

PODSTAWY ZAAWANSOWANEJ DIAGNOSTYKI ENERGETYCZNEJ SYSTEMÓW MECHANICZNYCH I BIOMECHANICZNYCH

Marian Witalis DOBRY

Politechnika Poznańska Instytut Mechaniki Stosowanej

ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, Tel.: +48 61 665 23 47, Fax.: +48 61 665 23 07

E-mail: Marian.Dobry@put.poznan.pl

1. Wprowadzenie

Badania przepływu energii i rozdziału mocy w systemach mechanicznych i biomechanicznych prowadzone w ostatnich latach w Laboratorium Dynamiki i Ergonomii Systemów Człowiek - Narzędzie wykazały, że przepływ energii i rozdział mocy może być nową dziedziną obserwacji zmiany stanu technicznego obiektu mechanicznego oraz stanu zagrożenia zdrowia czynnika ludzkiego [1]. Badania wykazały, że obie wielkości energetyczne charakteryzują się dużą dynamiką zmian w zależności od stanu technicznego obiektu i pozwalają na rozróżnienie wiele poziomów tego stanu.

Analiza stanu technicznego w dziedzinie energii zaliczana jest do metod zaawansowanej diagnostyki energetycznej systemów mechanicznych i biomechanicznych, gdyż realizowana jest na podstawie rezultatów analizy dynamicznej badanego systemu.

2. Podstawy zaawansowanej diagnostyki energetycznej

Obserwację i ocenę systemów mechanicznych i biomechanicznych w dziedzinie przepływu energii i rozdziału mocy umożliwił teoretyczny opis tych zjawisk przedstawiony w [1]. W tym celu wykorzystano Pierwszą Zasadę Termodynamiki i zastosowano ją do systemów mechanicznych, przy założeniu występowania tylko mechanicznych form energii. W rezultacie tych prac wyprowadzono dwie energetyczne zasady stanowiące podstawy przepływu energii i rozdziału mocy w dynamicznej strukturze badanego systemu mechanicznego lub biomechanicznego. Zasady te nazwano: Pierwszą Zasadą Przepływu Energii w Systemie Mechanicznym (PZPEwSM) i Pierwszą Zasadą Rozdziału Mocy w Systemie Mechanicznym (PZRMwSM) [1].

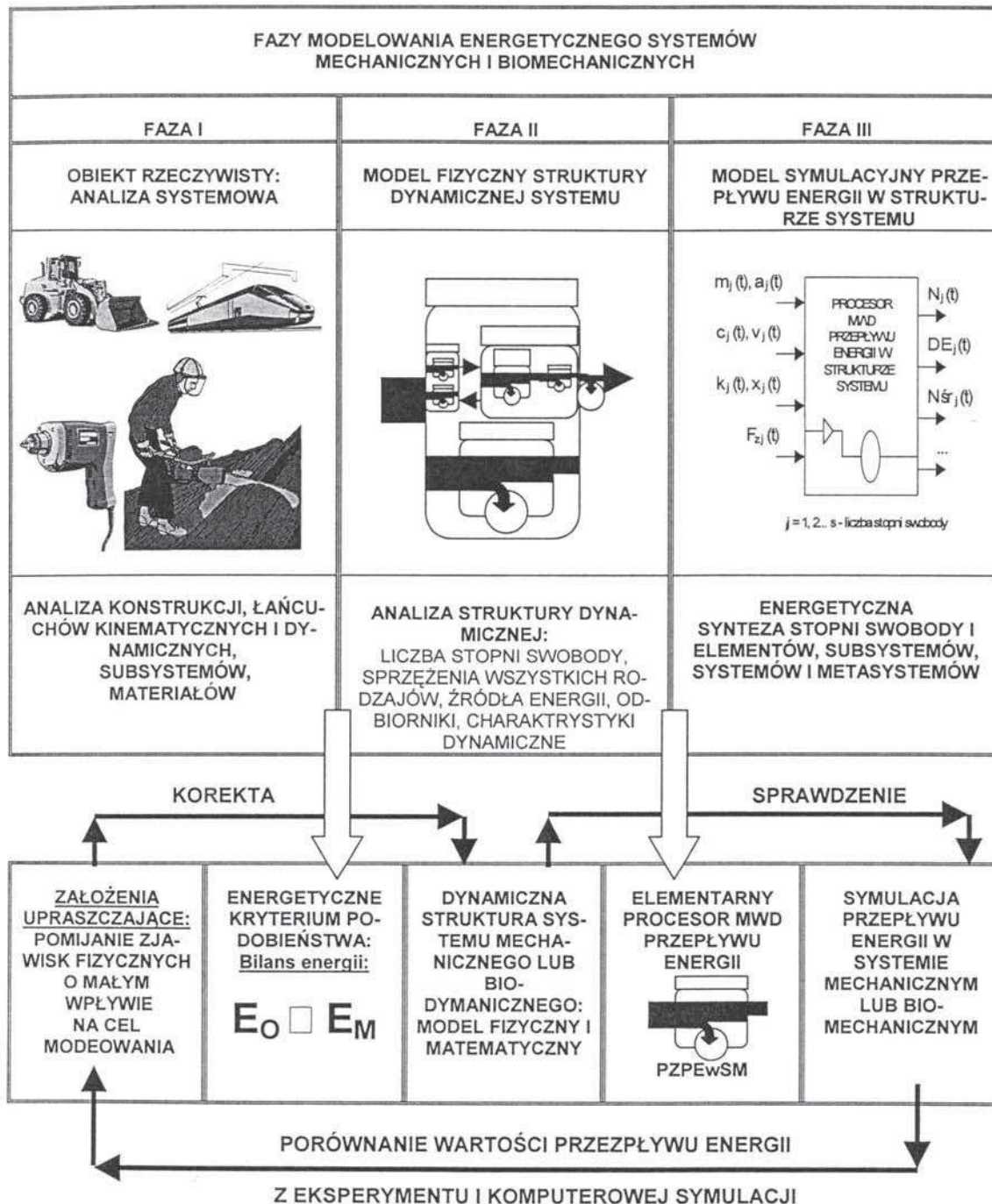
PZPEwSM pozwala na uogólnioną analizę przepływu energii od jej źródeł przez dynamiczną strukturę badanego systemu do miejsc jej odbioru lub start w systemie. Zasada ta wykazuje związek między dynamiką systemu mechanicznego, a strukturalnym przepływem energii, który zależy od zidentyfikowanych dynamicznych parametrów badanego systemu. W wyniku jej zastosowania uzyskujemy dawki energii w dżulach [J], które przepłynęły

przez interesujący nas stopień swobody (z rozróżnieniem dawek energii płynących w strukturze dynamicznej takich jak: energia bezwładności, strat i sprężystości), element, podsystem, system lub metasystem. Zasada ta ma zatem uniwersalny – uogólniający charakter i umożliwia analizę energetyczną na dowolnym poziomie struktury dynamicznej badanego systemu mechanicznego [1].

PZRMwSM opisuje szybkość przepływu energii w określonym punkcie struktury dynamicznej. Może być zastosowana również na wszystkich poziomach strukturalnego rozdziału mocy od elementów dynamicznej struktury poczynając, przez stopnie swobody, elementy, podsystemy systemy i na metasystemie kończąc [1, 2].

Obie Zasady energetyczne umożliwiają rozwiązanie podstawowego zagadnienia odwrotnego diagnostyki wibroakustycznej, czyli określenie na podstawie pomiarów drgań: tj. przyspieszeń, prędkości i przemieszczeń oraz zidentyfikowanych parametrów dynamicznych badanej struktury systemu mechanicznego lub biomechanicznego jak szybko, jakimi drogami i jakimi dawkami płynie energia w badanej strukturze mechanicznej. Różnicowanie tych zjawisk fizycznych stanowi podstawę diagnostyki energetycznej.

Zaproponowana metoda energetyczna zaawansowanej diagnostyki przydatna jest szczególnie tam, gdzie nie można wprowadzić czujników drgań do wnętrza struktury. Dotyczy to np. struktury dynamicznej człowieka jako subsystemu badanych systemów biomechanicznych [3]. Przepływ energii i rozdział mocy w organizmie człowieka określa się wówczas na podstawie znajomości modelu dynamicznego oraz zmierzonych drgań na wejściu do subsystemu człowieka oraz zdefiniowanych w ww. Zasadach reguł rządzących przepływem i rozdziałem mocy – patrz rys. 1. Obliczenia realizuje się symulacyjnie na komputerze na podstawie specjalnie do tego celu zbudowanego programu wykorzystującego program MATLAB/simulink i Procesor MWD Przepływu Energii – faza III, rys. 1. Stwierdzona duża wrażliwość przepływu energii i rozdziału mocy w badanym systemie mechanicznym i biomechanicznym na zmiany właściwości jednego z elementów subsystemów umożliwiła zastosowanie wielkości energetycznych jako wielkości kryterialnych.



Rys. 1. Fazy modelowania energetycznego [3, 6] z wykorzystaniem Pierwszej Zasady Przepływu Energii w Systemie Mechanicznym [1]

Jako podstawową wielkość kryterialną przyjęto dawkę energii w dżulach [J], która przepływa przez punkt kontrolny ustalony w czasie badań wstępnych. Dawkę energii – inaczej przyrost energii wejściowej do badanego systemu, można zapisać jako funkcję wielu wielkości fizycznych i warunków pracy systemu mechanicznego (biomechanicznego): $\Delta E_{we} = f\{\text{[dynamiki fundamentu i konstrukcji wsporczej]; [struktury dynamicznej systemu i}$

jej przestrzennej konfiguracji]; [struktury dynamicznej czynnika ludzkiego]; [wartości zidentyfikowanych, zmiennych w czasie parametrów dynamicznych całej struktury badanego metasytemu]; [zidentyfikowanych źródeł energii zewnętrznych i wewnętrznych, ich mocy oraz sił, które mogą wyzwolić do napędu, sterowania i hamowania systemu w czasie pracy]; [sposobu sterowania pracą systemu]; [cza-

su rzeczywistego "t"); [warunków środowiska] oraz [innych czynników tutaj nie wymienionych]].

Zmieniający się stan techniczny obiektu w przypadku trwania eksploatacji jest przyczyną zmiany wartości parametrów dynamicznych nadzorowanej struktury i jego właściwości. Ten fakt wywołuje zmianę dynamiki całego systemu, w tym zmianę wielkości fizycznych jako składowych sygnału mocy dystrybuowanej do poszczególnych stopni swobody. Zmiana przyrostu energii wejściowej określonej na podstawie sumy wszystkich strumieni energii wpływających do poszczególnych stopni swobody sygnalizuje zmianę stanu technicznego obiektu.

Ocena energetyczna stanu technicznego obiektu lub zagrożenia zdrowia wywołanego drganiami jest możliwa w przypadku, gdy dysponujemy energetycznymi kryteriami oceny systemów. Jako kryteria energetyczne oceny zaproponowano dopuszczalne wartości symptomów energetycznych ustalone teoretycznie (dla znanych z norm wartości dopuszczalnych przyspieszeń drgań) na podstawie symulacji przepływu energii lub doświadczalnie przy weryfikacji wartości uzyskanych na drodze teoretycznej [1].

3. Zaawansowana diagnostyka energetyczna na przykładzie systemu biomechanicznego

Analizie energetycznej poddano silnie nieliniowy system dynamiczny Człowiek - Zmechanizowane Narzędzie Ręczne - Podłoże (C-ZNR-P), którego strukturę dynamiczną i model przepływu energii na poziomie podsystemów pokazano na rys. 2.

Opracowany komputerowy program symulacji przepływu energii w tym systemie z wykorzystaniem PZPEwSM i PZRMwSM umożliwił wyznaczenie średnich mocy kierowanych do poszczególnych stopni swobody obliczonych z dawek energii, które wpływają do nich w czasie 100 cykli pracy (3,3 s). Na rys. 3 pokazano te rezultaty w kolejności od największej do najmniejszej wartości mocy w przypadku młotka pneumatycznego wyposażonego w wibroizolację WoSSO. Na rys. 3 pokazano również moc wejściową do systemu C-ZNR-P oraz rozdział mocy w przypadku młotka pneumatycznego bez wibroizolacji (konwencjonalnego) - oznaczonej słupkami czarnymi.

4. Energetyczna ocena badanego systemu

Obliczony rozdział mocy do poszczególnych stopni swobody charakteryzuje energetyczne obciążenie systemu C-ZNR-P na skutek pobudzenia do drgań bijaka i korpusu młotka. Moc wejściowa dostarczana przez sprężone powietrze wynosiła 1000 W. Bijak młotka (organ roboczy) uzyskał moc 418 W, którą przekazuje za pośrednictwem grota do podłoża.

Podłoże przejmuje jednak tylko 243 W, co oznacza, że 175 W ulega stracie na tej drodze. Korpus młotka uzyskuje moc równą 4,9 W. Stopnie swobody związane z biomechanicznym modelem człowieka-operatora uzyskują odpowiednio moce: Rękojeść-Dłoń - 0,063 W, Przedramię-Lokieć - 0,015 W, Ramię-Bark - 0,0055 W. Sumaryczna moc przekazana do subsystemu człowieka-operatora wynosi zatem 0,0835 W, co stanowi zaledwie 0,008 % mocy wejściowej do systemu C-ZNR-P. Widoczna jest tutaj skuteczna izolacja energetyczna subsystemu WoSSO. Skuteczność energetyczną izolacji WoSSO można ocenić w stosunku do młotka pneumatycznego konwencjonalnego bez wibroizolacji. Średnie moce obliczone z dawek energii w tym przypadku wynoszą dla stopni swobody: Korpus młotka-Rękojeść - 17,8 W, Rękojeść-Dłoń - 17,8 W, Przedramię-Lokieć - 23,8 W, Ramię-Bark - 7,2 W. Dzięki obliczonemu rozdziałowi mocy można ocenić względny spadek mocy w poszczególnych stopniach swobody i zaobserwować zmianę jego rozkładu w strukturze dynamicznej człowieka-operatora. Sumaryczna moc wejściowa do człowieka-operatora wynosi w tym przypadku 48,8 W. Energetyczna względna efektywność poprawy warunków drganiowych oceniana globalnie wynosi w tym przypadku: $48,8 : 0,0835 = 582$ razy i świadczy o zatrzymaniu przepływu energii mechanicznej na drodze korpus - człowiek-operator.

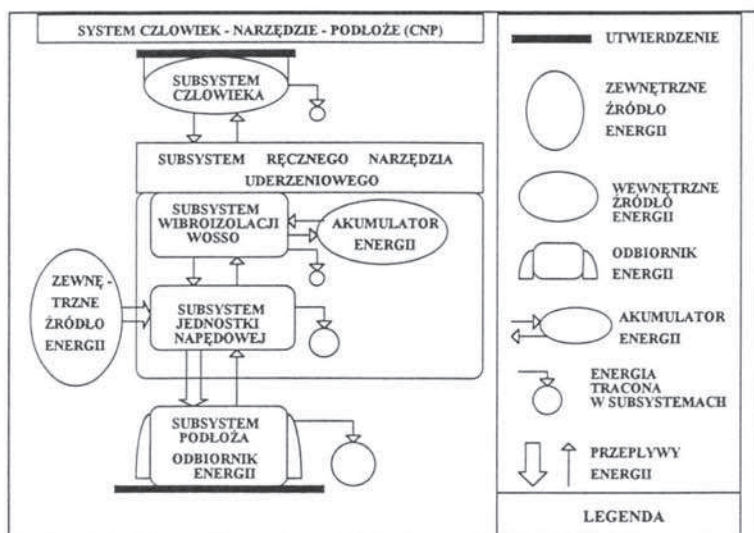
Diagnostyka bezwzględna bezpieczeństwa operatora w tym przypadku jest możliwa jeśli znana jest wartość dopuszczalna średniej mocy, która może być kierowana do człowieka od narzędzi na skutek ich drgań w czasie 8 godz. trwania jednej zmiany roboczej. Wartość dopuszczalną tej mocy ustalono w [1] i wynosi ona 0,1 W dla 8 godzin pracy (w literaturze światowej nie ma tych danych). Porównanie powyższej wartości z uzyskaną z badań prowadzi do wniosku, że młotek pneumatyczny MS13A+WoSSO spełnia wymagania energetyczne bezpieczeństwa drganiowego, a narzędzie konwencjonalne przekracza wartość dopuszczalną 488 razy. Bezpieczeństwo drganiowe człowieka-operatora można zatem ocenić przy pomocy jednego parametru energetycznego.

Powyższe rezultaty symulacji komputerowej przepływu energii zostały potwierdzone eksperymentalnie w badaniach prototypów młotków [1].

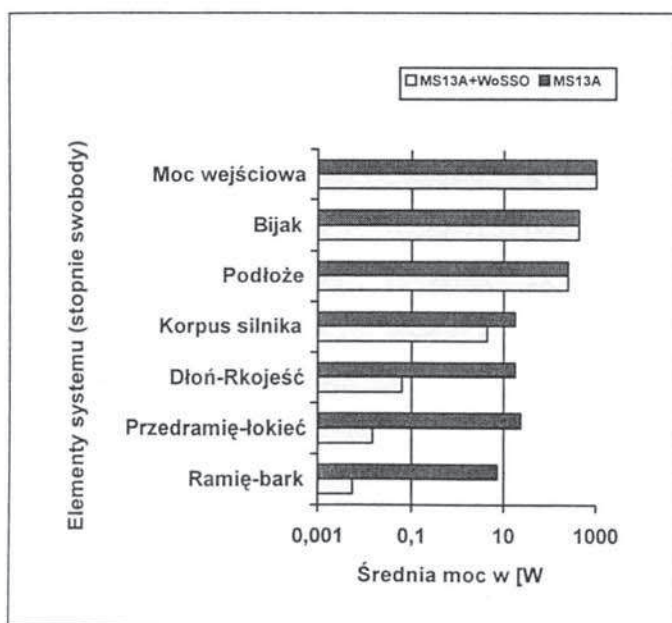
5. Wnioski

1. Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje możliwość prowadzenia zaawansowanej diagnostyki energetycznej systemów mechanicznych i biomechanicznych realizowanej w dziedzinie przepływu energii.

2. Zdefiniowane dwie zasady energetyczne: PZPEwSM i PZRMwSM stanowią podstawę teoretyczną zaawansowanej energetycznej diagnostyki.



Rys. 2. Struktura systemu Człowiek - Zmechanizowane Narzędzie Ręczne - Podłoże (C-ZNR-P) i model przepływu energii wewnątrz systemu na poziomie subsystemów [1]



Rys. 3. Rozdział średniej mocy w systemie Człowiek - Maszyna (drżania miejscowe) w przypadku używania w procesie pracy młotka pneumatycznego MS13A (konwencjonalnego) oraz MS13A z zastosowaną wibroizolacją WoSSO [6]

- Uogólnionym – energetycznym symptomem diagnostycznym może być średnia moc obliczana z dawki energii wejściowej do elementu (stopnia swobody) w określonym czasie trwania ekspozycji drganiowej w odróżnieniu od symptomów amplitudowych [4, 5].
- Jako wielkość kryterialną można przyjąć dopuszczalną średnią moc w watach.

5. Przedstawiona w przykładzie energetyczna diagnostyka umożliwia ocenę stanu technicznego obiektu technicznego i zagrożenia zdrowia systemu biomechanicznego z nim współpracującego przy pomocy jednego symptomu.

6. Podsumowanie

Przedstawiona praca stanowi jedno z pierwszych sformułowań podstaw nowej energetycznej diagnostyki systemów mechanicznych i biomechanicznych w zadanych ramach ograniczeń tej publikacji. Dalsze badania w tej dziedzinie będą kontynuowane, gdyż uzyskane wyniki pokazują duże możliwości zaawansowanej energetycznej diagnostyki.

Literatura

- Dobry M. W.; Optymalizacja przepływu energii w systemie Człowiek - Narzędzie - Podłoże (CNP). Seria „Rozprawy” nr 330. ISSN 0551-6528 Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, marzec 1998 r.
- Dobry M. W.; Energy flow in Man - Tool - Base System, Lecture Notes of the ICB Seminars, Vol. 29, Ed. International Centre of Biocybernetics, Warszawa 1996, s. 35-56.
- Dobry M. W.; Energetyczne oddziaływanie drgań technicznych środków transportu na organizm ludzki - Wprowadzenie. Materiały konferencyjne. Międzynarodowe Seminarium Naukowo-Techniczne, Zakład Podstaw Budowy Urządzeń Transportowych, Wydział Transportu, Politechnika Warszawska, Warszawa, listopad 1999 r., s. 125-134.
- Cempel C.; Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn. PWN. Warszawa, 1982 r.
- Natke H. G.; Cempel C.; Holistic dynamics and subsystem modelling: principles. International Journal of Systems Science, 1999, vol. 30, No. 3, 289-393.
- Dobry M. W.; Uogólniona - energetyczna metoda analizy dynamicznej struktur mechanicznych i biomechanicznych, VOL. IX - Structural Acoustics and Mechanics for Environmental Protection, Ed. by Polish Acoustical Society, Dep. Cracow, ISBN 83-909641-3-9, Cracow, 2000, pp. 93-98.
- 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