



Badania drganiowe segmentów murowych jako zarządzanie kontrolą jakości konstrukcji murowych

Mariusz Żółtowski¹, Katarzyna Jeleniewicz²

STRESZCZENIE:

W artykule poddano weryfikacji proponowaną metodykę drganiowego badania degradacji konstrukcji budowlanych w zastosowaniu do oceny miar rozprywu energii drganiowej w segmentach murowych (cegłanych). Analizy teoretyczne i weryfikacja praktyczna badania wrażliwości informacyjnej proponowanych miar procesów drganiowych wskazują na szerokie możliwości ich zastosowań, w szczególności możliwe jest zastosowanie przedstawionej metodyki w zarządzaniu kontrolą jakości.

SŁOWA KLUCZOWE:

segmenty murowe; degradacja stanu; drgania; miary stanu

1. Wprowadzenie

Procesy starzenia i zużycia są nieodłącznie związane z istnieniem obiektów budowlanych, wpływając destrukcyjnie na ich stan techniczny i prowadząc nieuchronnie do dających się obserwować uszkodzeń. Łączne oddziaływanie tych form degradacji struktury obiektu prowadzi do rozwoju uszkodzeń, jak też do przerwania poprawności funkcjonowania konstrukcji, a nawet utraty fizycznej spójności obiektu.

Znajomość podstaw fizycznych zjawisk starzeniowych i zużyciowych ułatwia poznanie oraz opis generowanych objawów degradacji materiałów i konstrukcji budowlanych, umożliwiając śledzenie zmian stanu ich degradacji i przewidywanie uszkodzeń, co warunkuje skuteczność stosowanych coraz częściej w sektorze budownictwa metod i środków badań nieniszczących oraz diagnostyki technicznej.

Poprawne istnienie (działanie, funkcjonowanie) maszyn i konstrukcji budowlanych wymaga doprowadzenia do nich (i odprowadzenia) odpowiednich rodzajów energii, a także różnych produktów materiałowo-technicznych zależnych od rodzaju konstrukcji. Potencjał użytkowy zapewnia zdolność do zastosowania zgodnie z przeznaczeniem określonym w fazie projektowania i wytwarzania. W czasie eksploatacji budowli ten potencjał ulega zużyciu i wobec tego musi być odnawiany. W związku z tym trzeba brać pod uwagę potencjał obsługowy, który służy do odnowy potencjału użytkowego zużytego podczas istnienia konstrukcji budowlanej [1].

Zmiana wartości wielkości charakteryzujących przedstawione potencjały jest uzależniona przede wszystkim od:

- rodzaju zadań realizowanych przez konstrukcje budowlane,
- zewnętrznych warunków istnienia (funkcjonowania) konstrukcji,
- stanu technicznego konstrukcji (budowli),
- kwalifikacji użytkowników i pracowników wykonujących prace naprawcze.

¹ Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa, e-mail: mariusz_zoltowski@sggw.pl, orcid id: 0000-0003-0305-2378

² Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa, e-mail: katarzyna_jeleniewicz@sggw.pl, orcid id: 0000-0002-7109-2737

Dedykowane algorytmy metodyki drganiowego badania stanu degradacji w budownictwie to uogólnione procedury badania własności dynamicznych (degradacji) różnych elementów, maszyn i konstrukcji budowlanych, które uwzględniają modelowanie, badania symulacyjne oraz ich weryfikację w badaniach stanowiskowych i eksploatacyjnych. Ocena stanu dynamicznego maszyn i konstrukcji budowlanych za pomocą miar propagacji energii drganiowej wymaga skojarzenia cech struktury ocenianego obiektu ze zbiorem miar i ocen procesów wyjściowych. Dedykowany algorytm postępowania badawczego podczas analizy rozptyłu energii drganiowej w badaniach maszyn i konstrukcji budowlanych obejmuje [2]:

- formułowanie problemu badawczego;
- akwizycję i przetwarzanie miar energii drganiowej;
- optymalizację jakościową symptomów drganiowych;
- modele związania miar ze stanem degradacji;
- wnioskowanie.

Zagadnieniem głównym tej pracy jest weryfikacja skuteczności proponowanej w wielu pracach autora dedykowanej metodyki drganiowego badania degradacji konstrukcji budowlanych w zastosowaniu miar rozptyłu energii drganiowej w segmentach murowych (cegłanych).

2. Badania segmentów murowych

Własności dynamiczne konstrukcji budowlanych mają bezpośredni wpływ na poziom generowanych drgań, emitowany hałas, wytrzymałość zmęczeniową, sterowalność i stabilność konstrukcji. Analizę własności dynamicznych konstrukcji identyfikuje się na podstawie budowanych modeli strukturalnych lub na podstawie eksperymentów na rzeczywistym obiekcie.

Ocena stanu dynamicznego konstrukcji budowlanych za pomocą procesów drganiowych wymaga skojarzenia cech struktury ocenianego obiektu ze zbiorem miar i ocen procesów wyjściowych. Wprowadzane drgania do obiektu mają charakter dynamiczny i zachowują warunki równowagi pomiędzy stanem bezwładności, sprężystości, tłumienia i wymuszenia. Zaburzenia rozchodzą się od źródeł w postaci fal w sposób zależny od własności fizycznych oraz granic konfiguracji, wymiarów i kształtów budowli. Powoduje to w konsekwencji rozpraszanie energii fal, ich ugięcia, odbicia i wzajemne nakładanie się. W rezultacie istnienia wejścia i realizacji transformacji stanów reprezentujących cechy i właściwości konstrukcji powstaje szereg dających się mierzyć objawów charakterystycznych zawartych w procesach wyjściowych [2-6].

Do badań weryfikacyjnych wybrano segmenty murowe wykonane z elementów ceramicznych, które dla potrzeb tego badania oznaczono w zależności od sposobu ich wykonania jak w tabeli 1. W tabeli tej podano także wartości siły niszczącej dany segment murowy.

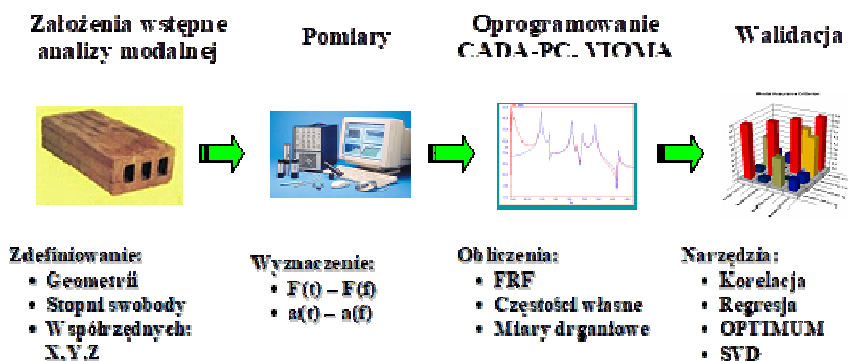
Tabela 1

Charakterystyka badanych segmentów murowych

Materiał	Przekrój próbki [cm]	Sposób zbrojenia	Oznaczenie próbki	Siła niszcząca [kN]
cegła ceramiczna	12 x 25	bez zbrojenia	C1	290
		zbrojenie siatką stalową	CD1	295
		zbrojenie siatką Ruredil	CR1	185

Badane segmenty murowe z cegły ceramicznej wykonano bez zbrojenia, ze zbrojeniem siatką stalową oraz zbrojone siatką Ruredil [7].

Badania segmentów murowych prowadzono zgodnie z zaproponowaną w wielu opracowaniach naukowych dedykowaną metodologią badań drganiowych w konstrukcjach budowlanych, zgodnie z metodyką przedstawioną na rysunku 1.



Rys. 1. Metodyka badań drganiowych segmentów murowych [9]

Eksperyment w badaniach identyfikacyjnych wykonuje się za pomocą specjalizowanego analizatora sygnałów lub wykorzystując komputer jako układ sterujący i obliczeniowy, wyposażony w specjalny interfejs pomiarowy. Każdy badany segment murowy pod założonym obciążeniem wymuszano do drgań młotkiem modalnym i rejestrowano zarówno wymuszenie oraz odpowiedź na to wymuszenie. Zmierzone na obiekcie sygnały drgań, najczęściej przyspieszenia drgań i siły wymuszającej, wymagają przetworzenia i archiwizacji.

Podstawową metodą przetwarzania sygnałów stosowaną w eksperymencie identyfikacyjnym jest analiza częstotliwościowa, która jest realizowana bądź to za pomocą specjalizowanego analizatora, bądź za pomocą specjalistycznego oprogramowania zaimplementowanego na komputerze stosowanym do obsługi eksperymentu. Oprogramowaniem tego typu jest CADA-X firmy LMS, a w szczególności tzw. Fourier Monitor dla komputerów typu workstation oraz oprogramowanie SAAS dla komputerów klasy PC. Ze względu na dużą liczbę punktów pomiarowych ściśle powiązanych z geometrią układu do archiwizacji danych pomiarowych stosowane są specjalne bazy danych zawarte w oprogramowaniu do analizy modalnej [6, 7].

Wyniki badań drganiowych przedstawionych segmentów dla wyróżnionych stanów obciążeń (tab. 2) stanowią bazę do dalszych badań efektywności opracowanej procedury drganiowej oceny stanu destrukcji segmentów murowych.

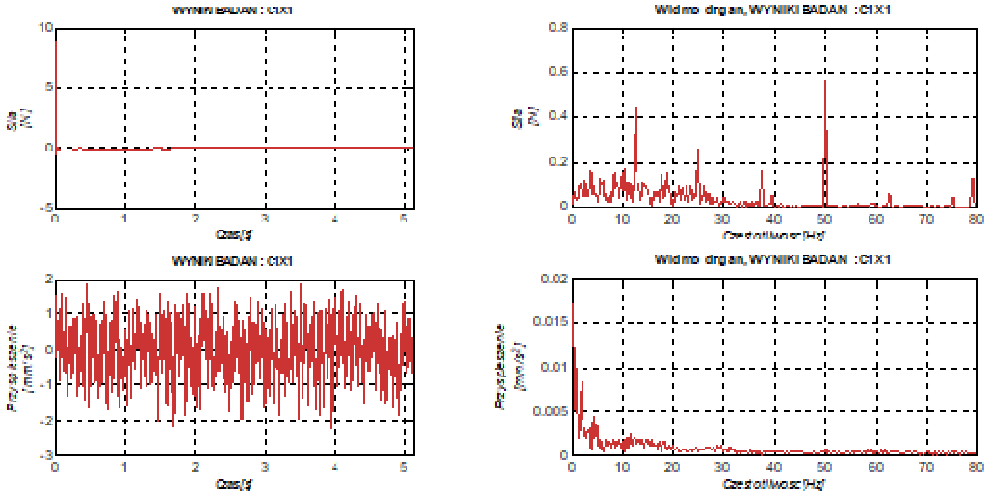
Tabela 2

Dane liczbowe miar sygnału drganiowego dla różnych obciążeń segmentów murowych

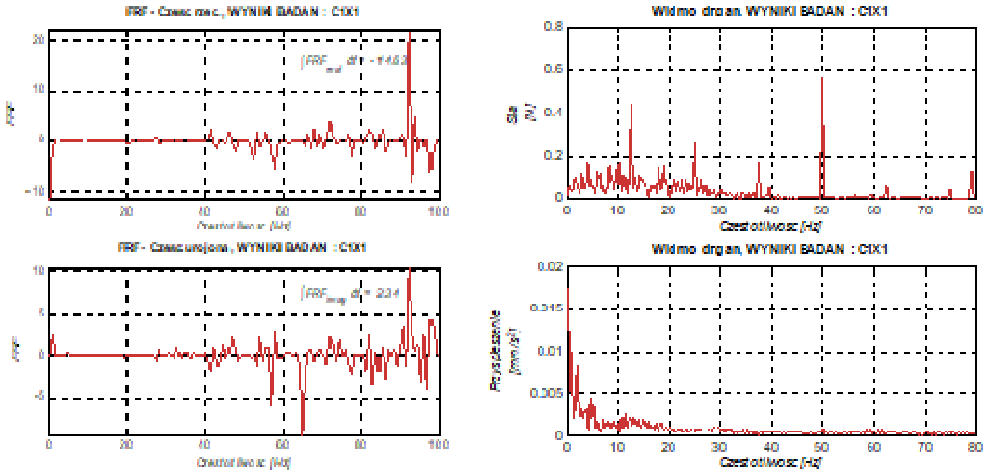
	kN	X data					Y data					
		FRFr	FRFu	HRir	HRiu	coher	kN	FRFr	FRFu	HRir	HRiu	coher
C 1	0	-14.43	2.34	-25.01	-26.4	11.11	0	15.47	5.27	-15.5	9.78	15.45
	150	5.37	12.35	-11.55	-58.72	14.97	150	-5.34	19.73	-11.38	53.94	15.55
	270	12.31	45.18	35.83	13.15	12.97	270	-24.71	-9.81	-31.52	25.81	18.75
CF 1	0	-21.51	2.01	43.87	12.72	15.83	0	28.54	4.17	-8.57	-24.88	12.37
	150	5.91	11.87	7.93	29.35	13.37	150	4.88	21.12	20.75	53.25	11.52
	296	43.83	-25.85	-14.28	77.32	14.75	296	4.87	6.52	-45.74	75.95	17.41
CF 1	0	-1.23	7.45	10.52	32.34	14.83	0	-22.55	8.75	-15.52	-25.12	15.11
	150	-13.79	5.81	23.65	23.77	12.65	150	5.94	36.81	10.89	11.12	15.57
	306	-11.74	-3.72	-5.17	55.73	17.58	306	15.34	12.37	14.23	17.78	17.32

Na rysunkach 2-4 przedstawiono wyniki takiego postępowania, prezentując kolejno: przebiegi siły wymuszenia, odpowiedzi na zadane wymuszenia w postaci amplitudy przyspieszenia drgań, widma drgań tych sygnałów, przebiegi FRF (części rzeczywistej i urojonej), przebiegi transmitancji (części rzeczywistej i urojonej), a także przebieg funkcji koherencji.

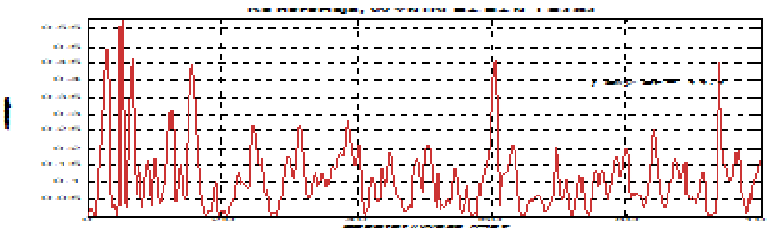
Badania przeprowadzono dla przygotowanych 6 różnych segmentów murowych w dwóch kierunkach wymuszeń: wzdłuż osi x oraz y. Poniżej zaprezentowano tylko wybrane wyniki tych badań dla przykładowego segmentu, obciążonego tylko wzdłuż jednej osi.



Rys. 2. Przebiegi siły wymuszenia i przyspieszenia drgań jako odpowiedzi w dziedzinie czasu i częstotliwości



Rys. 3. Przykładowe przebiegi funkcji transmitancji oraz FRF (Frequency Response Function)



Rys. 4. Wyniki badania funkcji koherencji dla segmentu C1

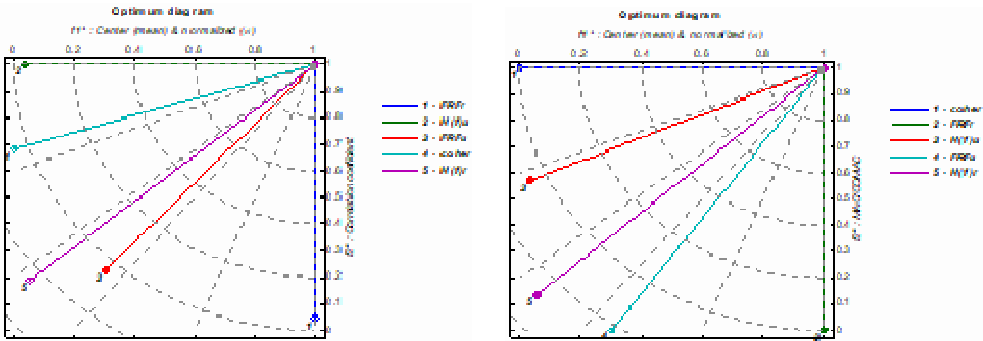
Badania weryfikacyjne opracowanej metodyki oceny destrukcji segmentów murowych prowadzono dalej na segmentach murowych dla trzech obciążeń przyjętych z powyższych badań: 0 kN, graniczna wartość siły zniszczenia segmentu oraz wartość średnia siły obciążenia.

Wyniki badań wybranych estymatorów drganiowych (rys. 5-8) pozwalają na jakościowe oceny, ale nie umożliwiają dogodnego ilościowego wnioskowania o zmianie destrukcji i wpływie obciążenia na badaną destrukcję segmentów murowych. Wszystkie przebiegi funkcyjne zostały więc dalej opracowane (dyskretyzowane) liczbowo i wykorzystane podczas wnioskowania jakościowego z zastosowaniem zaproponowanych wcześniej metod statystycznych [8, 9]. Zależności miar drganiowych od warunków obciążenia dla poszczególnych segmentów murowych zawarte są w opracowanych dalej modelach regresyjnych.

3. Badania wrażliwości miar

Badania wrażliwości miar estymatorów drganiowych zrealizowano oddzielnie dla każdego rodzaju materiału segmentu murowego. Selekcja badanych miar sygnału została przeprowadzona w programie OPTIMUM, gdzie wykorzystano 4 kryteria wrażliwości: wskaźnik zmienności $f1^*$, wskaźnik korelacji $f2^*$, wskaźnik wrażliwości $f3^*$ oraz wskaźnik MAC/COMAC $f4^*$. Pierwsze dwa wskaźniki były już wcześniej zdefiniowane i wykorzystywane, natomiast dwa pozostałe są zdefiniowane następująco [10].

Na rysunku 5 przedstawiono wybrane wyniki działania procedury OPTIMUM dla badanych segmentów murowych.



Rys. 5. Wyniki OPTIMUM segmentów ceramicznych dla f1 - korelacja, f1 - MAC/COMAC

W tabeli 3 przedstawiono w kolejności najlepsze miary procesu drganiowego wynikające z metodyki OPTIMUM dla różnych kryteriów ich oceny.

Tabela 3

Zestawienie najlepszych miar procesu destrukcji segmentów murowych

	X data			Y data				
	Position	Correlation Coefficient	Sensitivity Symptoms	MAC	Position	Correlation Coefficient	Sensitivity Symptoms	MAC
C	1	FRFR	FRFR	FRFR	1	FRFR	FRFR	FRFR
	2	FRFR	FRFR	FRFR	2	FRFR	FRFR	FRFR
	3	FRFR	FRFR	FRFR	3	FRFR	FRFR	FRFR

Analiza wyników z tabeli 3 wskazuje, że najlepsze dla segmentów ceramicznych w kolejności są miary: FRFR; H(f)r; coher.

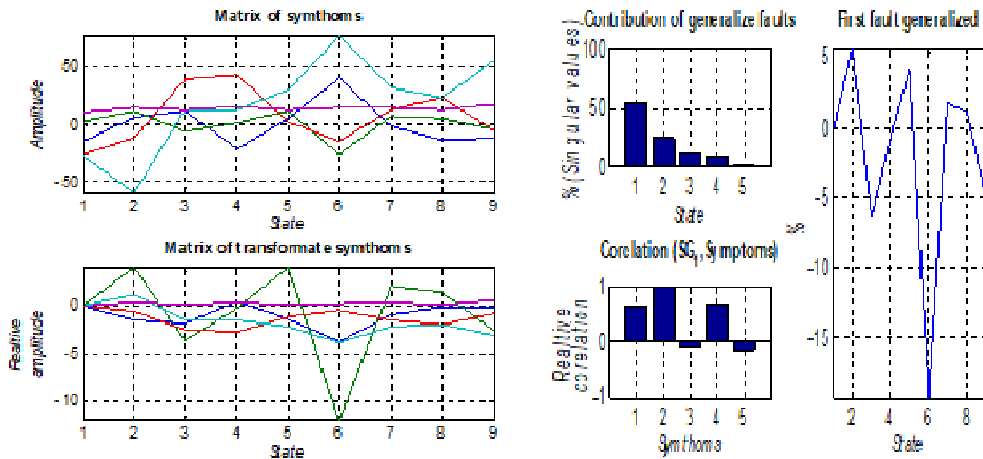
4. Badania destrukcji segmentów murowych w metodzie SVD

Wykorzystując wskazania istoty metody SVD (Singular Value Decomposition), dane z badań segmentów murowych poddano dalej wielowymiarowej analizie dostępnych miar procesu

drganiowego. Istota tego badania uwzględnia wszystkie mierzone estymatory drganiowe i wskazuje na ich przydatność w rozróżnianiu rozwijającej się destrukcji badanych segmentów murowych.

Przykładowe wyniki tego badania dla danych pomiarowych bez sortowania (uzyskanych w czasie krótkim w badaniach stanowiskowych) przedstawiono na rysunku 6.

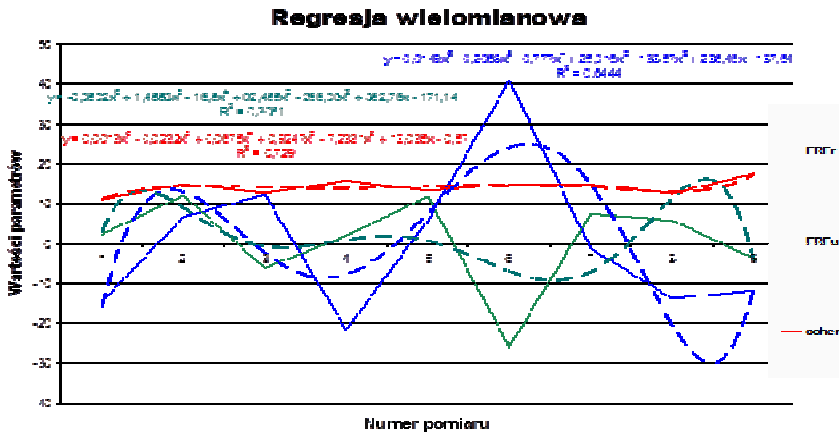
Takie same analizy wykonano dla różnych preferowanych sortowań w SVD (wybór miary głównej) i wyniki końcowe takiej analizy - zmiany destrukcji segmentów ceramicznych dobrze diagnozują miary - FRFr, H(f)r, coher. Można więc zaproponować użytkową metodę badania zmian stanu destrukcji konstrukcji (elementów, segmentów, ścian) murowych przy wykorzystaniu estymatorów drganiowych i parametrów modelu modalnego z badań eksperymentalnej analizy modalnej (EAM), wykorzystując: FRFr, FRFu, coher.



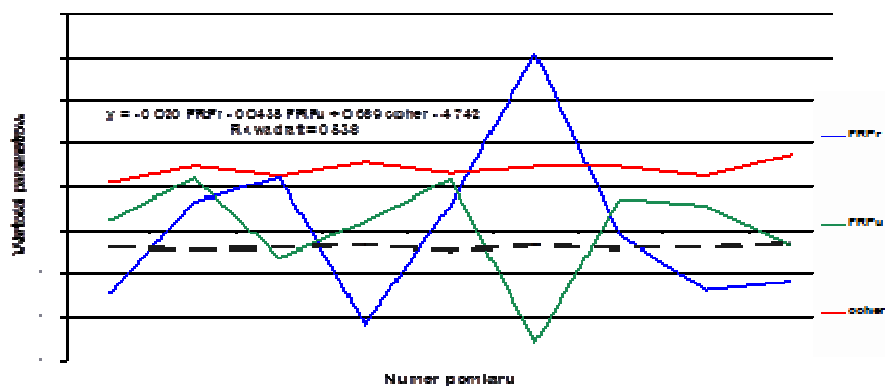
Rys. 6. Wyniki z SVD dla badanych segmentów ceramicznych wzdłuż osi X

5. Badania związków przyczynowo-skutkowych

Ustalenie relacji pomiędzy miarami stanu destrukcji a obciążeniem segmentów murowych przeprowadzono przy wykorzystaniu regresji wielomianowej. Na rysunkach 7 i 8 zaprezentowano modele regresji dla segmentów wykonanych z cegły ceramicznej (związki przyczynowo-skutkowe).



Rys. 7. Indywidualne modele regresyjne dla segmentów murowych ceramicznych - X



Rys. 8. Matematyczny model destrukcji segmentów murowych ceramicznych - X

Przedstawione na rysunkach modele regresji ukazują relacje przyczynowo-skutkowe pomiędzy destrukcją segmentu od działania obciążenia a wartościami miar sygnału drganiowego. Dobroć modeli oceniona została za pomocą współczynnika determinacji R^2 oraz przez dopasowanie linii trendu do wyników pomiarów.

Przeprowadzona egzemplifikacja metody na grupie segmentów murowych określa model wnioskowania w zakresie jakości degradacji badanych segmentów murowych oraz potwierdza zgodność i skuteczność metodyki badań drganiowych opracowanej dla budownictwa [11].

6. Podsumowanie

Rozważania tej pracy potwierdzają przydatność miar drganiowych i parametrów modelu modalnego z eksperymentalnej analizy modalnej do oceny stanu destrukcji konstrukcji murowych i możliwość wykorzystania jej w zarządzaniu degradacją elementów murowych. Pozytywnie też można ocenić zaproponowane w pracy algorytmy i programy wspomagające realizację metody, czyli: pozyskiwanie i przetwarzanie informacji, redukcję nadmiaru informacji, wnioskowanie statystyczne i prezentację wyników badania.

Przedstawione modele regresji ukazują relacje przyczynowo-skutkowe pomiędzy destrukcją segmentu od działania obciążenia a wartościami miar sygnału drganiowego. Dobroć modeli została oceniona za pomocą współczynnika determinacji R^2 , dopasowania linii trendu do wyników pomiarów.

Przeprowadzona egzemplifikacja metody na grupie segmentów murowych potwierdziła zgodność i skuteczność metodyki badań zaproponowanej dla badań drganiowych w budownictwie. Pozytywnie zatem zweryfikowano założenia wypracowanej metodyki badań na elementach w zastosowaniu do segmentów murowych, co dobrze rokuje dla potrzeb badań rzeczywistych na obiektach wieloletnich.

Literatura

- [1] Chmielewski T., Zembaty Z., Podstawy dynamiki budowli, Arkady, Warszawa 1998.
- [2] Janowski Z., Wymagania konstrukcyjne i wykonawcze murów. Konstrukcje murowe, Puławy 1998.
- [3] Uhl T., Computer-aided identification of mechanical structure models (in Polish), WNT, Warszawa 1997.
- [4] Żółtowski B., Łukasiewicz M., Diagnostyka drganiowa maszyn, ITE-PIB, Radom 2012.
- [5] Żółtowski M., Investigations of harbour brick structures by using operational modal analysis, Polish Maritime Research 2014, 1(81), 21, 42-54.
- [6] Żółtowski M., Martinod R.M., Quality identification methodology applied to wall-elements based on modal analysis, Civil Engineering the Athens Institute for Education and Research, Emerald, Athens 2015, 56-64.
- [7] Żółtowski M., Operacyjna analiza modalna w badaniach konstrukcji budowlanych, WU UTP, Bydgoszcz 2012.

- [8] Żółtowski B., Żółtowski M., *Vibration signals in mechanical engineering and construction*, ITE-PIB, Radom 2015.
- [9] Żółtowski B., Łukasiewicz M., Kałaczyński T., *Techniki informatyczne w badaniach stanu maszyn*, Wyd. UTP, Bydgoszcz 2012.
- [10] Żółtowski M., *Informatyczne systemy zarządzania w inżynierii produkcji*, ITE-PIB, Radom 2011.
- [11] Żółtowski M., *Opis drganiowy konstrukcji budowlanych*, *Logistyka* 2014, 6, 412-423.

Vibration tests of wall segments as a management control of masonry structures quality

ABSTRACT:

The presented study subjected to the verification of dictated vibration methodology study of building structures degradation in the application to the assessment of vibration energy flow measurements in masonry (brick) segments. Theoretical analysis and practical verification of the information sensitivity testing of proposed measures of vibration processes indicate the wide possibilities of their applications, it is possible to apply the presented methodology in the quality control management.

KEYWORDS:

wall segments; degradation of the condition; vibrations; measure of state