

Dominika Ziaja, Bartosz Miller*

WYKRYWANIE USZKODZEŃ KONSTRUKCJI NA PODSTAWIE ANALIZY ZMIAN PARAMETRÓW DYNAMICZNYCH

Streszczenie

W artykule zaprezentowano ideę monitorowania stanu konstrukcji jako działania wspierającego ochronę środowiska. Przedstawiono, na przykładzie badań dwukondygnacyjnej ramy portalowej, wstępną propozycję procedury umożliwiającej detekcję uszkodzeń połączeń w badanej konstrukcji. Prezentowane w opracowaniu wnioski bazują na pomiarach przyspieszeń w wybranych punktach konstrukcji poddanej wzbudzeniu dynamicznemu. Jako narzędzie do analizy zmian parametrów dynamicznych układu wykorzystano jednowarstwowe, jednokierunkowe sztuczne sieci neuronowe.

Słowa kluczowe: detekcja uszkodzeń, dynamika, SHM

WPROWADZENIE

Opisane w artykule badania są częścią szerszego zadania, którego celem jest opracowanie procedury umożliwiającej skuteczną detekcję różnego typu uszkodzeń konstrukcji. Jest to zadanie z dziedziny nazywanej monitorowaniem stanu konstrukcji (ang. Structural Health Monitoring, SHM), która, na podstawie analizy danych pochodzących z pomiarów przy użyciu metod nieniszczących, próbuje określić, czy i gdzie układ został uszkodzony oraz jaki jest wpływ wykrytego uszkodzenia na nośność konstrukcji. Rozwój systemów monitorowania stanu konstrukcji z pewnością przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa budowli, przede wszystkim tych, o znaczeniu strategicznym (jak zapory wodne, elektrownie jądrowe itp.), których uszkodzenie niesie ze sobą katastrofalne skutki. Wczesne wykrycie uszkodzenia umożliwia odpowiednio szybkie podjęcie działań mających na celu wykonanie niezbędnych napraw zanim dojdzie do poważnych

* Politechnika Rzeszowska, Katedra Mechaniki Konstrukcji

awarii. Dzięki temu możliwa jest redukcja kosztów utrzymania obiektów i zmniejszenie ilości odpadów (np. złomu), a obiekty w dobrym stanie technicznym mogą być eksploatowane przez dłuższy czas. Wymienione korzyści poprawiają bilans kosztów cyklu życia obiektu, wykorzystywanego do podejmowania ważnych decyzji środowiskowych [GLUCH 2004]. Zastosowanie systemów monitorowania stanu konstrukcji jest z pewnością działaniem proekologicznym, zapobiegającym wystąpieniu, bądź minimalizującym skutki katastrof (nie tylko w skali lokalnej jak np. w przypadku katastrofy obiektu mieszkalnego, ale także na znacznych obszarach np. w przypadku uszkodzenia zapory wodnej).

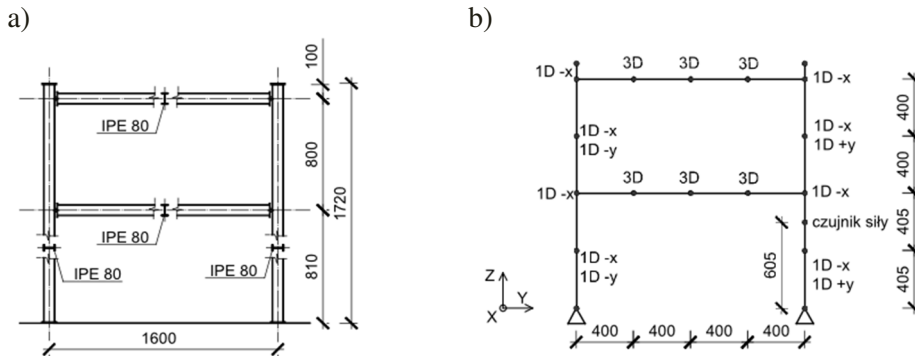
W literaturze prezentowane są różne nieniszczące metody służące do wykrywania uszkodzeń, np.: emisja akustyczna [RANACHOWSKI 2012], defektoskopia ultradźwiękowa [BEN 2013], termografia [JUREK 2015], fale sprężyste [RUCKA 2014], analiza modalna [WILDE 2008] i inne. Prezentowane w artykule wyniki bazują na analizie zmian parametrów dynamicznych układu, otrzymanych w wyniku przeprowadzenia analizy modalnej na danych pochodzących z pomiarów przyspieszeń w wybranych punktach wzbudzonej dynamicznie konstrukcji.

PRZEDSTAWIENIE OBIEKTU BADAŃ

Badanym modelem laboratoryjnym była dwukondygnacyjna rama portalowa wykonana z kształtowników IPE 80 (stal S355) o wymiarach zgodnych ze schematem zamieszczonym na rys. 1a. Schematy połączeń pomiędzy ryglami i słupami ramy przedstawiono na rys. 2. Kształt połączenia z fundamentem (rys. 3) wynikał z konieczności zamocowania ramy do podłogi siłowej Wydziałowego Laboratorium Badań Konstrukcji Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej.

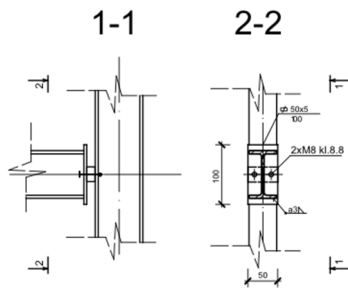
METODYKA BADAŃ

W ramach zadania badano wpływ wymiany elementów lub zmiany ich położenia na zmianę parametrów dynamicznych układu. Przedstawiony powyżej model ma posłużyć do stworzenia procedury umożliwiającej wykrycie uszkodzeń różnego typu, stąd postawiono pytanie, jakie zmiany są wynikiem uszkodzenia układu, a jakie są związane jedynie z wymianą jego elementów. Analizowano sytuacje, w których zmieniano położenie rygli (obroty względem osi rygli i względem osi symetrii w płaszczyźnie ramy) oraz wymieniano rygle na elementy pozornie identyczne. Badano również wpływ luzowania łączników na zmianę odpowiedzi układu. Luzowanie łączników miało symulować uszkodzenie węzłów w rzeczywistej konstrukcji.

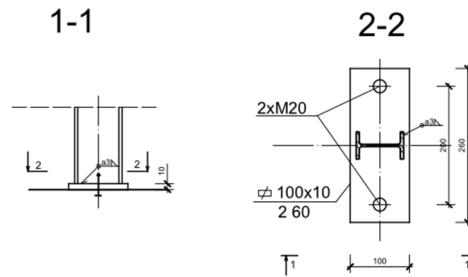


Rys. 1. a) Schemat badanej ramy, b) rozmieszczenie czujników i kierunki pomiarowe (opis w tekście)

Fig. 1. a) Scheme of the examined frame, b) location of accelerometers and measuring directions (description in text)



Rys. 2. Połączenie rygiel-stup
Fig. 2. Beam - to - column connection



Rys. 3. Połączenie z fundamentem
Fig. 3. Column footings

Zestaw pomiarowy składał się z dwunastu jednoosiowych czujników przyspieszeń PCB Piezotronics, Inc. model T352C03, sześciu trójosiowych czujników przyspieszeń B&K model 4506B003 oraz czujnika siły PCB Piezotronics, Inc. model 208C03, zamocowanych na konstrukcji ramy w punktach wyznaczonych na podstawie analizy postaci drgań modelu numerycznego. Pomiary przyspieszeń na wskazanych kierunkach umożliwiły analizę przestrzennej pracy ramy. Drgania układu wzbudzano wzbudnikiem (The Modal Shop, Inc. Model 2100E11) zamocowanym na dodatkowej konstrukcji wsporczej. Do wykonania pomiarów użyto oprogramowania Siemens LMS Test.Lab 15 z modułem MIMO FRF Testing. Do zbierania danych wykorzystano wielokanałowy rejestrator/analizator LMS Scadas Mobile. Rejestrowany sygnał, po transformacji do dziedziny częstotliwości, miał zakres 0-200Hz i rozdzielczość 0.097Hz.

W trakcie badań każdorazowo postępowano według następującej procedury: ustawiano elementy układu we właściwej konfiguracji, wzbudzano drgania ramy, mierzono przyspieszenia w wybranych kierunkach (pokazanych na Rys. 1b) oraz wykonywano analizę modalną, w wyniku której otrzymywano częstotliwości drgań i odpowiadające im postaci. Pomiarzy zostały powtórzone przynajmniej trzykrotnie w każdej z rozważanych konfiguracji elementów (zarówno z łącznikami dokręconymi z kontrolowanym momentem jak i poluzowanymi). W ten sposób zgromadzono bazę liczącą 193 wzorce (120 wzorców bez uszkodzenia - rama ze wszystkimi łącznikami dokręconymi ze stałym momentem oraz 73 wzorce w których oba łączniki w jednym z czterech połączeń rygiel-słup zostały poluzowane).

WYNIKI BADAŃ

Z opisanych powyżej badań wybrano początkowo jedynie wzorce odpowiadające sytuacji bez uszkodzenia, a spośród nich jeden, który został wzorcem porównawczym. Następnie do tego wzorca odnoszono dane z kolejnych pomiarów szukając odpowiadających sobie postaci drgań. Jako kryterium podobieństwa zastosowano współczynnik MAC zgodnie ze wzorem poniżej, uznając, że porównywane postaci są sobie odpowiadającymi jeśli $MAC \geq 0.8$ [UHL 1997]:

$$MAC_{jk} = \frac{|\Phi_{mj}^T \Phi_{ak}|^2}{(\Phi_{ak}^T \Phi_{ak})(\Phi_{mj}^T \Phi_{mj})}$$

gdzie:

- Φ_{mj} - wektor opisujący otrzymaną z pomiarów j-tą formę drgań,
- Φ_{ak} - k-ta forma drgań wzorca porównawczego.

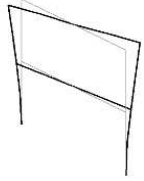
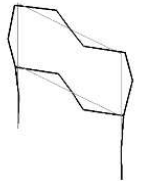
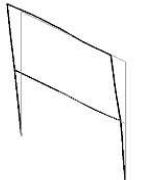
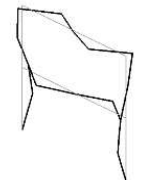
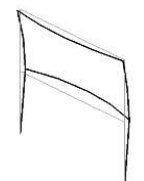
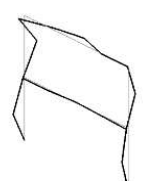
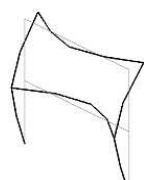
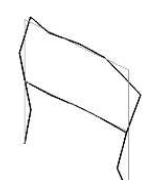
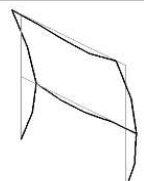
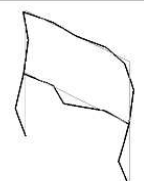
Porównując współczynniki MAC stwierdzono, że zmiana położenia poszczególnych elementów lub zamiana ich na inne skutkuje brakiem identyfikacji niektórych form odpowiadających wzorcowi porównawczemu. Istnieje jednak pewna grupa form niewrażliwa na wspomniane zmiany (formy identyfikowano przynajmniej dla 90% wzorców nieuszkodzonych). Formy te można obserwować nawet w sytuacji, gdy oba rygle zostały wymienione na inne elementy. Zestawienie dziesięciu postaci niewrażliwych na zmianę elementów (spośród 18 postaci dla wzorca porównawczego otrzymanych z pomiarów) przedstawiono w tab. 1.

Kolejnym etapem była analiza zmian parametrów dynamicznych układu na skutek luzowania łączników. Porównując każdy ze wzorców uszkodzonych ze wzorcem porównawczym (bez uszkodzenia, wybranym na wcześniejszym etapie, jak opisano powyżej) stwierdzono, że tylko dla trzech spośród 73 wzorców udało

się zidentyfikować komplet postaci przedstawionych w tab. 1, przy czym wartości odpowiadających im częstotliwości odbiegały od wartości średniej.

Tab. 1. Postacie zidentyfikowane przynajmniej dla 90% wzorców bez uszkodzenia

Tab. 1. Modal forms identified for more than 90% of undamaged patterns

| Nr No. | Postać Modal form | Częstotliwość średnia | Odchylenie standardowe | Nr No. | Postać Modal form | Częstotliwość średnia | Odchylenie standardowe |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | Frequency | Standard deviation | | | Frequency | Standard deviation |
| | | [Hz] | [Hz] | | | [Hz] | [Hz] |
| 3 |  | 7,7 | 0,0 | 14 |  | 120,1 | 0,4 |
| 4 |  | 12,8 | 0,3 | 15 |  | 142,4 | 0,6 |
| 5 |  | 26,9 | 0,1 | 16 |  | 155,1 | 0,3 |
| 8 |  | 63,7 | 0,2 | 17 |  | 161,6 | 0,3 |
| 9 |  | 91,0 | 0,4 | 18 |  | 169,6 | 0,7 |

Jedynie forma o nr 4 (wg tab. 1) została zidentyfikowana w 98% wzorców, formy o numerach 5, 8, 9 w odpowiednio 82% , 84% i 84% badanych wzorców. Informację o braku zidentyfikowanych 10 form potraktowano jako informację o możliwości wystąpienia uszkodzenia w układzie. Niestety charakter zmian obserwowanych parametrów nie pozwolił na ustalenie zasad pozwalających określić miejsce uszkodzenia (w którym z węzłów poluzowano łączniki).

DYSKUSJA WYNIKÓW

Ze względu na brak łatwo zauważalnych powiązań pomiędzy miejscem uszkodzenia a zmianą parametrów dynamicznych układu postanowiono wykorzystać w celu detekcji uszkodzeń sztuczne sieci neuronowe (SSN). Zastosowano jednowarstwowe, jednokierunkowe sieci neuronowe o różnej architekturze. Zmianie ulegała nie tylko liczba neuronów w poszczególnych warstwach ale również rodzaj parametrów podawanych na wejściu sieci i zwracanych przez sieć. Rozważano dwa zadania:

- określenie, czy w konstrukcji wystąpiło uszkodzenie czy nie (jeden neuron w warstwie wyjściowej) dla uczenia i testowania zarówno na wzorcach uszkodzonych jak i bez uszkodzenia, przy następującej liczbie i rodzaju parametrów wejściowych:
- 10 częstotliwości odpowiadających formom niewrażliwym na zmianę elementów (jeśli formy nie zidentyfikowano wartość częstotliwości przyjmowano równą 0),
- 5 pierwszych częstotliwości odpowiadających 5 pierwszym formom z wytypowanej grupy (jeśli formy nie zidentyfikowano wartość częstotliwości przyjmowano równą 0),
- 5 ostatnich częstotliwości odpowiadających 5 ostatnim formom z wytypowanej grupy (jeśli formy nie zidentyfikowano wartość częstotliwości przyjmowano równą 0),
- 16 neuronów opisujących czwartą postać ramy (identyfikowaną dla wszystkich wzorców), pod uwagę brano wyłącznie składowe formy w płaszczyźnie ramy,
- 14 neuronów opisujących czwartą postać ramy (identyfikowaną dla wszystkich wzorców), pod uwagę brano wyłącznie składowe formy z płaszczyźnie ramy,
- 16 neuronów opisujących dziewiątą postać ramy (identyfikowaną dla wszystkich wzorców bez uszkodzenia), pod uwagę brano wyłącznie składowe formy w płaszczyźnie ramy,
- 14 neuronów opisujących dziewiątą postać ramy (identyfikowaną dla wszystkich wzorców bez uszkodzenia), pod uwagę brano wyłącznie składowe formy z płaszczyźnie ramy,
- 10 składników głównych z czwartej formy,
- 15 składników głównych z czwartej formy,

- 10 pierwszych składników głównych dla każdej z form,
- określenie lokalizacji uszkodzenia (odpowiedzią sieci była klasa przypisana do danego rodzaju uszkodzenia - jedno wyjście; przyjęto następujące klasy: 1 - uszkodzenie lewego dolnego węzła, 2 - prawego dolnego węzła, 3 - prawego górnego oraz 4 - lewego górnego węzła), gdy na wejściu podawano:
- 10 częstotliwości odpowiadających formom z wytypowanego pasma, uczenie i testowanie na wzorcach uszkodzonych i nieuszkodzonych,
- 10 częstotliwości odpowiadających formom z wytypowanego pasma, uczenie i testowanie wyłącznie na wzorcach uszkodzonych,
- 10 pierwszych składników głównych dla każdej z form, uczenie i testowanie na wzorcach uszkodzonych i nieuszkodzonych,
- 10 pierwszych składników głównych dla każdej z form, uczenie i testowanie wyłącznie na wzorcach uszkodzonych.

W niektórych z analizowanych sytuacji szczególną uwagę poświęcono formom 4 i 9 (wg tab. 1), ponieważ są to postacie płaskie, najlepiej identyfikowane w rzeczywistej konstrukcji, gdzie przemieszczenia z płaszczyzny ramy są ograniczone poprzez układy stężające.

Liczba neuronów w warstwie ukrytej każdorazowo była dobierana w taki sposób, aby liczba parametrów sieci nie przekraczała liczby wzorców uczących.

Dla każdej architektury uczenie sieci przeprowadzono pięćdziesięciokrotnie dla dziesięciu różnych podziałów wzorców na zbiory uczący i testujący. Najlepsze wyniki otrzymano gdy detekcję uszkodzeń podzielono na dwa etapy: najpierw decydowano na podstawie 10 częstotliwości drgań czy rama została uszkodzona czy nie, a następnie, jeśli uszkodzenie wystąpiło, to wykorzystując 10 pierwszych składników głównych z analizowanych form określano w którym miejscu. Wyniki testowania najlepiej nauczonych sieci wraz z ich architekturą przedstawiono w tab. 2 oraz tab. 3. Takie podejście umożliwiło poprawne określenie stanu konstrukcji na poziomie 99% wzorców testujących oraz w 83% pozwoliło prawidłowo określić lokalizację uszkodzenia, gdy ono wystąpiło.

Zaproponowano następującą procedurę detekcji uszkodzeń:

- dla sytuacji bez uszkodzenia wytypować zestaw form niewrażliwych na zmianę elementów,
- dla każdego nowego pomiaru porównać otrzymane formy z formami wzorca porównawczego (stosując współczynnik MAC),
- wykorzystując SSN na podstawie wartości kolejnych częstotliwości określić czy rama została uszkodzona czy nie,
- jeśli uszkodzenie wystąpiło, wykorzystując pierwsze składniki główne z każdej zidentyfikowanej postaci i SSN określić jego położenie.

WNIOSKI

Zmiana położenia elementów lub wymiana ich na inne nie jest obojętna dla konstrukcji i skutkuje zmianą parametrów dynamicznych układu w postaci zmiany formy i/lub częstotliwości drgań swobodnych. Można jednak wyodrębnić pewną grupę form niewrażliwych na wspomniane zmiany.

Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych jako klasyfikatora umożliwiło, w najlepszej konfiguracji, prawidłową ocenę stanu konstrukcji na poziomie 99% oraz określenie położenia uszkodzenia (dla 83% wzorców testujących prawidłowo określono węzeł z poluzowanymi łącznikami).

Możliwe wydaje się stworzenie klasyfikatora, który z większą precyzją będzie lokalizował uszkodzenia, jednak wymaga to dodatkowych wzorców dla układu z uszkodzeniem (otrzymanych bądź na drodze pomiarów modelu laboratoryjnego bądź pochodzących z symulacji numerycznych). Pomimo konieczności douczenia sieci zaproponowaną procedurę można uznać za skuteczną w detekcji uszkodzeń węzłów.

Dzięki przedstawionemu podejściu można podjąć odpowiednie działania naprawcze gdy tylko dojdzie do uszkodzenia konstrukcji. Wczesne wykrycie uszkodzenia często pozwala zredukować koszty naprawy i ilość odpadów (zniszczonych elementów), a nawet, jeśli w skrajnym przypadku w ocenie eksperta naprawa nie jest możliwa, pozwala na zabezpieczenie i/lub ewakuację zagrożonego obszaru.

Podziękowania

Program MATLAB wykorzystany do przeprowadzenia badań został zakupiony w wyniku realizacji Projektu nr UDA-RPPK.01.03.00-18-003/10-00 „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Priorytet I. Konkurencyjna i Innowacyjna Gospodarka, Działanie 1.3 Regionalny system innowacji.

Tab. 2. Wyniki detekcji uszkodzenia dla zbioru testującego przez najlepiej wytrenowaną sieć (U - rama uszkodzona, N - rama bez uszkodzenia)

Tab. 2. The results of damage detection using the best fitted artificial neural network (ANN) (U - damaged frame, N - undamaged frame)

| Architektura SSN 10-2-1, ANN architecture 10-2-1 | | Klasyfikacja przez SSN ANN classification | |
|-------------------------------------------------------------|---|----------------------------------------------|----|
| | | U | N |
| Rzeczywisty stan konstrukcji Real state of the structure | U | 27 | 1 |
| | N | 0 | 43 |

Do badań wykorzystano aparaturę zakupioną w projekcie nr POPW.01.03.00-18-012/09 z Funduszy Strukturalnych w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego

Tab. 3. Wyniki lokalizacji uszkodzenia dla testującego zbioru wzorców uszkodzonych przy najlepiej wytrenowanej sieci

Tab. 3. The results of detection of damage location using the best fitted artificial neural network (ANN) for damaged testing patterns

| Architektura SSN ANN architecture 10-3-1 | Liczba wzorców testowych w danej klasie Number of testing patterns in each class | | |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------|
| Lokalizacja uszkodzenia Location of damage | Zaklasyfikowane prawidłowo Classified correctly | Zaklasyfikowane błędnie Classified incorrectly | Ogółem Altogether |
| 1 | 5 | 1 | 6 |
| 2 | 1 | 1 | 2 |
| 3 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 3 | 0 | 3 |

LITERATURA

1. GLUCH, P.; BAUMANN H.; 2004. The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making. *Building and Environment* 39. ss 571-580.
2. RANACHOWSKI Z.; 2012. Emisja Akustyczna w diagnostyce obiektów technicznych, *DROGI I MOSTY* 2/2012 ss. 65-87.
3. WILDE, K.; 2008. *Modal Diagnostics of Civil Engineering Structures*. Gdańsk University of Technology Publishers, Gdańsk.
4. BEN, B. S.; YANG, S. H.; RATNAM, CH.; BEN, B. A.; Ultrasonic based structural damage detection using combined finite element and model Lamb wave propagation parameters in composite materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, ss. 1847-1856.
5. JUREK, M.; MAJEWSKA, K.; MIELOSZYK, M.; OSTACHOWICZ, W.; PAWLUCZYK-MAJKA, J.; 2015. Badania próbek kompozytowych z wykorzystaniem metod termografii, Raport z projektu nr: PBS1/B6/8/2012, Nieinwazyjne metody oceny degradacji fizyko-chemicznej i mechanicznej elementów konstrukcji kompozytowych, realizowanego w ramach Programu Badań Stosowanych Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

6. RUCKA, M.; ZIMA, B.; 2014. Detekcja stanu zakotwienia pręta za pomocą fal sprężystych, *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, t. XXXI, z.61 (1/14), ss. 257-267.
7. UHL, T.; 1997. Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.

STRUCTURAL DAMAGE DETECTION BASED ON CHANGES IN DYNAMIC PARAMETERS

S u m m a r y

The article presents the idea of structural health monitoring as a supporting action to protect the environment. The preliminary proposal of a procedure enabling the damage detection of the joints is shown on the example of a two-storey portal frame. Conclusions, presented in the paper, based on the measurement of accelerations in selected points of structure, subjected to dynamic excitation. Single-layer, feed-forward artificial neural networks were used as a tool for the analysis of changes in the dynamic parameters.

Key words: damage detection, dynamics, SHM