

BUILDER
FOR THE
FUTURE

BUILDER
FOR THE
YOUNG
ENGINEERS

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.



Tomasz Howiacki
Politechnika Krakowska,
Wydział Inżynierii Lądowej
Opiekun naukowy:
dr inż. Rafał Sienko

W normie PN-EN 1990 [1] zawarto zapis zalecający prowadzenie kontroli w stadium projektowania, wykonywania i utrzymania konstrukcji budowlanych oraz inżynierskich. Wymagania normowe, opracowywane wytyczne (np. Instrukcja ITB 443/2009 [2]), ale przede wszystkim postęp wiedzy inżynierskiej – spowodowały wyraźny wzrost liczby realizacji systemów monitorowania stanu technicznego konstrukcji w ostatnich latach [3]. Pozyckiwanie wiedzy na temat obiektu budowlanego w czasie jego budowy i/lub eksploatacji ma na celu zminimalizowanie ryzyka awarii, przede wszystkim poprzez umożliwienie podejmowania racjonalnych decyzji na podstawie umiejętnego zarządzania informacją.

Monitorowanie dynamiczne

Wśród różnych sposobów analizowania pracy konstrukcji na podstawie pomiarów, ze względu na stopień trudności wyróżnić należy monitoring dynamiczny, rozumiany tutaj jako ciągły w czasie pomiar przyspieszeń drgań w wybranych punktach pomiarowych na konstrukcji. Po pierwsze realizowanie pomiarów w czasie rzeczywistym 24 godziny na dobę wymaga zaawansowanego zaplecza technicznego, pozwalającego na automatyzację przetwarzania danych w taki sposób, aby do docelowego użytkownika trafiały wyłącznie informacje podane w czytelnej, użytecznej postaci. Ponadto analiza wpływu drgań na budynki, prowadzona w oparciu o wytyczne polskiej normy [4], bardzo często musi zostać uzupełniona o zaawansowane

POMIARY DYNAMICZNE

– czy to się opłaca?

Wymagania prawne, zwiększenie świadomości inżynierskiej oraz rozwój nowoczesnych technologii wpłynęły na wzrost liczby zastosowań systemów monitorowania konstrukcji, w ramach których szczególnie istotne są pomiary dynamiczne.

obliczenia w środowisku metody elementów skończonych MES oraz interpretacje i opinie doświadczonych ekspertów. Odpowiednio zaprojektowany i zrealizowany system monitorowania dynamicznego może jednak dostarczyć bardzo wartościowych informacji.

Systemy monitorowania dynamicznego w Polsce

Bardzo ważnym aspektem w dziedzinie monitorowania dynamicznego pozostaje bieżąca kontrola i ocena wpływu drgań generowanych przez budowę na sąsiadujące konstrukcje [5]. Jest to szczególnie istotne w centrach miast, gdzie bardzo często plac budowy bezpośrednio przylega do istniejącej zabudowy i gdzie występują także inne źródła drgań, np. drgania komunikacyjne podziemne oraz naziemne.

Mówiąc o ciągłym monitorowaniu dynamicznym, możemy wyróżnić pomiary krótkoterminowe w oparciu o analizę eksperymentalną [6, 7] bądź długoterminowe pomiary w oparciu o analizę operacyjną, tj. uwzględniającą rzeczywiste, a nie zaprojektowane, oddziaływanie dynamiczne w czasie eksploatacji obiektu [8].

Pierwszy z przykładów dotyczy oddziaływań związanych z wbijaniem pali prefabrykowanych w podłoże gruntowe. W związku z bliskim sąsiedztwem zabudowy, głównie w postaci murowanych domów jednorodzinnych z lat 60. XX w., istniała uzasadniona obawa, że prowadzone prace mogą skutkować niekorzystnym wpływem na ich stan techniczny. Dwuosiove punkty pomiaru drgań (zo-

bacz rys. 1) zainstalowano w poziomie terenu na fundamentach wybranych budynków. Początkowo wbito dwa pale testowe, stopniowo zwiększając energię uderzeń kłosa i analizując w czasie rzeczywistym odpowiedź poszczególnych budynków zgodnie z przyjętymi kryteriami oceny. W ten sposób zoptymalizowano parametry procesu technologicznego, zapewniając bezpieczną dla sąsiadów realizację prac.

Jednym z największych w Polsce długoterminowych systemów monitorowania dynamicznego, realizującym pomiary przyspieszeń drgań w sposób ciągły, zdalny i automatyczny, jest system zaprojektowany na potrzeby budowy kompleksu budynków zlokalizowanych w ścisłej zabudowie centrum Krakowa [9]. Pomiarami zostały objęte cztery istniejące budynki oraz elementy konstrukcyjne w czterech nowo budowanych obiektach. System zbudowany został łącznie z 24 trójosiowych punktów pomiarowych (72 akcelerometry piezoelektryczne), kilkunastu rejestratorów danych dynamicznych próbkujących dane z częstotliwością maksymalną 4 [kHz], stacji alarmowej umieszczonej w biurze budowy, oprogramowania służącego do automatycznego przetwarzania danych pomiarowych i informowania o zagrożeniach oraz o ewentualnej awarii samego systemu – zobacz rys. 2.

Ze względu na osiągnięte korzyści bliźniaczą inwestycję zrealizowano przy placu budowy w centrum Łodzi [11] – zobacz rys. 3. Czujniki zainstalowano jeszcze przed rozpoczęciem ciężkich prac budowlanych w celu możliwości obserwacji tła dynamicznego, dzięki czemu możliwa jest obiektywna ocena rzeczywistego wpływu drgań generowanych przez budowę na okoliczne objekty.

Przykładowa analiza decyzyjna

Rozważmy sytuację, w której pale prefabrykowane (technologia A0) wbijane są w podłoże gruntowe w bliskim sąsiedztwie istniejącej zabudowy. Nie ma jednak do dys-



pozycji szczegółowej dokumentacji podłoża oraz inwentaryzacji zagrożonych budynków – przyjmuje się brak wiedzy na temat warunków gruntowo-wodnych oraz rzeczywistego stanu technicznego budynków. Nie da się z góry przewidzieć, czy prowadzone prace, generujące drgania, będą miały negatywny wpływ na konstrukcje. Stąd prawdopodobieństwo wystąpienia awarii (zdarzenie X1) przyjmuje się *a priori* równe 0,5.

Istnieje jednak możliwość zastosowania alternatywnej technologii (np. wiercone pale przemieszczeniowe – technologia A1), która nie generuje istotnych drgań, a przez to ryzyko wystąpienia awarii jest minimalizowane praktycznie do zera. Zastosowanie tej technologii powoduje jednak wzrost kosztów związanych przede wszystkim z przygotowaniem nowego projektu i zmianą harmonogramu prac (opóźnienia) – zobacz tab. 2.

W przypadku decyzji o realizacji pierwotnego projektu (A0) istnieje ryzyko wystąpienia awarii, co niesłoby ze sobą konieczność wypłacenia odszkodowań dla właścicieli sąsiadującej zabudowy. Poprzednie doświadczenia firmy wykonawczej w analogicznych sytuacjach wskazują na prawdopodobną skalę wydatków. Wartości kosztów w zależności od wystąpienia danego zdarzenia (X0, X1) oraz podjętych działań (technologia A0, A1) zestawiono w tab. 3.

Tabela 1. Założone prawdopodobieństwo *a priori* wystąpienia określonych zdarzeń

Symbol	Prawdopodobieństwo [-]	Opis zdarzenia
X0	0,5	brak awarii
X1	0,5	awaria

Tabela 2. Koszty możliwych działań (decyzji związanych z technologią)

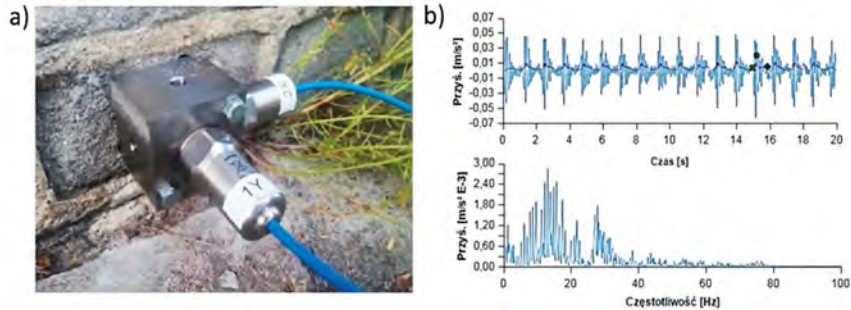
Symbol	Koszt [j]	Opis działania
A0	0,00	Pozostanie przy pierwotnej technologii
A1	-50,00	Modyfikacja technologii

Tabela 3. Koszty w zależności od prawdopodobnych zdarzeń i możliwych działań

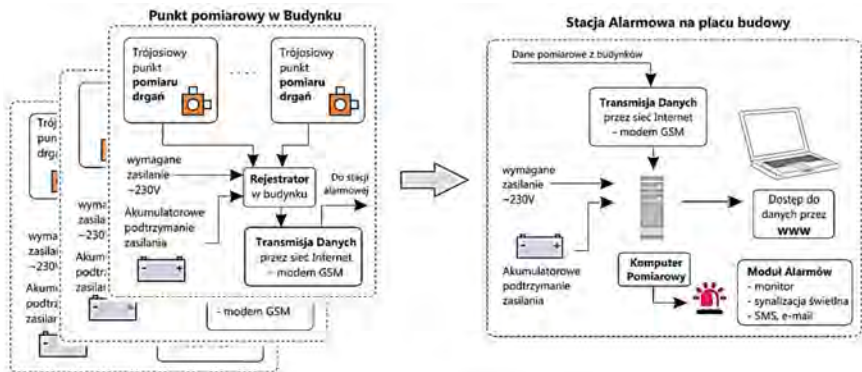
	A0	A1
X0	0,00	-50,00
X1	-300,00	-50,00

Analiza *a priori*

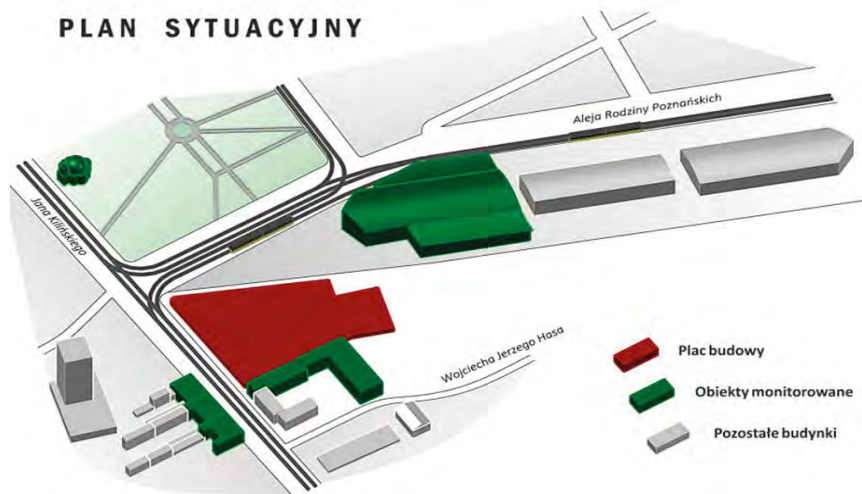
Celem analizy *a priori* jest odpowiedź na pytanie, czy warto zmienić technologię realizacji pali bez wykonywania dodatkowych badań lub pomiarów. W tym celu opracowano drzewo decyzji, uwzględniające różne możliwe (prawdopodobne) warianty – rys. 5. W tym przypadku ścieżka prowadząca do największych korzyści B0* (najmniejszych kosztów) odpowiada działaniu A1, czyli zmianie technologii realizowanych prac. W świetle teorii prawdopodobieństwa będzie to możliwe optymalna decyzja podjęta w oparciu o posiadane informacje. Pozostaje pytanie: czy dodatkowe informacje mogą zoptymalizować cały proces pod względem finansowym?



Rys. 1. a) Widok punktu pomiarowego; b) przykładowy wibrogram i jego częstotliwościowe spektrum odpowiedzi [dzięki uprzejmości SHM System]



Rys. 2. Schemat budowy dynamicznego systemu pomiarowego dla budynków w ścisłym centrum Krakowa [dzięki uprzejmości SHM System [16]]



Rys. 3. Widok obszaru objętego monitoringiem dynamicznym w centrum Łodzi [dzięki uprzejmości SHM System [16]]

ANALIZA A PRIORI					
Wartość	Działanie	Wartość	Prawdopodobieństwo	Wartość	
			P(X0)	0.50	0.00
	A0	-150.00	P(X1)	0.50	-150.00
B0*			P(X0)	0.50	-25.00
-100.00	A1	-100.00	P(X1)	0.50	-25.00

Rys. 5. Drzewo decyzji w ramach analizy *a priori*

Analiza pre-posterior

Rozważmy zatem możliwość instalacji systemu monitorowania odpowiedzi dynamicznej istniejącej zabudowy, którego zadaniem jest dostarczenie dodatkowej informacji na temat aktualnego stanu technicznego konstrukcji. Konieczne jest jednak poniesienie początkowych nakładów inwestycyjnych (tab. 4).

Na potrzeby analizy założono, że w przypadku wystąpienia negatywnego wpływu drgań na budynki system odpowiednio wcześniej poinformuje o tym fakcie w dziele w pięciu na dziesięć przypadków – tab. 5.

Tabela 4. Założone koszty dodatkowych informacji (zakup systemu monitorowania)

Symbol	Koszt [J]	Opis dodatkowej informacji
Z0	-30,00	Wczesne wskazanie zagrożenia
Z1		Brak wskazania zagrożenia

Tabela 5. Założona skuteczność systemu pomiarowego

	X0	X1
Z0	0,10	0,90
Z1	0,90	0,10

Zaktualizowane drzewo decyzji (uwzględniające nową wiedzę wynikającą z pomiarów) przedstawia rys. 6.

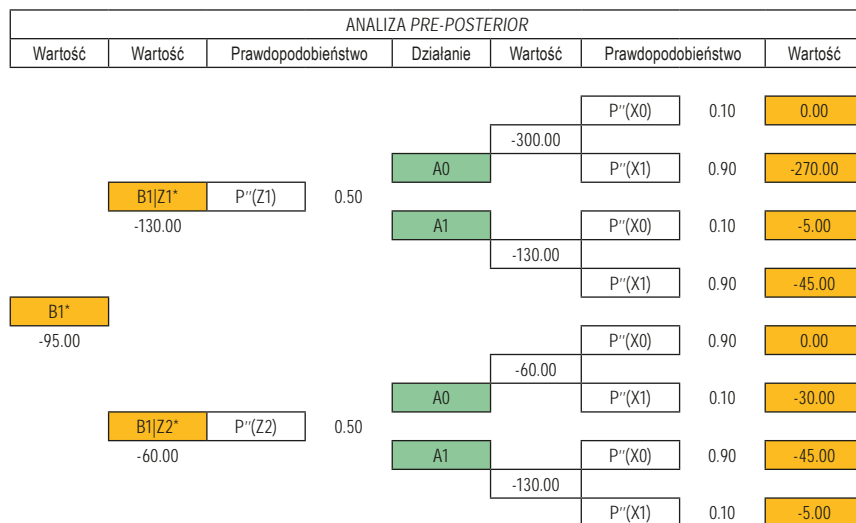
Można zaobserwować, że zainwestowanie środków finansowych w system pomiarowy dostarczy wyższych korzyści całkowitych (mniejszych spodziewanych kosztów) w porównaniu do sytuacji *a priori* (nieuwzględniającej dodatkowej wiedzy wynikającej z badań *in situ*). Wartość dodatkowej informacji (VolBI, ang. *Value of Information*) obliczana jest następująco:

$$Vol_{BI} = B^*_I - B^*_0 > 0 \quad (2)$$

gdzie:

B^*_I – spodziewane zyski (straty) z systemem monitorowania

B^*_0 – spodziewane zyski (straty) w sytuacji bez pomiarów



Rys. 6. Drzewo decyzji w ramach analizy pre-posterior

Podsumowanie

Przedstawiony w artykule przykład prezentuje sposób postępowania, z którego można skorzystać w celu optymalizacji procesu decyzyjnego związanego z inwestycją w systemy pomiarowe dostarczające nowych (dodatkowych) informacji na temat dynamicznej odpowiedzi konstrukcji.

Inżynierowie w Polsce bardzo często z dużym dystansem, wręcz niechęcią, podchodzą do teorii prawdopodobieństwa. Są przyzwyczajeni do podejmowania decyzji w oparciu o wartości deterministyczne. Za tymi wartościami kryje się jednak probabilistyczna rzeczywistość, czego dowodem jest występowanie awarii i katastrof budowlanych. Dlatego warto popularyzować wiedzę na temat podejścia probabilistycznego, które uwzględnione zostało przy formułowaniu normy PN-EN 1990, dotyczącej podstaw projektowania konstrukcji. Podejście to wykorzystywane może być w wielu aspektach inżynierskiej działalności, począwszy od przyjmowania założeń początkowych do analizy statyczno-wytrzymałościowej, szacowania parametrów materiałowych czy nośności całych układów konstrukcyjnych, a na optymalizacji decyzji inwestycyjnych kończąc.

Bibliografia

- [1] PN-EN 1990: Eurokod 0, Podstawy projektowania konstrukcji.
- [2] Instrukcja ITB 443/2009, System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie. Bezdotykowe metody obserwacji i pomiarów obiektów budowlanych, Warszawa, Wydawnictwo ITB, 2009.
- [3] Bednarski Ł., Sienko R., Howiacki T., Wybrane zagadnienia monitorowania konstrukcji, XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztatach Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 25-28.03.2015.
- [4] PN-B-02170:2016-12, Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [5] Bednarski Ł., Sienko R., Howiacki T., Zapobieganie awariom budowlanym istniejących konstrukcji poprzez ciągłe pomiary wielkości dynamicznych w czasie budowy, Awarie budowlane: zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, 2017, s. 467-475, ISBN: 978-83-7663-234-6.

- [6] Wójcicki Z., Grosel J., Sawicki W., Eksperymentalne badania dynamiczne budowli, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2014.
- [7] Pańtak M., Sienko R., Bednarski Ł., Howiacki T., Analiza i badania dynamiczne lukowej Kładki o. Bernatka przez Wisłę w Krakowie, Mosty Lukowe Dzieła Kultury – projektowanie, budowa, utrzymanie, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2015, ISBN: 978-83-7125-259-4.
- [8] Howiacki T., Teoretyczna, eksperymentalna oraz operacyjna analiza modalna konstrukcji na wybranych przykładach. Zarys wybranych zagadnień z Inżynierii Lądowej. Praca zbiorowa pod redakcją Joanny Bzówki, Monografia, Gilwice 2016, ISBN: 978-83-7880-365-2.
- [9] Rudziejewski-Rudziewicz P., Pierwszy rozproszony system monitorowania drgań otoczenia budowy, „GDMT geoinżynieria drogi mosty tunele” 1/2017.
- [10] Stecz P., Wpływ działania na budynki długotrwałych obciążeń dynamicznych generowanych przejazdami pociągów metra [rozprawa doktorska], Politechnika Krakowska, Kraków 2014.
- [11] Rudziejewski-Rudziewicz P., Pełna kontrola nad drganiami, „GDMT geoinżynieria drogi mosty tunele” 3/2017.
- [12] ISO 2384:2015, General principles on reliability for structures.
- [13] Raiffa H., Schlaifer R., Applied statistical decision theory, Wiley classics library, Originally published: Harvard University, 1961. Republished: Wiley (2000).
- [14] Benjamin J.R., Cornell C.A., Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill New York, 1970.
- [15] Faber M.H., Statistics and Probability Theory in Pursuit of Engineering Decision Support, Springer, 2012, ISBN 978-94-007-4055-6.
- [16] www.shmsystem.pl

Abstrakt: KONTROLA I BEZPIECZEŃSTWO: OPTIMALNE DECYZJE INWESTYCYJNE NA PRZYKŁADZIE POMIARÓW DYNAMICZNYCH

Instalacja systemów monitorowania dynamicznego w czasie budowy generującej drgania wiąże się z wieloma praktycznymi korzyściami, ale także z koniecznością poniesienia pewnych nakładów. Z pewnością koszty związane z wystąpieniem awarii istniejących obiektów będą zawsze większe od kosztów samego systemu, którego zadaniem jest wczesne ostrzeżenie o zagrożeniach. Jednak w celu podejmowania optymalnych decyzji inwestycyjnych, konieczne jest uwzględnienie teorii prawdopodobieństwa i niezawodności konstrukcji.

Słowa kluczowe: decyzje, dynamika, pomiary, prawdopodobieństwo, teoria Bayesa

ABSTRACT: CONTROL AND SAFETY: OPTIMAL INVESTMENT DECISIONS ON THE EXAMPLE OF DYNAMIC MEASUREMENTS

Installation of dynamic structural health monitoring systems during construction generating vibrations is associated with many practical benefits but also with the necessity of some expenses. Certainly, the costs associated with the failures of existing facilities will always be higher than the costs of the system itself, which task is to provide early warning of hazards. However, in order to make optimal investment decisions, it is necessary to consider the theory of probability and structural reliability.

Key words: decisions, measurements, dynamics, probability, Bayes theorem