

Koncepcja szacowania wpływu drgań komunikacyjnych na budynki i na ludzi przy użyciu sztucznych sieci neuronowych

**Mgr inż. Anna Jakubczyk-Gałczyńska, dr inż. Adam Kristowski, dr hab. inż. Robert Jankowski, prof. nadzw. PG
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska**

Drgania wywołane ruchem pojazdów generują negatywne oddziaływania na eksploatację budynków i negatywne odczucia mieszkańców obiektów poddanych oddziaływaniom dynamicznym. Drgania wywołane ruchem ulicznym mogą mieć ogromny wpływ na ludzi znajdujących się w zasięgu ich występowania, ponadto ruch uliczny powoduje hałas uciążliwy dla mieszkańców.

W artykule opisano problem, przedstawiono przyczyny i skutki drgań wywołanych ruchem ulicznym, przybliżono metodykę wykonywania pomiarów według polskich norm, ale przede wszystkim przedstawiono autorską koncepcję szacowania wpływu drgań komunikacyjnych na budynki jednorodzinne.

DEFINICJA DRGAŃ KOMUNIKACYJNYCH

Pojęcie drgań budynków jest ściśle związane z dynamiką budowli. Drganie komunikacyjne [8, 11] budynku jest określane wielkością przemieszczenia (prędkości lub przyspieszenia) cząsteczek przegród danego budynku wywołanego ruchem pojazdów, eksploatacją, robotami liniowymi na szlakach drogowych

i kolejowych. Wibracje występujące w wyniku przejazdu ciężkich pojazdów, czy też długotrwałej pracy sprzętu, są przenoszone przez grunt na fundamenty pobliskich konstrukcji, które przekazują oddziaływania na budynek. Wielkości te mierzone są przez specjalistyczne urządzenia pomiarowe, wyniki są odpowiednio przekształcane, następnie w celu przejrzystości i jasności analizy, są wykonywane wykresy drgań [11] pokazujące zależność przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia od czasu.

Zasięg wpływu dynamicznego od źródła drgań zasugerowano w pracy [8] na 25 m od osi torów tramwajowych i od skrajnego pasa jezdni, 40 m od ściany tunelu metra oraz 50 m od osi torów kolejowych.

Przyczyny i skutki występowania drgań

Przyczyn drgań budowli jest wiele (np. [7]). Niektóre z nich są obciążeniem dynamicznym stałym, okresowym, część z nich łatwo określić, a niektóre mają charakter losowy. Najczęstsze to: trzęsienia ziemi [17, 18], wstrząsy górnicze [16], działanie



Rys. 1. Uszkodzenia powstałe na skutek drgań komunikacyjnych (fot. własne)

dużych wibrujących maszyn [3], parcie wiatru, przemieszczanie się mas ludzi, a także drgania wywołane ruchem pojazdów poruszających się po pobliskiej drodze [5]. To ostatnie oddziaływanie poddano analizie w niniejszym artykule.

Biorąc pod uwagę skutki drgań spowodowanych ruchem ulicznym na budynki, mogą być one małe, niezauważalne lub mogą spowodować awarię. Najczęściej powodują one zarysowania i spękania tynków, odpadanie farby, tynku, zarysowania konstrukcji, pękanie elementów konstrukcji lub zawalenie się budynku [5, 8, 11].

Oprócz wpływu na budynek, istotny jest wpływ drgań komunikacyjnych na ludzi przebywających w budynkach. Problem ten jest szczególnie zauważalny, kiedy ludzie są narażeni na długotrwałe obciążenia drganiami i hałasem. Szczegółowiej problem ten opisano w dalszej części.

Czynniki wpływające na intensywność drgań komunikacyjnych

Oczywiste jest, że drgania wpływają na konstrukcję budynków, a intensywność tego wpływu jest określona przez szereg czynników. Są to czynniki zależne od budynku i jego usytuowania i od cech charakterystycznych drogi, takich jak: stan i rodzaj nawierzchni, rodzaj gruntu, dopuszczalna prędkość pojazdów, dopuszczalna nośność pojazdów, długotrwałość drgań, kształt i wymiary budynku, a także średnia odległość ściany od osi jezdnii.

Od wymienionych czynników zależy intensywność drgań przekazywanych na budynek. Im większy jest ruch uliczny oraz im budynek jest bardziej narażony na wpływ drgań, tym mogą wystąpić większe uszkodzenia.

Sposoby redukcji wpływu drgań

Ze względu na to, że drgania, zwłaszcza długotrwałe, mogą powodować wiele szkód, ważna jest wiedza, które obiekty są zagrożone i czy odpowiednio szybko podjęto kroki redukujące skutki drgań. Jest wiele metod, które można zastosować. Środki

techniczne redukcji drgań, tak zwane eliminatory drgań, mogą być umieszczane w źródle, na drodze propagacji lub w budynku.

Pod pojęciem eliminatora drgań rozumie się dodatkowe elementy dołączone lub wbudowane w konstrukcję, urządzenia lub dodatkowe systemy zainstalowane na konstrukcji (lub wbudowane w konstrukcję) po to, aby zmniejszyć efekty dynamicznego oddziaływania ruchu ulicznego na budynek [3]. Do najczęściej stosowanych metod redukcji drgań należą [3, 5]: elastyczne maty między gruntem a budynkiem (wibroizolacja) [4], sprężyste oddzielenie całego budynku pod stropem powyżej kondygnacji podziemnej, asfaltowanie dróg, wyeliminowanie z pasów ruchu odpływów wody opadowej, pokryw włazów do kanałów, łączzeń, itp., a także zmniejszenie prędkości pojazdów.

OKREŚLANIE WPLYWU DRGAŃ NA BUDYNKI

Przeciwdziałanie drganiom należy rozpocząć od określenia, które budynki są zagrożone. Można to wykonać posługując się normą [11]. Należy jednak zaznaczyć, że normę tę możemy zastosować jedynie w przypadku budynków murowanych o kształcie zwartym, o małych wymiarach zewnętrznych rzutu poziomego (maksymalnie 15 m) jedno- lub dwukondygnacyjnych, o wysokości nieprzekraczającej wymiarów rzutu. Do określenia wpływu drgań na takie budynki służy skala SWD I [11]. Istnieje również druga skala – SWD II służąca do określania strefy wpływów dynamicznych w budynkach do 5 kondygnacji, ale ich wysokość musi być mniejsza od podwójnej najmniejszej szerokości [11].

Według normy [11] należy wykonać pomiary przyspieszeń lub prędkości powstających wskutek przejazdu pojazdów za pomocą specjalistycznego urządzenia pomiarowego. Do każdego z pomiarów można przedstawić wykres odfiltrowanych przyspieszeń, tak zwany wibrogram. Szczegółowo metodykę pomiarową opisano w [8, 11].

W zależności od wartości drgań, wykres będzie znajdował się w jednej z pięciu stref zagrożenia:

- Strefa I : brak wpływu drgań na obiekt;
- Strefa II: drgania są odczuwalne, ale nieszkodliwe dla konstrukcji;

- Strefa III: może wystąpić ogólne osłabienie nośności konstrukcji;
- Strefa IV: drgania mają duży wpływ na konstrukcję; amplitudy są tak duże, że przedmioty znajdujące się w budynku spadają na podłogę. Obiekt znajdujący się w tej strefie stwarza zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi;
- Strefa V: nośność budynku zostaje zaburzona wskutek ogromnej amplitudy drgań, co może skutkować awarią lub zawaleniem się konstrukcji.

Przykład normowego określania strefy wpływu drgań na podstawie pomiarów

Badania polowe wykonano w niewielkiej miejscowości w Północnej Polsce na budynku jednorodzinny parterowy z poddaszem użytkowym, częściowo podpiwniczonym. Założono 4 czujniki na ścianie równoległej do ulicy przy poziomie terenu. Odległość ściany od krawędzi ulicy wynosiła 7,35 m. Pomiar przyspieszeń wykonano w dwóch kierunkach: X , Y podczas 17 prób podjętych w momencie przejazdu samochodów ciężarowych, autobusów, śmieciarki, traktora. Następnie wyniki przefiltrowano według normowych zasad podanych w [11] i otrzymano wyniki do każdego pomiaru i każdej wymaganej częstotliwości oraz wybrano ekstremalne wartości i umieszczono je na wykresie Skal Wpływów Dynamicznych I. Otrzymano następujący rezultat: analizowany budynek znajduje się w pierwszej strefie wpływów dynamicznych, wobec czego drgania wywołane poruszającymi się pojazdami na drodze znajdującej się tuż przed rozpatrywanym obiektem nie mają wpływu na konstrukcję ani na szybsze zużycie się tynków czy odpadanie farby. Można zatem wnioskować, że uszkodzenia w badanym domu powstały na skutek zużycia lub zmęczenia materiałów, wieku budynku lub wadliwego wykonania elementów wykończeniowych.

ODDZIAŁYWANIE DRGAŃ NA LUDZI

Drgania wywołane ruchem drogowym mogą powodować dyskomfort dla ludzi znajdujących się w strefie wpływu. Badania wskazują, że próg odczuwalności drgań przez człowieka jest niżej usytuowany niż granica odczuwalności przez budynek [8].

Przy ocenie wpływu drgań na ludzi zakłada się [13], że drgania są odbierane w sposób bierny, czyli ludzie nie mają wpływu na źródło drgań. Istnieją dwa stany odbioru drgań przez człowieka – uznawane jako ortogonalne układy odniesienia [8]:

- 1) Pozycja siedząca lub stojąca – odbiór drgań przez powierzchnię stóp i siedzenia – oś Z przebiega wzdłuż kręgosłupa, osie XY przyjmują kierunki poziome;
- 2) Pozycja leżąca – odbiór drgań przez całą powierzchnię ciała – oś Z jest pozioma, oś X przebiega od pleców do klatki piersiowej, oś Y od boku do boku.

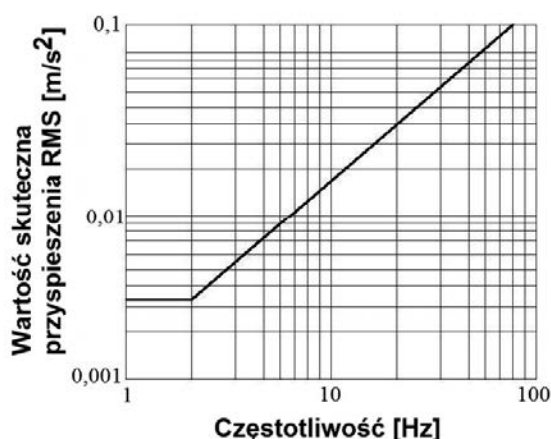
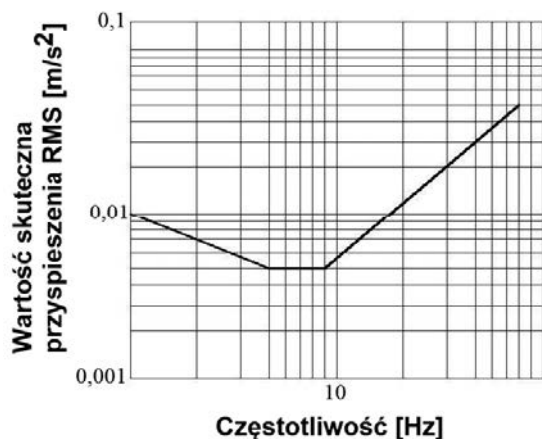
Wielkością charakteryzującą drgania jest wartość skuteczna RMS (z ang. *Root Mean Square*) przyspieszenia lub prędkości określona według wzorów zamieszczonych w [8]. Pamiętać należy, że drgania wywołane ruchem drogowym mają charakter nieregularny, najpierw narastają, następnie zmniejszają się. Dlatego jako czas uśredniania przyjmuje się tylko taki czas, w którym wartości amplitud są większe od 0,2 wartości ekstremalnej [8].

Parametry oceny i próg odczuwalności drgań

W normach opisano kilka metod oceny wpływu drgań komunikacyjnych na ludzi [1, 6, 9, 13]. W polskiej normie [13] istnieją dwa parametry oceny, trzeci parametr wprowadzono do norm europejskich [1, 6].

W pierwszej z metod wykorzystuje się parametr wartości skorygowanej przyspieszenia lub prędkości drgań w całym paśmie częstotliwości, czyli w zakresie $1 \div 80$ Hz. Skorygowanie następuje przez wprowadzenie do toru pomiarowego (między czujnikiem a rejestratorem) filtru korekcyjnego – rezultatem oceny jest skorygowana wartość skuteczna przyspieszenia lub prędkości [8, 13]. Próg odczuwalności przez człowieka tego parametru określono w [13] i jest to wartość równa przyspieszeniu (prędkości) wzdłuż osi Z : $0,005 \text{ m/s}^2$ ($0,0001 \text{ m/s}$), wzdłuż osi X i Y wynosi $0,0036 \text{ m/s}^2$ ($0,00029 \text{ m/s}$).

Kolejnym parametrem wykorzystywanym do określania wpływu drgań jest widmo (struktura częstotliwościowa) wartości skutecznej przyspieszenia lub prędkości w pasmach 1/3 oktaowych. Podobnie, jak przy pomiarach wpływu drgań na budynki, należy zarejestrować wibrogram, $a(t)$, poddać filtracji i nanieść wyniki na wykres progów odczuwalności drgań przez ludzi.



Rys. 2. Próg odczuwalności drgań na kierunku Z oraz XY (na podstawie [1, 6])

W normie polskiej opisano dwie wymienione metody [13]. Trzecią metodą, opisaną jedynie w normach europejskich [1, 6, 7, 8], jest metoda oparta na dawce wibracji *VDV*. Umożliwia ona uściślenie oceny wpływu drgań przez odniesienie do pełnego czasu oddziaływania wibracyjnego. Dawkę wibracji *VDV*, po wykonaniu wielu obliczeń i badań wprowadzono do norm europejskich, a wzór na obliczenie można znaleźć w [2, 8]. Nie występuje wyraźne określenie progu odczuwalności tego parametru. Można przyjąć podawane w literaturze [8] interpretacje, że wartości odpowiadające wystąpieniu małego prawdopodobieństwa zgłoszenia uwag ze strony mieszkańców odpowiadają progowi odczuwalności. Przyjmowane wartości maksymalne w porze dziennej to: $VDV = 0,2 \div 0,4 \text{ m/s}^{1,75}$ oraz w porze nocnej: $VDV = 0,13 \text{ m/s}^{1,75}$.

W Dyrektywie Europejskiej [2] sprecyzowano warunek wpływu drgań na człowieka do jednej wartości, tj. przyspieszenia drgań mechanicznych w ciągu dnia wyznaczonych w trzech kierunkach *X*, *Y* i *Z* z uwzględnieniem współczynników o oddziaływaniu ogólnym na organizm ludzki, przekazywanych do organizmu jako całości przez stopy lub części tułowia. Określono, że parametr ten nie powinien przekraczać wartości $0,8 \text{ m/s}^2$.

Dopuszczalne wartości hałasu w budynkach mieszkalnych

Występowanie drgań komunikacyjnych wiąże się zazwyczaj z dyskomfortem, a nawet niebezpiecznym dla ludzkiego ucha hałasem. Zgodnie z dyrektywą unijną [2] oraz normą [12] dopuszczalny równoważny poziom dźwięku *A* hałasu przenikającego do pomieszczeń mieszkalnych od wszystkich źródeł hałasu łącznie nie powinien przekraczać poziomu 40 dB w ciągu dnia, czyli w godzinach od 6:00 do 22:00 i 30 dB w nocy, czyli od 22:00 do 6:00, natomiast w kuchni i w pomieszczeniach sanitarnych wartości ekstremalne wynoszą odpowiednio: 45 dB i 40 dB.

Dopuszczalny poziom hałasu od wyposażenia technicznego budynku oraz innych urządzeń w budynku i poza budynkiem przenikającego do pomieszczenia mieszkalnego przy hałasie nieustalonym nie powinien przekraczać poziomu 40 dB w ciągu dnia i 30 dB w nocy, natomiast w kuchni i pomieszczeniach sanitarnych w ciągu całej doby poziom hałasu nie powinien przekraczać 45 dB.

KONCEPCJA OKREŚLANIA WPLYWU PRZY UŻYCIU SZTUCZNEJ SIECI NEURONOWEJ SSN

Sztuczna sieć neuronowa (SSN) jest to algorytm obliczeń oparty na zasadzie prosperowania ludzkiego mózgu [10]. Według Tadeusiewicza [15], mózg składa się z 10^{10} neuronów. Komórki te przyjmują i wysyłają sygnały o częstotliwości $1 \div 100 \text{ Hz}$. Mózg wykonuje 10^{18} operacji na sekundę. Jest to niewyobrażalna prędkość nawet dla najszybszych komputerów. Sztuczna sieć neuronowa opiera się na zasadzie funkcjonowania neuronów. Pewna informacja dociera do nich, neurony przetwarzają ją, zapamiętują, by wykorzystać w przyszłości. Sztuczne systemy działają w ten sam sposób. Informacje są podawane, przetwarzane i zapamiętywane, a nawet poprawiane.

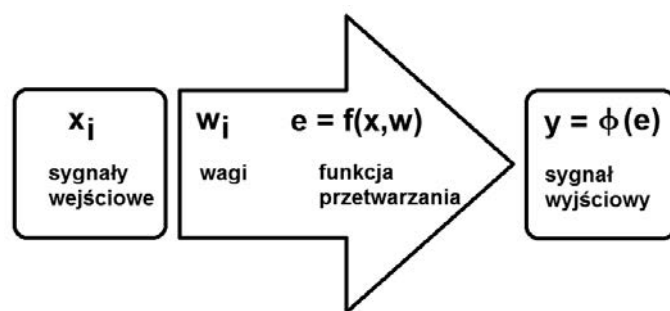
Do szacowania wpływu drgań planuje się budowę sztucznej sieci neuronowej jednokierunkowej, uczonej w sposób nadzorowany, ze wsteczną propagacją błędów. Tworzenie sieci neuronowej możemy podzielić na kilka etapów [14]. Pierwszym z nich jest utworzenie bazy danych. Są to dane niezbędne do rozpoczęcia budowy algorytmu. Bazę mogą stanowić wyniki pomiarów polowych, laboratoryjnych, wyniki ankiet. Im więcej jest danych, tym bardziej można utworzyć wiarygodną sieć. Następnym etapem jest budowa algorytmu. Określić należy czynniki, które mają lub mogą mieć wpływ na wyniki otrzymane w badaniach podczas tworzenia zbioru bazowego. Wyniki stanowią sygnały wyjściowe *X*. Ponadto należy określić, które czynniki mają większy wpływ na wynik, a które mniejszy. Trzeba dlatego określić wagi danych czynników *W*. Metoda wstecznej propagacji błędów [14] polega na losowym dobraniu wag, obliczeniu sieci z losowymi wagami i porównaniu wyników z rzeczywistymi wielkościami, a następnie takiej poprawie wag, aby otrzymać odpowiedni sygnał wyjściowy. W kolejnych etapach wagi będą poprawione przez sieć, w tak zwanej fazie uczenia sieci.

W systemie obliczeń wprowadzono funkcję aktywacji *f*. Funkcja ta może być liniowa, skokowa oraz sigmoidalna. Należy przyjąć taką funkcję, aby najlepiej pasowała do analizowanego problemu. Ma ona za zadanie obliczenie sygnału wyjściowego *Y*, na podstawie sygnałów wejściowych *X* i określonych wag *W* tych sygnałów.

Niezależnie należy prowadzić fazę weryfikującą. Oznacza to, że spośród danych wejściowych wybrać należy pewną grupę wyników, także poddanych działaniu sieci i samodzielnie, a zazwyczaj przy pomocy ekspertów, wyznaczyć dla nich wynik. Otrzymane w ten sposób wartości są porównywane z wynikami otrzymanymi przez sieć (fazę weryfikującą), która dzięki temu może poprawić wagi w taki sposób, aby otrzymać wyniki zbliżone do tych podanych przez człowieka. Proces poprawiania wag jest to etap uczenia sieci. Im więcej sprawdzonych i pewnych informacji i badań, tym sieć lepiej „nauczy się” i będzie podawać bardziej wiarygodne wyniki.

Oprócz tego, przed stworzeniem sieci, należy wyznaczyć próbki testujące. Wyników tych nie poddaje się działaniu sieci, kiedy jest ona w czasie „uczenia”. Dopiero w końcowej postaci algorytmu wprowadza się wyniki testujące. Sygnał wyjściowy porównuje się z wyznaczonym poza siecią i określa, jaki procent próbek testujących oznaczono poprawnie. Jeśli procent jest dla autora zadowalający, proces tworzenia sieci zostaje ukończony. Na rys. 3 przedstawiono schemat sztucznej sieci neuronowej.

Koncepcja szacowania wpływu drgań komunikacyjnych na budynki i na ludzi przy użyciu SSN polega na tym, aby po wpro-



Rys. 3. Model Sztucznej Sieci Neuronowej

wadzeniu do programu danych, takich jak: odległość budynku od drogi, rodzaj drogi, nośność pojazdów mogących poruszać się po drodze oraz innych istotnych czynników, sieć na podstawie zebranej wcześniej bazy danych ustaliła z określonym prawdopodobieństwem przynależność obiektu do strefy wpływów dynamicznych.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Problem występowania drgań coraz bardziej powiększa się, ponieważ coraz więcej obszarów podlega urbanizacji, jest coraz więcej pojazdów, są budowane nowe drogi w miastach i na terenach wiejskich. Obszary dobrze skomunikowane są chętnie zamieszkiwane i zabudowywane, stąd coraz więcej budynków powstaje w pobliżu dróg. W związku z tym, drgania w budynkach spowodowane ruchem pojazdów dotyczą coraz większej liczby domów, zarówno istniejących, jak i projektowanych. Dlatego warto podjąć wszelkie działania, aby zmniejszyć wpływ drgań komunikacyjnych na budynki i ludzi przebywających w nich.

Idea wykorzystania SSN do oszacowania wpływu drgań komunikacyjnych na budynki i na ludzi jest alternatywnym rozwiązaniem do kosztownych i pracochłonnych pomiarów. Największą jednak jej zaletą jest możliwość prognozowania występowania drgań w obiektach jeszcze nie wzniesionych. Obecnie brakuje prostych metod prognozujących zagrożenia powstających wskutek drgań. Stąd stworzenie sztucznej sieci neuronowej może przynieść wiele korzyści mieszkańcom domów narażonych na oddziaływania dynamiczne od ruchu pojazdów.

LITERATURA

1. BS 6472-1:2008. Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Part.1: Vibration sources other than blasting. British Standard.
2. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise.

3. Engel Z.: Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem. PWN, Warszawa 2001.
4. Falborski T., Jankowski R.: Polymeric bearings – a new base isolation system to reduce structural damage during earthquakes. *Key Engineering Materials*, Vol. 569-570, 2013.
5. Hunaidi O.: Traffic vibrations in buildings. National Research Council of Canada, 2000.
6. ISO 10137.2007. Bases for design of structures. Serviceability of buildings and walkways against vibration.
7. Kawecki J.: Oddziaływania dynamiczne na obiekty budowlane, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska* z. 58, nr 3/I, 2011.
8. Kawecki J., Stypuła K.: Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływania komunikacyjne. *Politechnika Krakowska*, 2013.
9. Kawecki, J.; Stypuła, K.: Błędy w diagnozach dotyczących oceny wpływów dynamicznych na budynki. *XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna Szczecin-Międzyzdroje*, 2007.
10. Ossowski S.: Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym. Warszawa 1996.
11. PN-85 B-02170.1985. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
12. PN-87/B-02151/02. 1987. Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach.
13. PN-88 B-02171. 1988. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.
14. Stęgowski Z.: Sztuczne sieci neuronowe, Kraków 2004.
15. Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe. Warszawa 1993.
16. Tataro T.: Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2012.
17. Zembaty Z., Cholewicki A., Jankowski R., Szulc J.: Trzęsienia ziemi 21 września 2004 r. w Polsce północno-wschodniej oraz ich wpływ na obiekty budowlane. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 1/2005.
18. Zembaty Z., Jankowski R., Cholewicki A., Szulc J.: Trzęsienie ziemi 30 listopada 2004 r. na Podhalu oraz jego wpływ na obiekty budowlane. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 9/2005.