

CHARAKTERYSTYKI ENERGETYCZNE PROCESU DEGRADACJI TECHNICZNEJ STRUKTUR Z BETONU SPRĘŻONEGO

Henryk KAŻMIERCZAK¹⁾, Jacek KROMULSKI²⁾

Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych
60-963 Poznań, ul. Starołęcka 31

¹⁾ tel. 0618712279, e-mail: kazmhendr@pimr.poznan.pl,

²⁾ tel. 0618712204, e-mail: kromulsk@pimr.poznan.pl

Roman BARCZEWSKI³⁾, Czesław CEMPEL⁴⁾

Politechnika Poznańska Instytut Mechaniki Stosowanej
60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3

³⁾ tel. 0616652390 e-mail: roman.barczewski@put.poznan.pl

⁴⁾ tel. 0616652390 e-mail: czeslaw.cempel@put.poznan.pl

Streszczenie

Elementy obiektów mechanicznych ulegają zużyciu z różną intensywnością. Proces degradacji odzwierciedla się w charakterystykach dynamicznych i charakterystykach mocy obiektu uzyskiwanych na podstawie drganiowych sygnałów testujących. W artykule przedstawiono ideę energetycznej metody identyfikacji stanu degradacji belek strunobetonowych. Belki obciążano statycznie, aż do ich pęknięcia. Metoda ta może być stosowana w badaniach rozplywu energii i zmian strukturalnych w obiektach mechanicznych.

Słowa kluczowe: diagnostyka, proces degradacji, rozplyw energii.

ENERGETIC CHARACTERISTICS OF TECHNICAL DEGRADATION PROCESS OF PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES

Summary

Elements of mechanical objects wear with various intensities. Degradation process manifests itself in dynamic and power characteristics formulated on the basis of vibration testing signal. The paper presents the idea of energetic identification method of degradation stage of prestressed concrete. Beams have been subject to static load until their crack. This method can be applied in research of energy distribution and structural changes in mechanical objects.

Keywords: diagnostics, degradation process, energy distribution.

1. MODEL ANALIZY DEGRADACJI OBIEKTU MECHANICZNEGO. ENERGETYCZNA METODA OCENY STANU TECHNICZNEGO OBIEKTU MECHANICZNEGO

Obiekt mechaniczny jest systemem mechanicznym o określonym przestrzennym rozkładzie mas, sztywności i tłumień [1].

Uszkodzenie elementu może wystąpić w wyniku ewolucyjnego procesu destrukcji lub w wyniku chwilowego przeciążenia [1]. Niszczenie układu mechanicznego następuje wówczas, gdy porcja energii (mocy) spowoduje zmianę jego własności strukturalnych, lub gdy przy ciągłej kumulacji energii nastąpi przekroczenie wartości granicznych, powodując niszczenie węzła

konstrukcyjnego. Procesy te mają wymiar energetyczny [5-6].

Jeśli przyrost pracy sił zewnętrznych działających na wyodrębniony element systemu jest większy od dopuszczalnego przyrostu energii wewnętrznej, następuje zmiana konfiguracji struktury na zaburzoną, co oznacza destrukcję tego fragmentu struktury. Bezpośrednią przyczyną uszkodzenia materiału jest utrata stateczności równowagi wewnętrznej w odkształconym materiale [4]. Do teoretycznego wyznaczenia niebezpiecznych (ze względów wytrzymałościowych) stanów odkształcenia niezbędna jest znajomość fizycznego modelu materiału zdefiniowanego za pomocą gęstości energii odkształcenia [1].

W badaniach stanu technicznego i ocenie trwałości obiektu, sprowadzającym się do śledzenia trendu ewolucji destrukcji posłużono się metodą analizy rozkładu mocy obciążeń dynamicznych [1]. Metoda ta jest podstawą identyfikacji trendu destrukcji. Jest nowoczesną, energetyczną metodą analizy trwałościowej obiektu.

Budując model degradacji obiektu technicznego należy uwzględnić moc dyssypowaną N_d traconą na procesy destrukcji [4-5].

Wielkościami opisującymi proces są siły wymuszające F_k , moce obciążeń N_k i moce przenoszone N_{ik} dla zjawisk destrukcji wewnętrznej. Rozpływ energii drganiowej jest modelowany podobnie jak przepływ ciepła w strukturze. Metoda uwzględnia przestrzenną zmianę energii w indywidualnych podsystemach oraz przepływ energii między podsystemami. Badając rozkład gęstości energii w każdym podsystemie uzyskuje się przestrzenną zmianę odpowiedzi drganiowej (w dziedzinie przyspieszenia, naprężenia, ciśnienia akustycznego, itp.).

Główną ideą metody jest fakt, że stan drganiowy może być reprezentowany przez gromadzoną, dyssypowaną i przenoszoną energię. Z teorii mechaniki ośrodków ciągłych wynika, że rozkład energii w strukturze podlega zachowaniu energii. Zasada zachowania energii dla ośrodków ciągłych może być przedstawiona jako (1):

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \bar{p} + p_{dys.} = 0 \quad (1)$$

gdzie: e – jest gęstością energii, \mathbf{q} – jest wektorem gęstości drganiowej i $p_{dys.}$ – przedstawia energię rozproszoną.

W warunkach stacjonarnych pochodna względem czasu może być pominięta.

W jednym z prostych modeli dyssypacji energii poprzez tłumienie (np. tłumienie histerezy) mamy:

$$p_{dys.} = \omega \eta e \quad (2)$$

Równanie to jest dobrym przedstawieniem uśrednionego przestrzennego tłumienia struktury, szczególnie w wysokich częstotliwościach.

Zgodnie z naturą procesów, zjawisko degradacji struktur mechanicznych opisywane może być poprzez wielkości energetyczne.

Praca zewnętrznej siły wymuszającej jest równa pracy sił tłumienia w układzie, będącej miarą destrukcji. Wartość zrealizowanej pracy jest funkcją miar tłumienia i amplitudy drgań. Uzyskuje maksymalne wartości w rezonansie.

Holistyczny model stanu obciążeń maszyny opisywany jest przez macierz gęstości widmowych mocy - mocy obciążeń dynamicznych w systemie mechanicznym [1]:

$$\{G_{N_{ik}}(j\omega, \Theta)\} = \mathbf{H}_{V_{ik}}(j\omega, \Theta) \cdot \mathbf{G}_{F_k F_k}(j\omega, \Theta) \quad (3)$$

gdzie: $\mathbf{H}_{V_{ik}}(j\omega, \Theta)$ – macierz mobilności dynamicznych,
 $\mathbf{G}_{F_k F_k}(j\omega, \Theta)$ – macierz gęstości widmowych wymuszeń.

Elementy macierzy (4) charakterystyk dynamicznych [1]:

$$\mathbf{H}_{ik}(j\omega, \mathbf{D}(r, \Theta)) = \begin{Bmatrix} H_{11}[j\omega, D_{11}(\Theta)] & \dots & H_{1n}[j\omega, D_{1n}(\Theta)] \\ \dots & \dots & \dots \\ H_{n1}[j\omega, D_{n1}(\Theta)] & \dots & H_{nn}[j\omega, D_{nn}(\Theta)] \end{Bmatrix} \quad (4)$$

są funkcjami przestrzennej miary destrukcji systemu mechanicznego.

W wielowejściowym - wielowyjściowym (MIMO) systemie mechanicznym macierz rozkładu mocy obciążeń dynamicznych maszyny ma postać [1]:

$$\bar{N}_{ik}(\Theta) = \begin{Bmatrix} \bar{N}_{11dyss.} & \bar{N}_{12} & \dots & \bar{N}_{1n} \\ \bar{N}_{21} & \bar{N}_{22dyss.} & \dots & \bar{N}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{N}_{r1} & \bar{N}_{r2} & \dots & \bar{N}_{rndyss.} \end{Bmatrix} \quad r > n \quad (5)$$

przy czym $k = 1, 2, \dots, n$ – punkty przyłożenia wymuszeń zewnętrznych, $i = 1, 2, \dots, n, n+1, n+2, \dots, r$ – punkty badania przyjęte jako punkty krytyczne konstrukcji ze względu na jej trwałość.

Część rzeczywista mocy obciążenia jest miarą dyssypacji wewnętrznej powodującej destrukcję. Kumulacyjne skutki występowania obciążeń objawiają się destrukcją elementów konstrukcji. Miarą destrukcji jest praca wykonana w przedziale czasu $\Delta\Theta$; czyli $L_d = \int_{\Theta} N_d d\Theta$. Praca L_d jest

miarą ewolucji stanu technicznego układu. Przebieg wielkości podcałkowej wykresu $N_d(\Theta)$ pokazuje trend destrukcji w danym węzle konstrukcji.

Wielkością fizyczną stanowiącą podstawę do określenia wielkości granicznych decydujących o zniszczeniu zmęczeniowym materiału jest praca (energia) sił procesów destrukcji.

Elementy macierzy wyżeń energetycznych można zdefiniować następująco [1]:

$$W_{ik} = \frac{\int N_{ik}}{S_i} \quad (6)$$

gdzie: N_{ik} są mocami obciążeń dynamicznych w punktach „i” wywołanych przyłożeniem sił w punktach „k”,

S_i – pole przekroju poprzecznego elementu konstrukcji w pkt. „i”, przy czym N_{ik} są średnimi mocami obciążeń przenoszonymi do punktu „i” maszyny z punktów „k” przyłożenia wymuszeń.

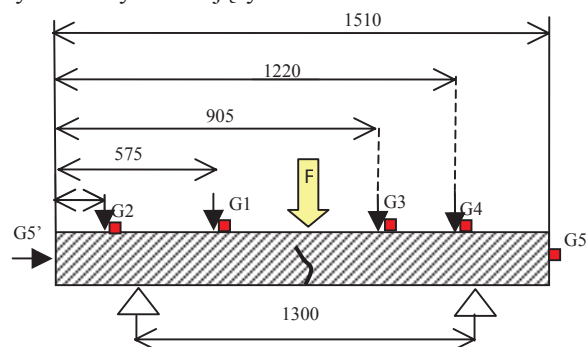
Do oceny trwałości zmęczeniowej wymagana jest znajomość mocy dyssypowanej (części rzeczywistej wyteżeń $ReW_{ik}(\Theta)$) i oddzielenie mocy sił sztywności dynamicznej $ImW_{ik}(\Theta)$) [7].

$$\int_{\Theta_0}^{\Theta_r} Re W_{ik}(\Theta) d\Theta + \frac{1}{2} \int_{\Theta_0}^{\Theta_r} Im W_{ik}(\Theta) d\Theta < E_{gr} \quad (7)$$

Aby wyznaczyć pracę sił procesu destrukcji należy znać funkcję podcałkową. Chwilowe przeciążenia mogą także osiągnąć wartości graniczne. Zniszczenie zmęczeniowe powstaje głównie w wyniku odkształcenia sprężystego lub plastycznego na krawędziach wad materiału. Ilość energii dyssypowanej oraz dystrybucja w objętości materiału decydują o trwałości elementów.

2. ENERGETYCZNE CHARAKTERYSTYKI DEGRADACJI STRUKTURALNEJ BELKI

Celem badań była analiza porównawcza procesu degradacji dwóch belek strunobetonowych (rys.1,2,3), o oznaczeniu: 118 i 125. Różniły się one stopniem sprężenia betonu. Badania stanu technicznego belek realizowano w oparciu o analizę wymuszenia testującego i odpowiedzi drganiowej belek. Badania prowadzono dla stopniowo zwiększanego obciążenia statycznego belki (siła F , przykładana w środku belki: 5,10,...75 kN) i w narastających stanach degradacji - pęknięcia belki (wzrost głębokości szczeliny) w wyniku kolejno zadawanych obciążeń. Na rysunkach 4-5 zamieszczono porównanie modułów gęstości widmowych mocy GN testujących obciążeń dynamicznych belek, wyznaczonych w poszczególnych stanach degradacji. Belki ulegały degradacji (pękaniu) z różną intensywnością. Jest to odzwierciedlane w charakterystykach dynamicznych i wartościach mocy obciążeń dynamicznych testujących.



Rys.1. Belka strunobetonowa obciążana statycznie. Rozmieszczenie punktów wymuszeń o charakterze impulsowym i punktów rejestracji drgań

Na rysunkach 4 i 5 zamieszczono moduły części urojonych i moduły części rzeczywistych gęstości widmowych mocy - mocy obciążeń dynamicznych $GN_{i3}(f)$ obydwu belek, gdzie $i = 1, 2, 3, 4, 5$, są

punktami badania odpowiedzi w badaniach testujących ich stan. Symbol $GN_{i3}(f)$ oznacza gęstość widmową mocy - mocy obciążeń testujących belki, wyznaczoną przy zadawaniu wymuszenia w punkcie 3 i pomiarze odpowiedzi w punkcie 1. Poszczególne charakterystyki przedstawione na rysunkach zostały wyznaczone w różnych stanach ich degradacji przy zadawaniu wymuszenia testującego. Charakterystyki te opisują stan degradacji belek.



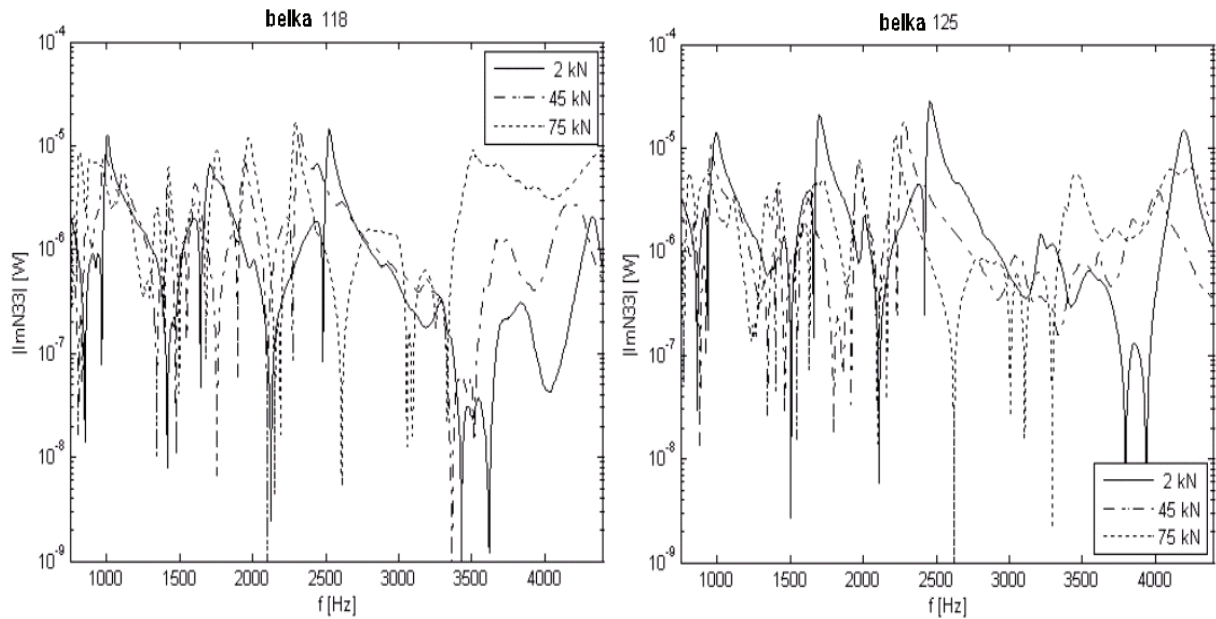
Rys.2. Testowanie belki z betonu sprężonego prowadzono po każdym kroku zwiększenia obciążenia statycznego i stopniowo postępującej degradacji struktury (pęknięcia).



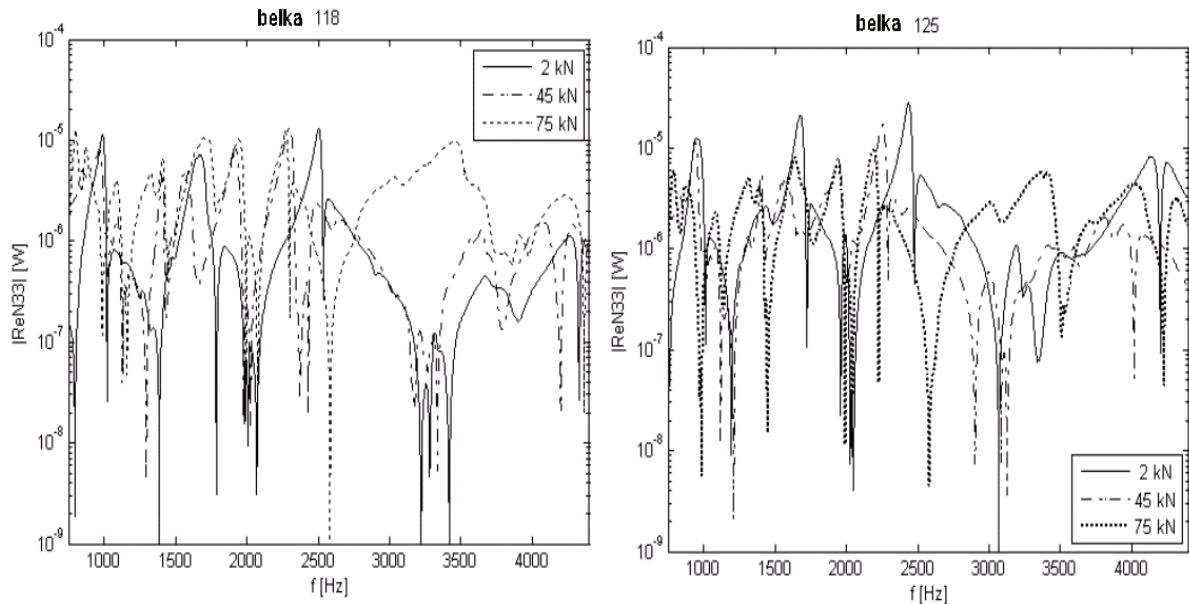
Rys.3. Utrata spójności betonu w miejscu statycznego obciążania belki.

Części rzeczywiste widm gęstości mocy - mocy sygnału testującego wyznaczają moc sił procesu degradacji belki podczas badań testujących różnych stanów belki. Natomiast części urojone $GN_{i3}(f)$ widm gęstości mocy - mocy są estymatami funkcyjnymi mocy sił sztywności dynamicznej i sił bezwładności belki. Ze wzrostem statycznego obciążenia ulegają obniżeniu częstotliwości charakterystyk. Oznacza to obniżenie sztywności dynamicznej belki (rys. 4).

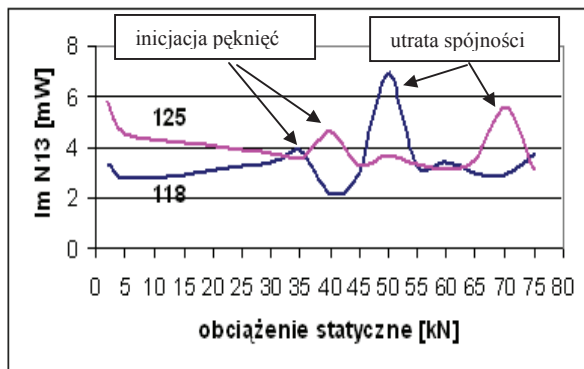
Analizując wykresy części rzeczywistych mocy sił w funkcji częstotliwości (w poszczególnych zakresach częstotliwości) obserwuje się duże zmiany (maksimów) w przebiegu tych funkcji (rys. 5), różne dla każdej z belek. Oznacza to, iż wraz ze wzrostem obciążeń statycznych belki wystąpiły procesy degradacyjne o różnej intensywności. Szczególnie w końcowej fazie badań wystąpił wzrost procesów degradacyjnych.



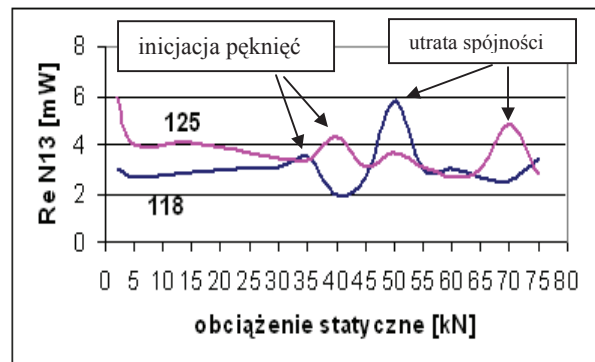
Rys.4. Porównanie gęstości widmowych mocy - mocy sił sztywności dynamicznych belek 118 i 125 w różnych stanach ich degradacji



Rys. 5. Porównanie gęstości widmowych mocy - mocy sił procesu degradacji (tłumienia wewnętrznego) belek w różnych stanach ich degradacji



Rys. 6. Charakterystyka zmian mocy sił sztywności dynamicznej



Rys. 7. Charakterystyka energetyczna degradacji belek betonowych

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono odpowiednio estymaty amplitudowe mocy dyssypowanych (rys. 6) i mocy sił sztywności dynamicznej (rys. 7) sygnałów testujących, wyznaczonych ze wzoru (8)

$$N_{ik} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} G_{N_{ik}}(\omega) d\omega \quad (8)$$

Analizując charakterystyki funkcyjne (rys. 4 i 5) oraz wykresy amplitud mocy (rys. 6 i 7) obciążeń testujących w funkcji obciążenia belek stwierdzić należy, że w obydwu belkach wystąpiły pierwsze zmiany funkcji przenoszenia energii przy obciążeniu statycznym około 40 – 45 kN. Przy dalszym obciążaniu, wyższe wartości sztywności dynamicznej oraz przenoszenia energii odnotowano dla belki 125. Prawdopodobnie w belce 118 nastąpiła utrata spójności betonu już przy obciążeniach około 50 kN, natomiast w belce 125 przy obciążeniu około 70 kN. Całkowite zniszczenie belek – ich złamanie - wystąpiło przy 70-75 kN.

3. WNIOSKI

- 1) Metoda analizy rozplywu energii obciążeń dynamicznych pozwoliła wyznaczyć charakterystyki procesu degradacji obiektu mechanicznego.
- 2) Porównanie wyników przeprowadzonych badań i współbieżnej obserwacji spójności struktury belek potwierdziła, że na podstawie charakterystyk energetycznych możliwa jest detekcja i określenie obciążenia granicznego inicjującego pęknięcie struktury belki strunobetonowej.

LITERATURA

- [1] H. Kaźmierczak, Analiza rozkładu mocy obciążeń dynamicznych w systemach mechanicznych, Rozprawy Nr 363, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
- [2] H. Kaźmierczak, Dynamic load power distribution in mechanical systems, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Zeszyt 3(127), 127-141, ITE Radom 2003.
- [3] H. Kaźmierczak, Badania trwałości zmęczeniowej maszyn metodą analizy rozkładu mocy obciążeń dynamicznych, Diagnostyka vol.26, 133-142, 2002, PTDT przy Wydziale Nauk Technicznych PAN.
- [4] H. Kaźmierczak, Energetic description of the destruction process of machine structural nodes, Machine Dynamics Problem, Vol. 27, No 3, 113-123, Warszawa 2003.
- [5] H. Kaźmierczak, Rola eksperymentu modalnego w badaniach trwałości struktur mechanicznych, w Zagadnienia Analizy Modalnej Konstrukcji Mechanicznych 131-137, AGH, Kraków 2003.
- [6] H. Kaźmierczak, Analiza destrukcji maszyny metodą rozkładu mocy obciążeń dynamicznych, DIAGNOSTICS'2004 –3rd International Congress of Technical Diagnostics.
- [7] H. Kaźmierczak, J. Kromulski, T. Pawłowski Energetyczne charakterystyki degradacji przyczepy, Diagnostyka vol.33, 2005, PTDT przy Wydziale Nauk Technicznych PAN.
- [8] H. Kaźmierczak, J. Kromulski, C. Cempel, R. Barczewski, Energetic description of the destruction process of steel concrete structures, COST Action 534 New Materials and Systems for Prestressed Concrete Structures, Workshop of COST on NTD Assessment and New Systems in Prestressed Concrete Structures, Radom 2005.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę 136/E/SPB/COST/T07/DWM11, w ramach COST Action 534 "New materials and systems for prestressed concrete structures"- Use of the vibroacoustic signals for diagnosis of defect development in pre stressed concrete structures



Prof. dr hab.
Henryk KAŹMIERCZAK – absolwent Wydziału Mat. Fiz. Chem. Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Stopień doktora habilitowanego nauk technicznych z dziedziny mechanika uzyskał w 2002r. na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej. Jest autorem ponad 250 publikacji naukowych. Zajmuje się zagadnieniami z dziedziny dynamiki maszyn, diagnostyki technicznej, identyfikacji własności dynamicznych maszyn, w tym metodami analizy modalnej. Ostatnie publikacje dotyczą energetycznego modelowania obciążeń w maszynach oraz zastosowań, opracowanej przezeń metody analizy rozkładu mocy obciążeń dynamicznych do badań procesów degradacji i trwałości maszyn.



Dr Jacek KROMULSKI jest adiunktem w Przemysłowym Instytucie Maszyn Rolniczych. W działalności naukowej zajmuje się zagadnieniami dynamiki strukturalnej, modelowania, analizy modalnej oraz analizy sygnałów. Jest autorem ponad 80 prac dotyczących wspomnianych zagadnień.



Dr inż.
Roman BARCZEWSKI
jest adiunktem oraz kierownikiem Laboratorium Diagnostyki Systemów w Instytucie Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej. Specjalizacja: diagnostyka i wibroakustyka maszyn

i środowiska, diagnostycznie zorientowane metody i techniki cyfrowego przetwarzania sygnałów WA; samouczące i samoorganizujące systemy diagnostyczne. Członek Zespołu Ergonomii PAN/O Poznań, Członek Zarządu Głównego PTDT. Członek KT PKN nr 158 ds. Bezpieczeństwa maszyn i ergonomii.



Prof. dr hab.
Czesław CEMPEL jest kierownikiem Zakładu Wibroakustyki i Biodynamiki Systemów Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, mult. dr h. c., członek korespondent Polskiej

Akademii Nauk, członek Komitetu Badań Naukowych w trzeciej kadencji. Jest członkiem wielu organizacji naukowych krajowych i zagranicznych np. IMEKO, EUROSCIENCE, GAMM. Jeden z założycieli PTDT w 1990 r. Obecnie jest honorowym przewodniczącym PTDT. Zajmuje się wibroakustyką i diagnostyką maszyn, inżynierią systemów, ekologią. Autor ponad 350 opublikowanych prac, 14 skryptów i książek.