

NOWA KONCEPCJA MODELU DIAGNOSTYCZNEGO MASZYN OBROTOWYCH

Jerzy TOMASZEWSKI

Ośrodek Badawczo – Rozwojowy Motoreduktorów i Reduktorów „REDOR”
43-300 Bielsko-Biała ul. Piekarska 81
Fax : 48 33 8149180 E-mail : jtomaszewski@ath.bielsko.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono nową koncepcję diagnostycznego modelu maszyn obrotowych. Idea modelu polega na możliwości określania stanu urządzenia poprzez wyznaczone wcześniej na drodze teoretycznej lub doświadczalnej zmiany parametrów stanu. Stan urządzenia określany jest za pomocą funkcji niezawodności. W artykule pokazano sposób wyznaczania parametrów stanu w przypadku zmęczeniowego pęknięcia podstawy zęba

Słowa kluczowe: model, parametr stanu, niezawodność, symptom, pęknięcie zmęczeniowe

NEW CONCEPT OF DIAGNOSTIC MODEL OF ROTATIONAL MACHINES

Summary

In the paper, the new concept of diagnostic model of rotational machines has been presented. The idea of the model consists in a possibility of determination of the device status by means of the parameters- determined in advance upon theoretical or experimental procedure. The method of the determination of state parameters in the case of fatigue crack in gear tooth is explained.

Keywords : diagnostic model, state parameter, reliability, symptom, fatigue crack

1. DOTYCHCZASOWE STOSOWANE MODELE DIAGNOSTYCZNE

Najogólniej mówiąc wg [1], model diagnostyczny obiektu to relacja pomiędzy parametrami sygnałów diagnostycznych i jego stanami. Istnieje wiele pozycji literatury opisujących modele diagnostyczne, w zależności od rodzaju rozpatrywanej maszyny. Głównymi powszechnie stosowanymi modelami diagnostycznymi są [1] :

1. Parametry sygnałów-parametry stanu. Inaczej mówiąc pomiędzy parametrami sygnału i parametrami stanu istnieją określone zależności, na przykład funkcje.
2. Parametry stanu – parametry sygnałów. Model diagnostyczny obiektu przedstawia odwzorowanie zbioru parametrów sygnału (diagnostycznych) w zbiór parametrów stanu, za pomocą pewnej reguły. Oznacza to, że pomiędzy parametrami stanu i parametrami sygnałów istnieją określone zależności, na przykład opisane zbiorem równań liniowych.

Przedstawione wcześniej diagnostyczne modele maszyny mają wspólną cechę którą jest zależność między parametrami stanu a sygnałem diagnostycznym.. Bez względu od przyjętego modelu diagnostycznego, konieczna jest znajomość zależności pomiędzy parametrami stanu obiektu a

parametrami diagnostycznymi. Zależności te z reguły wyznacza się doświadczalnie, analizując historię eksploatacji lub wykonując eksperymenty diagnostyczne. Przyjmuje się że podstawowymi normatywami niezbędnymi w procesie racjonalnego obsługiwanie obiektów technicznych muszą być [1] :

- a) Normatywy początkowe x_p , y_p odpowiadają nowym obiektom znajdującym się w stanie zdatności lub obiektom po naprawie lub regulacji
- b) Normatywy dopuszczalne x_d , y_d są normatywami, na których opiera się system dynamicznej eksploatacji obiektów technicznych. Na podstawie znajomości wartości tych parametrów jest stawiana diagnoza o stanie obiektu i są podejmowane
- c) Normatywy graniczne x_0 , y_0 odpowiadają stanowi obiektu, przy których dalsza jego eksploatacja staje się niemożliwa lub niecelowa ze względów technicznych lub ekonomicznych

Dotychczasowe zrealizowane prace [2,3,4] pokazały, że wyznaczenie koniecznych parametrów wymaga każdorazowo dla konkretnego obiektu przeprowadzenia bardzo czasochłonnych badań eksploatacyjnych.

2. NOWA KONCEPCJA BUDOWY MODELU DIAGNOSTYCZNEGO

Spośród zbioru parametrów stanu $X = \{x_m\}$ wybieramy tylko następujące stany :

- długość pęknięcia zmęczeniowego zęba koła przekładni zębatej,
- narastanie powierzchni zmęczeniowego uszkodzenia bocznej powierzchni zęba pittingiem lub spallingiem,
- powierzchnia uszkodzenia w wyniku procesów zatarcia ,
- wielkość zużycia ściernego par kinematycznych
- fretting
- powierzchnie zużycia odkształceniowego których przyczynami są : rozwalcowywanie z rozmazywaniem, odkształcenia plastyczne (niskotemperaturowe) występujące w okolicy średnicy tocznej, marszczenie (falowanie), odkształcenie plastyczne wysokotemperaturowe

Przyjmujemy że stany te są wystarczające do określenia stanu obiektu.

Ponadto zakładamy że parametry stanu mają następujące własności :

- $X(t)$ jest stochastycznym procesem losowym o rozkładzie Gaussowskim, który jest określany przez wartość średnią i wariancję,
- $X(t)$ jest odcinkami stochastycznym procesem Markowa,

Średnia wartość zmian parametru stanu określona jest stochastycznym równaniem różniczkowe postaci :

$$\frac{dX(t)}{dt} = f(\sigma, X, l) \quad (1)$$

gdzie: σ - naprężenia od sił zewnętrznych i reszkowych, l – funkcja logistyczna (antropotechniczna)

Interpretacja parametru stanu wynika wprost z koncepcji C. Cempla [5] tzw. procesora energetycznego, oraz koncepcja system-środowisko M. Dobry [6]. W wyniku narastania procesów degradacyjnych, część energii doprowadzonej do systemu ΔE_{we} jest akumulowana w uszkodzeniu ΔE_d . Koncepcja ta zakłada, że energia na sposób pracy jest tracona w systemie, czego wynikiem jest zmiana w czasie mierzalnej wielkości nazwanej parametrem stanu. Symbolicznie zależność tą określić można równaniem :

$$\Delta E_d = W[X(t)] \quad (2)$$

gdzie:

W - praca zależna od zbioru parametrów stanu $X(t)$. Przyjmuje się również założenie o niezależności procesów stochastycznych parametrów stanu $x_1(t), x_2(t) \dots x_m(t)$ tj. spełniona jest relacja [7] :

$$P\left[x_1(t) \leq x_1^1, \dots, x_1(t_m) \leq x_1^m, \dots, x_m(t) \leq x_m^1, \dots, x_m(t_m) \leq x_m^m\right] = P\left[x_1(t) \leq x_1^1, \dots, x_1(t_m) \leq x_1^m\right] \cdot P\left[x_m(t) \leq x_m^1, \dots, x_m(t_m) \leq x_m^m\right] \quad (3)$$

$$\cdot P\left[x_m(t) \leq x_m^1, \dots, x_m(t_m) \leq x_m^m\right]$$

Mając zdefiniowany zbiór parametrów stanu i warunek niezależności (3), można zdefiniować funkcję niezawodności.

Wyznaczenie funkcji niezawodności dla przekładni nierozłącznie wiąże się z przyjęciem założenia, że w procesie eksploatacyjnym prowadzone jest monitorowanie wartości parametrów stanu poszczególnych węzłów kinematycznych. W takim przypadku relacja określająca funkcję niezawodności jest następująca:

$$R(t) = \left[1 - \max \left[\begin{array}{l} P\left[X_1(t) \leq X_1^{Gr}\right] \\ \dots \dots \dots \\ P\left[X_m(t) \leq X_m^{Gr}\right] \end{array} \right] \right]^{E_{we} - E_{st} - E_u \leq E_{dśś}} \quad (4)$$

gdzie: $P[\cdot]$ -prawdopodobieństwo warunkowe, X_m^{Gr} - dopuszczalne wartości progowe parametrów stanu. Pierwszy człon określa nam pośrednio warunek kumulacji energii strat, natomiast drugi warunek zapewnia zasadę ochrony środowiska , sformułowaną przez M..Dobry [6] która brzmi : „*Optymalny metasystem (Procesor Energii – Środowisko), to metasystem zapewniający minimalny przepływ (strumień) energii do środowiska, przy jednoczesnym skonsumowaniu wewnątrz systemu maksymalnej ilości energii do niego wprowadzone*”.

W praktyce, pomiar bezpośredni zmian parametrów stanu poszczególnych węzłów jest trudny i bardzo kosztowny. Jeśli koszt systemu pomiarowego parametrów stanu przekracza pewną graniczną wartość K_p , to w takim przypadku przyjmują się symptom diagnostyczny odwzorowujący zmiany wartości parametru stanu wg zależności :

$$s(t) = S \cdot X(t) + v(t) \quad (5)$$

gdzie : S – macierz symptomu, $v(t)$ – zakłócenia pomiarowe. Drugim ważnym założeniem jest to że wybieramy tylko parametry diagnostyczne (symptomy diagnostyczne) liniowo zależne w sensie funkcji korelacji od parametrów stanu. Na obecnym etapie rozwoju środków i metod pomiarowych , ze względu na koszty, jedynie diagnostyka symptomowa ma ekonomiczną rację zastosowania jej do wyznaczenia funkcji niezawodności przekładni. Wprowadzenie dodatkowego równania (5) w celu wyznaczenia parametrów stanu, znacznie pogarsza trafność prognozy. Spowodowane jest to faktem, że symptom jest też procesem losowym, co w konsekwencji spowoduje zwiększenie rozrzutu wartości średnich parametrów stanu. Ponadto dość dobrze są opracowane metody rozwiązania równań stochastycznych liniowych, natomiast bardzo duże trudności występują w przypadku równań nieliniowych. Aby doprowadzić stochastyczny układ (1) do postaci liniowej, należy rozłożyć w szereg Taylora wokół wybranych wartości X_0, σ_0, l_0 wówczas równanie (1) przyjmie postać :

$$\frac{dX}{dt} = F(t) \cdot \Delta X + G(t) \cdot \Delta \sigma + C(t) \cdot \Delta l \quad (6)$$

gdzie:

$$F(t) = \frac{\partial f}{\partial X_0}, \quad G(t) = \frac{\partial f}{\partial \sigma_0}, \quad C(t) = \frac{\partial f}{\partial l_0}$$

Zakładamy że funkcja naprężeń $\sigma(t)$ ma postać deterministyczną, natomiast wektor logistyczny $l(t)$ jest białym szumem Gaussowskim. Model (5) można przedstawić w formie dyskretnej [7]:

$$X(k+1, k) = \Phi(k+1, k) \cdot X(k) + \Gamma(k+1, k) \cdot l(k) + \Psi(k+1, k) \cdot \sigma(k) \quad (7)$$

Ponieważ z założenia wynika że proces $X(t)$ jest procesem Gaussa-Markowa, to do określenia warunkowej funkcji gęstości procesu konieczna jest znajomość wartości średniej i wariancji w czasie t jego trwania.

Wartość średnią wyznacza się z rekurencyjnego wzoru [8]

$$\overline{x(k+1)} = \Phi(k+1, k) \cdot \overline{x(k)} + \Gamma(k+1, k) \cdot \overline{l(k)} + \Psi(k+1, k) \cdot \overline{\sigma(k)} \quad (8)$$

natomiast funkcję kowariancji z zależności:

$$P(k+1) = \Phi(k+1, k) \cdot P(k) \cdot \Phi^T(k+1, k) + \Gamma(k+1, k) \cdot Q(k) \cdot \Gamma^T(k+1, k) \quad (9)$$

Wyznaczając tylko wartość średnią w czasie $t=0$ parametru stanu $X(0)$ i kowariancję $P(0)$ oraz przyjmując wartość funkcji kowariancji dla szumu białego postaci $Q(k)$, można wyznaczyć w dowolnej chwili czasowej $t = k \cdot T$ wartość średnią parametru stanu $X(k)$ z wzoru (8) i funkcję kowariancji $P(k)$ z wzoru (9). Funkcja gęstości procesu przyjmie postać:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{(2 \cdot \pi)^n \cdot |P|}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot (X - \overline{X})^T \cdot P^{-1} \cdot (X - \overline{X}) \right] \quad (9)$$

Znając funkcję gęstości można wyznaczyć poszukiwane prawdopodobieństwo warunkowe wektora $X(t) \leq X_{gr}$ wchodzącego w skład wzoru na funkcję niezawodności (3). Przedstawiona koncepcja wyznaczania funkcji niezawodności obiektu wymaga wykonania wielu doświadczalnych prac w zakresie wyznaczania pewnych symptomów, liniowo zależnych od wartości parametru stanu. Dotychczas znaleziono symptomy drganiowe pozwalające wyznaczyć rozwój pęknięcia zmęczeniowego zęba przekładni i rozwój pittingu i spallingu

3. PARAMETR STANU DLA PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH

Parametrem stanu w przypadku pęknięcia zmęczeniowego podstawy zęba jest jego długość, którą można wyznaczyć przy zastosowaniu równania Nasgro 2/3 [8]:

$$\frac{da}{dN_f} = C \left(\frac{1-f}{1-R} \right)^n \Delta K_1 \left(\frac{1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K_1}}{1 - \frac{K_{max}}{K_C}} \right)^p \quad (10)$$

gdzie: ΔK – współczynnik intensywności naprężeń, R – współczynnik asymetrii cyklu, ΔK_{th} – progowy współczynnik intensywności naprężeń, K_C – krytyczny współczynnik intensywności naprężeń, C – stała materiałowa, n , p – wykładniki zależne od materiału.

Współczynnik intensywności naprężeń ΔK określa się z zależności:

$$\Delta K = K_{max} \cdot (1-R) \quad (11)$$

Natomiast K_{max} określa zależność:

$$K_{max} = K_{eff} = \sqrt{(K_I + |K_{III}|)^2 + 2 \cdot K_{II}^2} \quad (12)$$

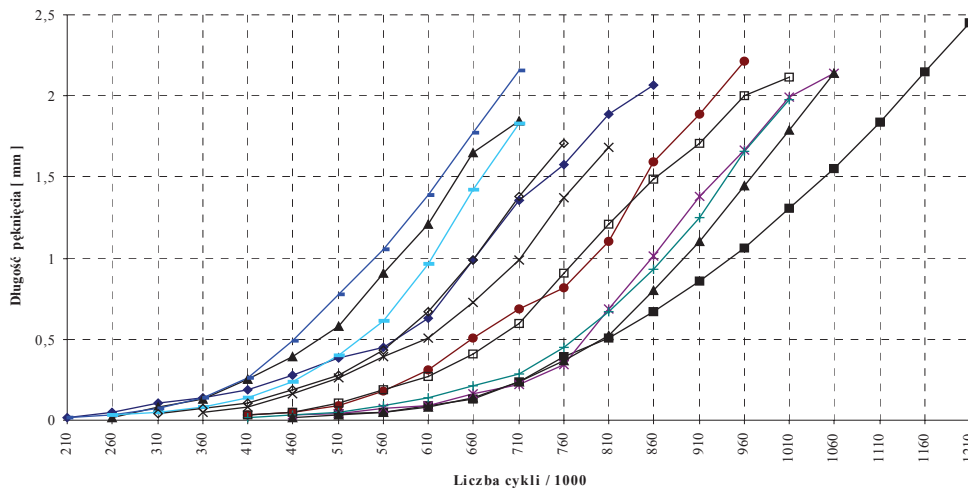
gdzie: K_I, II, III – współczynniki intensywności naprężeń dla obciążeń I, II, III rodzaju..

Do obliczeń propagacji pęknięcia zmęczeniowego przyjęto parametry konstrukcyjne i kinematyczne kół przekładni walcowej o zębach prostych pracującej w stanowisku mocy zamkniętej. Parametry te zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry konstrukcyjne kół

Rodzaj koła	Ilość zębów	Moduł mm	Kąt zarysu α	Korekcja x	Szerokość kół
zębnik	27	4	20 ⁰	0,0	16
koło	35	4	20 ⁰	0,2574	20

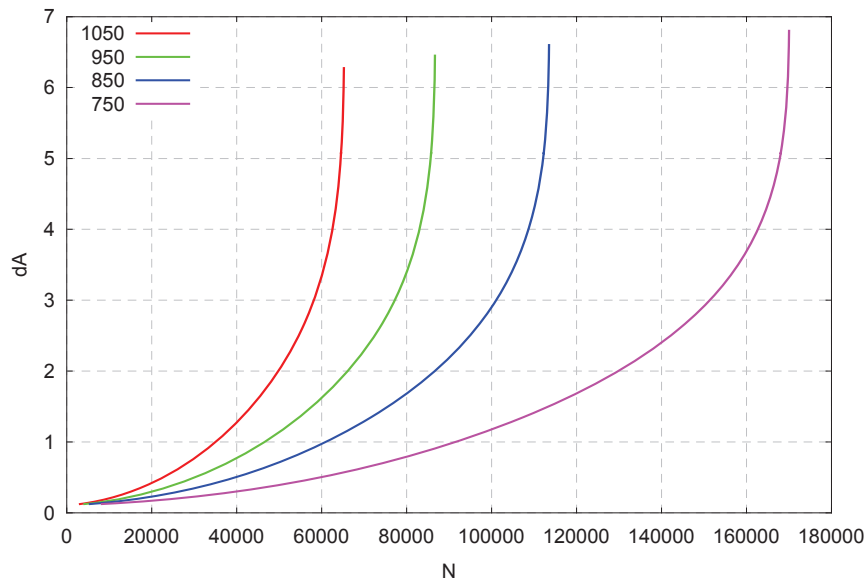
Koła wykonane były ze stali 17 HNM (jej odpowiednikiem w przybliżeniu jest stal 4330 wg normy AGMA), nawęglane i hartowane do twardości 58 ± 2 HRC. Klasa wykonania kół 6. Krzywa przejściowa bez protuberancji.



Rys.3. Rozwój pęknięcia zmęczeniowego podstawy zęba dla stali 18 HGT podczas eksperymentu na pulsatorze

Dane materiałowe wykorzystywane w niniejszej pracy zaczerpnięto z bazy danych firmy NASGRO/FLAGRO (www.nasa.com). Na rys.1 przedstawiono symulowany przebieg długości pęknięcia w funkcji liczby cykli dla różnych poziomów obciążenia tylko dla zakresu propagacji

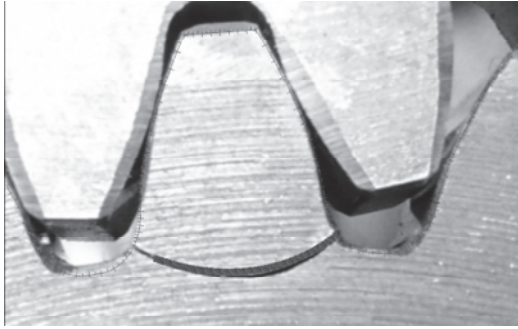
pęknięcia i przy założeniu pęknięcia początkowego $a_0 = 0.1 \text{ mm}$ (zgodnie z wymaganiami programu Beasy). Obliczenia przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Beasy.



Rys.1. Przyrost pęknięcia w funkcji liczby cykli

Na rysunku 2 pokazano ścieżkę propagacji pęknięcia obliczoną i uzyskaną w rzeczywistych warunkach. Pęknięcie zmęczeniowe podstawy zęba jest procesem losowym. Na poparcie tej tezy na rysunku 3 pokazano rozwój pęknięcia zmęczeniowego, uzyskany dla tego samego koła próbki, lecz dla kolejnych 12 zębów poddanych na pulsatorze procesowi odzerowego zginania. Analiza uzyskanych wyników

pokazuje, że zarówno proces pęknięcia, jak i ścieżki rozchodzenia się pęknięcia są to procesy losowe. Średnia wartość pęknięcia, jak wykazano w [8] ściśle odpowiada wynikom uzyskanym z symulacji rozwoju pęknięcia, przy zastosowaniu programu Beasy.



Rys.2. Porównanie ścieżek pęknięcia

Wariancję rozrzutu długości pęknięcia, dla liczby cykli odpowiadającej średniemu pęknięciu wynoszącemu 0,2 mm otrzymać można z wyników uzyskanych podczas eksperymentu na pulsatorze. Metodę wyznaczania wartości rozrzutu pokazano w [7] i dla wyników pokazanych na rys.4, wartość ta wynosi $s^2 = 1,537 \cdot 10^{-7}$. Wartości progowe parametrów stanu są w przypadku pęknięć zmęczeniowych równe krytyczną długością pęknięcia.

W tabeli 2 zestawiono progowe wartości parametrów stanu w zależności od naprężeń zginających w podstawie zęba.

Tabela 2. Wartości progowe parametrów stanu

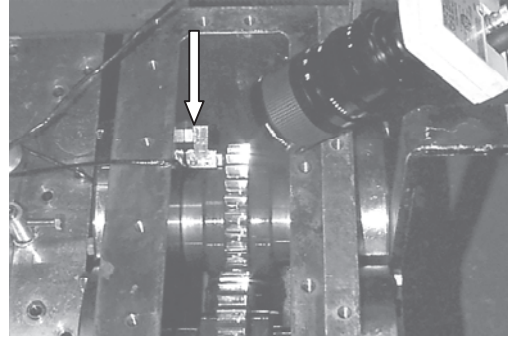
Naprężenie [Mpa]	750	850	950	1050
Próg parametru stanu [mm]	6,8	6,6	6,4	6,2

Koncepcja wyznaczania funkcji niezawodności obiektu, opiera się na znajomości średnich wartości parametrów stanu w procesie eksploatacyjnym. Załóżmy że w pewnej chwili t_a czasu eksploatacji symptom diagnostyczny otrzymany z procesu monitorowania wskazał na pojawienie się pewnej wartości początkowej parametru stanu x_p . Wartość początkowa parametru stanu ściśle związana jest z tzw. rozdzielczością symptomu. Rozumie się ją tutaj jako najmniejszą wartość parametru stanu która spowodowała istotną ze względów pomiarowych zmianę symptomu diagnostycznego. Jeśli przyjmimy że symptom jest jednoznaczny i stabilny, zgodnie z definicją podana w [1], to znając współczynnik kalibracji symptomu określony zależnością :

$$S_k = \frac{x}{s} \quad (13)$$

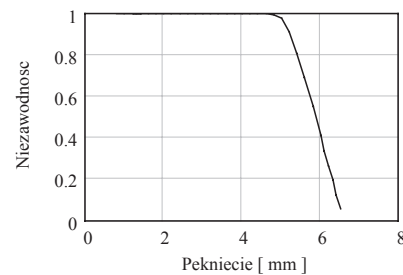
gdzie: x - wartość parametru stanu, s - wartość symptomu, możemy określić jednoznacznie wartość początkową wektora stanu x_p .

Na rysunku 4 pokazano magnetyczny czujnik pozwalający jednoznacznie z rozdzielczością 0.8 mm, wykryć pęknięcie zmęczeniowe w podstawie zęba.



Rys.4. Magnetyczny czujnik do wykrywania pęknięć zmęczeniowych

Mając wyznaczoną wartość wariancji, można wyznaczyć funkcję gęstości rozkładu pęknięcia, dla średniej jego długości, co pozwala wyznaczyć prawdopodobieństwo, że średnia długość pęknięcia nie przekroczy wartości progowej, czyli inaczej określić wartość funkcji niezawodności. Na rysunku 5 pokazano zmianę wartości funkcji niezawodności w stosunku do długości pęknięcia zmęczeniowego.



Rys.5. Przebieg zmian funkcji niezawodności podczas pęknięcia zmęczeniowego.

4. WNIOSKI

Zaproponowany model diagnostyczny umożliwia diagnozowanie stanu urządzenia, oraz przewidywanie resztkowego jego czasu pracy. Podany przykład pokazuje, że zmiany parametrów stanu, w przypadku pęknięć zmęczeniowych można wyznaczać obliczeniowo, jak również można obliczeniowo wyznaczać wartości progowe, dla każdej przekładni zębatej.

LITERATURA

- [1] Niziński S., Michalski R.: *Diagnostyka Obiektów Technicznych*. Biblioteka Problemów Eksploatacji ITE, Radom 2002
- [2] Alattass M., Mahfoudh J., Remond D., Play D.: *Experimental Study of Fault Influence on Vibration and Noise Measurements in a Gear Transmission Mechanism*. Proceedings of International Gearing Conference. MEP London, 1994 pp. 469-474

- [3] Bartelmus W.: *Application of some vibration estimates to gear condition assessment*. Raport techniczny 616. Politechnika Śląska, Gliwice 1979
- [4] Bendat J.S., Piersol A.G.: *Primenenia Korelacionnogo i Spiektralnogo Analiza*. Izd. Mir. Moskva, 1983
- [5] Cempel C.: *Energy Dissipation in Mechanical Systems its Description and control*. Int. Workshop Dyn. And Prod. Autom. Szczecin, April 1995, pp 139-151
- [6] Dobry M.W : *Optymalizacja przepływu energii w systemie człowiek-narzędzie-podłoże (CPN)*. Rozprawy nr.330, Politechnika Poznańska, Poznań 1998.
- [7] Tomaszewski J.: *Komputerowy system diagnostyki przekładni zębatych*. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, Warszawa 1998
- [8] Rysiński J.: *Ocena trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej na złamanie zęba prostego walcowego koła zębatego*. Rozprawa doktorska. ATH w Bielsku-Białej, 2003 r.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego 5 T 07C 01023 finansowanego przez KBN w latach 2003-2004



Dr inż. Jerzy Tomaszewski
adiunkt, pracownik OBR
„Redor” w Bielsku-Białej.
Liczne publikacje i ekspertyzy
naukowe w zakresie
diagnostyki urzędów
przemysłowych, szczególnie
przekładni zębatych ogólnego
przeznaczenia