

Rekonstrukcja obciążenia uderowego obudowy górniczej¹

Łukasz Jankowski, Marcin Wikło, Grzegorz Suwała, Jan Holnicki-Szulc

STRESZCZENIE

Referat przedstawia metodę rekonstrukcji przebiegu oraz przestrzennego rozkładu obciążenia uderowego łuku obudowy górniczej. Metoda jest oparta na analizie elastycznej odpowiedzi obudowy zarejestrowanej podczas uderu przez dedykowany system czujników piezoelektrycznych lub akcelerometrów i umożliwia rekonstrukcję przebiegu modalnego obciążenia zastępczego. Zrekonstruowane obciążenie zastępcze przybliża obciążenie rzeczywiste, tzn. podstawowe charakterystyki modalne obu obciążeń są identyczne, a dokładność przybliżenia rośnie wraz ze wzrostem liczby czujników. Istotną nowością metody jest możliwość rekonstrukcji obciążenia o nieznanym wcześniej lokalizacji oraz obciążeń wielokrotnych i ruchomych. Przebieg obciążenia jest modelowany i rekonstruowany za pomocą metody dystorsji wirtualnej (VDM). Referat zawiera numeryczną symulację rekonstrukcji obciążenia uderowego belkowego modelu łuku obudowy górniczej.

1. MODEL ODPOWIEDZI OBUDOWY

Proponowany model opiera się na metodzie dystorsji wirtualnych [1], jest więc ograniczony do przypadku małych odkształceń, a zatem umożliwia rekonstrukcję obciążenia w pierwszych chwilach działania sił zewnętrznych, zanim (jeśli) dojdzie do dużych odkształceń i zniszczenia konstrukcji. Dynamika konstrukcji jest opisana przy użyciu tzw. impulsowych macierzy wpływu przechowywujących lokalne odpowiedzi konstrukcji na impulsowe pobudzenia we wszystkich uwzględnianych stopniach swobody (potencjalnych lokalizacjach obciążenia). Impulsową macierz wpływu konstrukcji można wyliczyć za pomocą numerycznego modelu konstrukcji lub zmierzyć eksperymentalnie, co jest być może praktyczniejsze w wypadku dużych konstrukcji. Wielkością mierzoną mogą być odkształcenia (przetworniki piezoelektryczne, tensometry) lub przyspieszenia (akcelerometry); tutaj założono, że wielkością mierzoną jest odkształcenie ε .

Proponowana metoda rekonstrukcji wykorzystuje jedynie zmierzone odpowiedzi, impulsową macierz wpływu oraz ewentualnie pewne heurystyczne założenia dotyczące rozkładu i przebiegu obciążenia. Gdy jest więc dana impulsowa macierz wpływu, nie ma potrzeby dodatkowego numerycznego modelowania i symulacji.

Rozpatrywany odcinek czasu podzielony jest na skończoną liczbę T kroków czasowych, oznaczanych dalej symbolami t , τ i κ . Obciążenie dynamiczne w n -tym stopniu swobody jest reprezentowane przez szereg impulsowych obciążeń $p_n(\tau)$ występujących w kolejnych chwilach czasowych τ . W rozpatrywanym wypadku małych odkształceń w zakresie sprężystym wartość $\varepsilon_\alpha(t)$ w chwili czasowej t i w lokalizacji α modelowanej struktury może być przedstawiona w postaci sumy efektów obciążenia statycznego oraz splotu obciążenia dynamicznego z impulsową macierzą wpływu:

$$\varepsilon_\alpha(t) = \sum_{n=1}^N S_{\alpha n} p_n^0 + \sum_{\tau=0}^t \sum_{n=1}^N B_{\alpha n}(t-\tau) p_n(\tau), \quad (1)$$

gdzie pierwszy składnik opisuje statyczne odkształcenie wywołane statycznym obciążeniem wektorem sił p^0 (a zatem macierz S jest analogiczna do macierzy podatności), a drugi składnik jest liniową kombinacją odpowiedzi konstrukcji na wszystkie wcześniejsze wymuszenia $p_n(\tau)$. Indeks n

¹ Referat ukaże się w materiałach konferencji KOMTECH 2006, 14–16 listopada 2006, Zakopane.

przebiega stopnie swobody, indeks α oznacza lokalizacje czujników, a N jest liczbą stopni swobody, w których potencjalnie może wystąpić obciążenie. $\mathbf{B}$ jest impulsową macierzą wpływu: B_{an} to wektor zdyskretyzowanej odpowiedzi konstrukcji w lokalizacji α ($\alpha = 1, \dots, A$, gdzie A jest liczbą czujników) na impulsowe pobudzenie w chwili 0 w n -tym stopniu swobody.

Zależność (1) można zapisać w postaci liniowej jako

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{p}, \quad (2)$$

gdzie $\boldsymbol{\varepsilon}$ jest wektorem odkształceń (we wszystkich lokalizacjach α i chwilach czasowych t) o długości TA , wektor $\mathbf{p}$ o długości TN zawiera wszystkie wymuszenia, zarówno statyczne $\mathbf{p}^0$, jak też dynamiczne $p_n(\tau)$, a macierz $\mathbf{B}$ o rozmiarze $TA \times TN$ jest uogólnioną macierzą wpływu reprezentującą odpowiedzi konstrukcji na obciążenia statyczne i dynamiczne. Niech $\mathbf{P}$ i $\mathbf{E}$ będą liniowymi przestrzeniami odpowiednio wszystkich potencjalnie możliwych obciążeń i pomiarów; wówczas $\mathbf{p} \in \mathbf{P}$, $\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbf{E}$ oraz $\dim(\mathbf{P}) = TN$, $\dim(\mathbf{E}) = TA$.

2. REKONSTRUKCJA OBCIĄŻENIA

Zadanie rekonstrukcji obciążenia sprowadza się w zasadzie do zadania znalezienia takiego obciążenia $\mathbf{p}$, które — zgodnie z równaniami (1) i (2) — generuje zmierzoną odpowiedź konstrukcji $\boldsymbol{\varepsilon}^M$, a zatem do rozwiązania liniowego układu równań analogicznego do (2):

$$\boldsymbol{\varepsilon}^M = \mathbf{B} \mathbf{p}, \quad (3)$$

czyli do minimalizacji normy rezyduum

$$\|\boldsymbol{\varepsilon}^M - \mathbf{B} \mathbf{p}\|. \quad (4)$$

Istnieją trzy zasadnicze trudności związane z układem równań (3):

- Rozmiar układu: macierz $\mathbf{B}$ jest rozmiaru $TA \times TN$, co już w relatywnie prostym przykładzie numerycznym przedstawionym poniżej wynosi 350×4400 .
- Złe uwarunkowanie numeryczne, które w rzeczywistych problemach zazwyczaj wymusza zastosowanie numerycznej techniki regularyzacji, by zachować stabilność rozwiązania. Przegląd metod regularyzacji zastosowanych do problemu identyfikacji obciążenia o znanej lokalizacji można znaleźć w [2].
- Nieokreśloność układu: problem rekonstrukcji obciążenia był dotychczas rozpatrywany przy mało realistycznym założeniu, że rekonstruowana siła jest skupiona w jednym stopniu swobody (tzn. $N=1$), zazwyczaj znanym z góry [3]. W takim wypadku już przy użyciu dwóch lub więcej czujników ($A>1$) macierz $\mathbf{B}$ ma więcej rzędów niż wierszy ($TA > TN$), a zatem układ (3) jest nadokreślony i można go dokładnie rozwiązać w sensie minimalizacji normy rezyduum (4). Jednak w rozpatrywanym tutaj wypadku ogólnego obciążenia, o nieznanym z góry lokalizacji, liczba czujników jest ograniczona technologicznie i musi być dużo mniejsza od liczby stopni swobody, w których może wystąpić obciążenie ($A \ll N$); a zatem układ (3) jest nieokreślony: istnieje nieskończenie wiele dokładnych jego rozwiązań, spośród których właściwe należy wybrać na podstawie kryteriów niezależnych od wektora pomiarowego $\boldsymbol{\varepsilon}^M$.

Problemy związane z dużym rozmiarem i złym uwarunkowaniem układu liniowego są czysto numeryczne i często dyskutowane w literaturze. Zasadniczym tematem tego referatu jest więc problem trzeci: praktyczne zadanie rekonstrukcji obciążenia o nieznanym z góry lokalizacji przy ograniczonej liczbie czujników.

Rekonstrukcję obciążenia można przeprowadzić na dwa sposoby, różniące się dokładnością i kosztami numerycznymi (czasem obliczeń i niezbędną pamięcią):

- Sposób dokładniejszy (część 2.1) wymaga jednokrotnego wykonania kosztownego numerycznie rozkładu macierzy $\mathbf{B}$ według wartości osobliwych. Dla każdej odpowiedzi konstrukcji można następnie kolejno wyznaczyć dwie składowe szukanego obciążenia: na podstawie wykonanego pomiaru składową rekonstruowalną (część 2.1.1) i na podstawie założeń heurystycznych składową nierekonstruowalną (część 2.1.2).
- Sposób mniej dokładny (część 2.2) wyznacza obie składowe rekonstruowanego obciążenia jednocześnie i nie rozróżniając między nimi; dzięki temu jest szybszy, ponieważ nie wymaga rozkładu według wartości osobliwych, ale też mniej dokładny, ponieważ założenia heurystyczne wpływają na obie składowe obciążenia, więc również tę, która może — i powinna — być zrekonstruowana jedynie na podstawie zarejestrowanej odpowiedzi konstrukcji.

2.1. Rozkład obciążenia na składowe

W analizie układu (3) pomocny jest (jednoznaczny) rozkład macierzy $\mathbf{B}$ według wartości osobliwych (SVD) [4]:

$$\mathbf{B} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T, \quad (5)$$

gdzie $\mathbf{U}$ i $\mathbf{V}$ są macierzami ortogonalnymi (tj. $\mathbf{U}^T \mathbf{U} = \mathbf{I}$, $\mathbf{V}^T \mathbf{V} = \mathbf{I}$) o rozmiarach odpowiednio $TA \times TA$ i $TN \times TN$, a $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_{TA})$ jest macierzą diagonalną o rozmiarze $TA \times TN$. Wartości przekątniowe $\sigma_1, \dots, \sigma_{TA}$ nazywane są wartościami osobliwymi macierzy $\mathbf{B}$ i zwyczajowo uporządkowane są nierosnąco. Niech M oznacza liczbę niezerowych wartości osobliwych macierzy $\mathbf{B}$ ($M \leq TA$).

Praktyczna interpretacja rozkładu (5) w kontekście przekształcenia (2) jest następująca: przestrzeń wszystkich możliwych rozkładów obciążeń $\mathbf{P}$ można rozłożyć na iloczyn kartezjański takich dwóch prostopadłych podprzestrzeni liniowych $\mathbf{P}_1$ i $\mathbf{P}_2$,

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_1 \times \mathbf{P}_2, \quad (6)$$

że

- M -wymiarowa podprzestrzeń $\mathbf{P}_1$ jest przekształcana przez $\mathbf{B}$ wzajemnie jednoznacznie na pewną M -wymiarową podprzestrzeń TA -wymiarowej przestrzeni wszystkich możliwych wyników pomiarów $\boldsymbol{\varepsilon}$, przy czym gdy macierz $\mathbf{B}$ jest nieosobliwa ($M = TA$), to $\mathbf{P}_1$ jest przekształcana wzajemnie jednoznacznie na całą przestrzeń $\boldsymbol{\varepsilon}$.
- $(TN-M)$ -wymiarowa podprzestrzeń $\mathbf{P}_2$ jest jądrem przekształcenia liniowego $\mathbf{B}$, czyli

$$\mathbf{B} \mathbf{P}_2 = \mathbf{0}. \quad (7)$$

Podprzestrzeń $\mathbf{P}_1$ jest generowana przez wektory odpowiadające niezerowym wartościom osobliwym macierzy $\mathbf{B}$, czyli przez pierwszych M kolumn macierzy $\mathbf{V}$, podczas gdy pozostałe kolumny macierzy $\mathbf{V}$ generują podprzestrzeń $\mathbf{P}_2$. Odpowiednio niech $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_1 \mathbf{V}_2]$, gdzie macierz $\mathbf{V}_1$ zawiera pierwszych M kolumn macierzy $\mathbf{V}$, natomiast macierz $\mathbf{V}_2$ pozostałe.

Dowolne obciążenie $\mathbf{p} \in \mathbf{P}$ można zatem jednoznacznie przedstawić w ortonormalnym układzie współrzędnych związanym z kolumnami macierzy $\mathbf{V}$ za pomocą szeregu współczynników modalnych $\mathbf{m} = \langle m_1, \dots, m_{TN} \rangle = \mathbf{V}^T \mathbf{p}$, a następnie rozłożyć go na dwie części $\mathbf{m} = [\mathbf{m}_1 \mathbf{m}_2] = [\mathbf{V}_1^T \mathbf{p} \mathbf{V}_2^T \mathbf{p}]$, definiujące składowe obciążenia $\mathbf{p}$ należące odpowiednio do podprzestrzeni $\mathbf{P}_1$ i $\mathbf{P}_2$,

$$\mathbf{p} = \mathbf{V} \mathbf{m} = \mathbf{V}_1 \mathbf{m}_1 + \mathbf{V}_2 \mathbf{m}_2, \quad (8)$$

z których pierwsza jest w pełni rekonstruowalna na podstawie pomiaru $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{p}$, a informacja zawarta w drugiej jest podczas pomiaru — zgodnie z zależnością (7) — całkowicie tracona:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{p} = \mathbf{B} (\mathbf{V}_1 \mathbf{m}_1 + \mathbf{V}_2 \mathbf{m}_2) = \mathbf{B} \mathbf{V}_1 \mathbf{m}_1. \quad (9)$$

Należy zauważyć, że współczynniki $\mathbf{m}$, jednoznacznie definiujące obciążenie $\mathbf{p}$ są związane z modalnymi rozkładami obciążenia zdefiniowanymi (w czasie i przestrzeni) przez kolumny macierzy $\mathbf{V}$ i odpowiadającymi kolejnym wartościom osobliwym, różnią się więc od standartowych modalnych postaci drgań własnych konstrukcji.

Dla danego wektora pomiarowego $\boldsymbol{\varepsilon}$ rekonstrukcję obciążenia $\mathbf{p}$ należy więc przeprowadzić w dwóch etapach: w pierwszym (część 2.1.1) rekonstruowana jest składowa obciążenia $\mathbf{V}_1\mathbf{m}_1$, a następnie w drugim etapie — np. w sposób przedstawiony w części 2.1.2 — wyznaczana jest prostopadła do niej składowa obciążenia $\mathbf{V}_2\mathbf{m}_2$.

2.1.1. Rekonstruowalna składowa obciążenia

Rekonstruowalna składowa $\mathbf{V}_1\mathbf{m}_1$ dowolnego obciążenia $\mathbf{p}$ może być — pominąwszy często omawiane w literaturze potencjalne problemy numeryczne związane z rozmiarem macierzy $\mathbf{B}$ i jej złym uwarunkowaniem [2, 4] — w pełni odtworzona na podstawie pomiaru $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\mathbf{p}$

- zgodnie z zależnością

$$\mathbf{B}^+ \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}^+ \mathbf{B} (\mathbf{V}_1\mathbf{m}_1 + \mathbf{V}_2\mathbf{m}_2) = \mathbf{B}^+ \mathbf{B} \mathbf{V}_1\mathbf{m}_1 = \mathbf{V}_1\mathbf{m}_1, \quad (10)$$

gdzie przez $\mathbf{B}^+$ oznaczona jest uogólniona macierz odwrotna macierzy $\mathbf{B}$, którą łatwo wyznaczyć znając czynniki rozkładu według wartości osobliwych (5),

- lub poprzez minimalizację normy rezydium (4),

$$f_1(\mathbf{m}_2) = \|\boldsymbol{\varepsilon}^M - \mathbf{B}\mathbf{V}_1\mathbf{m}_1\|, \quad (11)$$

która może być relatywnie szybko wykonana, np. za pomocą algorytmu sprzężonych gradientów opisanego w [5].

2.1.2. Nierekonstruowalna składowa obciążenia

Ponieważ składowa obciążenia $\mathbf{V}_2\mathbf{m}_2$ należy do jądra $\mathbf{P}_2$ przekształcenia $\mathbf{B}$, wynik pomiaru $\boldsymbol{\varepsilon}$ nie jest zależny od współczynników modalnych $\mathbf{m}_2$, nie zawiera więc o nich żadnej informacji. A zatem na podstawie pomiaru $\boldsymbol{\varepsilon}$ nie można zrekonstruować współczynników modalnych $\mathbf{m}_2$ oraz składowej $\mathbf{V}_2\mathbf{m}_2$ obciążenia. Przybliżone jej odtworzenie możliwe jest jedynie na podstawie danych heurystycznych, takich jak przybliżona lokalizacja obciążenia, gładkość przebiegu obciążenia w czasie lub przestrzeni itp., co ogólnie można zapisać w postaci zadania minimalizacji pewnej funkcji celu $f_2(\mathbf{m}_2)$,

$$f_2(\mathbf{m}_2) = \|\mathbf{D}(\mathbf{V}_1\mathbf{m}_1 + \mathbf{V}_2\mathbf{m}_2)\|, \quad (12)$$

gdzie $\mathbf{D}$ może być operatorem pierwszej ($\mathbf{D}^1$) lub drugiej ($\mathbf{D}^2$) pochodnej względem czasu lub przestrzeni, złożeniem tych operatorów ze sobą lub z operatorem jednostkowym (macierz $\mathbf{I}$) itp. Powyższe sformułowanie ma tę zaletę, że wykorzystuje kwadratową postać funkcji $f_2(\mathbf{m}_2)$, która — podobnie jak (11) — może być relatywnie szybko zminimalizowana [5].

Należy zauważyć, że do minimalizacji f_2 (12) niezbędna jest znajomość rekonstruowalnej składowej obciążenia $\mathbf{V}_1\mathbf{m}_1$, uprzednio wyznaczonej za pomocą zależności (10) lub minimalizacji f_1 (11).

2.2. Jednoetapowa rekonstrukcja obciążenia

Proces rekonstrukcji obciążenia można przyspieszyć rezygnując z rozkładu według wartości osobliwych, ale kosztem dokładności rekonstrukcji: minimalizując jednocześnie funkcję celu (11) i odpowiednio ważoną współczynnikiem $\gamma \geq 0$ funkcję (12):

$$f_\gamma(\mathbf{p}) = \|\boldsymbol{\varepsilon}^M - \mathbf{B}\mathbf{p}\| + \gamma \|\mathbf{D}\mathbf{B}\mathbf{p}\|. \quad (13)$$

Dzięki zależnościom (8) i (9) funkcja celu f_γ może zależeć bezpośrednio od obciążenia $\mathbf{p}$, nie ma więc konieczności kosztownego numerycznie rozkładu obciążenia na współczynniki modalne $\mathbf{m}$.

Sama minimalizacja (13), podobnie jak (11) i (12), może być wykonana relatywnie szybko, np. za pomocą algorytmu sprzężonych gradientów [5]. Z drugiej strony, ponieważ f_2 zależy również od rekonstruowalnej składowej obciążenia, minimalizacja f_2 jednocześnie z f_1 zaburza dokładność wyznaczenia rekonstruowalnej składowej obciążenia, która wyznaczona dokładnie może być tylko w wypadku $\gamma = 0$, czyli w wypadku całkowitej rezygnacji z wykorzystania założeń heurystycznych i odtwarzania składowej nierekonstruowalnej.

Jakość uzyskanego rozwiązania mocno zależy od wartości parametru γ . Praca [2] rozważa różne metody doboru tego parametru w pokrewnym problemie regularyzacji rozwiązania układu dobrze określonego lub nadokreślonego, większość z proponowanych metod wymaga wielokrotnego powtarzania minimalizacji (13) z różnymi wartościami γ . Podobnym, relatywnie prostym sposobem jest wybór tej wartości γ , która minimalizuje

$$\Omega(\gamma) = \|\varepsilon^M - B p_\gamma\|^2 + \|D B p_\gamma\|^2, \quad (14)$$

gdzie p_γ jest obciążeniem minimalizującym (13) dla danej wartości parametru γ .

3. PRZYKŁAD NUMERYCZNY

Możliwości proponowanej metody zostały sprawdzone w eksperymencie numerycznym: przygotowano dwuwymiarowy numeryczny model odrzwi obudowy łukowej podatnej ŁP1/V21/A [6] (część 3.1), przeprowadzono symulację przykładowego obciążenia testowego (część 3.2) i na podstawie wyliczonych odpowiedzi losowo umieszczonych czujników zrekonstruowano obciążenie wyjściowe przy zastosowaniu dwóch przykładowych strategii heurystycznych odtworzenia nierekonstruowalnej części obciążenia (część 3.3).

3.1. Belkowy model łuku obudowy górniczej

Rys. 1 przedstawia schemat belkowego modelu odrzwi obudowy łukowej podatnej ŁP/V21/A [6]. Łuk został podzielony na 89 elementów belkowych, o charakterystykach wynikających z własności profilu V21 [6], leżących pomiędzy 90 węzłami, z których każdy posiada trzy stopnie swobody (model płaski) poza węzłami skrajnymi, którym odjęto wszystkie stopnie swobody. Węzłom ruchomym nadano numery od 1 (biały kwadrat) do 88 (czarny kwadrat). Założono, że do dyspozycji jest siedem czujników odkształcenia ($A = 7$) umieszczonych na losowo wybranych elementach (nr 7, 16, 31, 39, 54, 65 i 81), oznaczonych na rys. 1 powiększonymi węzłami.

3.2. Obciążenie testowe

Założono, że konstrukcja jest wstępnie nie sprężona, oraz że obciążenie może wystąpić jedynie prostopadle do łuku obudowy w węzłach ruchomych (nr 1 do 88, $N = 88$). Rozpatrywany okres czasu o długości 25 ms podzielono na 50 kroków czasowych ($T = 50$), a zatem macierz wpływu B (2) ma rozmiar $TA \times TN = 350 \times 4400$.

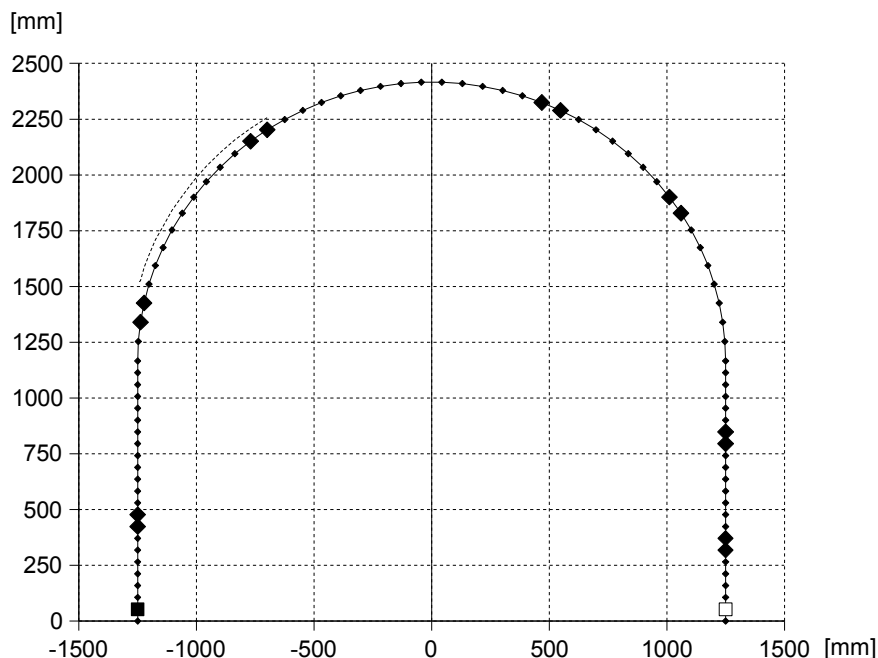
Przykładowe obciążenie testowe działa na 11 węzłów (nr 53 – 63) oznaczonych przerywaną linią na rys. 1. Jego rozkład według czasu i węzłów przedstawiono na rys. 2.

3.3. Rekonstrukcja obciążenia

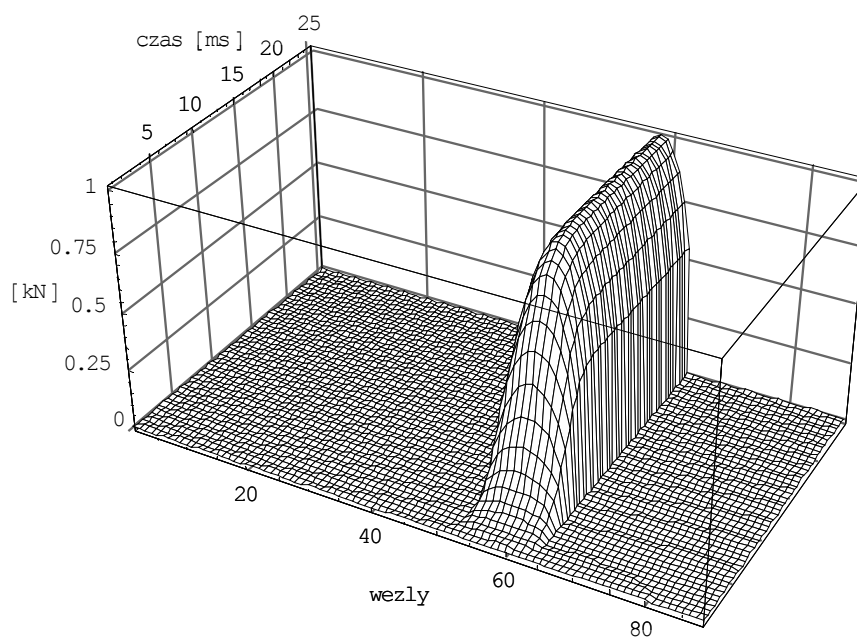
Na podstawie wyliczonej numerycznie odpowiedzi czujników na testowe obciążenie wyliczono rekonstruowalną składową obciążenia (10) i przedstawiono ją na rys. 3.

Obciążenie zrekonstruowane (rys. 3) jest pomiarowo nieodróżnialne od obciążenia testowego (rys. 2), tzn. odpowiedzi czujników na oba obciążenia są identyczne. Wykorzystując dane heurystyczne o spodziewanych charakterystykach obciążenia — macierz D w (12) — można próbować odtworzyć nierekonstruowalną składową obciążenia testowego; obciążenia odtworzone w ten sposób również będą pomiarowo nieodróżnialne od obciążenia testowego:

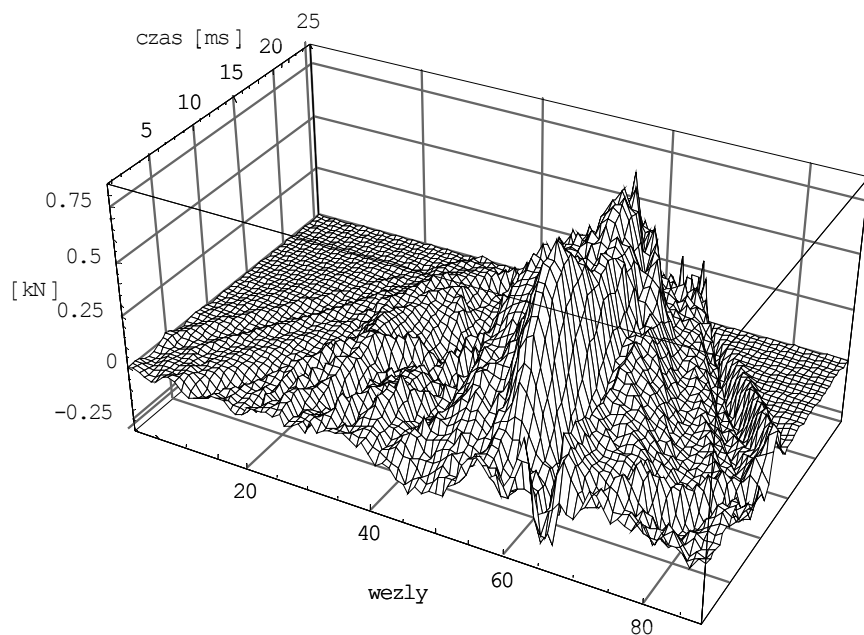
- Rys. 4 przedstawia obciążenie odtworzone przy założeniu gładkości przebiegu obciążenia w czasie, tzn. to obciążenie, które — spośród wszystkich obciążeń pomiarowo nieodróżnialnych od obciążenia testowego — minimalizuje pierwsze pochodne przebiegu siły w węzłach względem czasu.
- Rys. 5 przedstawia obciążenie odtworzone przy ważonym złożeniu dwóch założeń: gładkości przebiegu obciążenia w czasie (z wagą 1.0) oraz wzdłuż łuku (z wagą 0.2).



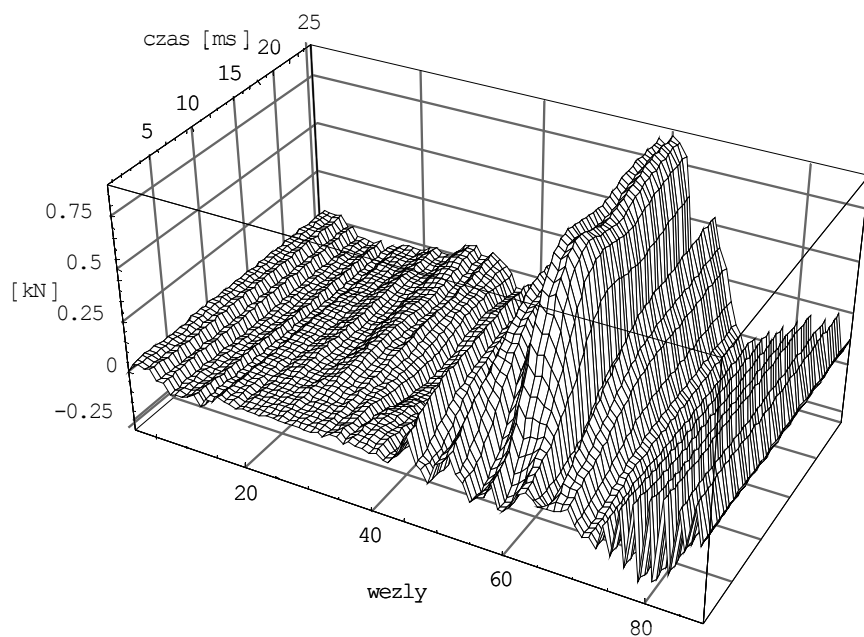
Rys. 1. Schemat dwuwymiarowego belkowego modelu łuku obudowy ŁP/V21/A: czujniki umieszczone na elementach zaznaczonych czarnymi węzłami; kwadrat biały oznacza węzeł nr 1, kwadrat czarny — węzeł nr 88; cienką przerywaną linią oznaczono lokalizację obciążenia testowego



Rys. 2. Obciążenie testowe



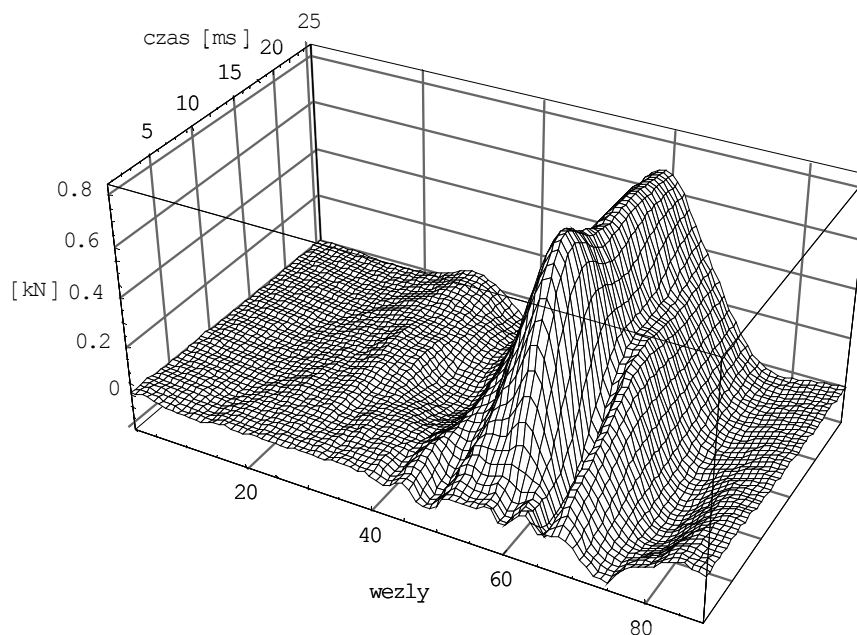
Rys. 3. Rekonstruowalna składowa obciążenia testowego



Rys. 4. Obciążenie odtworzone przy założeniu gładkości przebiegu obciążenia w czasie

4. PODSUMOWANIE

Referat przedstawia metodę rekonstrukcji przebiegu obciążenia uderowego konstrukcji sprężystej. Istotną nowością jest możliwość rekonstrukcji obciążenia o nieznanym wcześniejszym położeniu, obciążeń wielokrotnych i ruchomych oraz niewielka liczba niezbędnych czujników. Jako kolejny etap badań planowane są testy eksperymentalne na przykładowej konstrukcji kratowej oraz we współpracy z Głównym Instytutem Górniczym na łuku obudowy górniczej. Dalszych badań wymaga problem odpowiedniego rozmieszczenia czujników.



Rys. 5. Obciążenie odtworzone przy ważonym złożeniu dwóch założeń: gładkości przebiegu obciążenia w czasie (z wagą 1.0) oraz wzdłuż łuku (z wagą 0.2)

PODZIĘKOWANIA

Referat powstał przy wsparciu sieci szkoleniowej SMART SYSTEMS (HPRN-CT-2002-00284) oraz projektu MAT-INT (PBZ-KBN-115/T08/2004). Autorzy dziękują panu Andrzejowi Nierobiszowi (Główny Instytut Górnictwa) za przekazanie danych technicznych modelowanego łuku obudowy górniczej.

LITERATURA

- [1] J. Holnicki-Szulc, J. T. Gierlinski, *Structural Analysis, Design and Control by the Virtual Distortion Method*, John Wiley & Sons, Chichester, U.K., 1995.
- [2] E. Jacquelin, A. Bennani, P. Hamelin, *Force reconstruction: analysis and regularization of a deconvolution problem*, J. of sound and Vibration, Vol. 265, 2003, pp. 81–107.
- [3] H. Inoue, J. Harrigan, S. Reid, *Review of inverse analysis for indirect measurement of impact force*, Applied Mechanics Reviews, Vol 54(6), 2001, pp. 503–524.
- [4] G. Dahlquist, Å. Björck, *Numerical Methods in Scientific Computing*, Vol. I, II, <http://www.mai.liu.se/~akbj/NMbook.html> (05-10-2006).
- [5] L. Jankowski, M. Wikło, *A posteriori impact identification*, Structural Health Monitoring — Third European Workshop, 5-6 July 2006, Granada, Spain, pp. 675–682.
- [6] Huta Łabędy S.A., *Odrzwia obudowy łukowej podatnej ŁP, Kształtowniki do obudów chodnikowych i tuneli*, <http://www.hutalab.com.pl> (11-10-2006).

AUTORZY

Łukasz Jankowski¹, Marcin Wikło^{1,2}, Grzegorz Suwała², Jan Holnicki-Szulc¹

¹Smart-Tech Centre, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
E-Mail: ([lukasz.jankowski](mailto:lukasz.jankowski@ippt.gov.pl) | [marcin.wiklo](mailto:marcin.wiklo@ippt.gov.pl) | [jan.holnicki](mailto:jan.holnicki@ippt.gov.pl))@ippt.gov.pl

²Wydział Mechaniczny, Politechnika Radomska, E-Mail: dzenio83@o2.pl