachodzi, gdy między odchyłką stwierdzoną (rzeczywistą)  $T_{rzecz}$  a odchyłką dopuszczalną  $T_{dop}$  zachodzi relacja:

$$T_{rzecz} \leq T_{dop} \quad (1)$$

W przypadku, gdy zachodzi przypadek odmienny, a więc gdy:

$$T_{rzecz} > T_{dop} \quad (2)$$

mamy do czynienia z błędem wykonania a więc z przedmiotem wadliwym.

Rezultaty tych badań wykorzystuje się do celów diagnostycznych – na podstawie uzyskanych rezultatów możliwe jest bezpośrednie wnioskowanie o stanie technicznym obrabiarki. W pierwszym z przytoczonych przypadków, przy spełnionym warunku (1), obrabiarka jest w stanie zdatnym, natomiast w drugim, wg (2) – w stanie niezdatnym do realizacji postawionych zadań. Stwierdzenie to jest prawdziwe o ile nie zidentyfikowano innych przyczyn niewłaściwych cech wykonanego elementu próbnego, np. złe zamocowanie obrabianego elementu.

Na podstawie zmierzonych odchyłek wykonawczych przedmiotów próbnych można wnioskować o stanie poszczególnych zespołów funkcyjnych obrabiarek. Dla przykładu, stwierdzone po obróbce przedmiotu próbnego na centrum obróbkowym – rys. 1, duże wartości odchyłki prostopadłości płaszczyzn świadczyć będą o niedokładnościach występujących w zespole przemieszczania narzędzi względem przedmiotu obrabianego, których przyczyną mogą być np. luzy w prowadnicach.

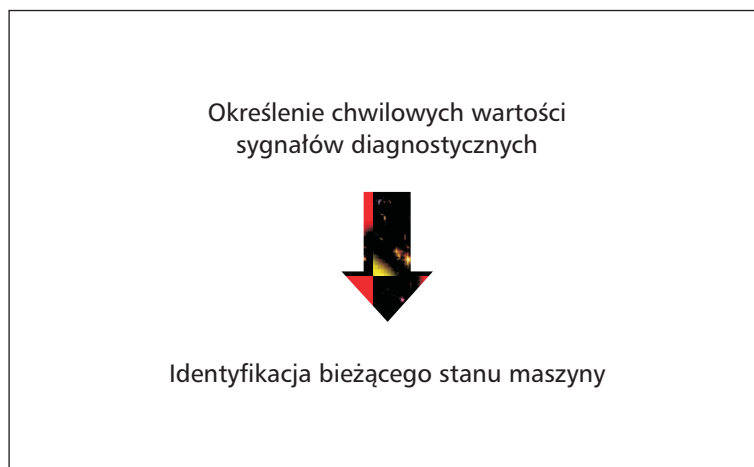
Stwierdzone odchyłki prostoliniowości krawędzi lub płaskości powierzchni świadczyć będą o zużyciu elementów prowadnicowych.

Przytoczone przykłady wnioskowania diagnostycznego nie wyczerpują oczywiście możliwości diagnostycznych, w których można wykorzystać rezultaty badań dokładności. Na ich podstawie można jednak stwierdzić, że do pełnego diagnozowania niezbędna jest dobra znajomość rozwiązań konstrukcyjnych zastosowanych w badanej obrabiarkę oraz zasad jej funkcjonowania.

#### 4. Prognozowanie stanu obrabiarki

Stwierdzono wcześniej, że poza określeniem aktualnego (chwilowego) stanu maszyny działania diagnostyczne powinny obejmować także elementy prognostyczne odnośnie dwóch podstawowych zagadnień:

- terminu kolejnych badań diagnostycznych,
- czasu dalszej skutecznej pracy maszyny.



Rys. 2. Sekwencja działań niezbędnych dla realizacji PZDO (czytaj nast. strona)

O ile więc zadanie diagnostyczne stanowi następującą sekwencję działań (rys. 2):

1. Określenie chwilowych wartości sygnałów diagnostycznych
2. Identyfikacja bieżącego stanu maszyny

to uwzględnienie w diagnostyce zadań prognostycznych powoduje rozszerzenie powyższej sekwencji o następujące elementy (rys. 3):

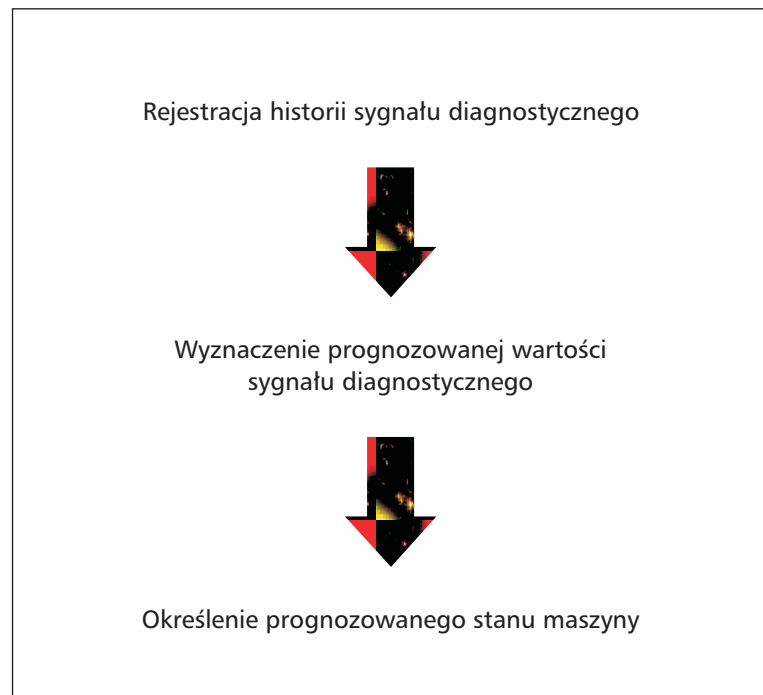
1. Rejestracja historii sygnału diagnostycznego
2. Wyznaczenie prognozowanej wartości sygnału diagnostycznego
3. Określenie prognozowanego stanu maszyny

Realizacja powyższych sekwencji jest możliwa wykorzystując przedstawione wyżej badania dokładności obrabiarek skrawających. Pierwsza z nich wymaga przeprowadzenia jednego zestawu badań natomiast w drugim przypadku niezbędne jest przeprowadzenie cyklu badań, przy wyznaczonej ich częstotliwości, tak aby na podstawie analizy wyników można było ekstrapolować wyniki badań diagnostycznych. Algorytm działań umożliwiających prognozowanie stanu obrabiarek wykorzystujących serię *PZDO*, stanowiących w tym algorytmie ogniwo elementarne, przedstawiono na rys. 4.

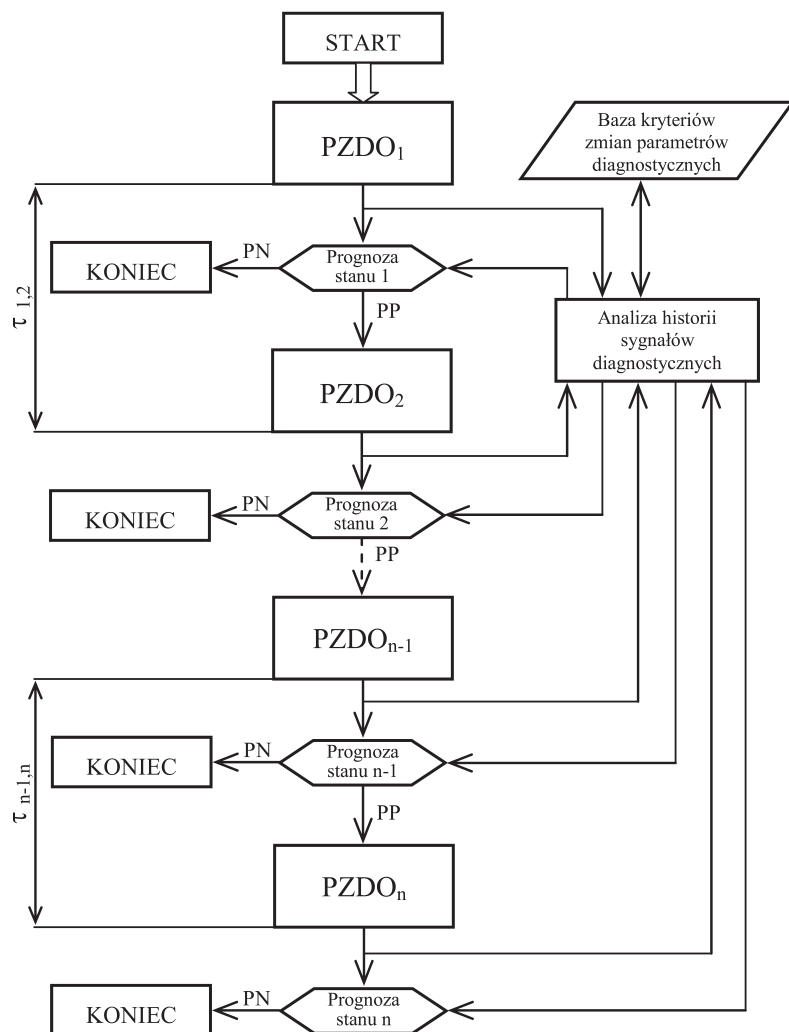
Uwzględniając różnorodność wymuszeń zewnętrznych oddziałujących na obrabiarki należy przyjąć, że dla każdego rodzaju obrabiarek skrawających (tokarki, szlifierki itp.) częstotliwość ta będzie inna. Na podstawie znajomości mechanizmów typowych procesów zużycia można ponadto stwierdzić, że częstotliwość ta powinna być zróżnicowana: inna (mniejsza) w początkowej fazie procesu eksploatacji obrabiarki, inna (większa) – dla fazy końcowej. Zachodzi więc relacja:

$$T_{1,2} > T_{(n-1),n} \quad (3)$$

Czas między kolejnymi *PZDO* wyznacza się na podstawie analizy historii sygnałów diagnostycznych, w której uwzględnia się zbiór kryteriów zmian wielkości przyjętych jako sygnały diagnostyczne. Przyjmuje się go w ten sposób aby po wyznaczonym czasie  $\tau_i$  przewidywane



Rys. 3. Sekwencja diagnostycznych działań prognostycznych, wg [6]



Rys. 4. Algorytm działań prognostycznych z wykorzystaniem *PZDO* (PP – prognoza pozytywna, PN – prognoza negatywna)

wartości badanych parametrów nie przekraczały wartości dopuszczalnych, a więc aby spełniony był warunek (1). Jeżeli wartość pojedynczego analizowanego parametru nieznacznie przekracza wartość dopuszczalną można skrócić czas, tak aby wspomniany warunek był spełniony.

Prognozę opracowuje się według określonej procedury także na podstawie analizy zmian sygnałów diagnostycznych. Jeżeli po technicznie i ekonomicznie uzasadnionym czasie  $\tau_i$  przewidywana wartość parametru będzie większa niż dopuszczalna to wówczas prognoza stanu jest negatywna (PN) i następuje zakończenie fazy użytkowania obrabiarki (KONIEC). W takim przypadku pozostaje podjęcie decyzji odnośnie dalszych jej losów: przekazać do naprawy lub złomować. W przeciwnym przypadku, tzn. przy prognozie pozytywnej (PP) następuje dalsze użytkowanie obrabiarki aż do czasu realizacji kolejnego PZDO.

## Podsumowanie

W rezultacie przeprowadzonych rozważań wykazano przydatność opisanych wyżej badań dokładności obrabiarek skrawających do diagnostyki operacyjnej. Zawarte w normach dopuszczalne wartości odchyłek geometrycznych cech konstrukcyjnych, które można przyjąć jako graniczne wartości symptomów stanu obrabiarek, umożliwiają wnioskowanie o bieżącym stanie obrabiarki.

Jednolite warunki badań pozwalają obserwować i porównywać zmiany stanu w czasie, a to stanowi jeden z niezbędnych czynników do prognozowania dalszego procesu eksploatacji. Wraz z kryteriami zmian obserwowanych symptomów stanowi to podstawę diagnostyki holistycznej.

Opracowane procedury rozszerzają zbiór narzędzi diagnostycznych dla obszernej i ważnej grupy maszyn technologicznych jakimi są niewątpliwie obrabiarki skrawające.

## Literatura

- [1] Cholewa W.: Diagnostyka techniczna maszyn. Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 1992.
- [2] Norma ISO 230-1:1996 – Test code for machine tools – Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions.
- [3] Norma PN-ISO 19791-7:2000 – Warunki badania centrów obróbkowych. Dokładność obrobionego przedmiotu próbnego.
- [4] Styp-Rekowski M.: Comparison of Operational Performances of Special and Standard Rolling Bearings. in: Franek F., Kajdas Cz. (ed.): Tribology – Science and Application. Vienna Scientific Centre of the Polish Academy of Sciences, serie „Conference Proceedings and Monographs”, vol. 4. Vienna 2004, pp. 302-311.
- [5] Styp-Rekowski M.: Zagadnienia tribologiczne w budowie obrabiarek skrawających. Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 2004.
- [6] Tylicki H.: Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych. Wydawnictwo Uczelniane ATR, seria Rozprawy nr 96. Bydgoszcz 1998. ■