

HOLISTYCZNA-ENERGETYCZNA METODA DIAGNOSTYKI SYSTEMÓW MECHANICZNYCH, BIOMECHANICZNYCH I BIOLOGICZNO-MECHANICZNYCH

Marian W. DOBRY

Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej
60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3, fax.: 061 665 23 07, Marian.Dobry@put.poznan.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono zastosowania holistycznej-energetycznej metody diagnostyki trzech różnych systemów. Przedstawiona metoda umożliwia diagnozę stanu technicznego belek strunobetonowych, diagnozę przepływu energii w strukturze dynamicznej ciała człowieka w pozycji siedzącej pobudzonego do drgań ogólnych oraz diagnozę szkodliwości młota elektrycznego H 905 dla człowieka i postęp ochrony anty-energetycznej po wprowadzeniu innowacyjnej metody wibroizolacji WoSSO.

Słowa kluczowe: diagnostyka energetyczna, biodynamika, systemy biologiczno-mechaniczne.

THE HOLISTIC-ENERGY METHOD OF DIAGNOSING MECHANICAL, BIOMECHANICAL AND BIOLOGICAL-MECHANICAL SYSTEMS

Summary

In this paper applications of the holistic-energy method of diagnosing for three different systems are presented. The presented method makes possible the diagnosis of the technical state of prestressed concrete beams, the diagnosis of energy flow in a dynamical structure of the human body in a sitting position excited the whole-body vibrations and the diagnosis of harmfulness of the electric hammer H 905 for the human as well as a progress in an anti-energy protection after the application of the innovative WoSSO method of vibroisolation.

Keywords: energy diagnostics, bio-dynamics, biological-mechanical systems.

1. WPROWADZENIE

Poszukiwanie holistycznych symptomów diagnostycznych pozwalających ocenić obiekt techniczny na wszystkich etapach jego życia skierował prace prowadzone w tym zakresie w dziedzinę rozdziału mocy i przepływu energii w jego dynamicznej strukturze [1, 2]. Podstawy teoretyczne metody energetycznej stanowią dwie zasady energetyczne sformułowane w roku 1996 [1] i potwierdzone w roku 1998 [2]. Holistyczny charakter omawianej metody polega na wprowadzeniu symptomów diagnostycznych w postaci mocy dynamicznych sił wewnętrznych oporu badanej struktury i sił zewnętrznych wyrażonych w watach [W] oraz dawek energii przepływającej przez tą strukturę w czasie pracy systemu wyrażonych w dżulach [J].

Diagnostyka ta wykorzystuje uzyskiwane synchronicznie rezultaty analizy dynamicznej badanych systemów i jest zaliczana do metod zaawansowanych diagnostyki. Może ona być stosowana na wszystkich etapach życia obiektu technicznego. Zastosowana metoda diagnostyki energetycznej umożliwia ujęcie i opis wszystkich istotnych zjawisk dynamicznych zachodzących w poszczególnych subsystemach, elementach oraz

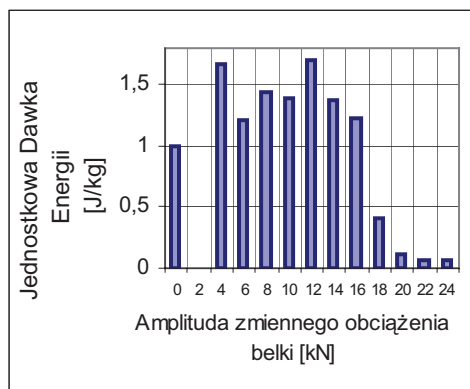
punktach redukcji w dwóch dziedzinach: w dziedzinie rozdziału mocy i przepływu energii.

W niniejszej publikacji, holistyczno-energetyczną metodę diagnostyki pokazano na przykładzie trzech zastosowań. Są to systemy tylko mechaniczne, systemy biomechaniczne (np. człowiek) oraz systemy złożone, w których w strukturze dynamicznej uwzględnia się nie tylko obiekty techniczne, ale również człowieka-operatora, który współpracuje bezpośrednio z maszyną.

2. HOLISTYCZNA-ENERGETYCZNA DIAGNOSTYKA DEGRADACJI STRUKTURY BELEK WYKONANYCH Z BETONU SPRĘŻONEGO

Celem badań w tym przypadku było poszukiwanie metody diagnostycznej oceny stopnia degradacji struktury wewnętrznej belek strunobetonowych. W zaproponowanej metodzie energetycznej założono, że badana belka poddana będzie testowi impulsowemu w różnych stanach technicznych wywołanych obciążeniami dynamicznymi w laboratorium wytrzymałościowym. Testy impulsowe wykonano w stanie nowym i po każdym obciążeniu pulsującą siłą sinusoidalnie

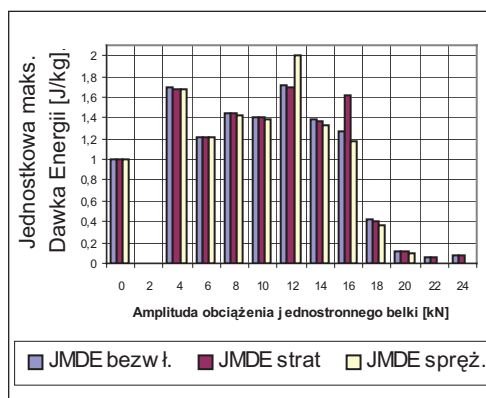
zmienną o 200 cyklach obciążenia. Cyfrowe sygnały przyspieszeń odpowiedzi belki, siły dynamicznej w punkcie kontaktu młotka modalnego z belką zarejestrowano synchronicznie na komputerze. Do analizy energetycznej testu impulsowego wykorzystano sygnały pochodzące z punktu pomiarowego zlokalizowanego w części środkowej belki. Na podstawie analizy widmowej sygnału przyspieszeń określono główne składowe widma. Upřednio prowadzone badania energetyczne wykazały, że przy pobudzeniu impulsowym belki żelbetonowej do drgań, 85 % energii przekazanej przez młotek modalny kumuluje pierwsza postać drgań własnych belki. Rezultaty badań energetycznych przepływu energii w zależności od stanu degradacji struktury dynamicznej belki pokazano na rys. 1. Jako wielkość kryterialną zastosowano unormowaną do stanu dobrego (nowej belki) Jednostkową Dawkę Energii (JDE). Wykazała ona dobrą wrażliwość na zmieniający się stan degradacji materiału belki.



Rys. 1. Unormowane Wartości Jednostkowej Dawki Energii Całkowitej (JDEC) [J/kg] przepływającej przez dynamiczną strukturę strunobetonowej belki do wartości wyjściowej uzyskanej dla belki nowej – test impulsowy po kolejnych obciążeniach 200 cyklami siłą sinusoidalną jednostronnie zmienną o zadanej amplitudzie w kN (siła sprężenia belki 70 kN)

Zakres poprawnej pracy belki wykazał unormowaną wartość JDE > 1 wynoszącą od 1,23 do 1,7. Dla widocznych uszkodzeń belki i jej totalnej degradacji, wartości unormowanej JDE zmniejszyły poniżej 1 i wynosiły poniżej 0,4. Holistyczno-energetyczna metoda ocenia degradację struktury nośnej belki w jednoznaczny sposób.

Możliwości metody idą jeszcze dalej. W metodzie tej możliwe jest obserwowanie w czasie testu impulsowego maksymalnego przepływu trzech podstawowych rodzajów energii: energii bezwładności, energii straconej i energii sprężystej. Fakt ten umożliwia interpretację zjawisk zachodzących w degradowanej strukturze strunobetonowej belki. Wyniki rodzajowego przepływu energii przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Unormowane wartości Jednostkowych, Maksymalnych Dawek Energii Rodzajowych (JMDE) [J/kg] przepływających przez dynamiczną strukturę strunobetonowej belki – test impulsowy po kolejnych obciążeniach jednostronnie zmienną siłą sinusoidalną (200 cykli) w kN – do wartości wyjściowych uzyskanych dla belki nowej (nie obciążanej)

Pokazano na nim unormowane wartości Jednostkowych Maksymalnych Dawek Energii Rodzajowych (JMDE) dla belki nowej i stanów degradacji belki wywołanych dynamicznymi siłami o amplitudach podanych na osi odciętych (od 4 do 24 kN). Wartości JMDE dla belki w dobrym stanie uzyskano większe od 1, a dla belki złamanej gwałtownie spadły do wartości poniżej 0,4. Znamienne jest, że dla tych energetycznych symptomów diagnostycznych w momencie pojawienia się pęknięcia JMDE sprężystości wykazała wartość maksymalną równą 2, a dla ostatniego stanu zdatności belki do przenoszenia obciążenia maksymalną wartość wykazała JMDE straconej w strukturze równą 1,62. Wymienione wyżej zjawiska można uzasadnić faktem przejścia obciążenia w chwili pęknięcia betonu przez napięte struny stalowe w betonie po stronie naprężeń dodatnich (od dołu). Wzrost JMDE straconej tuż przed utratą nośności przez belkę wiąże się z dużym wzrostem tarcia wewnętrznego w strukturze belki, co ma miejsce przy oddzielaniu się betonu od strun na całej powierzchni kontaktu z betonem oraz w rozkruszonym betonem po stronie naprężeń ściskających u góry belki. Metoda holistyczno-energetyczna wykazała dobrą wrażliwość na zmianę stanu degradacji struktury strunobetonowej belki – od stanu nowego (wyjściowego) do stanu niezdatności – czyli pełnej degradacji struktury żelbetonu sprężonego. Ponadto, możliwa jest obserwacja momentu pęknięcia betonu i momentu poprzedzającego złamanie belki na podstawie JMDE sprężystości i strat.

3. HOLISTYCZNA-ENERGETYCZNA METODA DIAGNOSTYKI SYSTEMU BIOMECHANICZNEGO

Drugie zastosowanie omawianej metody diagnostyki energetycznej dotyczyło wewnętrznej struktury dynamicznej ciała człowieka w pozycji siedzącej pobudzanego do drgań ogólnych – czyli systemu biomechanicznego (biodynamicznego o 28 stopniach swobody). Celem badań było określenie rozdziału mocy i przepływu energii w poszczególnych częściach ciała lub jego elementach. Przepływ energii wywołuje stany zaburzenia funkcjonowania lub uszkodzenia części ciała lub jego organów, co związane jest z zespołem choroby wibracyjnej w przypadku drgań ogólnych [1, 2]. W tym celu opracowano model fizyczny i matematyczny człowieka-operatora w pozycji siedzącej – rys. 4, dla którego przeprowadzono eksperymentalną identyfikację parametrów dynamicznych struktury ciała człowieka – rys. 3. Ponadto, model ten zweryfikowano energetycznie porównując energię kierowaną do człowieka zmierzoną eksperymentalnie w czasie testu harmonicznego w paśmie 4 do 80 Hz na stanowisku badawczym z wartością energii uzyskaną na drodze symulacji cyfrowej przepływu energii w takim samym teście harmonicznym modelu. Uzyskano te same wartości dawek energii w J, a błąd wynosił zaledwie 4%. Opracowany w ten sposób model energetyczny człowieka umożliwił symulacje rozdziału mocy i przepływu energii w całej strukturze dynamicznej człowieka.

Na rysunku 5 pokazano procentowy rozdział energii kierowanej do ciała człowieka w pozycji siedzącej dla stałej amplitudy przyspieszeń wynoszącej $0,5 \text{ m/s}^2$. Energetyczna diagnostyka wykazała, że 62% energii kierowanej do człowieka przejmują punkty redukcji 'Miednica'. Najmniej energii przepływa przez punkty redukcji 'Narządy wewnętrzne klatki piersiowej' oraz 'Głowa'.



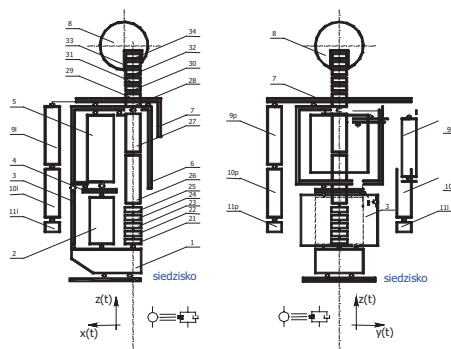
Rys. 3. Stanowisko badawcze do badań drgań ogólnych człowieka-operatora maszyn i pojazdów w pozycji siedzącej

Świadczy to o dobrych właściwościach wibroizolacyjnych struktury ciała ludzkiego, w którym chronione są przed drganiami najważniejsze organy ciała takie jak mózg czy serce. Powyższe dane umożliwiły hierarchizację obciążeń energetycznych poszczególnych części ciała, co istotne jest dla wyjaśnienia inicjacji choroby wibracyjnej i oceny jej szkodliwości u operatorów maszyn technologicznych, maszyn roboczych i wszelkich pojazdów – rys. 5.

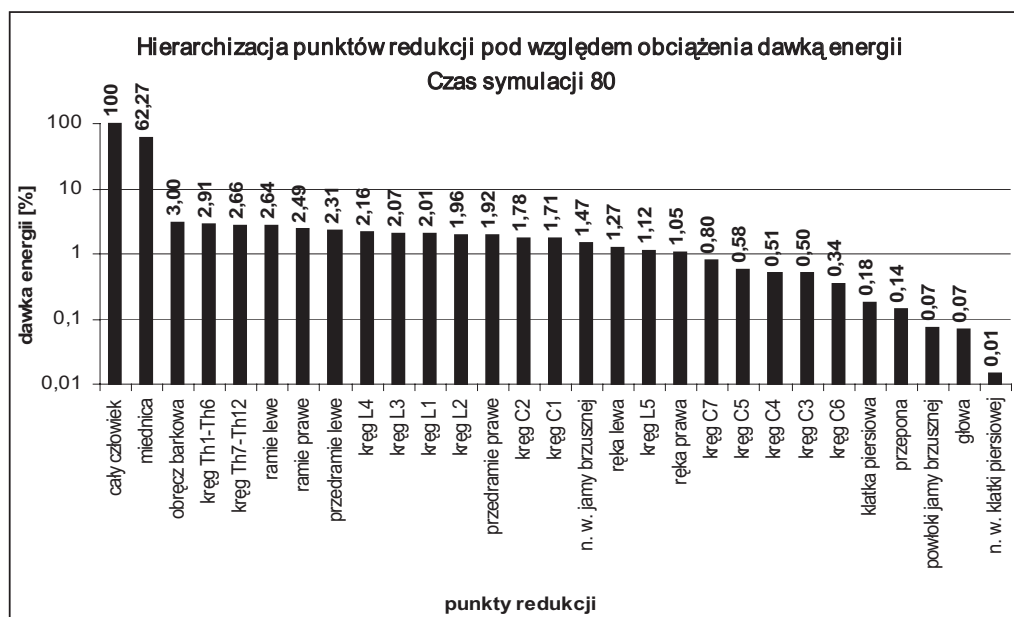
4. HOLISTYCZNA-ENERGETYCZNA METODA DIAGNOSTYKI SYSTEMU BIOLOGICZNO-MECHANICZNEGO

Trzecie zastosowanie metody przedstawione w tej publikacji dotyczy diagnostyki energetycznej systemu biologiczno-mechanicznego, którym był Człowiek-operator – Zmechanizowane Narzędzie Ręczne (C-ZNR) – rys. 6. W tym zastosowaniu metoda diagnostyki holistycznej-energetycznej posłużyła do oceny energetycznej efektywności wibroizolacji innowacyjnego systemu wibroizolacji WoSSO i jego energetycznej optymalizacji [3, 5].

W tym celu zbudowano model fizyczny i matematyczny systemu C-ZNR oraz na jego podstawie model energetyczny. Rozwiązanie modelu matematycznego i energetycznego przeprowadzono metodą symulacji cyfrowej dynamiki, rozdziału mocy i przepływu energii w badanym systemie opracowując program PSDC-ZNRbW z wykorzystaniem programu MATLAB/ simulink. Diagnozę energetyczną przedstawiono w tabeli 1. Łączna moc średnia całego systemu C-ZNRbW – jako odbiornika energii wynosi 9,906 W. Całkowitą dawkę energii przepływającej przez całą badaną strukturę systemu C-ZNRbW można uzyskać mnożąc wartości średniej mocy przez czas trwania narażenia na drgania człowieka-operatora.



Rys. 4. Model fizyczny człowieka MWD_MG_HB2005 w pozycji siedzącej o 28 stopniach swobody zweryfikowany eksperymentalnie w Laboratorium Dynamiki i Ergonomii (IMS Politechnika Poznańska) [4]



Rys. 5. Rezultaty diagnostyki energetycznej przepływu energii w dynamicznej strukturze ciała człowieka w pozycji siedzącej na podstawie dawek energii przepływającej przez wyszczególnione punkty redukcji w czasie 80 s testu harmonicznego w paśmie od 4 do 80 Hz – symulacyjna cyfrowa [4]



Rys. 6. Diagnostowany system biologiczno-mechaniczny Człowiek – Zmechanizowane Narzędzie Ręczne - młot elektr. H 905; $m = 11,3$ kg, $f_r = 36$ Hz)

Moc średnia całkowita rozdziela się ona na poszczególne punkty redukcji zgodnie z Pierwszą Zasadą Rozdziału Mocy w Systemie Mechanicznym [1]. Wyniki rozdziału mocy średniej pokazano w tabeli 1.

Największą moc średnią uzyskano dla punktu redukcji Korpus Silnika – Dłonie i wynosiła 82,37 % całkowitej mocy średniej. Dla następnych punktów redukcji Przedramię-Łokieć ręki lewej i prawej uzyskano moc średnią, która stanowi 4,07 % całkowitej mocy średniej. Większą moc średnią uzyskano dla punktów redukcji Ramię-Bark, gdyż wynosi 4,74 % całkowitej mocy średniej. Wynika z tego, że punkt redukcji Ramię-Bark jest bardziej

obciążony dynamicznie przy pracy z konwencjonalnym młotem bez wibroizolacji niż punkt redukcji Przedramię-Łokieć.

Tab. 1. Diagnoza energetyczna rozdziału mocy średniej w strukturze dynamicznej systemu Człowiek – Zmechanizowane Narzędzie Ręczne bez wibroizolacji (C-ZNR bez WIBR.), ZNR – młot elektryczny H 905; ($m = 11,3$ kg, $f_r = 36$ Hz), czas symulacji 20 s, główny kierunek drgań „z”

| Moc średnia | symbol | Wat | Udział % |
|-------------------------|--------|--------------|----------------|
| Korpus Silnika - Dłonie | KS-D | 8.16 | 82.37% |
| Przedramię-Łokieć L | (P-L)L | 0.403 | 4.07% |
| Przedramię-Łokieć P | (P-L)P | 0.403 | 4.07% |
| Ramię-Bark L | (R-B)L | 0.47 | 4.74% |
| Ramię-Bark P | (R-B)P | 0.47 | 4.74% |
| suma mocy śr. C+ZNR | C+ZNR | 9.906 | 100.00% |

Bezwzględna wartość mocy średniej pozwala postawić diagnozę, że we wszystkich punktach redukcji została przekroczona wartość dopuszczalnej mocy średniej, którą określono jako wartość 0,1 W [1, 2]. Przekroczenia te wynoszą odpowiednio: 4,03 i 4,7 razy. Oznacza to, że w miejscach tych wystąpią zaburzenia funkcjonowania biologicznej struktury ciała ludzkiego. Najczęściej są to zwyrodnienia stawów śródreżca (25 %), łokciowych (70 %) i barkowych (4 %). Diagnostyka energetyczna wykazała, że w przypadku młota elektrycznego bez wibroizolacji, energia drganiowa wnika głęboko w ciało ludzkie, co jest szkodliwe i wywołuje zespół choroby wibracyjnej.

Wprowadzenie Wibroizolacji o Stałej Sile Oddziaływania (WoSSO) do redukcji drgań i przepływu energii od narzędzia do człowieka zmieniło radykalnie przedstawiony stan

dynamicznego obciążenia ciała człowieka. Wyniki diagnostyki energetycznej dla tego przypadku pokazano w tab. 2.

W niniejszej publikacji, wyniki diagnostyki energetycznej przedstawiono tylko dla głównego kierunku 'z' drgań, na którym występują największe drgania w czasie pracy. Zmiana struktury dynamicznej systemu C-ZNR, w której wprowadzono wibroizolację WoSSO, wymagała ponownego modelowania dynamicznego systemu C-ZNRzWoSSO i ponownych badań energetycznych prowadzonych metodą symulacji cyfrowej.

Tab. 2. Diagnoza energetyczna rozdziału mocy średniej w strukturze dynamicznej systemu Człowiek – Zmechanizowane Narzędzie Ręczne z wibroizolacją WoSSO (C-ZNR z WoSSO.) ZNR – Młot elektryczny H 905 ($m = 11,3$ kg, $m_{rek.} = 4$ kg, $f_r = 36$ Hz), czas symulacji 20 s, główny kierunek drgań „z”

| Moc średnia | symbol | Wat | Udział % |
|--------------------------|--------|----------------|----------------|
| Korpus silnika | KS-D | 0.946 | 97.09% |
| Korpus Rękojeść - Dłonie | KR-L | 0.0177 | 1.82% |
| Przedramię-Lokiec L | (P-L)L | 0.00279 | 0.29% |
| Przedramię-Lokiec P | (P-L)P | 0.00279 | 0.29% |
| Ramię-Bark L | (R-B)L | 0.00252 | 0.26% |
| Ramię-Bark P | (R-B)P | 0.00252 | 0.26% |
| suma C+KR | C+KR | 0.02832 | 2.91% |
| Moc całkowita C+ZNR | C+ZNR | 0.97432 | 100.00% |

Przedstawiona w tab. 2. diagnoza energetyczna wykazała znaczny spadek przepływu energii w całym systemie, a zwłaszcza w subsystemie człowieka-operatora dla wszystkich punktów redukcji. Spadek ten globalnie wyniósł 34,4 razy. We wszystkich punktach redukcji wartości mocy średniej spełniają warunek energetycznego bezpieczeństwa, gdyż są mniejsze od wartości dopuszczalnej 0,1 W [2]. Zastosowana wibroizolacja WoSSO skutecznie chroni człowieka-operatora od nadmiernego przepływu energii drganiowej pochodzącej od silnika. Zastosowanie wibroizolacji WoSSO potwierdziło kolejny raz dużą efektywność energetyczną wibroizolacji uderzeniowego narzędzia, którym był duży młot wyburzeniowy H 905.

Holistyczna-energetyczna metoda diagnostyki pozwala również postawić diagnozę, czyli ocenić energetyczną efektywność wibroizolacji we wszystkich punktach redukcji. Postęp techniczny

w innowacyjnej metodzie redukcji drgań określany na podstawie redukcji przepływu energii pokazano w kolejnej tabeli nr 3.

W tabeli 3 przeprowadzono porównanie średniej mocy uzyskanej dla wszystkich punktów redukcji, w których występują punkty związane z submodelem biologicznym. Zdefiniowano w ten sposób Efektywność Energetyczną (EE) redukcji drgań jako wielkość bezwymiarową. Efektywność Energetyczna (EE) redukcji drgań pozwoliła ocenić warianty konstrukcyjne ZNR i mówi o postępie technicznym w ochronie człowieka przed przepływem szkodliwej energii od maszyn do człowieka.

Efektywność Energetyczna zdefiniowana jako:

$$EE = \frac{N_{sr}(ZNR \text{ bez wibroizolacji})}{N_{sr}(ZNR \text{ z wibroizolacją WoSSO})} \quad (1)$$

dla całego systemu wyniosła 349. Oznacza to, że do systemu C-ZNR z wibroizolacją WoSSO przepłynęło 349 razy mniej energii niż do systemu z konwencjonalnym młotem bez wibroizolacji. Na podstawie powyższego można powiedzieć, że dzięki nowej innowacyjnej metodzie redukcji przepływu energii uzyskano 349-krotny postęp techniczny.

W poszczególnych punktach redukcji związanych z ciałem człowieka-operatora uzyskano następujące efektywności energetyczne: dla punktu redukcji Korpus-Rekojeść-Dłonie: 461, dla punktu Przedramię-Lokiec: 144, dla punktu Ramię-Bark: 186. Końcowa diagnoza postawiona na podstawie wyników badań holistycznej-energetycznej metody diagnostyki systemu biologiczno-mechanicznego może być tylko jedna: nowa innowacyjna metoda redukcji przepływu energii od młota wyburzeniowego do człowieka z zastosowaniem wibroizolacji WoSSO gwarantuje bezpieczne używanie tego narzędzia w pracy.

Holistyczna-energetyczna metoda diagnostyki umożliwi również postawienie **prognozy** co do czasu bezpiecznej pracy z użyciem tego innowacyjnego narzędzia. Określona w [2] dopuszczalna dawka energii przypadająca na jedną zmianę roboczą równą 8 godzinom pracy wynosi 2928 J. Dopuszczalny czas trwania narażenia w przypadku używania nowego narzędzia wyniesie:

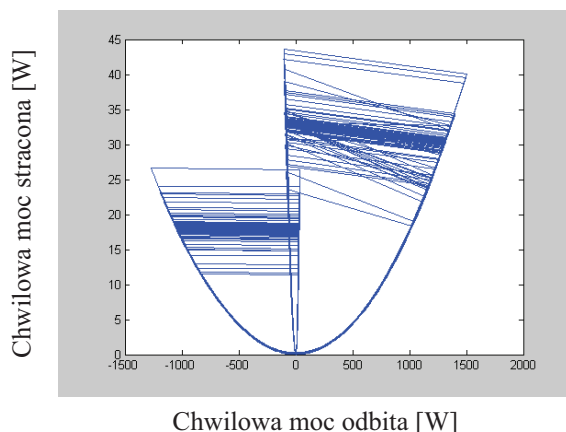
$$t_{dopuszcza} \ln y = \frac{2928}{0,02832} = 103\,389 \text{ s} \approx 28 \text{ godzin} \quad (2)$$

Po 28 godzinach dawka energii przepływająca przez ciało człowieka osiągnie dopuszczalną dawkę obliczoną dla jednej zmiany 8 godzinnej. Diagnoza ta świadczy o pełnym bezpieczeństwie człowiek-operatora używającego tych narzędzi przy pracy.

Tab. 3. Ocena – diagnoza energetyczna postępu technicznego w redukcji obciążenia dynamicznego człowieka-operatora wywołanego wprowadzeniem wibroizolacji WoSSO do konstrukcji młota elektrycznego

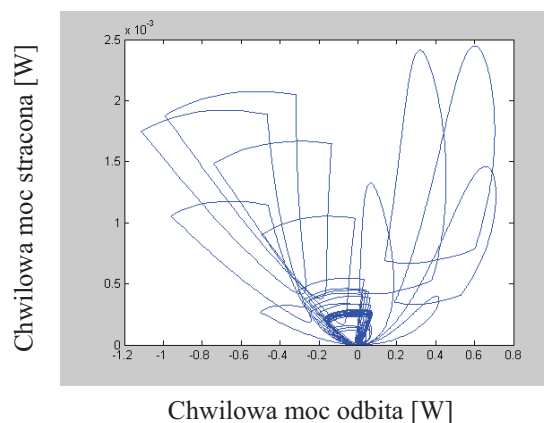
| Młot elektryczny H 905 (m = 11,3 kg, f _r = 36 Hz), bez wibroizolacji | | Młot elektryczny H 905 (m = 11,3 kg, m _{rek.} = 4 kg, f _r = 36 Hz) z wibroizolacją WoSSO | | Ef _{energ} |
|---|--------------|--|----------------|---------------------|
| PUNKTY REDUKCJI | Wat | PUNKT REDUKCJI | Wat | |
| Korpus Silnika - Dłonie | 8.16 | Korpus Rękojeść - Dłonie | 0.0177 | 461 |
| Przedramię-Lokieć L | 0.403 | Przedramię-Lokieć L | 0.00279 | 144 |
| Przedramię-Lokieć P | 0.403 | Przedramię-Lokieć P | 0.00279 | 144 |
| Ramię-Bark L | 0.47 | Ramię-Bark L | 0.00252 | 186 |
| Ramię-Bark P | 0.47 | Ramię-Bark P | 0.00252 | 186 |
| Suma C+ZNR | 9.906 | Suma C+ Korpus ZNR | 0.02832 | 349,8 |
| Diagnoza – efektywność energetyczna wibroizolacji WoSSO w ochronie człowieka-operatora przed przepływem energii od narzędzia do człowieka | | | | Ef _{energ} |

Stwierdzone fakty można pokazać na portretach energetycznych w czasie pracy narzędzia w każdym subsystemie, punkcie redukcji oraz globalnie w całym systemie. Na rys. 7 pokazano portret energetyczny dla punktu redukcji Korpus Silnika – Dłonie w systemie C-ZNR bez wibroizolacji, w którym zarejestrowano największą wartość mocy średniej.



Rys. 7. Portret energetyczny dla punktu redukcji Korpus Rekojeść-Dłonie w systemie Człowiek – Zmechanizowane Narzędzie Ręczne (młot elektryczny H905) z wibroizolacją WoSSO na głównym kierunku drgań 'z'

Portret ilustruje zależność między chwilową mocą straconą i mocą odbitą w punkcie redukcji Korpus-Rękojeść – Dłonie w czasie od spoczynku do ruchu ustalonego. Dla ruchu ustalonego wartości mocy zmniejszyły się tylko o 30 do 40 % - co świadczy o bardzo dużym obciążeniu energetycznym omawianego punktu redukcji. Na kolejnym rys. 8 pokazano portret energetyczny dla punktu redukcji Korpus Obudowa – Dłonie w systemie C-ZNR z wibroizolacją WoSSO.



Rys. 8. Portret energetyczny dla punktu redukcji Korpus-Rękojeść – Dłonie w systemie Człowiek – Zmechanizowane Narzędzie Ręczne (młot elektryczny H905) z wibroizolacją WoSSO na głównym kierunku drgań 'z'

Maksymalne wartości mocy chwilowej w procesie przejściowym i ruchu ustalonym (pogrubione linie) zmniejszyły się znacząco. Wartości te można porównać dla obu badanych przypadków, a krotność ich zmniejszenia informuje o postępie w redukcji przepływu energii od ZNR do człowieka-operatora określonego w wartościach chwilowych.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawiona metoda holistyczna-energetyczna diagnostyki umożliwia wszechstronną diagnostykę różnych systemów mechanicznych, biomechanicznych i biologiczno-mechanicznych.

LITERATURA

- [1] 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, s. 35-56

- [2] DOBRY M. W.: *Optymalizacja przepływu energii w systemie Człowiek - Narzędzie - Podłoże (CNP)*, Rozprawa habilitacyjna, Seria „Rozprawy” nr 330. ISSN 0551-6528, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998
- [3] DOBRY M. W., WOJSZNIŚ M.: *Innowacyjna metoda redukcji przepływu energii do człowieka-operatora od dużych zmechanizowanych narzędzi ręcznych*. Raport. Zadanie 1. Projekt bad. N503 017 32/2558 (2007-2010), IMS Politechnika Poznańska 2008.
- [4] DOBRY M. W.; GRYGOROWCZ M.: *Ocena rozdziału mocy i przepływu energii w biodynamicznej strukturze ciała człowieka pobudzonego do drgań ogólnych*, XV Kraj. Konf. Biocybernetyki i Inż. Biomedycznej, Polit. Wrocławska, Wrocław 2007
- [5] Praca zbiorowa pod kierunkiem M. W. Dobrego: *Przepływ energii w systemie Człowiek – Maszyna (C-M) w przypadku złożonych stanów interakcji między Człowiekiem i Maszyną*. Raport końcowy projektu badawczego nr KBN 7 T07B 03017 (1999-2002), IMS, PP., Poznań 2002



Dr hab. inż. **Marian Witalis DOBRY**, profesor nadzw. - jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Politechniki Poznańskiej. Pełnił funkcję Prodziekana ds. Kształcenia na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania (02-05) oraz jest kierownikiem Lab. Dynamiki i Ergonomii 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, Biomechanika, Ergonomia, Ochrona człowieka i środowiska przed drganiami i hałasem. Członek Sekcji Dynamiki Układów i Biomechaniki Komitetu Mechaniki PAN, PK TMM PAN oraz Sekcji Technicznych Środków Transportu Komitetu Transportu PAN. Autor: 1 monografii, kilku rozdziałów w monografiach, ponad 150 publikacji, 29 patentów krajowych i zagranicznych chroniących konstrukcję wibroizolatorów WoSSO i wdrożonych drganiowo bezpiecznych ręcznych narzędzi uderzeniowych (w Polsce, Europie, i USA).