

WKŁAD PROFESORA CZESŁAWA CEMPELA W ROZWÓJ WIBROAKUSTYKI

Zbigniew Witold ENGEL

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: engel@agh.edu.pl
Centralny Instytut Ochrony Pracy, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa

1. WSTĘP

Nowa dziedzina wiedzy wibroakustyka, której Współtwórcą jest Profesor Czesław Cempel powstała w naszym Kraju około 40 lat temu. Było to możliwe, gdyż w Polsce rozwijały się różne działy nauki w tym szeroko pojęta mechanika. Powstały znaczące ośrodki zajmujące się problematyką drganiową, powstały silne ośrodki akustyki.

Do powstania wibroakustyki przyczyniła się polska szkoła teorii drgań oraz krakowska szkoła drganiowa tworzona przede wszystkim przez profesorów Stefana Ziembę, Władysława Bogusza, Zbigniewa Osińskiego, Romana Gutowskiego, Janisława Skowrońskiego, Kazimierza Piszczka oraz innych. Drugą dyscypliną naukową, która w znaczący sposób przyczyniła się do powstania wibroakustyki była akustyka. Prace Marka Kwieka, Edmunda Karaśkiewicza, Ignacego Maleckiego, Stefana Czarneckiego i wielu innych doprowadziły do rozwoju tej dziedziny nauki.

Rozwój mechaniki i jej branż, akustyki i innych dziedzin naukowych pozwoliły na wykrystalizowanie się nowej dziedziny wiedzy – wibroakustyki.

Wibroakustyka jest nową dziedziną nauki zajmującą się wszelkimi problemami drganiowymi i akustycznymi zachodzącymi w przyrodzie, technice, maszynach, urządzeniach, środkach transportu i komunikacji, a więc w środowisku.

2. WSPÓŁCZESNE ZADANIA WIBROAKUSTYKI

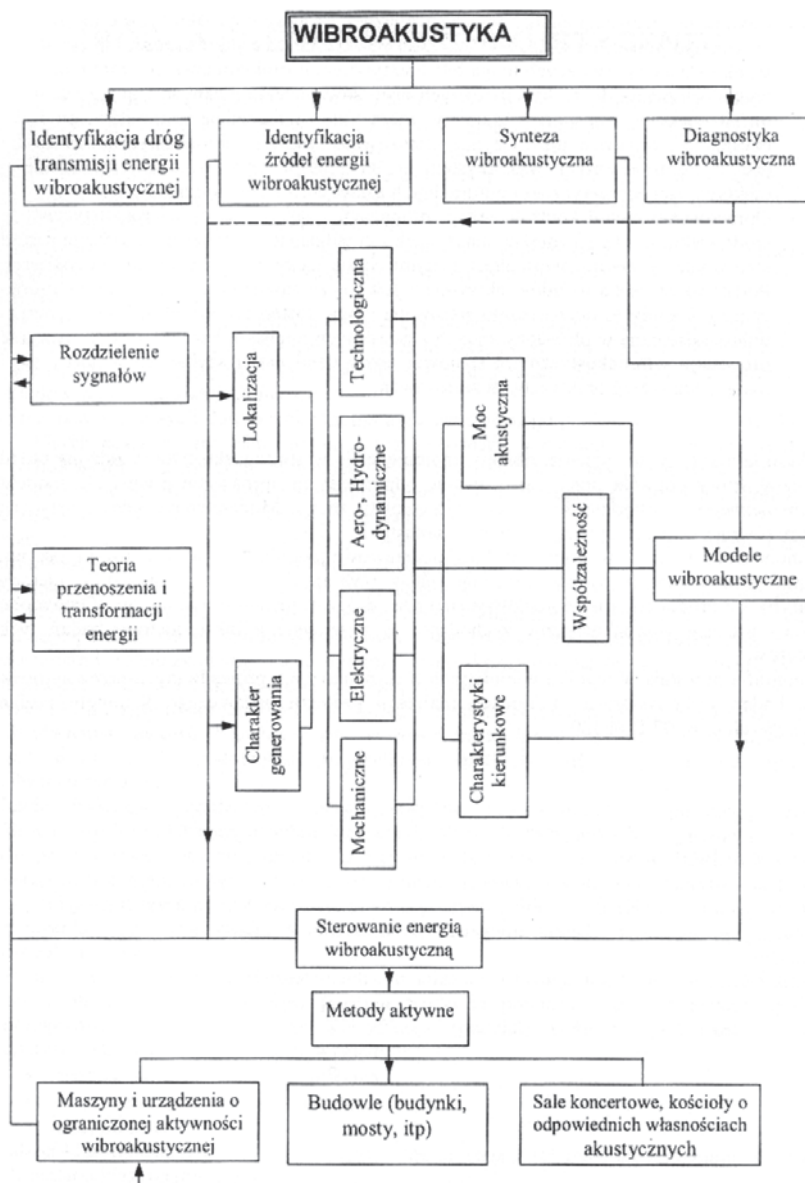
Znając definicję wibroakustyki można przedstawić jej cel: „Celem utylitarnym wibroakustyki jest obniżenie zakłóceń wibroakustycznych maszyn, urządzeń, instalacji oraz ich otoczenia do minimum możliwego na danym etapie wiedzy i technologii, a także wykorzystanie informacji zawartych w sygnale wibroakustycznym do oceny jakości maszyn i urządzeń, budowli itp. oraz realizowanych procesów technologicznych. Wykorzystanie sygnału dla celów diagnostyki medycznej”.

Dla tak sformułowanego celu można podać podstawowe zadania wibroakustyki. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie te zadania. Są to:

a. Identyfikacja źródeł energii wibroakustycznej, która polega na zlokalizowaniu źródeł w obrębie

maszyny, obiektu, urządzenia. Następnie podać należy charakterystyki źródeł, określić współzależność między poszczególnymi źródłami, określić moc akustyczną, a także podać charakter generacji drgań i dźwięków.

- b. Identyfikacja dróg transmisji energii wibroakustycznej w określonym środowisku (budowlach, obiektach, maszynach, urządzeniach itp.). Opracowanie teorii transformacji i przenoszenia energii, rozdzielanie sygnałów wibroakustycznych, opracowanie biernych i czynnych metod kontroli zjawisk, opracowanie metod analizy na pograniczu falowego i dyskretnego ujęcia zjawisk.
- c. Diagnostyka wibroakustyczna wykorzystująca sygnały emitowane przez maszyny, urządzenia itp. Sygnały wibroakustyczne zawierają informacje o stanie zdrowia, stanie budowli, obiektu, maszyny i urządzenia. Te własności sygnałów są często wykorzystywane zarówno w diagnostyce medycznej jak również w diagnostyce maszyn i urządzeń oraz realizowanych procesów technologicznych, a także w badaniach nieniszczących. Zasady diagnostyki wibroakustycznej stosowane są w każdej fazie istnienia maszyn i urządzeń: w konstruowaniu, wytwarzaniu i eksploatacji oraz przy sterowaniu procesami wibroakustycznymi.
- d. Synteza wibroakustyczna maszyn, obiektów oraz sygnałów. Zadania podzielić można na dwie grupy zagadnień:
- synteza parametrów opisujących pole akustyczne, względnie synteza wielkości stosowanych metodach aktywnych, synteza w akustyce mowy;
 - synteza maszyn i obiektów, przez co rozumiemy syntezę strukturalną, kinematyczną i dynamiczną prowadzącą do uzyskania odpowiedniej aktywności wibroakustycznej.
- e. Czynne zastosowanie energii wibroakustycznej. Procesy wibroakustyczne nie zawsze muszą być procesami szkodliwymi. Zastosowane celowo przy użyciu odpowiednich środków zabezpieczających mogą być efektywnym nośnikiem energii, która może być wykorzystana do realizacji różnych procesów technologicznych. Czynne zastosowanie energii wibroakustycznej związane jest z kontrolowanym wykorzystaniem tej energii,



Rys. 1. Zadania wibroakustyki

przy warunku maksymalnej efektywności energetycznej i minimalnych zakłóceń zewnętrznych.

Energia wibroakustyczna wykorzystana może być również dla celów medycznych przy tzw. „terapii wibroakustycznej”.

f. Opracowanie metod kontroli emisji, propagacji i emisji energii wibroakustycznej w środowisku, w tym również w maszynach i urządzeniach, a także opracowanie metod sterowania procesami wibroakustycznymi, co się łączy z tzw. metodami aktywnymi. Podstawową cechą układów aktywnych jest to, że zawierają one zewnętrzne źródło energii. Układy te odpowiednio sterowane mogą dostarczać lub absorbować energię wibroakustyczną w określony sposób z dowolnych miejsc układu. Metody sterowania procesami wibroakustycznymi stanowią nowy dział nauki

szybko rozwijający się i mający już szereg praktycznych zastosowań.

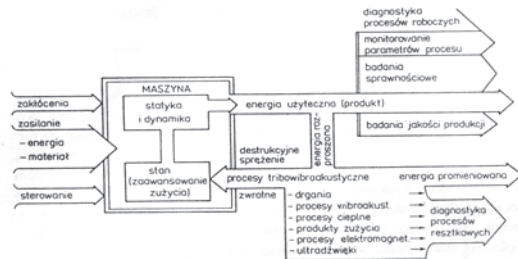
Wszystkie maszyny i urządzenia, obiekty znajdujące się w środowisku tworzą złożony układ fizyczny, który pozwala przez zastosowanie odpowiednich uproszczeń przejść do modelu mechanicznego, a następnie do modelu wibroakustycznego. Modelowanie wibroakustyczne należy również do ważnych zadań wibroakustyki.

3. MASZyny I URZĄDZENIA JAKO PRZETWORNIKI ENERGII

Profesor Czesław Cempel swoich pracach [15, 16] pokazał, że wszelkie maszyny i urządzenia są przetwornikami energii. Na rys. 2 pokazany jest model takiego przetwornika.

Celowo skonstruowane obiekty (maszyny, urządzenia, budowle) dla wykonania określonego zadania traktujemy jako systemy działaniowe. Są to

systemy otwarte z przepływem masy (materiału), energii i informacji. Można więc stwierdzić, że są to układy transformujące energię z nieodłączną jej dyssypacją wewnętrzną i zewnętrzną. Wejściowy strumień masy, energii i informacji na energię użyteczną w postaci innej jej formy lub produktu oraz na energię niepożądaną, dyssypowaną, która jest częściowo emitowana do środowiska, a częściowo akumulowana w obiekcie jako efekt różnych procesów zużyciowych zachodzących podczas jego pracy. Zaawansowanie procesów zużyciowych determinuje jakość każdego obiektu technicznego i nosi nazwę stanu technicznego. Stan techniczny może być określony poprzez obserwację przekształconej energii tj. energii użytecznej i energii niepożądanej.



Rys. 2. Maszyna jako system przetwarzania energii

Analizując energię dyssypowaną obserwujemy różnego typu tzw. procesy resztkowe różnego typu np. wibroakustyczne, termiczne, elektromagnetyczne itp. niezamierzone przez projektanta. Obserwacja wyjść daje duże możliwości diagnozowania stanu technicznego z jednej strony, zaś z drugiej minimalizację czynników ujemnie wpływających na środowisko, ale także na sam obiekt.

Wewnętrzna dyssypacja energii w każdym systemie działaniowym ma charakter kumulacyjny, determinujący stan tego systemu. Dyssypacja energii wynika z tytułu zachodzących w systemie procesów zużyciowych jak: zmęczenie we wszystkich formach, tarcie, erozja w strumieniu cząstek oraz korozje wszelkiego typu, a także płynięcie materiału, zwłaszcza przy wysokich temperaturach, łącznie z pełzaniem przy wysokich obciążeniach. Te procesy są przyczynkami sumarycznej dyssypacji energii.

Sumaryczną dyssypację energii w systemie E_d można wyrazić następująco [15]:

$$E_d(\theta) = \int_0^{\theta} N_d[V(\theta), \theta] d\theta \leq E_{db}, V \ll N_d$$

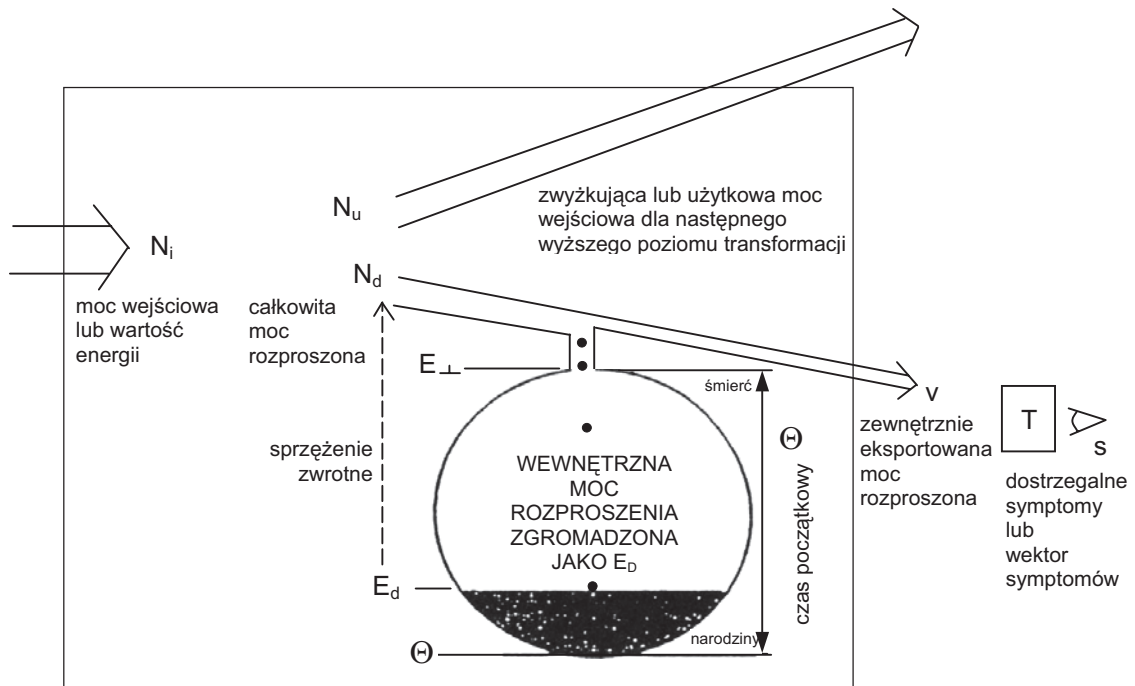
gdzie: N_d - intensywność dyssypacji (moc);

θ - czas działania (życia) obiektu;

$V(\theta)$ - moc dyssypacji zewnętrznej;

E_{db} - pojemność dyssypacji energii przed zniszczeniem systemu;

Wartość intensywności dyssypacji energii zależy od czasu działania (życia) obiektu θ oraz od mocy dyssypacji zewnętrznej. Prof. Czesław Cempel wykazał, że całkowita moc dyssypowana, a także moc dyssypacji zewnętrznej rosną monotonicznie w funkcji czasu życia θ dążąc do nieskończoności dla czasu awarii. Pokazany na rys. 3 model ewolucji stanu układu transformującego energię można stosować do opisu zmian stanu eksploatacyjnego. Ujawnia się w tym fraktalna natura przekształcania energii.



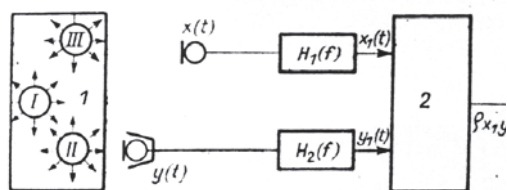
Rys. 3. Model energetyczny systemu działaniowego

Koncepcja procesora energii doprowadziła do sformułowania pojęcia czasu życia i czasu przeżycia, jako miary zdysypowanej wewnętrznie energii, mierzonej od urodzenia systemu aż do jego śmierci. Umożliwiło to z kolei wprowadzenie czasu życia innych systemów działaniowych, w ramach którego następuje ewolucja własności systemów.

Dało to narzędzie do sformułowania przez Profesora Cempela „Holistycznej Dynamiki Systemów Mechanicznych”, dynamiki ujmującej dwa czasy: ewolucję własności systemów w czasie ich działania – makro czas, a także zjawiska dynamiczne i drgania w systemie mikro czas.

4. IDENTYFIKACJA ŹRÓDEŁ ENERGII WIBROAKUSTYCZNEJ

Jednym z podstawowych zadań wibroakustyki jest identyfikacja źródeł generacji energii wibroakustycznej. Identyfikacja ta obejmuje między innymi lokalizację poszczególnych źródeł, określenie charakterystyk i współzależności pomiędzy poszczególnymi źródłami. W wielu przypadkach przyjmowało się, że maszyna lub urządzenie jest pojedynczym źródłem tej energii. Takie przyjęcia były dużym uproszczeniem, gdyż nawet prosta maszyna czy urządzenie posiada od kilku do kilkuset elementarnych źródeł. Zagadnieniami identyfikacji źródeł energii wibroakustycznej zajmowało się szereg osób w naszym kraju, między innymi Prof. Cz. Cempel, który na drodze teoretycznej i doświadczalnej prowadził tego typu badania. Na podkreślenie zasługuje stosowanie przez niego do identyfikacji metod koherencyjnych. Na rys. 4 przedstawiony jest schemat układu do identyfikacji źródeł przy zastosowaniu metod koherencji, zastosowany przez Profesora Cempela.



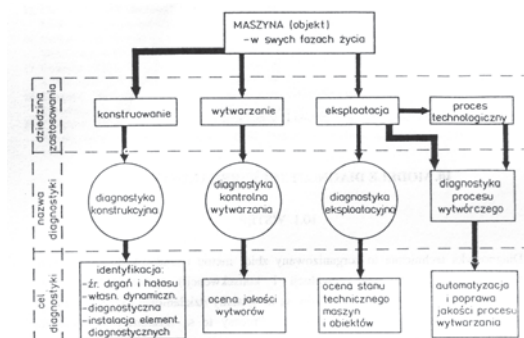
Rys. 4. Schemat zastosowanej procedury

5. DIAGNOSTYKA WIBROAKUSTYCZNA

Na specjalne podkreślenie zasługuje wkład Profesora Cempela w rozwój diagnostyki wibroakustycznej maszyn i urządzeń. Czesław Cempel stworzył podstawy teoretyczne diagnostyki wibroakustycznej, pokazał jej praktyczne zastosowania. Wyniki swoich badań opublikował w kilku monografiach i publikacjach w renomowanych czasopiśmie naukowych. Monografie te były przetłumaczone na języki obce i opublikowane przez takie wydawnictwa jak

Springer stały się one podstawowymi podręcznikami z tego zakresu w świecie naukowym.

C. Cempel stwierdzał, że diagnostyka to zorganizowany zbiór metod i środków do oceny stanu technicznego obiektów, maszyn, urządzeń. W większości przypadków są to systemy działaniowe generujące i przenoszące procesy wibroakustyczne.



Rys. 5. Rodzaje i cele diagnostyki wibroakustycznej.

Procesy te są nośnikami informacji o stanie technicznym. Stan techniczny obiektu podawany jest w kategoriach jakości i bezpieczeństwa jego działania poprzez wektor miar bezpośrednich lub pośrednich. Miary bezpośrednie są np. wymiary, parametry technologiczne itp. Miary pośrednie stanu technicznego noszą nazwę symptomów, czyli wielkości współzmienniczych z miarami stanu technicznego.

W diagnostyce maszyn należy wyróżnić cztery rodzaje zastosowań: diagnostykę konstrukcyjną, diagnostykę kontrolną, diagnostykę eksploatacyjną oraz diagnostykę procesów (rys. 5). Celem diagnostyki konstrukcyjnej dokonywanej na etapie badań prototypu jest identyfikacja źródeł zakłóceń wibroakustycznych jako zjawisk świadczących o niedociągnięciach projektowych i konstrukcyjno – montażowych, a także identyfikacja własności dynamicznych. Celem diagnostyki kontrolnej jest ocena jakości wytworzonych elementów i podzespołów maszyn i urządzeń, natomiast diagnostyka eksploatacyjna ma za zadanie ocenę bieżącego i przyszłego stanu eksploatacyjnego maszyn i urządzeń w trakcie ich eksploatacji. Wreszcie diagnostyka procesów technologicznych ma na celu ocenę jakości i etapu procesu.

Problemy badawcze i aplikacyjne diagnostyki wibroakustycznej są wielorakie i coraz lepiej rozwijane za pomocą współczesnych środków pomiarowych, technologii informatycznych oraz sztucznej inteligencji. Do nich zaliczyć można:

- wybór miejsca pomiaru sygnału wibroakustycznego, co decyduje o zawartości sygnału użytecznego;
- wybór sposobu przetwarzania sygnału dla uzyskania symptomu stanu;
- ekstrakcja całościowej informacji diagnostycznej ze zbioru symptomów stanu i selekcja

rozwijających się niezależnych uszkodzeń w obiekcie;

- ocena zaawansowania uszkodzeń i podjęcie decyzji o stanie obiektu.

Każdy z tych cząstkowych celów diagnostyki wibroakustycznej może być rozwiązywany na wiele sposobów i w różnych zakresach wypełnienia zadania.

Reasumując, należy stwierdzić, że identyfikacja uszkodzeń w diagnostyce wibroakustycznej odbywa się poprzez pomiar specjalnych uszkodzeniowo zorientowanych symptomów. Profesor Cempel jako pierwszy zdefiniował te wielkości oraz dodał kilka łatwo mierzalnych jak np. współczynnik impulsowości, luzu, częstości Rice'a, współczynniki harmoniczności. Zaproponował softwarową procedurę dyskryminacji i klasyfikacji uszkodzeń maszyn poprzez wybór zbioru symptomów o minimalnej redundancji opisujących stan maszyny. Procedura ta oparta była o metody rozpoznawania obrazów, a w szczególności o metodę składowych głównych macierzy uszkodzeń. Prof. C. Cempel wprowadził również do zastosowań w diagnostyce wibroakustycznej pojęcie niezawodności symptomowej.

Omówione problemy diagnostyki były i są przedmiotem prac badawczych Profesora Cempela, a także licznych Jego publikacji w tym monografii.

6. PODSUMOWANIE

Profesor Czesław Cempel jest współtwórcą wibroakustyki – nowej dziedziny wiedzy. Określił nie tylko podstawowe zadania i metody współczesnej wibroakustyki, lecz również pokazał praktyczne zastosowania. Działalność naukowa i publikacyjna Czesława Cempela z zakresu wibroakustyki może być podzielona na kilka grup:

- wibroakustyka maszyn i środowiska;
- wibroakustyka narzędzi ręcznych, głównie pneumatycznych;
- dynamika układów wibruderzeniowych;
- diagnostyka wibroakustyczna.

W ramach tych grup zagadnień, Prof. Czesław Cempel opublikował dużą ilość prac. Wyniki swoich badań przedstawiał na licznych kongresach, konferencjach i sympozjach naukowych. Był wielokrotnie zapraszany do wygłaszania referatów plenarnych na światowych kongresach.

Szerokie, różnorodne Jego osiągnięcia naukowe i wdrożenia z zakresu wibroakustyki przyczyniły się do rozwoju tej dziedziny wiedzy nie tylko w Polsce, lecz również na całym świecie.

LITERATURA

1. Cempel C.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. WNT Warszawa, 1982.
2. Cempel C. *Wibroakustyka stosowana*. PWN Warszawa 1978.
3. Cempel C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Wyd. Politechniki Poznańskiej 1985.
4. Cempel C. *Wibroakustyczna diagnostyka maszyn*. PWN Warszawa, 1989.
5. Cempel C.: *Vibroakustische Maschinen-Diagnostik*. Verlag Technik Berlin 1990.
6. Cempel C. *Vibroacoustic Condition Monitoring*. Horwood, Chichester, New York, 1991.
7. Cempel C.: *The Tribovibroacoustical Model of Machines*. Wear 105, str. 297-305, 1985.
8. Cempel C.: *The Wear Process and Machinery Vibration – a Tribovibroacoustic Model*. Bull. of the Pol. Acad. of Sc. vol. 35, nr. 7-8, str. 347-363, 1987.
9. Cempel C.: *Theory of Energy Transforming Systems and their Application in Diagnostics of Operating Systems*. Applied Mathematics and Computer Science, vol. 3, nr. 3, str. 533-548, 1993.
10. Cempel C.: *Energy Processors in Systems Engineering and their Evolution*. Bull. Of the Pol. Academy of Sc. Vol. 45, nr 4, str. 495-511, 1997.
11. Cempel C.: *Diagnostically Oriented Measures of Vibroacoustical Processes*. Journal of Sound and Vibration 73(4), str. 547 -561, 1980.
12. Cempel C. *Modele ewolucji systemów*. Problemy Eksploatacji nr. 3, 47- 69, 1997.
13. Cempel C., Kosiel U.: *Noise Sources Identification in Machines and Mechanical Devices*. Archives of Acoustics 1,1, str. 5-19, 1976.
14. Cempel C., Engel Z.: *Wibroakustyka maszyn, geneza dziedziny i jej podstawowe problemy*. Zeszyty Naukowe AGH, nr. 728, str. 13-17, 1979.
15. Cempel C., Lotz G.: *Efficiency of Vibrational Energy Dissipation by Moving Shot*. Journal of Structural Engineering, Vol 119, no 9, str. 2642-2652, 1993.
16. Cempel C., Natke H. G.: *The Modeling of Energy Transforming and Energy Recycling Systems*. Journal of Systems Engineering. Vol. 6, str. 79-88, 1996.
17. Engel Z., Cempel C.: *Vibroacoustics and its Place in Science*. Bull. Of the Pol. Acad. of Sc. Vol 49, nr 2, str. 185-198, 2001.
18. Natke H. G., Cempel C.: *Model-Aided Diagnosis of Mechanical Systems*. Springer Verlag, 1997.



Prof. zw. dr hab. inż. **Zbigniew ENGEL** jest wieloletnim profesorem AGH w Krakowie i Centralnego Instytutu Ochrony Pracy w Warszawie. Jest specjalistą zakresu mechaniki i inżynierii środowiska, twórca nowej dziedziny nauki – wibroakustyki. Dorobek publikacyjny

prof. Engela obejmuje ponad 550 publikacji, w tym monografie, skrypty, podręczniki, artykuły w znanych czasopismach zagranicznych i krajowych, referaty na konferencjach naukowych. Jest doktorem honoris causa Akademii Górniczo-Hutniczej i Politechniki Krakowskiej.