

prof. zw. dr hab. CZESŁAW CEMPEL
 Centralny Instytut Ochrony Pracy
 – Państwowy Instytut Badawczy
 Kontakt: czcem@ciop.pl

Wibroakustyczne zagrożenia środowiska

Fot. Ratmaner/Bigstockphoto



W artykule omówiono podstawowe pojęcia z dziedziny nauki, którą jest wibroakustyka, między innymi charakteryzując hałas, infradźwięki i ultradźwięki. Odniesiono się do teorii zrównoważonego rozwoju w kontekście zagrożeń wibroakustycznych dla środowiska (w tym środowiska pracy człowieka), a następnie zdefiniowano, w jaki sposób należy pojmować systemowe podejście do tych zagrożeń, jak również jak prawidłowo dokonywać oceny ryzyka z nimi związanego i w jaki sposób je ograniczać.

Słowa kluczowe: wibroakustyka, hałas, drgania, ryzyko, środowisko

Vibroacoustic hazards to the environment

The article presents the basic definitions used in vibroacoustics, such as noise, infrasound and ultrasound. The theory of the sustainable development has also been acknowledged, especially in the context of vibroacoustic hazards towards environment (including the human work environment) followed by the proper understanding of the so-called "system" approach to such threats, as well as an accurate way of performing a risk evaluation in relation to vibroacoustics and diminishing them.

Keywords: vibroacoustics, noise, vibrations, risk, environment

Wstęp

Wśród wielu procesów fizycznych zachodzących w naturze, w środowisku pracy i życia człowieka występują zjawiska akustyczne. W środowisku naturalnym są one sygnałami życia flory, fauny i człowieka, a także zmian atmosferycznych i zmian górotworu czy nawet gruntu. Cywilizacja¹, którą stworzył człowiek w ciągu ostatnich kilku tysięcy lat oparta jest na przekształcaniu energii, szczególnie do celów transportu, produkcji itp. Zaś efektywność każdego takiego przekształcenia jest znacznie mniejsza od 100% i każdorazowo oprócz innych niechcianych efektów (takich jak towarzyszące im ciepło czy tarcie) niesie ze sobą współwytwarzane niepożądane procesy akustyczne, często o bardzo wysokich poziomach dźwięku. Jeśli przyjmujemy definicję, że hałas to każdy niepożądany dźwięk, to można powiedzieć, że nasza cywilizacja jest „hałasotwórcza” i w miarę rozwoju socjotechnicznego musimy sobie z tym radzić.

Procesy akustyczne ze względu na percepcję człowieka oraz uwarunkowania fizyczne propagacji fali akustycznej dobrze jest podzielić ze względu na częstotliwość. Powszechnie każdy z nas odczuwa dźwięki słyszalne, czyli te o zakresie częstotliwości średnio od 20 Hz do 20 kHz. Poniżej zaś leży pasmo infradźwiękowe obejmujące zjawia-

ska akustyczne o częstotliwościach od 1 do 20 Hz, często odczuwane w uszach jako wahania ciśnienia (zmiany odczuwanego ucisku), a przy dużych amplitudach odbierane przez ciało człowieka, zwłaszcza działające na poszczególne narządy.

Procesy akustyczne o częstotliwościach wyższych to ultradźwięki, dla ludzi niesłyszalne, ale używane przez zwierzęta: zwłaszcza w wodzie, do echolokacji (delfiny, walenie), ale i w powietrzu (nietoperze). W akustyce środowiska pracy definiuje się także hałas ultradźwiękowy, który obejmuje dźwięki w zakresie częstotliwości od 10 kHz do 40 kHz.) Dźwięki niskoczęstotliwościowe rozchodzące się w powietrzu są łatwo transformowane na drgania gruntu, ścian, konstrukcji wsporczych maszyn i odwrotnie – drgania takich obiektów czy ich elementów generują dźwięk, dlatego też noszą specjalną nazwę: wibracje (drgania) mechaniczne z zakresu 1 – 100 Hz. Kierunkowość źródeł akustycznych zależy od częstotliwości. W stosunku do częstotliwości niskich źródło dźwięku jest wszechkierunkowe, natomiast dla wysokich (rzędu kiloherców) coraz bardziej wiązka dźwiękowa staje się kierunkowa; najbardziej wąskie są wiązki ultradźwiękowe. Dlatego między innymi ultradźwięki w przyrodzie i w technice używane są do celów zarówno echolokacji czynnej, jak i biernej [1, 2², 3].

Percepcja zjawisk dźwiękowych w przyrodzie jest różna. U człowieka przebiega ona nieliniowo i obejmuje szeroki zakres, zarówno co do amplitudy

ciśnienia akustycznego (jak i co do częstotliwości), powszechnie więc używa się skali logarytmicznej, decybelowej (dB). Ciśnienie akustyczne mierzy się w Pascalach (1 Pa = 1 N/m²), a ucho ludzkie zaczyna już słyszeć średnio od amplitudy ciśnienia akustycznego: $p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{Pa}$.

Odzwierciedleniem logarytmicznego charakteru percepcji dźwięku jest fakt wyrażania zakresu względnych zmian słyszalnej amplitudy ciśnienia akustycznego (dynamiki słyszenia dźwięku) za pomocą poziomów ciśnienia akustycznego;

$$L = 20 \log(p/p_0) \quad (1)$$

gdzie p jest ciśnieniem akustycznym mierzonym w odniesieniu do progu słyszalności (czułości) ucha ludzkiego p_0 .

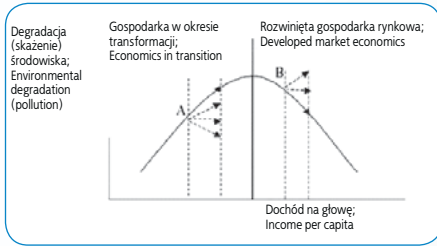
W gospodarce i technice niezamierzona generacja zjawisk akustycznych przybiera nieraz znaczne poziomy, na granicy bólu dla słuchu (115 dB), lub jest powodem innego typu szkodliwego oddziaływania, często zagrożenia zdrowia, czy nawet życia. Przeciwdziałania tym niekorzystnym zjawiskom mają już od dziesięcioleci rangę wiedzy i postać rozwiązań technologicznych i w tę sferę zagadnień wpisuje się ten artykuł.

Zrównoważony rozwój ludzkości i zagrożenia wibroakustyczne

Wspomniana we wstępie cywilizacja bazuje najczęściej na nieodnawialnych zasobach energii i innych potrzebnych nam minerałów i niezamierzonym niszczeniu środowiska. W drugiej połowie ub.w.

¹ W skrócie: cywilizacja – sposób (technologia) zaspokajania potrzeb zbiorowych i jednostkowych (np. czy podróżuje na koniu, czy też Intercity Express (ICE); kultura – sposób rozumienia siebie i swego otoczenia [patrz np. Cempel 2008].

² (patrz też: <http://neur.am.put.poznan.pl>)



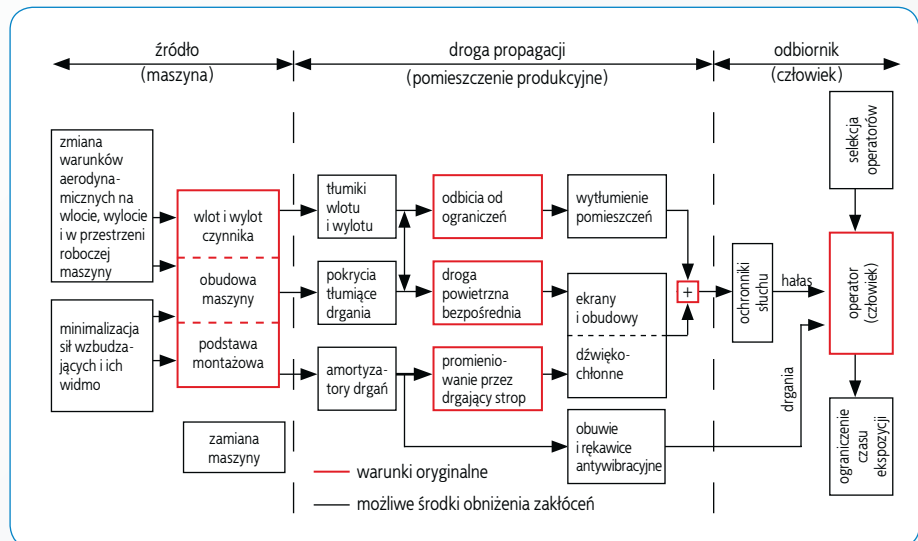
Rys. 1. Uogólniona krzywa Kuznetsa w zastosowaniu do zagrożeń środowiska [7]

Fig. 1. A generalized Kuznet's curve pursuant to environmental hazards [7]

dowiedzieliśmy się z raportów Klubu Rzymskiego (Klub 1972) i innych opracowań, że główne zasoby i sama odnawialność środowiska wyczerpie się za kilkadziesiąt lat, tj. w dostępnym nam horyzoncie czasu. Obecny typ rozwoju gospodarczego został zatem zakwestionowany, a obowiązującym paradygmatem stał się rozwój zrównoważony, oparty na energiach odnawialnych, recyklingu materiałów i minimalizacji zanieczyszczenia środowiska – a zatem nacisk położony został na redukcję zagrożeń dla ekosystemu naszego życia i przetrwania.

Wokół tych problemów powstały dziedziny: ekologia, ekoinżynieria i cały szereg fundamentalnych prac i studiów, zajmujących się m.in. tym, jak rozwój gospodarczy zmienia społeczeństwo i środowisko i jak można temu przeciwdziałać. Opracowane zostały specjalne metody obliczeniowe obciążenia (powstających szkód) środowiska przez gospodarkę człowieka, zwane oceną cyklu życia (*Life Cycle Assessment – LCA*) w stosunku do planowanego lub już produkowanego wyrobu czy zachodzącego procesu w trzech obszarach działalności człowieka: szkody w zasobach, szkody w jakości ekosystemu i szkody dla zdrowia i życia człowieka. Jak się sądzi, bardzo dobrze ocenia te szkody specjalna metodologia ekoprojektowania zwana *Eco-indicator 99* [4]. Mimo że zagrożenia WA (wibroakustyczne) mogłyby się tam znaleźć w dwóch obszarach liczenia: szkody ekosystemu i szkody dla zdrowia i życia człowieka, to nie widać tam bezpośrednio uwzględnienia zagrożeń WA. Pewien wyłom w tej sytuacji stanowią prace uwzględniające zagrożenia WA w środowisku poprzez wprowadzenie systemu wskaźników jego jakości, jak np. w pracy *Noise control at work place as an element of sustainable development* [5].

W kontekście dyskusji dotyczących zagrożeń środowiskowych dużą karierę zrobiła tzw. krzywa Kuznetsa (odwrotne U), która pierwotnie była użyta dla wyjaśnienia zmiany nierówności społecznych w funkcji dochodu narodowego (PKB) na głowę mieszkańca [6]. Okazało się bowiem, że w wielu przypadkach odzwierciedla ona zachodzące zwiększenie zagrożenia środowiska wraz ze wzrostem gospodarczym, np. łączy zagrożenie dwutlenkiem węgla z rosnącą liczbą samochodów. Uogólnienie tej krzywej pokazano na rys. 1. (zaczerniętym z [7]), zaś strzałki poprowadzone z punktów A i B przedstawiają możliwe warianty rozwoju. Jak się wydaje, krzywa ta może również odzwierciedlać wibroakustyczne zagrożenie środowiska, gdyż w początkowym etapie rozwoju gospodarczego celem samym w sobie jest rozwój, a dopiero później przychodzi troska o jakość życia i jakość środowiska, w tym też stan zagrożenia WA.



Rys. 2. Wczesny schemat systemowego ujęcia zagrożeń wibroakustycznych w przemyśle [2]

Fig. 2. An early schematics for a system take on vibroacoustic hazards in industry [2]

Potwierdzeniem takiego rozumowania jest statystyka zagrożenia hałasowego w Europie. Wynika z niej, że w najbardziej rozwiniętych krajach UE procent pracowników narażonych na hałas w 2010 r. wyniósł 29% i był mniejszy niż np. w Polsce (~37%); 5 lat wcześniej było to jeszcze więcej, bo 42% [8], a my jesteśmy na pewno na wznoszącym się łuku krzywej U rysunku 1.

Zagrożenie WA to nie tylko środowisko pracy i życia człowieka, ale też środowisko rozumiane jako obszar bytowania roślin i zwierząt, gdzie również należy liczyć się z negatywnym wpływem obciążenia WA. Prowadzono badania na ten temat; są doniesienia, że niektóre ptaki opuszczają miejsca o dużym poziomie hałasu, a ptaki śpiewające w mieście zmieniają brzmienie swego śpiewu [9]. Co do wpływu zagrożeń WA na rośliny, nie ma jeszcze takich prac, ale wpływ ten z pewnością istnieje.

Systemowe ujęcie zagrożeń wibroakustycznych

O systemowej redukcji hałasu i innych zagrożeń WA zaczęto myśleć w Polsce we wczesnych latach 70. ub. w., kiedy to upojenie zbudowaniem pierwszych zakładów przemysłowych zwolna mijało, a w zakładach pracy zaczęły nabrzmiewać problemy bezpieczeństwa pracy, w tym wysokie zagrożenie WA. Zaczęto znajdować rozwiązania dla poszczególnych przypadków, ale jednocześnie pojawiły się próby systemowego widzenia zagrożeń WA. Przykładem takiego wczesnego myślenia jest schemat przedstawiony na rys. 2. [2]. Widać tu już system: źródło hałasu i drgań w postaci maszyny (hałas drogowy jeszcze nam wtedy nie dokuczał), droga propagacji jako drugi podsystem i człowiek operator jako odbiorca tych zagrożeń. Poszczególne podsystemy schematu zawierają znane wówczas rozwiązania minimalizacyjne zagrożeń WA i w porównaniu z obecnym stanem wiedzy i techniki brakuje tylko czynnych metod redukcji drgań i hałasu. Brakuje również środków transportu jako źródeł hałasu oraz elektrowni wiatrowych, których jeszcze wtedy w kraju nie było.

To systemowe podejście uwzględniające nowe metody i dodatkowe obecnie występujące źródła hałasu i drgań mechanicznych przedstawiono na mapie myślowej problemu zamieszczonej na rys. 3. (gałęzie 3,4,5 mapki); z uwagi na ograniczoną objętość artykułu nie będziemy ich tutaj szczegółowo omawiać. Mapka myśli jest generalnie biorąc dobrym narzędziem do myślenia twórczego i warto ją stosować razem z innymi bardziej rozbudowanymi narzędziami kreatywnego myślenia, np. w celu redukcji hałasu w otaczającym nas środowisku [10].

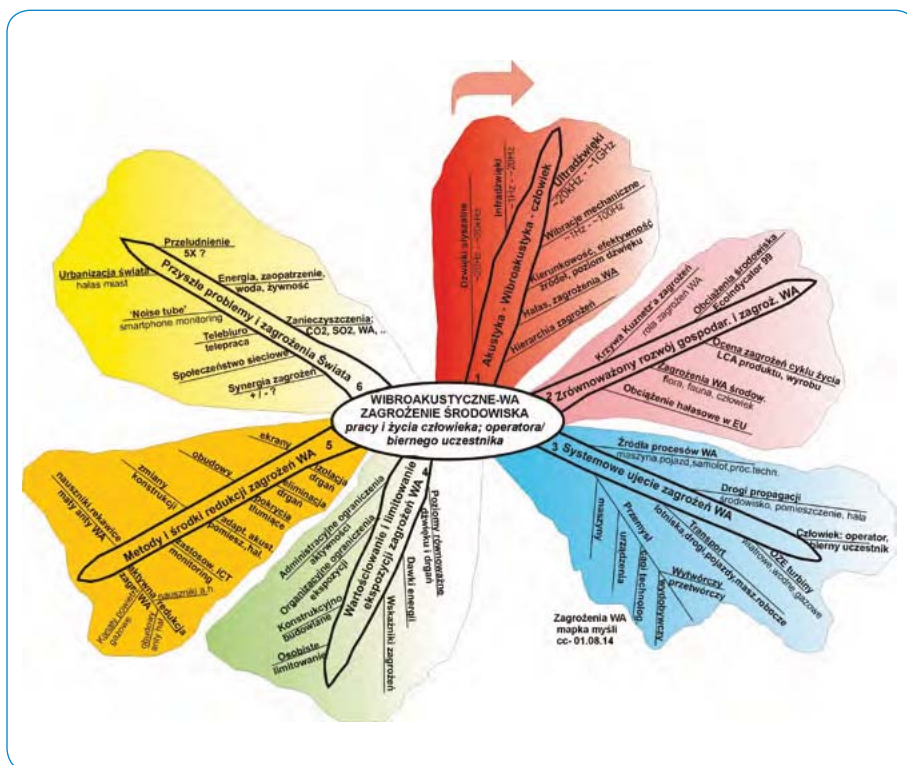
Ocena i ograniczanie ekspozycji na zagrożenia wibroakustyczne

Przed przystąpieniem do czynności związanych z redukcją hałasu i drgań, musimy rozróżnić te zjawiska i dokonać ich oceny w oparciu o rozporządzenia, dyrektywy UE, a także normy krajowe i międzynarodowe. Ocena hałasu słyszalnego oparta jest na wynikach pomiaru miernikiem z zastosowaniem skorygowania mierzonego poziomu ciśnienia akustycznego krzywą A, tj. skorygowania zgodnie z tym, jak przeciętny człowiek słyszy dźwięki; mówimy wtedy o poziomie dźwięku A w decybelach (w niektórych krajach oznaczonego dBA). Jak wiemy z obserwacji, poziom hałasu rzadko jest stały w czasie, dlatego też do celów normowania hałasu na stanowiskach pracy, jak i w innym środowisku poddanym jego ekspozycji, definiuje się tak zwany poziom ekwiwalentny L_{Aeq} (równoważny), przez operację uśrednienia jego poziomu w czasie, co można wyrazić matematycznie przez operację sumowania fragmentów jego oddziaływania, jak to przedstawia poniższy wzór:

$$L_{Aeq} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P_A^2(t)}{P_0^2} dt = 10 \lg \frac{1}{T} \sum_{\Delta t_i}^N 10^{L_{Aeq_i}} \quad (2)$$

gdzie T jest czasem obserwacji (*ekspozycji*) hałasu (*na ogół 8h*), rozbitym na N odcinków w których poziom hałasu był względnie stały i wynosił L_{Aeq_i} , $i=1, \dots, N$.

Tak określony poziom równoważny hałasu jest przedmiotem wielu ustaleń normowych krajowych i międzynarodowych (PN, EN, ISO), zarówno



Rys. 3. Mapa myślowa problemu zagrożenia wibroakustycznego środowiska pracy i życia człowieka
Fig. 3. A mind map of the vibroacoustic hazards towards environment of human's work and life

w odniesieniu do warunków panujących na stanowiskach pracy, jak i w środowisku zamieszkania w porze nocnej i w dzień. Dopuszczalna wartość równoważnego poziomu dźwięku A oddziałującego na człowieka 8 godzin dziennie przez 5 dni w tygodniu to 85 dBA³ (tzw. poziom ekspozycji na hałas), do której dodajemy lub odejmujemy poprawki zależne od warunków akustycznych środowiska, typu źródła hałasu, rodzaju stanowiska pracy itp. [11]. Nie będziemy ich tu przytaczać, można je znaleźć w stosownych aktach prawnych.

Patrząc ogólnie na wyrażenie określające poziom równoważny (2) można powiedzieć, że przedstawia on względną uśrednioną wartość energii określoną przez moc i czas, z jaką proces dźwiękowy działa na obiekt lub operatora.

Wróćmy do rys. 3 i rozważmy przykładowy jego element. Przejdźmy do lewej strony gałęzi 4 i całej gałęzi 5 mapki, traktujących o metodach i środkach redukcji zagrożeń WA na stanowisku pracy, jak i w środowisku bytowania człowieka i innych jego zagrożonych lokatorów. Oczywiście najpierw, jeśli nie ma innych metod, możemy administracyjnie limitować dopuszczalną wartość poziomu ekspozycji na zagrożenia WA stwarzane przez przemysł lub transport. Ale jak widać z gałęzi 5 mapki, istnieją środki i metody w inżynierii mechanicznej i budowlanej, które w wielu przypadkach pozwalają skutecznie ograniczyć zagrożenie WA. Ostatnio jako konkurencyjne pojawiają się czynne środki redukcji procesów WA polegające na redukcji aktywnej

³ Uściślijmy tutaj jednak, że w każdym z podanych przypadków hałas charakteryzują inne parametry, a to co je łączy, to fakt, że są one pochodną ciśnienia akustycznego oraz wartości podawane są w dB. Wartości „poprawek” zależą od emisji hałasu przez człowieka, określonej na podstawie wpływu hałasu na jego organizm.

(tłumieniu danego procesu procesem o podobnym przebiegu, ale w przeciwnej fazie), to znaczy, że hałas redukuje się odpowiednio wygenerowanym w przeciwfazie dźwiękiem, podobnie jak drgania, odpowiednio wygenerowanymi w przeciwfazie drganiami.

Obecnie można powiedzieć, że większość zagrożeń WA w środowisku pracy i życia człowieka można sprowadzić do poziomów dopuszczalnych: najpierw jednak trzeba sobie zdać sprawę z istnienia zagrożenia, a potem zatroszczyć się o niezbędną wiedzę i środki dla skutecznej redukcji zagrożenia WA. Można również przypuszczać, że wznoszenie się kraju na krzywej rozwoju gospodarczego (rys. 1.) doprowadzi nas do drugiego odcinka krzywej Kuzneta i jakoś WA środowiska ulegnie znacznej poprawie.

Przyszłe problemy i zagrożenia naszego świata

Patrząc na naszą przyszłość w szerszej perspektywie, widzimy więcej zagrożeń – nie tylko wibroakustyczne: w nurcie zagrożeń środowiskowych mamy także CO₂, SO₂ i inne chemiczne zagrożenia czystości naszej wody i atmosfery. O braku energii w postaci takiej, jaką wykorzystujemy (ropa) wszyscy słyszeli, bo nawet współcześnie prowadzone wojny mają ją w tle.

Najważniejszym zagrożeniem jest, jak to napisano w raporcie małżeństwa Meadows, bomba demograficzna [12]. Zależnie od sposobu liczenia poziomu życia należącego każdemu na świecie (energochłonność) jest nas co najmniej pięć (lub więcej) razy za dużo i w związku z tym w perspektywie pokolenia pojawią się w krajach biedniejszych

braki energii, żywności i wody pitnej [13]. W krajach bogatych, a ten status nierówności życia między państwami utrzyma się, narastać będzie urbanizacja ze wszystkimi skutkami tego zjawiska, co stworzy potrzebę lepszego monitorowania zagrożeń WA w miastach, np. za pomocą sieci informatycznych i smartfonów [13]. Informatyzacja społeczeństwa da też pozytywne skutki organizacyjne, takie jak telepraca, telebiuro, co zmniejszy konieczność używania różnych środków transportu i zmniejszy obciążenie hałasowe środowiska. Światli ludzie mają też nadzieję, że społeczeństwo sieciowe będzie lepiej poinformowane i bardziej współuczestniczące w rozwiązywaniu swych problemów. Można również spekulować, czy oddziaływanie wymienionych zagrożeń będzie synergiczne, czy też osłabiające – oby to ostatnie.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono, w skrótej formie, współczesne myślenie o zagrożeniach wibroakustycznych w środowisku pracy i życia człowieka. Cywilizacja, jaką wytworzyliśmy jest bowiem hałas- i wibracjotwórcza, a hałas oraz wibracje wdzierają się wszystkimi drogami do naszej pracy i życia. Na szczęście wiele już wiadomo o tym, jak minimalizować zagrożenia WA, trzeba mieć tylko odpowiednie środki. A do tego cywilizacja, jaką tworzymy, jest źródłem innych poważnych zagrożeń dla nas samych. Warto więc zatroszczyć się, by nasze myślenie i działanie było przyjazne środowisku i nam samym.

BIBLIOGRAFIA

[1] Engel Z. i in. *Podstawy wibroakustyki przemysłowej*. Wyd. AGH, 2003, s. 350
 [2] Cempel C. *Wibroakustyka stosowana*. PWN Warszawa 1978 wyd. I, 1989 wyd. II, s. 278
 [3] Cempel C. *Teoria i Inżynieria Systemów*. Wyd. ITE Radom 2008, s. 291
 [4] Eco-indicator 99 Manuals, <http://www.pre-sustainability.com/eco-indicator-99-manuals>
 [5] Engel Z., Zawieska M. *Noise control at work place as an element of sustainable development*. International Congress of Sound and Vibration, Rio de Janeiro, July 2011
 [6] Kuznets S. *Economic growth and income inequality*. "The American Economic Review" 1955, Vol. 1, No 45:1-28
 [7] Budny J. Turowski J., *Oszczędzanie czy poszanowanie energii? Ekonomiczne, socjologiczne i etyczne aspekty gospodarowania energią*, „Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego” 2012, No 4, s. 5-11
 [8] Augustyńska D., Pleban D., Radosz J. *Zagrożenia hałasem na stanowiskach pracy w Polsce i innych państwach Unii Europejskiej*, „Medycyna Pracy” 2012, 63, 6: 689-700
 [9] Slabbekoorn H., den Boer-Visser A. *Cities Change the Songs of Birds*, „Current Biology” 2006, 16, 23: 2326-2331
 [10] Cempel C. *Inżynieria kreatywności w projektowaniu innowacji*. Wyd. ITE Radom, 2013, s. 340
 [11] Engel Z. *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. PWN Warszawa 1993 wyd. I, 2001 wyd. II, s. 490
 [12] Meadows D.H. i in. *Limits to growth*. Klub Rzymski 1972, p. 338
 [13] Cempel C. *Wydolność geobiosfery i tragedia wspólnot*, „Transformacje” 2005, 41, 3-4: 133-138; <http://neur.am.put.poznan.pl>
 [14] Maisonneuve et al, *Citizen noise pollution monitoring*. The Proceedings of the 10th Digital Government Research Conference 2009, pp. 96-102