

## **ENERGETYCZNA METODA DIAGNOSTYKI TECHNICZNYCH I INTELIWENTNYCH BIOLOGICZNO-TECHNICZNYCH SYSTEMÓW ORAZ JEJ ZASTOSOWANIA**

Marian Witalis DOBRY

Poznań University of Technology, Institute of Applied Mechanics, Vibroacoustics and Bio-Dynamics of Systems Group, Laboratory of Dynamics and Ergonomics of Human – Technical Object – Environment Metasystem, 3 Piotrowo Street, 60-965 Poznań, POLAND  
tel.: ++48 61 665 23 47, fax.: ++48 61 665 23 07  
E-mail: [Marian.Dobry@put.poznan.pl](mailto:Marian.Dobry@put.poznan.pl)

### Streszczenie

Publikacja dotyczy nowej metody diagnostyki technicznych i inteligentnych biologiczno-technicznych systemów w dziedzinach rozdziału mocy i przepływu energii w ich dynamicznej strukturze opracowanej w ostatnich latach. W metodzie wykorzystano ścisły związek między dynamiką badanych systemów i zjawiskami energetycznymi, które zachodzą w badanych systemach. Zjawiska te są silnie zależne od konstrukcji, wykonania, czasu i sposobu eksploatacji, który ma wpływ na stan techniczny badanych obiektów. Pozwalają one ponadto, na podjęcie decyzji o likwidacji obiektów technicznych. Własności metody pokazano na kilku przykładach inteligentnego biologiczno-mechanicznego systemu: Człowiek - Maszyna.

Słowa kluczowe: energetyczna metoda diagnostyki, przepływ energii, systemy biologiczno-mechaniczne

### ENERGY METHOD OF DIAGNOSTICS OF TECHNICAL AND INTELLIGENT BIOLOGICAL-TECHNICAL SYSTEMS AND ITS APPLICATIONS

#### Summary

The publication is concerned with a new diagnostics method of technical and intelligent biological-technical systems in the domains of power distribution and energy flow in the dynamical structure of the systems, which was elaborated during last years. In this method, a close relationship between the dynamics of the investigated system and energy phenomena was used. The phenomena are strongly dependent from design, manufacturing, time and the way of operation that has influence on the technical condition of the investigated systems. Moreover, they allow to take decision on liquidation technical objects. The properties of the method have been shown on several examples of intelligent biological-mechanical Human – Machine System.

Keywords: energy method of diagnostics, energy flow, biological-mechanical systems

## **1. WPROWADZENIE**

Prezentowana energetyczna diagnostyka obiektów technicznych i inteligentnych systemów biologiczno - technicznych prowadzona jest w dwóch dziedzinach: rozdziału mocy oraz przepływu energii w dynamicznej strukturze badanego systemu. Inteligentne systemy biologiczno - techniczne są systemami złożonymi, składającymi się z inteligentnego, biologicznego subsystemu człowieka oraz technicznego subsystemu, który stanowi system współpracujący z człowiekiem w procesie pracy lub zaspokajają inne potrzeby ludzkie. Systemami technicznymi są maszyny i różne urządzenia w środowisku człowieka. Zaliczyć do nich można maszyny technologiczne stacjonarne i zmechanizowane narzędzia ręczne, maszyny ruchome i pojazdy robocze, pojazdy ciężarowe i osobowe, statki,

samoloty, pojazdy kosmiczne - itd. Do tych obiektów technicznych zaliczyć można wszystkie produkty, które w sposób sztuczny wytworzył człowiek w swojej działalności

Subsystemy te współpracują ze sobą i oddziałują na siebie. W przypadku systemu inteligentnego – zawierającego w swojej strukturze człowieka – istotne jest, aby subsystem techniczny oddziaływał na człowieka w zakresie wartości dopuszczalnych różnych czynników psychicznych i fizycznych określonych przez różne dyrektywy i normy [45, 46]. Ważną sprawą jest również, aby techniczny obiekt do swojej obsługi nie wymagał psychicznych i fizycznych właściwości przekraczających możliwości człowieka.

Powyższe powody spowodowały poszukiwania parametru fizycznego pozwalającego obiektywnie określić oddziaływanie obiektu technicznego na

człowieka i odwrotnie. Opracowane standardy różnych oddziaływań obiektów technicznych na człowieka sformułowane są na podstawie odczuwania tych interakcji. Standardy dotyczące bezpieczeństwa ludzi są uzyskane również na podstawie subiektywnego odczuwania zjawisk fizycznych dla reprezentatywnej próbki osób. Szkodliwość różnych wielkości fizycznych na podstawie tak określonych wartości budzi szereg wątpliwości. Związane jest to z indywidualną wrażliwością ludzkich zmysłów na istniejące bodźce różnej natury w np. czasie pracy z wykorzystaniem maszyn.

W przypadku obiektów technicznych problem obiektywnej diagnostyki, pozwalającej poprawnie wyjaśnić aktualny stan obiektu i genezę takiego stanu oraz postawić prognozę co do dopuszczalnego, bezpiecznego czasu dalszej eksploatacji obiektu jest niezwykle istotny. Precyzyjne określanie trwałości i niezawodności obiektów technicznych jest ściśle związane z sukcesem ekonomicznym ich producentów i ochroną środowiska.

Stosowana dotychczas diagnostyka dawała tylko częściową odpowiedź na postawione kwestie. Prognozę trwałości i niezawodności nowych obiektów stawiano najczęściej na podstawie bardzo kosztownych, przyspieszonych badań zmęczeniowych wykonanych modeli lub prototypów obiektów technicznych.

W przypadku systemów biologiczno - technicznych wartości dopuszczalne określano na podstawie wielu tysięcy pomiarów realizowanych przez wiele lat przez różne jednostki badawcze, aby określić standardy międzynarodowe ISO. Badania te zapoczątkowano dopiero wtedy, gdy pojawiły się szkodliwe skutki oddziaływania obiektów technicznych na człowieka. Tak było np. ze zmechanizowanymi narzędziami ręcznymi (np. młotkami pneumatycznymi) stosowanymi powszechnie w procesie pracy.

Można postawić pytanie: czy możliwe jest obiektywne określenie stanu technicznego obiektu technicznego i zagrożenia zdrowia człowieka, na którego te obiekty oddziałują na wszystkich etapach życia obiektu technicznego?

Doświadczenie badawcze zdobyte w prowadzonych przez wiele lat badaniach w Laboratorium Dynamiki i Ergonomii Metasystemu: Człowiek – Techniczny Obiekt – Środowisko (LdiEM:C-TO-Ś) pozwala stwierdzić, że odpowiedź na postawione pytanie może dać energetyczna diagnostyka. Wykorzystuje ona znajomość przebiegu procesu przepływu energii w strukturze dynamicznej badanych systemów oraz dynamicznego rozdziału mocy wywołanego istniejącymi w strukturze mechanicznej siłami w czasie jej pracy.

Stan techniczny obiektu technicznego jest ściśle związany z strukturalnym i globalnym przepływem w nim energii. Ustalenie dopuszczalnego poziomu mocy oraz dopuszczalnej dawki energii, która może przepłynąć w określonym czasie przez badany sys-

tem lub jego określone węzły, pozwala ocenić stan techniczny obiektu.

Prezentowana energetyczna metoda diagnostyki może być stosowana na wszystkich etapach życia obiektu technicznego: 1) Projektowanie, 2) Produkcja, 3) Eksploatacja, 4) Utylizacja (reutilizacja). Każdemu etapowi życia obiektu odpowiada specjalny rodzaj diagnostyki energetycznej – patrz tabela 1.

Na pierwszym etapie życia obiektu ma zastosowanie **energetyczna diagnostyka konstrukcyjna**. Polega ona na ocenie wariantów konstrukcyjnych na podstawie strukturalnego i globalnego przepływu energii, na hierarchizacji energetycznych obciążeń struktury i zapobieganie ich koncentracji oraz na ocenie oddziaływania obiektu na człowieka i środowisko.

Na drugim etapie życia obiektu technicznego ma zastosowanie **energetyczna diagnostyka kontrolna**, której zadaniem jest określenie jakości procesów produkcji oraz na jakości produktów etapie ich odbioru. W tej diagnostyce mają zastosowanie globalne miary energetyczne.

**Energetyczna diagnostyka eksploatacyjna** stosowana jest na trzecim etapie życia obiektu. Umożliwia ona ocenę stanu technicznego z wykorzystaniem energetycznych miar i oceny dynamiki badanych obiektów, która ściśle związana jest z fizycznymi właściwościami (parametrami dynamicznymi) wszystkich elementów badanej struktury. Zmiana dynamicznych parametrów w czasie powodowana eksploatacją obiektu wywołuje zmianę rozptyłu energii w całej strukturze dynamicznej obiektu. Zjawisko to jest podstawą oceny stanu technicznego obiektu.

Na czwartym etapie życia obiektu zastosowana może być **energetyczna diagnostyka utylizacyjna** pozwalająca podjąć decyzję o utylizacji (reutilizacji) obiektu i jej rodzaju w pełnym cyklu recyklingu. Jednoznaczna ocena, którą umożliwia energetyczna diagnostyka, pozwala na ostateczne wycofanie obiektu z eksploatacji i przekazanie jego do reutilizacji. Stwierdzenie niedopuszczalnego stanu technicznego określanego energetycznie może być powiązane z ekonomicznym uzasadnieniem dalszej eksploatacji. Wymagana naprawa główna w takim stanie może być nieopłacalna i mniejsze koszty w przyszłości przyniesie zakup nowego obiektu niż dalsza eksploatacja naprawionego obiektu.

W analizowanej literaturze światowej nie stwierdza się publikacji dotyczących diagnostyki energetycznej wykorzystującej znajomość zjawiska strukturalnego i globalnego przepływu energii w diagnozowanym obiekcie technicznym. Istnieją jednak publikacje, które dotyczą tylko pomiarów mocy absorbowanej przez człowieka poddanego wibracji wywołanej przez zmechanizowane narzędzia ręczne [np. 1, 50]. W zakresie diagnostyki znane są publikacje Cempla i Natke dotyczące próby energetycznego opisu procesu degradacji w

czasie eksploatacji obiektów technicznych [2, 3, 4, 5, 6, 59]. Inne pozycje dotyczące uogólnionego podejścia do dynamiki i energii to: Karnopp, Rosenberg [47], Layon [49] – metoda SEA, Panuszka [56] – metody całkowite i energetyce stosowane w akustyce, PAVIC G. [57] – akustyczna moc strukturalna.

Odmianą metodę badania zjawisk energetycznych opublikował autor [7, 8, 9, 10, 11]. Zapoczątkowała ona całą serię publikacji [od 11 do 44 i 63].

**2. PODSTAWY TEORETYCZNE METODY**

Energetyczna diagnostyka systemów mechanicznych i biologiczno-technicznych opracowana została z wykorzystaniem dwóch energetycznych zasad opracowanych przez autora [9, 10, 11]. Były to: Pierwsza Zasada Przepływu Energii i Pierwsza Zasada Rozdziału Mocy w Systemie Mechanicznym. Zostały one opracowane z wykorzystaniem Pierwszej Zasady Termodynamiki i wykazują ścisły związek dynamiki systemów mechanicznych ze zjawiskami przepływu energii i rozdziału w mocy w ich strukturze dynamicznej.

Tabela 1.

Rozszerzenie celów energetycznej diagnostyki technicznej na wszystkich etapach życia obiektów i systemów technicznych o sprzężenia zwrotne z etapem projektowania [43]

Etap życia obiektu i systemu technicznego	Rodzaj energetycznej diagnostyki technicznej z uwzględnieniem człowieka i środowiska	Metody i środki wspomaganie diagnostyki energetycznej – rezultaty diagnostyki
<p><b>1. Projektowanie</b></p> <p>Wytyczne konstrukcyjne z diagnostyki</p>	<p><b>Energetyczna diagnostyka konstrukcyjna</b> – ocena wariantów konstrukcyjnych, hierarchizacja obciążeń struktury i zapobieganie ich koncentracji oraz ocena oddziaływania na człowieka i środowisko</p>	<p>Wirtualne modele energetyczne diagnostyki, symulacje ewolucji struktury i jej zmian fizycznych w czasie życia obiektu i systemu technicznego w dziedzinie rozdziału mocy i przepływu energii</p>
2. Produkcja	<p><b>Energetyczna diagnostyka kontrolna jakości procesów produkcji oraz na etapie odbioru jej produktów</b></p>	<p>Energetyczne metody diagnostyki kontrolnej we wszystkich fazach produkcji i odbioru końcowego jej produktów</p>
3. Eksploatacja	<p><b>Energetyczna diagnostyka eksploatacyjna</b></p>	<p>Energetyczne systemy diagnostyczne stacjonarne i pokładowe</p>
4. Utylizacja (reutilizacja)	<p><b>Energetyczna diagnostyka utylizacyjna</b> pozwalająca podjąć decyzję o utylizacji (reutilizacji) obiektu i jej rodzaju w pełnym cyklu recyklingu</p>	<p>Uogólnione metody energetyczne do kompleksowej oceny eksploatowanego obiektu technicznego uwzględniające obecność człowieka i ochronę środowiska</p>

**3. ENERGETYCZNA METODA DIAGNOSTYKI**

Metoda wymaga opracowania modelu dynamicznego badanej struktury. W przypadku obiektu technicznego należy opracować model dynamiczny badanej struktury i zidentyfikować wszystkie parametry dynamiczne. W przypadku obiektów projek-

towanych, jest to wirtualny model dynamiczny zgodny z założeniami projektowymi. Dysponując prototypem możliwe są badania identyfikacyjne i weryfikacyjne opracowanego modelu. Po uzyskaniu wystarczającej zgodności obiektu rzeczywistego i modelu na podstawie symulacji dynamiki i

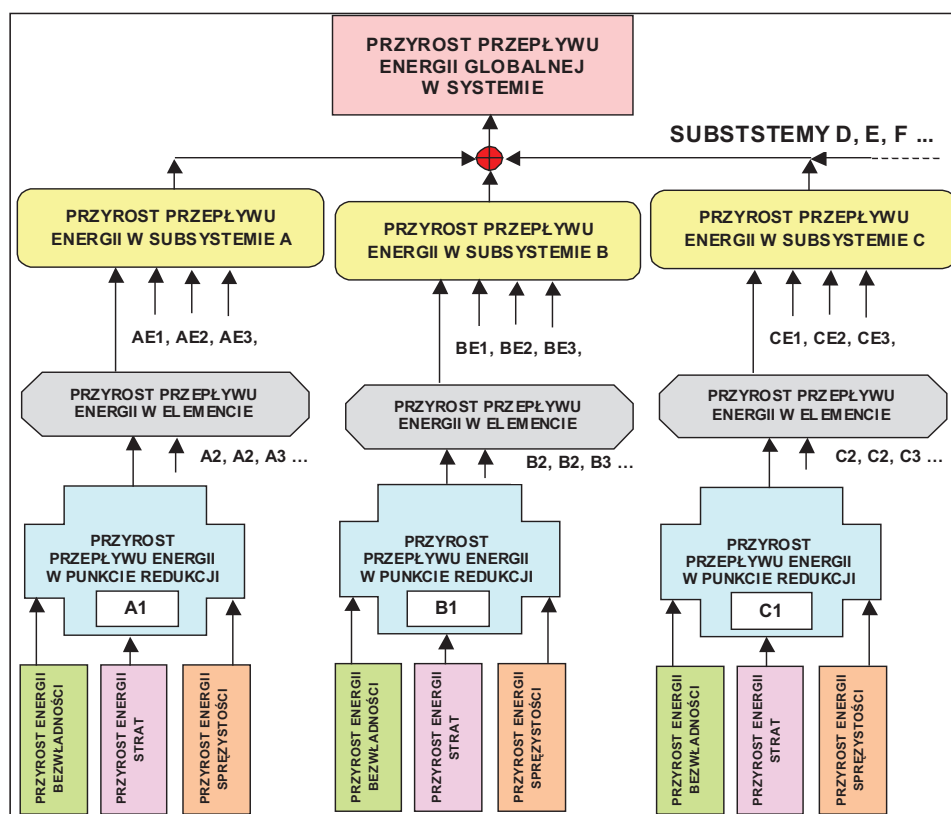
pomiarów eksperymentalnych, można przeprowadzić analizę rozdziału mocy chwilowej i średniej raz przepływu energii. Dysponując modelem matematycznym badanej struktury opracowanym np. w środowisku MATLAB / simulink możliwe jest zastosowanie Elementarnych Procesorów Przepływu Energii MWD, w których zawarte są obie zasady energetyczne [43]. W rezultacie ich zastosowania analiza dynamiczna pracujących systemów transformuje się do dwóch energetycznych dziedzin analizy. Są to: dziedzina rozdziału mocy sił działających oraz przepływu energii w dynamicznej strukturze badanego systemu. Symptomami tej diagnostyki są symptomy energetyczne. W dziedzinie mocy jest to moc w watach, kumulująca w sobie dwie fizyczne wielkości tj. siły i prędkości. Dziedzina przepływu energii jest określana w dżulach i łączy w sobie trzy wielkości: siły, prędkości i czas działania obiektu (systemu).

Symptomy energetyczne są zatem symptomami uogólnionymi, ujmującymi w sobie znane energetyczne skalary pozwalające na dodawanie poszczególnych strumieni energii strukturalnych w jeden

globalny strumień. Ten jeden parametr może być wielkością kryterialną w ocenie globalnej stanu technicznego lub zagrożenia zdrowia człowieka-operatora w systemie biologiczno-technicznym.

#### 4. OCENA ZMIANY STANU TECHNICZNEGO, DETEKCJA USZKODZEŃ I POSTAWIENIE DIAGNOZY

Strukturalny i globalny przepływ energii w systemie mechanicznym lub biologiczno-mechanicznym silnie zależy od stanu technicznego i stanu fizjologicznego subsystemu biologicznego badanego systemu. Zmiana globalnego przyrostu przepływu energii na **poziomie I - systemu** o zadanej wartości jest sygnałem do rozpoczęcia procesu diagnozy. Istotną sprawą jest wskazanie miejsc wystąpienia zmian, a następnie ustalenie przyczyn. W realizacji tego zadania jest przydatny schemat strukturalnego i globalnego przepływu energii w badanych systemach pokazany na rys. 1. Rysunek 1 przedstawia strukturalny i globalny



Rys. 1. Schemat strukturalnego i globalnego przepływu energii w metodzie energetycznej diagnostyki systemu mechanicznego lub biologiczno-mechanicznego

przepływ energii w badanym systemie zgodny z jego dynamicznym modelem o czterech poziomach strukturalnych: **I– system, II–subsystem, III–element, IV–punkt redukcji**. Punktami reprezentatywnymi dla struktury dynamicznej są punkty redukcji, których przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia można wyznaczyć z analizy dynamicz-

nej. W energetycznej metodzie diagnostyki możliwe jest obliczenie przyrostu energii przepływającej przez punkt redukcji w określonym czasie oraz rozbitcie jego na trzy rodzaje energii przez zastosowanie Elementarnych Procesorów Przepływu Energii MWD do każdego punktu redukcji. W metodzie tej możliwa jest zatem detekcja miejsc o maksy-

malnym przyroście dawki energii w stosunku do okresu porównawczego lub do wartości kryterialnej określonej w odrębnych badaniach. Tym samym wskazane są miejsca (punkty redukcji), w których dochodzi do największych zmian dynamicznych parametrów zastępczych sygnalizujących początek procesu przyspieszonej (w stosunku do normalnej – zakładanej) degradacji struktury systemu. Wartość przyrostu przepływu energii w określonym czasie pozwala stwierdzić czy jest to już uszkodzenie elementu czy tylko początek niebezpiecznej dla systemu zmiany właściwości fizycznych w wyszukiwanym punkcie redukcji.

Postawienie diagnozy ułatwia analiza rodzaju energii, dla której zaobserwowano największy przyrost przepływu (dawkę energii w określonym czasie). Wzrost przepływu energii na pokonanie sił tarcia wewnętrznego i na styku ciał (wzrost energii dysypacji) oraz zmiana przepływu energii sprężystości sygnalizuje np. początek zjawiska pęknięcia elementu.

Istotną właściwością prezentowanej metody jest możliwość relatywnej oceny wzrostu przepływu energii we wszystkich punktach i ustalenie rankingu punktów z punktu widzenia jej wartości. W ten sposób wskazane są punkty redukcji, elementy, do których one należą i subsystemy składające się z tych elementów. Obserwacja taka wskazuje, w których punktach redukcji degradacja systemu postępuje najszybciej i pojawiają się (lub mogą pojawić się) uszkodzenia. Umożliwia to działanie profilaktyczne zapobiegające poważnym awariom w przypadku ich niewykrzycia.

Wartościami dopuszczalnymi mogą być wartości ustalone w początkowym okresie eksploatacji systemu (po dotarciu), gdy stan techniczny wszystkich subsystemów i elementów jest dobry.

Określenie rankingu obciążenia wewnątrz struktury dynamicznej jest szczególnie przydatne w energetycznej diagnostyce konstrukcyjnej na I etapie życia obiektu, którym jest projektowanie. Umożliwia ono optymalizację energetyczną powstającej konstrukcji (z wykorzystaniem jej wirtualnego modelu dynamicznego i energetycznego) prowadzącą do równomiernego rozłożenia obciążeń, spełnienia wymagań wytrzymałości zmęczeniowej we wszystkich punktach redukcji - zanim powstanie realny model lub prototyp maszyny.

W przypadku systemów biologiczno-mechanicznych takich jak Człowiek – Maszyna możliwe jest określenie energetycznego obciążenia dynamicznej struktury Człowieka wywołanej oddziaływaniem Maszyny na Człowieka i odwrotnie. Zna-

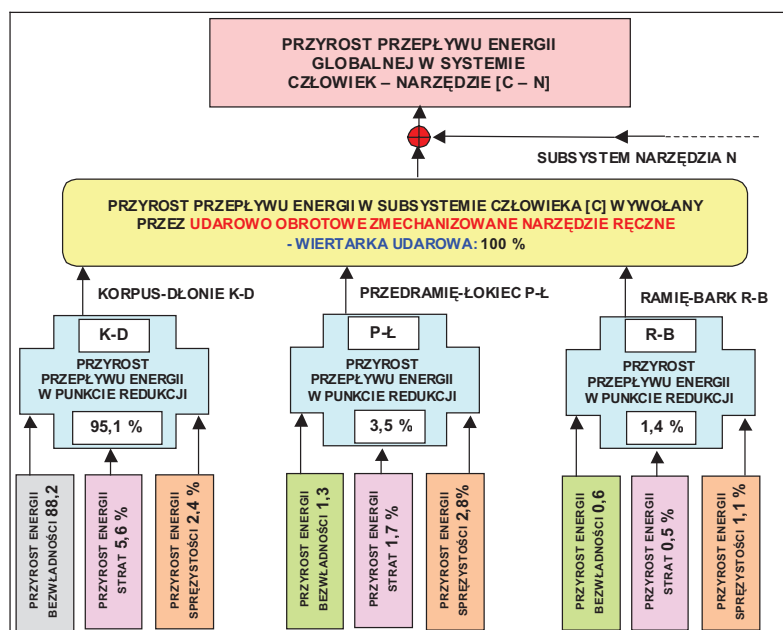
jomość dopuszczalnych wartości parametrów energetycznych umożliwia optymalizację konstrukcji maszyny dopasowującą maszynę do psychofizycznych właściwości człowieka. Jest to naczelne zadanie ergonomii [51, 61] realizowane w zaproponowanej metodzie z energetycznymi kryteriami dostosowania Maszyny do Człowieka [11].

## 5. PRZYKŁAD ENERGETYCZNEJ DIAGNOSTYKI SYSTEMÓW BIOLOGICZNO – TECHNICZNYCH

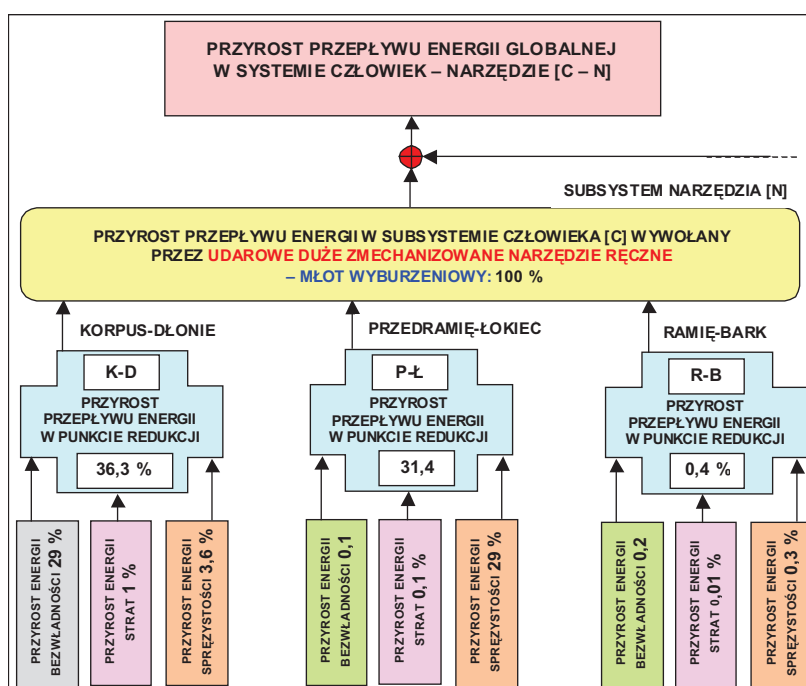
Jako przykład przedstawiono **energetyczną diagnostykę konstrukcyjną** systemów biologiczno-technicznych Człowiek – Maszyna. Subsystemami Maszyna w badanych systemach były dwa typy zmechanizowanych narzędzi ręcznych: wiertarka udarowa oraz młot wyburzeniowy o konwencjonalnej konstrukcji - bez systemów wibroizolacji. **Celem energetycznej diagnostyki było określenie zagrożenia zdrowia człowieka-operatora obsługującego się ww. narzędziami.** Zagrożenie zdrowia związane jest z koncentracją przepływu energii w ciele człowieka. Ten fakt potwierdzają fizjologowie zajmujący się oceną oddziaływania wibracji na człowieka [52, 53, 58, 60, 62].

Badania energetyczne na potrzeby diagnostyki energetycznej prowadzone były tylko w systemie Człowiek – Narzędzie dla obu narzędzi. W niniejszej publikacji ograniczono się do przedstawienia rozdziału mocy w subsystemie Człowieka-operatora [30]. W prezentowanych badaniach określono maksymalne moce chwilowe (maksymalne szybkości płynięcia energii). Wartości maksymalne mocy chwilowej świadczą o dynamice przepływu, czyli o natężeniu przepływu energii w jednostce czasu. W celu porównania uzyskanych wartości natężenia przepływu energii we wszystkich punktach redukcji modelu dynamicznego, określono procentowy udział natężenia przepływu w każdym punkcie redukcji w stosunku do sumarycznej wartości wszystkich mocy maksymalnych. Wyniki tej analizy przedstawiono na dwóch kolejnych rysunkach nr 2 i 3.

Rysunek 2 dotyczy skutków energetycznych oddziaływania **wiertarki udarowej** na człowieka-operatora. W modelowaniu wykorzystano średni model człowieka z normy ISO [64]. Analiza wykazała, że maksymalną dynamikę przepływu energii wykazuje punkt redukcji nazwany Korpus-Dłonie (K-D) - 95,1 %, potem Przedramię-Lokieć (P-Ł) - 3,4 %, a następnie Ramię-Bark (R-B) - 1,4 %.



Rys. 2. Strukturalny i rodzajowy rozdział maksymalnej mocy chwilowej w systemie Człowiek – Udarowo Obrotowe Zmechanizowane Narzędzie Ręczne (wiertarka udarowa) jako rezultat energetycznej diagnostyki systemu biologiczno-technicznego



Rys. 3. Strukturalny i rodzajowy rozdział maksymalnej mocy chwilowej w systemie Człowiek – Udarowe Duże Zmechanizowane Narzędzie Ręczne (młot wyburzeniowy) jako rezultat energetycznej diagnostyki systemu biologiczno-technicznego

Punkt redukcji K-D jest punktem, w którym znajduje się impulsowe źródło drgań mechanicznych generujące T okresowy ciąg impulsów sił zderzeniowych. Jak wykazały badania punkt ten jest najbardziej obciążony w dynamicznej strukturze subsystemu Człowiek-operatora. Analiza rodzajowej mocy w tym punkcie wykazała, że największą

moc stanowi moc bezwładności – 88,2 %, potem moc strat – 5,6 % i moc sprężystości 2,4 %. Porównawcza analiza rodzajowego rozdziału mocy w pozostałych punktach redukcji wykazała, że punkt K-D jest bardzo silnie obciążony wszystkimi rodzajami mocy. Tylko moc sprężystości w punkcie P-Ł ma wartość o 0,4 % większą niż w punkcie K-

D. Taki stan obciążenia punktu K-D umożliwia **postawienie diagnozy**, że w ciele człowieka w tym punkcie – czyli dłoniach, występują zaburzenia przepływu krwi, następuje wzrost temperatury ciała dłoni (zaburzenia funkcjonowania mechanizmu utrzymywania stałej temperatury) i silnie są obciążone elementy sprężyste połączeń wszystkich kości śródrezcza i palców.

Obciążenie elementów sprężystych może wywołać zaburzenia funkcjonowania aparatu ruchowego dłoni i palców i prowadzić do uszkodzeń stawów i ich więzadeł, torebek stawowych, ścięgien oraz mięśni.

**Przyczyną** tego stanu jest bardzo silne pobudzenie do drgań korpusu i ręki wiertarki zderzeniowymi siłami impulsowymi. **Prognoza zagrożenia zdrowia** człowieka-operatora używającego takiego narzędzia w czasie pracy wskazuje na możliwość doprowadzenia do silnych zaburzeń fizjologicznych w dłoniach operatora i wywołania szeregu różnych rodzajów uszkodzeń ciała w tym miejscu. Przedstawiony na rys. 3 rozdział maksymalnych mocy chwilowych w tych samych punktach redukcji, ale dla przypadku używania **młota wyburzeniowego** o masie 10 kg, różni się od poprzedniego

Maksymalną wartość mocy chwilowej uzyskano dla punktu K-D – 36,3 %, potem punktów P-Ł – 31,4 % i dla R-B – 0,4 %. Energetyczna diagnostyka wykazała, że największy udział w mocy punktu K-D ma moc bezwładności – 29 %. Pozostałe moce stanowią tylko: moc dyssypacji – 1 % i moc sprężystości 3,6 %. Analiza rodzaju mocy w punkcie P-Ł wykazała, że w tym punkcie maksymalną moc stanowi moc sprężystości – 29 % całej mocy sił obciążających człowieka.

**Diagnoza zagrożenia zdrowia człowieka** w tym przypadku wskazuje na: zaburzenie przepływu krwi w naczyniach dłoni, zaburzenia funkcjonowania elementów sprężystych zawartych w punkcie P-Ł oraz na trzecim miejscu: stawów kości śródrezcza i palców. **Przyczyną** takiego odmiennego stanu jest inna charakterystyka dynamiczna systemu Człowiek – Narzędzie wywołana inną masą narzędzia oraz inną charakterystyką źródła drgań. **Prognoza zagrożenia zdrowia** człowieka, w przypadku dalszego stosowania młota wyburzeniowego, jest związana z wystąpieniem zaburzeń przepływu krwi w naczyniach dłoni, zaburzeń funkcjonowania i uszkodzeń ścięgien, mięśni, więzadeł i torebek stawowych stawów łokciowych oraz w mniejszym stopniu tych samych elementów aparatu ruchu dłoni i palców.

## 6. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Przedstawiona w artykule energetyczna diagnostyka technicznych i biologicznych, inteligentnych systemów biologiczno-technicznych umożliwia ho-

listyczną diagnozę stanu technicznego oraz zagrożenia zdrowia człowieka-operatora wywołanego współpracującej z nim maszyny. Stwierdzony stan zagrożenia zdrowia wywołany może być nie tylko niewłaściwą konstrukcją pozbawioną wibroizolacji uchwytów (konwencjonalne narzędzia o typowej konstrukcji), ale również złym stanem technicznym badanych narzędzi.

Przedstawiona metoda energetycznej diagnostyki, wykorzystująca model energetyczny badanego systemu, jest metodą bezinwazyjną. Umożliwia ona określenie energetycznego obciążenia w biomechanicznych punktach redukcji związanych z ciałem człowieka na podstawie danych na styku Człowieka z Maszyną.

Hierarchizacja obciążenia struktury dynamicznej oraz możliwość rodzajowej analizy mocy w poszczególnych punktach redukcji, umożliwia prognozę zagrożenia zdrowia człowieka-operatora co do miejsc wystąpienia zaburzeń funkcjonowania lub uszkodzeń ciała oraz ich rodzajów. Analiza ta potwierdza tezę, że szkodliwość oddziaływania wibracji na człowieka związana jest z koncentracją przepływu energii [30, 33]. Metoda energetycznej diagnostyki umożliwia wyznaczenie tych miejsc i określenie rodzajów energii płynących do poszczególnych punktów ciała zawartych w punktach redukcji badanej struktury dynamicznej.

Przedstawione przykłady energetycznej metody diagnostyki pozwalają sformułować użyteczny wniosek, że metoda ta może być stosowana również w przypadku dynamicznej analizy konstrukcji obiektów technicznych [48, 55]. **Energetyczna diagnostyka konstrukcyjna** umożliwia zatem ocenę wariantów konstrukcyjnych obiektów technicznych, hierarchizację obciążeń struktury dynamicznej, zapobieganie ich koncentracji oraz ocenę oddziaływania na człowieka i środowisko [54].

Metoda energetycznej diagnostyki będzie rozwijana dalej i dotyczyć będzie pozostałych etapów życia obiektów technicznych.

## LITERATURA

- [1] BURSTRÖM L., BYLUND S. H.; The influence of vibration-free periods on the absorption of power, 35<sup>th</sup> United Kingdom Group Meeting on Human Responses to Vibration, held at ISVR, University of Southampton, Southampton, 13-15 Sept. 2000, England, pp. 83-88
- [2] CEMPEL C.; Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn, WNT, Warszawa 1982
- [3] CEMPEL C.; Theory of energy transforming systems and their application in diagnostics of operating systems. App. Math. And. Comp. Sci., Vol. 3, 1993, 533-548
- [4] CEMPEL C.; Damage initiation and evolution in operating mechanical systems, Bulletin of the Polish Acad. of Sci., Technical Sciences Vol. 40, No. 3, 1992

- [5] CEMPEL C., NATKE H. G.; *Holistic Dynamics of Systems*. J. Sys. Eng. No 6, London, Springer, 1996, 33-45
- [6] CEMPEL C., NATKE H. G.; *The modelling of Energy Transforming and Energy Recycling Systems*. J. Syst. Eng. No 6, 1996, London, Springer, s. 79-88
- [7] DOBRY M.W.; *Energy flow in a power-unit of hand-held impact tools with vibro-isolation of feed force realised by WOSSO system*. Ninth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms. Proceedings, Politecnico di Milano, 29 August / 2 September 1995, Italy, 2765-2769
- [8] DOBRY M.W.; *Energy flow in Human - Tool - Base System (MTBS) with application of WoSSO vibroisolation subsystem*. XVIIth Symposium Vibrations in Physical Systems, May 22-25, Polit. Poznańska, Poznań - Błażejewko, 1996, s.98-99
- [9] DOBRY M.W.; *Energy flow in Man - Tool - Base System*, Lecture Notes of the ICB Seminars, Vol.29, Wyd. International Centre of Biocybernetics, Warszawa 1996, pp. 35-56
- [10] DOBRY M. W.; *Energy flow in Human - Tool - Base System (HTBS) and its experimental verification*, Proceedings. Eighth Internat. Conference on Hand-Arm Vibration, 9-12 June 1998, Umeå, Sweden, pp. 31-40
- [11] 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 s.
- [12] DOBRY M. W.; *Energetyczne wskaźniki bezpieczeństwa (EWB) mechanicznych i biomechanicznych systemów*, Vibrations in Physical Systems, XVIII th Symposium, Poznań-Błażejewko, May 27-30, 1998 s. 95-96
- [13] DOBRY M. W.; *Skuteczna ochrona człowieka przed energią drganiową*. Materiały konferencyjne. Ósme krajowe Sympozjum Wpływ Wibracji na Otoczenie. Politechnika Krakowska, 28-30 września 1998 r., Kraków-Janowice, s. 121-128
- [14] DOBRY M.W.; *Energy coefficients of safety (ECoS) of power-driven hand-held tools*. Proceedings. Vol. 5, Tenth World Congress on the Theory of Machine and Mechanisms, University of Oulu, June 20-24, 1999, Finland, pp. 1956-1961
- [15] DOBRY M.W.; *Energy flow in the dynamic structure of a Human-Tool-Base System and effective protection of the human subsystem against energy transmitted from hand-held impact tools*. PROCEEDINGS. Sixth International Congress on Sound and Vibration, Ed. By Finn Jacobsen, Technical University of Denmark, Copenhagen - Lyngby 5-8 July 1999, pp. 1953-1958
- [16] DOBRY M.W.; *Dystrybucja mocy w dynamicznej strukturze systemu Człowiek - Maszyna*. Acta of BIOENGINEERING and BIO-MECHANICS, Vol. 1, Supplement 1, 1999 r., s. 105-108
- [17] DOBRY M.W.; *Energetyczne oddziaływanie drgań technicznych środków transportu na organizm ludzki - Wprowadzenie*. Międzynarodowe Seminarium Naukowo-Techniczne, Zakład Podstaw Budowy Urządzeń Transportowych, Wydz. Transportu, Polit. Warszawska, Warszawa, Listopad 1999 r. s. 125-134
- [18] DOBRY M.W.; *Pierwsza Zasada Przepływu Energii jako podstawa uogólnionej metody analizy dynamicznej systemów mechanicznych*; Krajowa Konferencja „Napędy'99”, Szczyrk, 13-14 grudnia 1999 r. OBR „REDOR” Bielsko Biała, Kat. Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH Kraków, Energo-control Sp. z O.O. - Kraków, s. 117-122
- [19] DOBRY M. W.; *Uogólniona - energetyczna metoda analizy dynamicznej struktur mechanicznych i biomechanicznych*. Vol. IX - Structural Acoustics & Mechanics for Environmental Protection. Ed. by Polish Acoustical Society, Kraków Dep., Kraków 2000, pp. 93-98
- [20] DOBRY M. W.; *Energetyczna ocena norm drganiowych*. VOL. V. WAVE METHODS AND MECHANICS IN BIOMEDICAL ENGINEERING, Ed. by Polish Acoustical Society, Kraków Dep., Kraków 2000, s. 169-174
- [21] DOBRY M. W.; *Energy flow in Human-Tool-Base System (HTBS) and its experimental verification*. Proceedings. Eighth International Conference on Hand-Arm Vibration, 9-12 June 1998, Umeå, Sweden, ARBETSLIVSRAPPORT NR 2000:4, National Institute for Working Life, Umeå 2000, Sweden, pp. 31-40,
- [22] DOBRY M. W.; *Generalised theory foundations of advanced energy condition monitoring of machines*, Abstracts and invited lectures, XIXth Symposium - Vibrations in Physical Systems - Polit. Poznańska, IMS, Poznań-Błażejewko 2000, pp. 96-97
- [23] DOBRY M. W.; *Teoretyczne podstawy energetycznej metody oceny konstrukcji maszyn i mechanizmów*. Proceedings. XVII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Dydaktyczna Teorii Maszyn i Mechanizmów, Polit. Warszawska, Warszawa-Jachranka, 6 - 8 września 2000 r. s. 91-96
- [24] DOBRY M. W.; *Advanced analysis of Human - Machine Systems in energy flow domain*, 35<sup>h</sup> United Kingdom Group Meeting on Human Responses to Vibration, held at ISVR, University of Southampton, Southampton, England, 13-15 September 2000, pp. 89-99
- [25] DOBRY M.W.; *Podstawy teoretyczne uogólnionej - energetycznej diagnostyki struktur mechanicznych i systemów biomechanicznych*. II Międzynarod. Kongres Diagnostyki Techn., Tom 1, Referaty Zamawiane, Polit. Warszawska, 19-22.09.2000, s. 95-105, (streszczenie po angielsku w: Abstracts. Volume 2, pp. 103),
- [26] DOBRY M. W.; *Przepływ energii w przypadkach złożonych stanów interakcji w systemie Człowiek - Maszyna*. Wprowadzenie. Acta of Bio-



*DOBRY, Energetyczna metoda diagnostyki...*

- engineering and Biomechanics, Vol. 2, Supplement 1, 2000, Oficyna Wyd. Polit. Wrocławskiej, Wrocław 2000, pp. 131-136
- [27] DOBRY M.W.; Podstawy zaawansowanej diagnostyki energetycznej systemów mechanicznych i biomechanicznych. Diagnostyka Vol. 23, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn, wrzesień 2000 r. s. 23-26
- [28] DOBRY M. W.; Generalised theory foundations of advanced energy condition monitoring of machines, Abstracts and invited lectures, XIXth Symposium – Vibrations in Physical Systems – Politechnika Poznańska, IMS, Poznań-Błażejewko 2000, pp. 96-97.
- [29] DOBRY M. W.; Characteristics of structural and global power distribution in mechanical and biomechanical systems as foundation for their diagnostics, Structures – Waves – Biomedical Engineering, Structural Acoustics, 2001, Vol. X, No.1, Polish Acoustical Society, Kraków Division, Kraków 2001, POLAND, pp. 17-24
- [30] DOBRY M. W.; Analysis of structural energy flow in mechanical and biomechanical systems, Abstracts, 9<sup>th</sup> International Conference on Hand-Arm Vibration, Institut National de Recherche et de Securite (INRS), 5-8 June, 2001 – Nancy, France
- [31] DOBRY M. W.; Podstawy energetycznego modelowania, analizy i diagnostyki w systemach mechatronicznych i biomechanicznych, V Szkoła Metody Aktywne Redukcji Drgań i Hałasu. AGH, Wydział Inżynierii i Mechanicznej i Robotyki, Katedra Automatykacji Procesów, Krynica 22-25 maja 2001 r.
- [32] DOBRY M. W.; Energetyczne portrety strukturalnego i globalnego rozdziału mocy w systemach mechanicznych i biomechanicznych jako podstawa ich energetycznej diagnostyki. Zeszyty Naukowe MECHANIKA nr 83, Polit. Krakowska, Kraków 2001, s. 57-68
- [33] DOBRY M. W.; Energy diagnostics and assessment of dynamics of mechanical and biomechanical systems, Machine Dynamics Problems 2001, Vol. 25, No.3/4 Warsaw University of Technology, Warsaw 2001, pp. 35-54
- [34] DOBRY M. W.; Energy diagnostics of biomechanical systems with application of energy portraits of instantaneous power distribution characteristics, Structures – Waves – Biomedical Engineering, Structural Acoustics, 2001, Vol. XI, No.1, Polish Acoustical Society, Kraków Division, Kraków 2002, POLAND, pp. 19-28
- [35] DOBRY M. W.; Energy analysis of mechanical and biomechanical systems, Abstracts and invited lectures. XXth Jubilee Symposium Vibration in Physical Systems, Poznań-Błażejewko, May 21-25, 2002, pp. 18-33
- [36] DOBRY M.W.; Energetyczna diagnostyka systemów biologiczno-mechanicznych, Konferencja Diagnostyka Techniczna' 2003, Politechnika Śląska, Węgierska Górka 2003
- [37] DOBRY M. W.; Procesy przejściowe przepływu energii w systemach biologiczno-mechanicznych Człowiek – Zmechanizowane Narzędzie Ręczne, X Konferencja Naukowa Wibrotechniki i Wibroakustyki, V Ogólnopolskie Seminarium Wibroakustyki w Systemach Technicznych, 24-25.03.2003, Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie, Kraków 2003
- [38] DOBRY M. W.; Energy analysis of mechanical and biomechanical systems, Studia I Materiały LIII, Technika 3, Współczesne problemy techniki, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2003, s. 137-158
- [39] DOBRY M. W., KOLECKA M.; Energetyczny wpływ drgań ogólnych na organizm człowieka, Zeszyty Naukowe MECHANIKA nr 83, Polit. Krakowska, Kraków 2001, s. 69-76
- [40] DOBRY M. W., KOLECKA M.; Rozdział mocy w systemie Człowiek – Pojazd, Proceedings 12<sup>th</sup> International Conference on Noise Control, Noise Control '01, 24-26 September, 2001 Kielce, CIOP Warszawa 2001, s. 95-101
- [41] DOBRY M. W., MISZCZAK M.; Dynamiczny model systemu Człowiek – Maszyna w przypadku posługiwania się dużymi narzędziami zmechanizowanymi, Acta of Bioengineering and Biomechanics, Vol. 2, Supplement 1, 2000, Oficyna Wyd. Polit. Wrocławskiej, Wrocław 2000, pp. 125-130
- [42] DOBRY M. W.; Energy analysis of mechanical and biomechanical systems, Abstracts and invited lectures. XXth Jubilee Symposium Vibration in Physical Systems, Poznań-Błażejewko, May 21-25, 2002, pp. 18-33
- [43] Dobry M. W.: Energetyczna diagnostyka systemów biologiczno-mechanicznych, Konferencja Diagnostyka Techniczna, Węgierska Górka 2003
- [44] DOBRY M. W.; Energy analysis of mechanical and biomechanical systems, STUDIA I MATERIAŁY LIII, TECHNIKA 3, Współczesne problemy techniki, Oficyna Wyd. Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2003, s. 137-158 (chapter in monograph)
- [45] ENGEL Z.; Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem, PWN, Warszawa, 1993
- [46] GRIFFIN M. J.; Handbook of human vibration, London: Academic Press, 1990
- [47] KARNOPP D., ROSENBERG R.; System dynamics: A unified approach, A Wiley-Interscience Publ. 1975, John Wiley & Sons New York / London / Sydney / Toronto
- [48] KAŻMIERCZAK H.; Analiza rozkładu mocy obciążeń dynamicznych w systemach mechanicznych, Wyd. Polit. Poznańskiej, Rozprawy nr 363, Poznań 2001
- [49] LAYON R.H.; Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems: Theory and Applications, MIT Press. 1975
- [50] LUNDSTRÖM R.; Absorption of mechanical energy in the skin of human hand while exposed to

vibration, J. Low Freq. Noise Vib. No 3, 1987, 113-120

[51] LINDQVIST B., Power Tool Ergonomics, Boardwalk International AB, 1997

[52] MARKIEWICZ L.; Fizjologia i higiena pracy. Wibracja. Instytut Wydawniczy CRZZ, Warszawa 1980

[53] MAREK K., Choroby zawodowe, PZWL, Warszawa 2003

[54] NADER M.; Modelowanie i symulacja oddziaływania drgań pojazdów na organizm człowieka. Oficyna Wyd. Polit. Warszawskiej, Warszawa 2001

[55] ORŁOWSKI Z.; Diagnostyka w życiu turbin parowych. WNT, Warszawa 2001

[56] PANUSZKA R.; Metody całkowite i energetyczne w akustyce. Wyd. PTA w Krakowie, Kraków 2000

[57] PAVIC G.; Acoustical power flow in structures. A Survay. Inter Noise 88, Avignon, France, 1988, 101-104.

[58] PELMEAR P. L., TAYLOR W., WASSERMAN D. E.; Hand-Arm Vibration, Van Nostrand Reinhold, New York

[59] PRACA ZBIOROWA pod redakcją C. CEMPLA.; Wnioskowanie diagnostyczne, Materiały IX Szkoły Diagnostyki, Politechnika Poznańska, IMS, Poznań-Rydzyna 1989 r.

[60] TAYLOR W., PELMEAR P. L.; Vibration White Finger in Industry, Academic Press, London – New York – San Francisco, 1973

[61] TYTYK E.; Projektowanie ergonomiczne, PWN, Warszawa-Poznań 2001

[62] WASSERMAN D. E.; Human Aspects of Occupational Vibration, Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo 1987

[63] WOJSZNIŚ M.; DOBRY M.; The Influence of Tool Mass on Energy Phenomena in a Biomechanical Human – Big Demolishing Hammer System, W: Structures – Waves – Human Health, Biomedical Engineering, Vol. XII, No. 1, Polish Acoustical Society, Division Kraków, Kraków 2003, pp. 141-150

[64] INTERNATIONAL STANDARDISATION ORGANISATION, ISO/FDIS 10068:1998. Mechanical vibration and shock – Free mechanical impedance of human hand-arm system at the driving point.

gonomii Metasystemu: Człowiek – Techniczny Obiekt – Środowisko. Jego dziedzina aktywności naukowej to: Mechanika, a specjalności – Mechanika stosowana, Dynamika maszyn i systemów biologiczno-mechanicznych, Wibroakustyka, Przepływ energii i rozkład mocy w systemach mechanicznych i biologiczno-mechanicznych, Diagnostyka energetyczna systemów mechanicznych i biologiczno-mechanicznych, Ochrona człowieka i środowiska przed drganiami i hałasem. Członek Sekcji Dynamiki i Mechaniki Eksperymentalnej Komitetu Mechaniki PAN oraz Komisji Ergonomii PAN, Autor: 1 monografii, ponad 100 publikacji, 29 patentów krajowych i zagranicznych chroniących konstrukcję wibroizolatorów WoSSO i drganiowo bezpiecznych ręcznych narzędzi uderzeniowych (w Polsce, Europie, i USA).



Dr hab. inż. Marian Witalis DOBRY, prof. nadzw. Jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Politechniki Poznańskiej. Obecnie pełni funkcję Prodziekana ds. Kształcenia na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania oraz jest kierownikiem Lab. Dynamiki i Er-