

## METODA DIAGNOSTYKI ENERGETYCZNEJ W ZASTOSOWANIU DO ROZPOZNAWANIA STANU TECHNICZNEGO I OBCIĄŻENIA BELEK ŻELBETOWYCH

Marian Witalis DOBRY

Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej, Zakład Wibroakustyki i Bio-Dynamiki Systemów  
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. 061 665 2347, e-mail: Marian.Dobry@put.poznan.pl

### Streszczenie

W pracy przedstawiono nową metodę diagnostyki energetycznej. Metoda umożliwia rozpoznawanie stanu technicznego i obciążenia belki na podstawie analizy mocy sił wewnętrznych belki pobudzonej do drgań siłą impulsową. Wstępne badania wykazały również, że stosując tę metodę, możliwe jest rozróżnianie historii obciążenia belki.

Słowa kluczowe: energetyczna diagnostyka, przepływ energii w systemach mechanicznych.

### THE METHOD OF ENERGY DIAGNOSTICS IN APPLICATION TO RECOGNITION OF TECHNICAL CONDITION AND LOAD OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

### Summary

New energy diagnostics method has been presented in the paper. The method allows recognition of technical condition and load of the reinforced concrete beam, based on power analysis of the internal forces in the beam excited to vibration using impact force. Preliminary investigations also show, that it is possible to determine history of the beam loading, by applying this method.

Keywords: energy diagnostics, energy flow in mechanical systems.

## 1. WPROWADZENIE

Prezentowane wyniki dotyczą wstępnej diagnostyki energetycznej belki żelbetowej w różnych stanach obciążenia.

Badania eksperymentalne wykonano w Laboratorium Wytrzymałości w Politechnice Kieleckiej. Na ich podstawie wykonano wstępne analizy widmowe określając kilka podstawowych częstotliwości drgań własnych belki swobodnej oraz systemu belka-maszyna wytrzymałościowa w zależności od stanu obciążenia i stanu technicznego belki.

## 2. WSTĘPNA ANALIZA ROZDZIAŁU MOCY I PRZEPŁYWU ENERGII W BELCE ŻELBETOWEJ

Metoda energetyczna diagnostyki (w odróżnieniu do wibroakustycznej [1]) wykorzystuje ścisły związek między dynamiką systemu mechanicznego i rozdziałem mocy oraz przepływem energii w dynamicznej strukturze badanego systemu [2, 3, 5, 9, 15]. Wielkościami kryterialnymi w tej metodzie do oceny w diagnostyce realizowanej „on-line” są **moce dynamicznych sił strukturalnych** wyrażonych w

watach [W] takie jak: **moc bezwładności, moc strat i moc sprężystości** związane z różnymi zjawiskami fizycznymi towarzyszącymi ruchowi systemu wywołanego przez siły zewnętrzne.

Uwzględnienie istotnego czynnika zwłaszcza w diagnostyce, którym jest czas, wymagało wprowadzenia drugiej wielkości kryterialnej, którą jest **dawka energii wyrażona w dżulach [J]**. Wymienione energetyczne wielkości fizyczne uzyskać można na drodze eksperymentalnej i analitycznej [2, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14].

Dysponując danymi z pomiarów wykonanych w Laboratorium Wytrzymałości Politechniki Kieleckiej przekazanych przez dr inż. Romana Barczewskiego i ich pierwszymi analizami energetycznymi wykonanymi przez autora możliwe było określenie rozdziału mocy oraz dawki energii przypadającej na każdy kilogram masy zredukowanej do punktu redukcji belki.

Wielkościami kryterialnymi mogą być zatem:

- a) **jednostkowa moc maksymalna (JMM)** przypadająca na każdy kilogram masy zredukowanej dla danej mody drgań, czyli: W/kg
- b) **jednostkowa dawka energii (JDE)** przypadająca na każdy kilogram dynamicznej

masy zredukowanej dla danej mody drgań, czyli:  $J/kg$

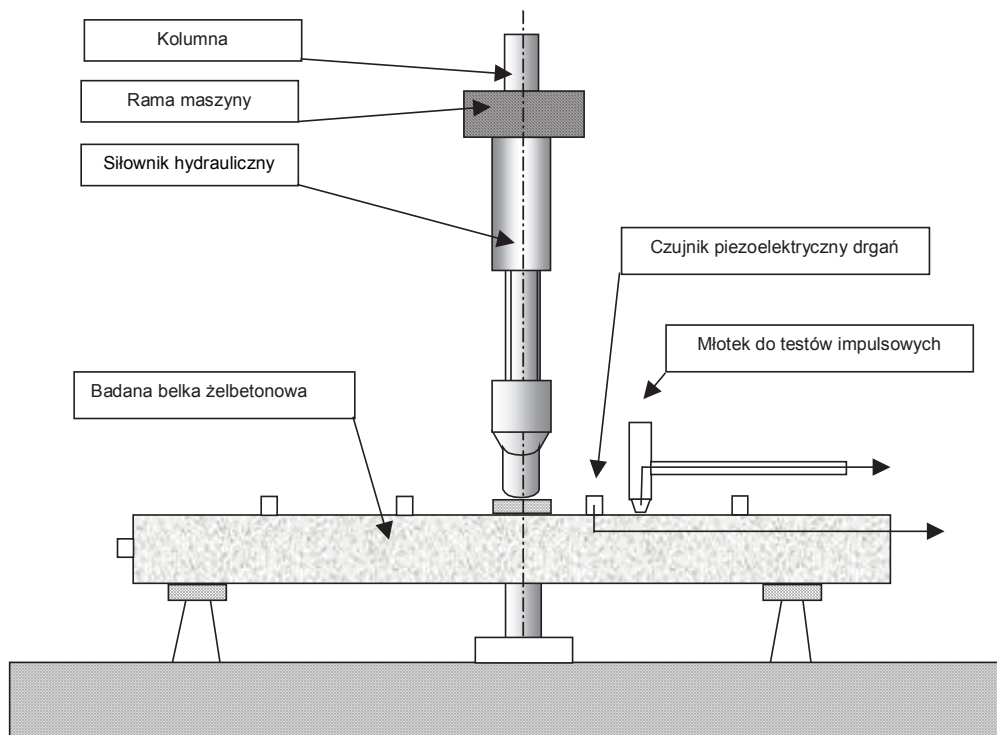
- c) **sumy odpowiednich wielkości** wymienionych w punktach a) i b)
- d) **jednostkowe moce średnie** przypadające na każdy kilogram dynamicznej masy zredukowanej dla każdej mody oraz ich sumy.

## 2.1. Wyniki wstępnych analiz dynamicznych i energetycznych belki żelbetowej w różnych stanach obciążenia

Badania dynamiczne belki żelbetowej przeprowadzono na stanowisku badawczym

Politechniki Świętokrzyskiej w różnych stanach naprężenia żelbetonowej belki wywołanych hydrauliczną maszyną wytrzymałościową.

Na rys.1 pokazano sposób obciążenia belki żelbetowej i sposób jej podparcia. W punktach podparcia podłożono kawałki materiału elastycznego. Testy impulsowe wykonywano dla różnych obciążeń. Sygnał odpowiedzi odbierany był w pobliżu punktu impulsowego pobudzenia do drgań belki. Sygnały przyspieszeń drgań rejestrowane były na cyfrowym rejestratorze magnetycznym.



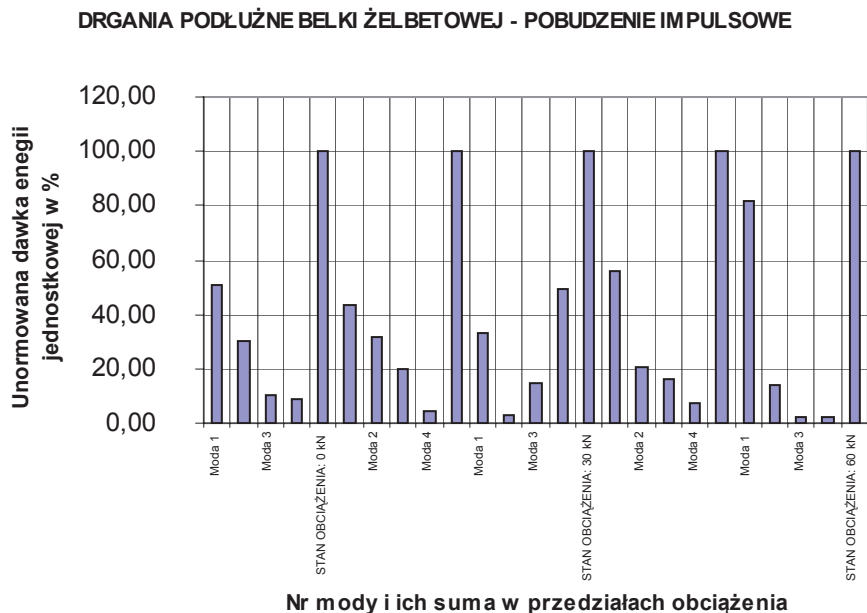
Rys. 1. Schemat sposobu zamocowania i obciążania badanej belki żelbetowej w hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej w czasie testów impulsowych

### 2.1.1. Energetyczna diagnostyka drgań podłużnych badanej belki żelbetowej

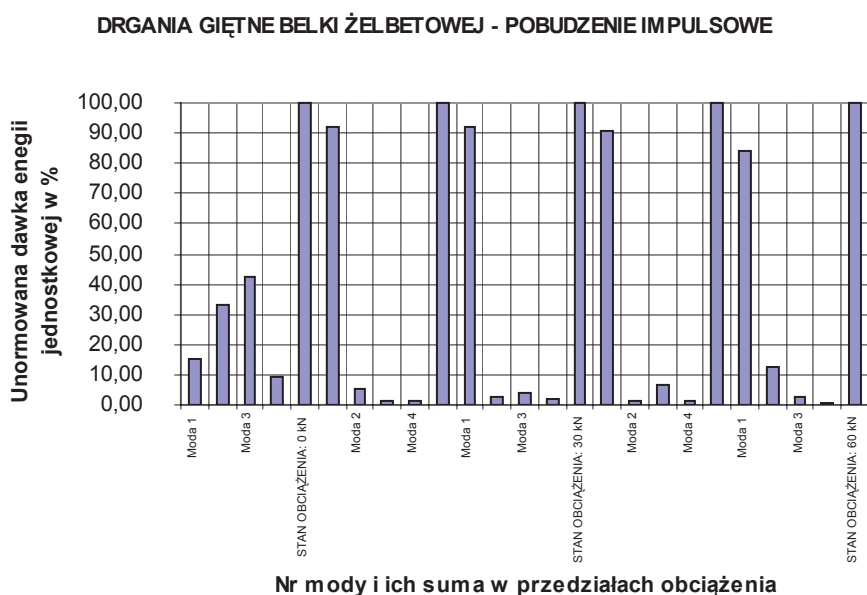
Na potrzeby energetycznych badań belki żelbetowej **opracowano model energetyczny testu impulsowego** przeprowadzanego w Laboratorium Wytrzymałości Politechniki Świętokrzyskiej. Model ten umożliwia, oprócz analizy dynamicznej, również rozdział wejściowej mocy i dawek energii na trzy rodzaje mocy i energii: moc i dawkę energii bezwładności, moc i dawkę energii strat oraz moc i dawkę energii sprężystości. **Jest to zatem całościowa i strukturalna amplitudowo-częstotliwościowa analiza rozdziału mocy i przepływu energii w badanej strukturze mechanicznej uwzględniająca wszystkie pobudzenia siłami zewnętrznymi.**

W celu uniezależnienia badań energetycznych od wielkości siły dynamicznej impulsu pobudzenia wykonano unormowanie wyników określając procentowy udział JDE dla poszczególnych mód w całkowitej jednostkowej dawce energii przyjętej za 100 %. Wyniki tych obliczeń dla drgań podłużnych pokazano na rys. 2.

**Jak wynika z przeprowadzonych badań, przepływ energii dla pierwszej częstotliwości drgań własnych silnie zależy od stanu obciążenia belki żelbetowej i jest do niego wprost proporcjonalny. Ten wniosek sprawia, że możliwa jest diagnostyka belek żelbetowych z wykorzystaniem tylko jednej pierwszej mody drgań własnych.** Oznacza to, że nadzór diagnostyczny realizowany zaproponowaną metodą diagnostyki energetycznej byłby znacznie uproszczony.



Rys. 2. Unormowana Jednostkowa Dawka Energii – JDE w poszczególnych stanach obciążenia uzyskana na podstawie **drgań podłużnych** belki wymuszanych siłą impulsową



Rys. 3. Unormowana Jednostkowa Dawka Energii – JDE w poszczególnych stanach obciążenia uzyskana na podstawie **drgań giętnych** belki wymuszanych siłą impulsową

### 2.1.2. Energetyczna diagnostyka drgań giętnych badanej belki żelbetowej

Przeprowadzona normalizacja wykazała również, że w przypadku obciążenia belki siłą poprzeczną, wyższe częstotliwości drgań własnych nie odgrywają tak dużej roli jeśli chodzi o przepływ energii. Cała przepływająca energia wprowadzona przez siłę impulsową gromadzi się w pierwszej modzie i jej udział dla wszystkich przypadków z obciążeniem mieści się w przedziale: **od 84 do 92 %**. Wynika z stąd wniosek, że diagnostykę

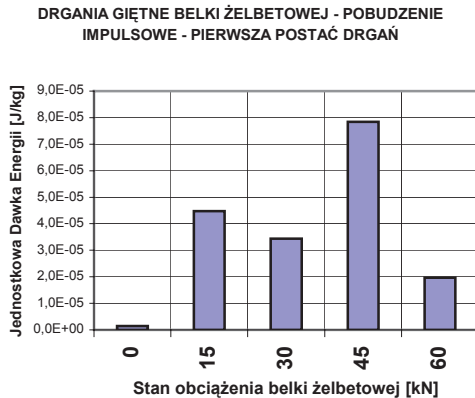
energetyczną można prowadzić również w tym przypadku tylko na podstawie pierwszej mody drgań giętnych – rys. 3.

### 3. ZALEŻNOŚĆ KRYTERIALNYCH WIELKOŚCI ENERGETYCZNYCH OD STANU OBCIĄŻEŃ I STANU TECHNICZNEGO BELKI ŻELBETOWEJ

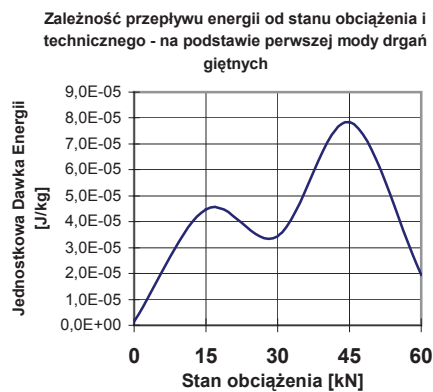
Zestawiając uzyskane dane dla pierwszej mody w przypadku drgań giętnych można uzyskać zależność np. JDE od stanu obciążenia i stanu

technicznego belki. Pokazano to na kolejnych dwóch wykresach a) i b) na rys. 4.

a)



b)



Rys. 4. Zależność Jednostkowej Dawki Energii (JDE) od stanu obciążenia i stanu technicznego belki żelbetowej dla pierwszej postaci drgań własnych systemu (pierwszej mody); a) wykres kolumnowy, b) wykres wygładzany liniowy

#### Poszczególne stany oznaczają:

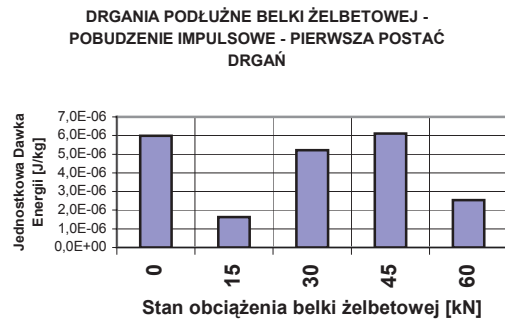
**Stan 0** na wykresach oznacza **belkę nieobciążoną** – nową, przygotowaną do badań, bez historii obciążeń.

**Stan 15 kN** uzyskano dla belki pierwszy raz obciążanej.

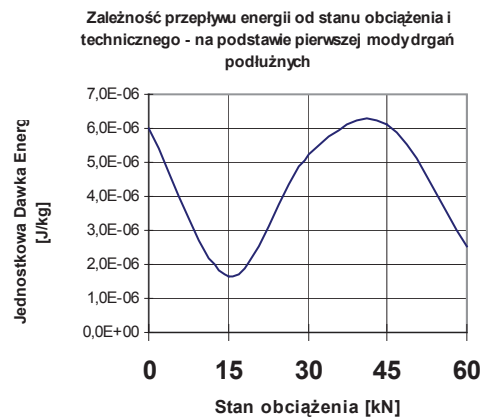
**Stan 30 kN** dotyczy sytuacji po ponownym obciążeniu do wartości 30 kN, jednakże belka przedtem była obciążona do wartości siły 15 kN, a następnie obciążenie zdjęto w celu zmiany sterowania maszyny wytrzymałościowej na zakres do 60 kN.

**Stan 45 kN** dotyczy wzrostu obciążenia belki z zachowaniem ciągłości obciążenia w stosunku do 30 kN, dla którego belka powinna być bliska granicznej wartości obciążeń i co za tym idzie - dopuszczalnych wartości naprężeń.

a)



b)



Rys. 5. Zależność Jednostkowej Dawki Energii (JDE) od stanu obciążenia i stanu technicznego belki żelbetowej dla pierwszej postaci drgań własnych – podłużnych systemu (pierwszej mody); a) wykres kolumnowy, b) wykres wygładzany liniowy

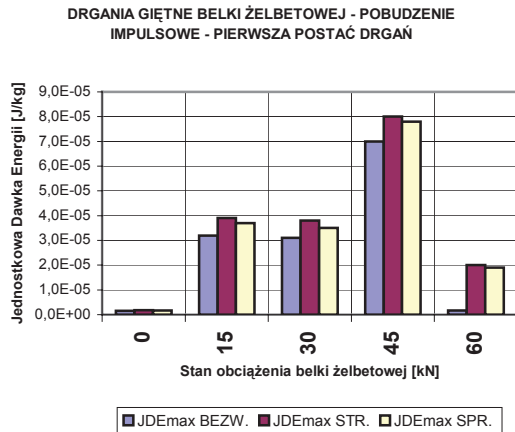
**Stan 60 kN** dotyczy sytuacji, w której na belce pojawiły się widoczne okiem pęknięcia powodujące zerwanie się naklejonych tensometrów. Jest to stan degradacji żelbetonowej belki choć obciążenie było utrzymywane w celu wykonania badań drganiowych.

Wnioski:

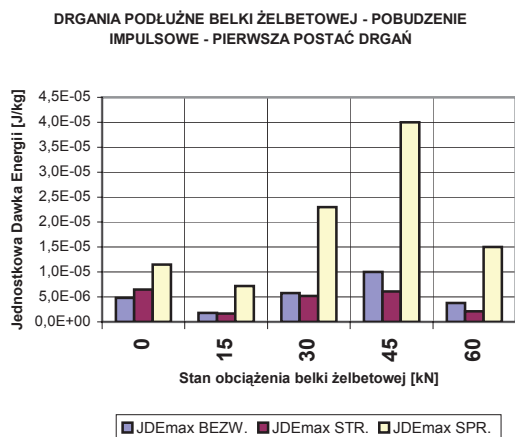
1. Istnieje wprost proporcjonalna zależność JDE przepływającej w teście impulsowym od obciążenia.
2. Diagnostyka energetyczna rozróżnia historię stanu obciążenia.

#### 4. ZMIANA ROZKŁADU PRZEPLYWU ENERGII W STRUKTURZE BELKI W ZALEŻNOŚCI OD WIELKOŚCI OBCIĄŻENIA I STANU TECHNICZNEGO BELKI ŻELBETOWEJ.

Analiza rodzajowa wartości maksymalnych dawek energii wykazuje istotne zróżnicowanie obu stanów impulsowego obciążenia i rodzaju drgań - rys. 6 i 7.



Rys. 6. Rozdział energii w dynamicznej strukturze belki żelbetowej drgającej giętnie na energię bezwładności, strat i sprężystości w zależności od wielkości obciążenia (naprężeń) i stanu technicznego belki. Test impulsowy



Rys. 7. Rozdział energii w dynamicznej strukturze belki żelbetowej drgającej podłużnie na energię bezwładności, strat i sprężystości w zależności od wielkości obciążenia (naprężeń) i stanu technicznego belki. Test impulsowy

W drganiach giętnych dominuje dla wszystkich wielkości obciążenia energia strat – czyli w tym przypadku energia dyssypacji - zamiany energii mechanicznej na ciepło w procesie tarcia wewnętrznego i konstrukcyjnego.

Odmienny obraz rozdziału energii strukturalnej uzyskano dla drgań podłużnych belki – rys. 7. Dominującą energią w tym przypadku jest energia sprężystości maksymalnie kilkakrotnie przekraczająca inne rodzaje energii. Drugą energią jest energia bezwładności, a trzecią energia start (dyssypacji). Wszystkie energie są proporcjonalne do stanu obciążenia (naprężeń) belki.

## 5. WNIOSKI

Przeprowadzone wstępne badania metodą diagnostyki energetycznej z wykorzystaniem sygnałów wibroakustycznych wykazały dużą wrażliwość energetycznych symptomów na stan obciążenia i stan techniczny badanej belki żelbetowej. **Upoważniają one do sformułowania następujących wstępnych wniosków:**

1. wartości Jednostkowej Dawki Energii rosną wraz ze wzrostem obciążenia aż do stanu wyczerpania się nośności betonu i zapoczątkowania procesu zniszczenia struktury belki żelbetowej,
2. odstępstwo od tej reguły zanotowano, zarówno dla drgań giętych i podłużnych, dla zakresu 30 kN obciążenia, który to zakres zadano ponownie po odciążeniu belki z poziomu 15 kN. Ten wniosek umożliwia postawienie tezy, że **dynamiczne badania energetyczne wykazują historię obciążeń badanej belki,**
3. analiza przepływu energii do poszczególnych mód drgań belki wykazała kolejną prawidłowość, że najwięcej energii pochodzącej od impulsowej siły wymuszenia przepływa do pierwszej mody drgań giętych (porzecznych) w czasie obciążenia belki,
4. w przypadku drgań giętych w pierwszej modzie przepływa od 84 do 92 % całej energii wejściowej do badanego systemu mechanicznego pochodzącej od siły impulsowego pobudzenia,
5. powyższy wniosek świadczy o możliwości prowadzenia **energetycznej diagnostyki kontrolnej (na etapie końca produkcji – odbioru technicznego przez jednostki Kontroli Jakości) oraz energetycznej diagnostyki eksploatacyjnej** z wykorzystaniem tylko pierwszej postaci giętych drgań własnych belek żelbetowych,
6. dominującą energią w przepływie strukturalnym w przypadku drgań giętych jest energia start (dyssypacji), a w przypadku drgań podłużnych energia sprężystości,
7. wszystkie rodzaje energii wykazują proporcjonalność do wielkości obciążenia i wskazują wyraźnie utratę nośności – zmianę struktury przez jej degradację (stan obciążenia 60 kN).

## LITERATURA

- [1] CEMPEL C.: Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn. Wyd. NT, Warszawa 1982 r.
- [2] DOBRY M. W.: *Optymalizacja przepływu energii w systemie Człowiek – Narzędzie – Podłoże (CNP)*., Wyd. Politechniki Poznańskiej 1998; Seria: Rozprawy Nr 330 ISSN 0551-6528 Poznań, marzec 1998, (128 stron)

- [3] DOBRY M. W.: *Energy diagnostics and assessment of dynamics of mechanical and biomechatronics systems*, Machine Dynamics Problems 2001, Vol. 25, No.3/4 Warsaw University of Technology, Warsaw 2001, pp. 35-54
- [4] DOBRY M. W.: *Energy analysis of mechanical and biomechanical systems*, STUDIA I MATERIAŁY LIIII, TECHNIKA 3, Współczesne problemy techniki, Oficyna Wyd. Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2003, s. 137-158
- [5] DOBRY M. W.: *Energy method of diagnostics of health hazard by vibration induced diseases*, Structures – Waves – Human Health, Volume XIII, No. 1, Polish Acoustical Society, Division Kraków, Kraków 2004, pp. 31-46
- [6] GRYGOROWICZ M.; DOBRY M. W.: *Concentration of energy flow in biodynamic structure of human exposed to whole-body vibration*, Structures – Waves – Human Health, Volume XIII, No. 1, Polish Acoustical Society, Division Kraków, Kraków 2004, pp. 47-54
- [7] WOJSZNIŚ M., DOBRY M. W.: *Dynamics of energy flow in a biomechanical Human-Machine System – hand-arm vibrations*, Structures – Waves – Human Health, Volume XIII, No. 1, Polish Acoustical Society, Division Kraków, Kraków 2004, pp. 55-70
- [8] DOBRY M. W.: *Dependence of energy flow and damages of human body exposed on hand-arm vibration*, XXI SYMPOZJUM – VIBRATIONS IN PHYSICAL SYSTEMS – Poznań-Kiekrz 2004
- [9] DOBRY M. W.: *Energetyczna metoda diagnostyki technicznych i inteligentnych biologiczno-technicznych systemów oraz jej zastosowania*, Diagnostyka Vol. 30, tom 1, Olsztyn 2004, s. 137-146
- [10] DOBRY M. W., GRYGOROWICZ M.: *Energetyczna transmitancja struktury biodynamicznej człowieka poddanego działaniu wibracji ogólnej*, Diagnostyka Vol. 30, tom 1, Olsztyn 2004, s. 147-150
- [11] DOBRY M. W., WOJSZNIŚ M.: *Oddziaływanie drgań miejscowych na organizm ludzki – ocena analizy dynamicznej i energetycznej*, Diagnostyka Vol. 30, tom 1, Olsztyn 2004, s. 151-154
- [12] DOBRY M. W., GRYGOROWICZ M.: *Transmitancja mocy struktury biodynamicznej człowieka poddanego działaniu wibracji ogólnej w pozycji siedzącej*, Czasopismo Techniczne,

mechanika, z. 5-M/2004, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004, s. 81-89

- [13] WOJSZNIŚ M., DOBRY M. W.: *Analiza energetycznego oddziaływania dużego zmechanizowanego narzędzia uderowego na człowieka*, Czasopismo Techniczne, Mechanika, z. 5-M/2004, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004, s. 379-387
- [14] DOBRY M. W.: *Metoda energetycznego dostosowania maszyn do człowieka-operatora i środowiska na etapie projektowania*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Vol. 2, Nr 2 spec., Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004, s. 29-39
- [15] DOBRY M. W.: *Diagnostyka energetyczna systemów technicznych*. W: Inżynieria diagnostyki Maszyn, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej i Instytut Technologii Eksploatacji PIB Radom, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004 r., s. 314-339

---

Dr hab. inż. Marian W. DOBRY, prof. nadzw. – jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Politechniki Poznańskiej na Wydziale Budowy



Maszyn i Zarządzania. W latach 2002-2005 pełnił funkcję Prodziekana ds. Kształcenia na studiach dziennych. Jest kierownikiem Laboratorium Dynamiki i Ergonomii Metasystemu: Człowiek – Obiekt Techniczny – Środowisko. Reprezentuje dziedzinę: Mechanika, a w niej specjalności: Mechanika stosowana, Dynamika Maszyn, Wibroakustyka, Rozdział mocy i przepływ energii w systemach mechanicznych i biologiczno-mechanicznych oraz ich optymalizacja, Energetyczna diagnostyka, Ochrona człowieka i środowiska przed drganiami i hałasem (ujęcie konwencjonalne i energetyczne). Opublikował jedną monografię oraz ponad 120 publikacji. Jest autorem około 39 patentów krajowych i zagranicznych (Europa, USA i Japonia). Jest członkiem Komitetu Mechaniki PAN w sekcji Dynamiki Układów i Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego oraz wielu towarzystw naukowych w kraju i zagranicą. Jest ekspertem Międzyresortowej Komisji ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy - powołanej przez Premiera RP.