ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: BUDOWNICTWO z. 93 Nr kol. 1514

Ewa SILICKA*
Politechnika Szczecińska

EWOLUCYJNA IDENTYFIKACJA MODELU OBLICZENIOWEGO RAMY STALOWEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono proces identyfikacji modelu obliczeniowego ramy stalowej. W tym celu przeprowadzono badania doświadczalne konstrukcji, podczas których dokonano pomiarów odkształceń oraz przemieszczeń pod wpływem kontrolowanych obciążeń zewnętrznych. Następnie stworzono przybliżony teoretyczny model ramy opisany za pomocą prętowych elementów skończonych. Model ten poddano identyfikacji wykorzystując metody polioptymalizacyjne. Jako kryteria zgodności modelu teoretycznego i rzeczywistego przyjęto sumę odchyleń kwadratowych przemieszczeń i odkształceń. Zadanie rozwiązano w trzech cyklach opierając się na koncepcji optymalizacji ewolucyjnej.

STEEL FRAME MODEL EVOLUTIONAL IDENTYFICATION

Summary. The work presents process of the steel frame analytical model identification. There have been made empirical tests on construction. Under controlled external loading values of displacements and strains have been registered. After that approximated theoretical model has been created with use linear finite elements. The model has been analyzed with polyoptimization methods. Compatibility criteria of theoretical and empirical model have been sums of square differences between displacements and strains. The problem has been solved in three evolutional cycles.

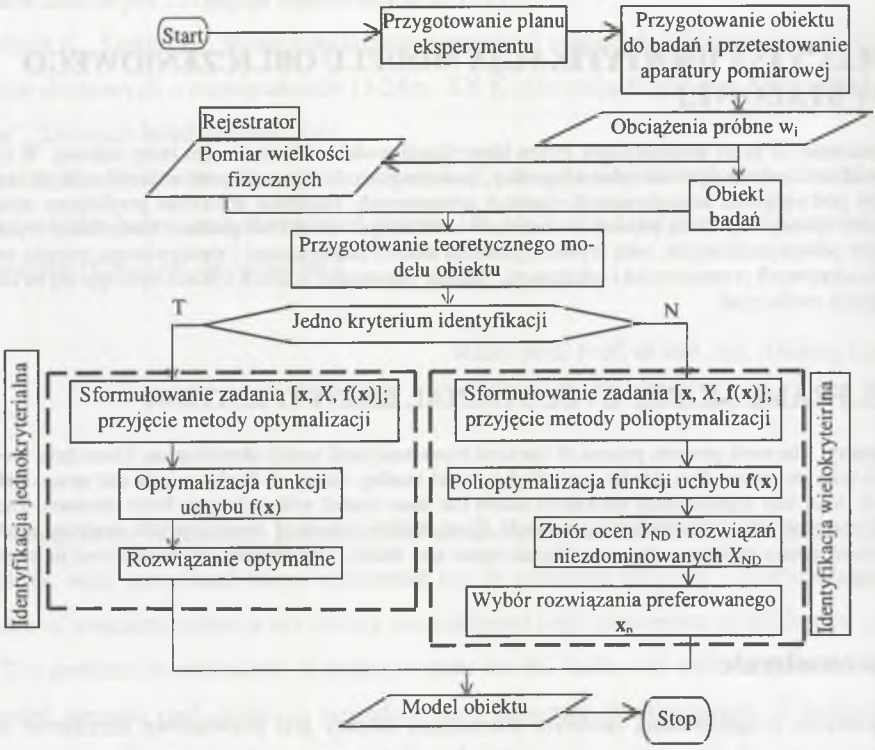
1. Wprowadzenie

W procesie projektowania istotnym elementem analizy jest prawidłowe określenie modelu obliczeniowego konstrukcji. W przypadku skomplikowanych obiektów przyjęcie niewielkich nawet uproszczeń prowadzić może do dużych błędów. Należy zdawać sobie sprawę, że wszystkie przyjmowane zwykle schematy statyczne są wyidealizowane. W przypadku rzeczywistych konstrukcji rzadko zdarza się, aby podpora spełniała warunki idealnego przegubu, pełnego zamocowania itd. Zazwyczaj są to podpory sprężyste, których podatność zależy od warunków gruntowych, tarcia występującego w przegubach, luzów w połączeniach i innych czynników trudnych do przewidzenia bez przeprowadzenia szczegółowej analizy identyfikacyjnej.

Proces identyfikacji pozwala na stworzenie zbliżonego do rzeczywistości modelu obliczeniowego, co w konsekwencji prowadzi do bardziej precyzyjnego i bezpieczniejszego projektowania. Aby odnaleźć model, który najlepiej odpowiada poddanej analizie konstrukcji, celowe jest zasto-

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Witold M. Paczkowski, prof. PSz.

sowanie technik optymalizacyjnych [1]. Identyfikowane wielkości określane są wówczas jako zmienne decyzyjne, natomiast funkcje celu wyrażają w sposób matematyczny przyjęte kryteria zgodności modelu teoretycznego z rzeczywistym obiektem. Tak rozumiany proces identyfikacji przedstawiono w sposób schematyczny na rysunku 1 [2].



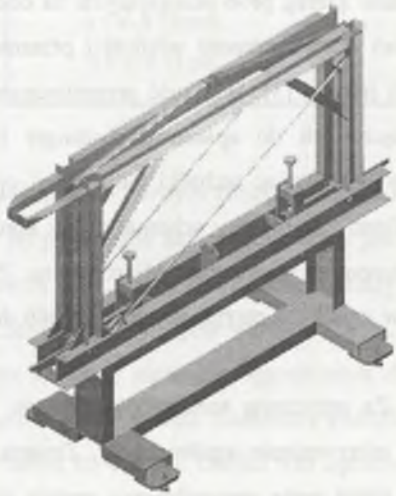
Rys. 1. Schemat blokowy obrazujący proces identyfikacji optymalizacyjnej
Fig. 1. Block diagram illustrating process of optimization identification

W początkowej fazie projektowania lub oceny stanu obiektu istniejącego wiedza na temat poddawanej analizie konstrukcji jest zwykle niewielka. Wynika to z faktu braku powtarzalności i oryginalnego charakteru każdej inwestycji. Stąd też przy pierwszej próbie sformułowania zadania dotyczącego optymalizacji lub identyfikacji optymalizacyjnej może okazać się, że posiadane informacje nie są wystarczające, aby odpowiednio zdefiniować poszczególne założenia. Dopiero po pewnym czasie można określić niektóre cechy obiektu, jego wrażliwość na przyjęte zmienne decyzyjne, istotność ograniczeń, charakter funkcji celu, itp. Często zachodzi potrzeba modyfikacji zadania. Stąd też powstała koncepcja ewolucyjnego podejścia do procesu optymalizacji, omówiona szczegółowo w pozycji [1]. Zakłada ona, że podczas rozwiązywania zadania naby-

wana jest wiedza, która pozwala na formułowanie coraz lepszych założeń, przyjmowanie bardziej efektywnych metod rozwiązania, eliminację zbędnych elementów. Każdy cykl ewolucji stanowi standardowe zadanie, a przyjęcie założeń i sformułowanie cyklu następnego opiera się na wnioskach wyciągniętych po rozwiązaniu zadania cyklu poprzedniego. Zadanie ewolucyjne stanowi zatem nawiązanie do powszechnie rozumianego procesu ewolucji, który polega na tworzeniu form coraz doskonalszych i lepiej przystosowanych do istniejących warunków.

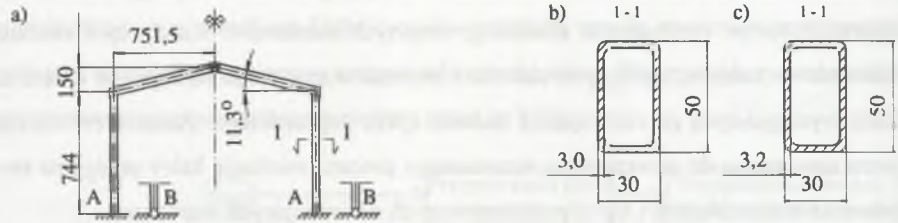
2. Obiekt identyfikacji

Obiektem poddanym analizie identyfikacyjnej jest model ramy stalowej (rys. 2). Konstrukcja składa się z symetrycznego rygla o dwustronnym spadku, połączonego w kalenicy w sposób przegubowy. Połączenia rygla ze słupami wykonstruowano są jako węzły sztywne. Dolne węzły słupów wykonano w sposób pozwalający na uzyskanie podparcia przegubowego (rys. 3, szczegół B) lub zamocowania (rys. 3, szczegół A). Wymiary ramy pokazano na rysunku 3a. Dodatkowo naroża oraz węzły podporowe wzmocnione są płytką stalową umieszczoną wewnątrz przekroju. W połowie długości rygli znajdują się gniazda, za pośrednictwem których możliwe jest precyzyjne przyłożenie siły. Ramę wykonano z elementów zimnogiętych o przekroju prostokątnym zamkniętym o wymiarach pokazanych na rysunku 3b.



Rys. 2. Model ramy stalowej
Fig. 2. Model of the steel frame

Konstrukcja umieszczona jest pomiędzy dwiema symetrycznie ustawionymi ramami obudowy o znacznie większej sztywności (rys. 2). Na nich umieszczone zostały statywy utrzymujące czujniki przemieszczeń. Po badaniach ram stwierdzono, że ich sztywność jest na tyle duża w porównaniu do sztywności badanego modelu, że powstające odkształcenia można uznać za nieznacznie małe i pominąć w dalszej analizie. Podczas analizy konstrukcji pominięto także niewielkie tarcie występujące w przegubach.



Rys. 3. Wymiary badanej ramy
Fig. 3. Dimensions of the analyzed frame

3. Badania modelowe ramy

Proces identyfikacji składa się z kilku etapów [2]. Pierwszym jest przeprowadzenie badań doświadczalnych, które pozwalają ocenić wrażliwość konstrukcji na oddziaływania zewnętrzne, istniejący w niej stan naprężeń, odkształceń lub przemieszczeń pod wpływem wprowadzonych, kontrolowanych sił zwanych obciążeniami próbnymi. Kolejny etap stanowi stworzenie modelu obliczeniowego, przy czym wielkości opisujące konstrukcję podlegające analizie identyfikacyjnej zdefiniowane są jako zmienne decyzyjne. Następnie stosując metody optymalizacyjne określa się wartości zmiennych, które minimalizują przyjęte funkcje uchybu. W sposób schematyczny proces identyfikacji przedstawiono na rysunku 1.

Podczas badań modelowych konstrukcji wykonano szereg prób polegających na obciążaniu konstrukcji zgodnie z przewidzianym planem badań oraz mierzeniu wielkości przemieszczeń i odkształceń konstrukcji w wybranych przekrojach (rys. 4) [3]. Wielkość przemieszczeń określono za pomocą czujników indukcyjnych podłączonych do aparatury Hottinger Baldwin Messtechnik MGC*plus*. Odkształcenia mierzono wykorzystując techniki tensometrii oporowej [3]. W kolejnym etapie procesu identyfikacji ustalono przybliżony schemat pracy konstrukcji posługując się metodą prętowych elementów skończonych w systemie MikroStrains. Po przeprowadzeniu analizy stwierdzono znaczne różnice w wynikach otrzymanych w sposób doświadczalny i teoretyczny.

Rys. 4. Przekroje poddane analizie
Fig. 4. Analyzed cross-sections

Za przyczynę rozbieżności uznano lokalne usztywnienie węzłów ramy. Zmiana sztywności pręta spowodowana została dodatkowym wzmocnieniem płytką stalową przyspawaną wewnątrz przekroju w dolnej oraz górnej części słupa. Ze względu na niekorzystne warunki spawania zarówno

zasięg, jak i wpływ usztywnienia były trudne do ustalenia bez przeprowadzenia szczegółowej analizy identyfikacyjnej.

4. Sformułowanie zadania identyfikacji w pierwszym cyklu ewolucji

Aby w sposób racjonalny ustalić wpływ płaskowników na sztywność węzłów sformułowano zadanie identyfikacji optymalizacyjnej [1,2]. Przyjęto dwuelementowy wektor zmiennych decyzyjnych opisujący zmianę sztywności w górnych i dolnych częściach słupów

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T. \tag{1}$$

Jako pierwszą zmienną przyjęto stopień usztywnienia wyrażony przez zastępczą grubość płytek węzłowych. W ten sposób w matematycznym modelu ramy uwzględniono możliwość połączenia płaskowników ze ściankami przekroju w sposób nie w pełni monolityczny. Drugą zmienną jest zastępcza długość płytek wyrażająca zasięg ich połączenia ze ściankami rury. Na zmienne decyzyjne nałożono ograniczenia górne i dolne oraz dyskretyzacyjne zestawione w tablicy 1.

Tablica 1

Ograniczenia obszaru dopuszczalnego

Ograniczenia kostkowe		Ograniczenia dyskretyzacyjne	
$0 \le x_1 \le 3{,}0$ mm	(2)	$x_1 = n_1.0{,}3$ mm	(4)
$0 \le x_2 \le 15$ cm	(3)	$x_2 = n_2.0{,}5$ cm	(5)
		$n_1, n_2 \in C$, C – zbiór liczb całkowitych	(6)

Ograniczeniem górnym zmiennej x_1 jest rzeczywista grubość płytki usztywniającej, co oznacza, że jej połączenie ze ściankami rury jest monolityczne, zaś ograniczeniem dolnym jest grubość równa zero, przez co rozumieć należy brak dodatkowego usztywnienia. Dla zmiennej x_2 ograniczeniem górnym jest wartość 15 cm, a ograniczeniem dolnym wartość równa zero. Ponadto na zmienne nałożono ograniczenia dyskretyzacyjne ułatwiające obliczenia numeryczne w systemie Mikro-Strains. Zastępczą grubość płytki x_1 zmieniano co 0,3 mm, natomiast zasięg usztywnienia co 0,5 cm. Dzięki tym ograniczeniom zarówno przestrzeń rozwiązań, jak i ocena rozwiązań są przestrzeniami dyskretnymi, a całe zadanie – zadaniem optymalizacji dyskretnej [1].

Zadanie rozwiązano biorąc pod uwagę dwa kryteria optymalizacji – minimum odchylenia kwadratowego przemieszczeń oraz minimum odchylenia kwadratowego odkształceń. Kryteria zestawiono w dwuelementowy wektor funkcji celu

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})]^T. \tag{7}$$

Funkcje $f_1(\mathbf{x})$ oraz $f_2(\mathbf{x})$ zdefiniowano odpowiednio

$$f_1(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{n} \frac{[\delta_{0i}^k - \delta_i^k(\mathbf{x})]^2}{[0{,}5\cdot(\delta_{0i}^k + \delta_i^k(\mathbf{x}))]^2}, \tag{8}$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{n} \frac{[\varepsilon_{0i}^k - \varepsilon_i^k(\mathbf{x})]^2}{[0{,}5\cdot(\varepsilon_{0i}^k + \varepsilon_i^k(\mathbf{x}))]^2}, \tag{9}$$

gdzie:

δ_{0i} – przemieszczenie i-tego punktu otrzymane doświadczalnie,

$\delta_i(\mathbf{x})$ – przemieszczenie i-tego punktu otrzymane w sposób teoretyczny,

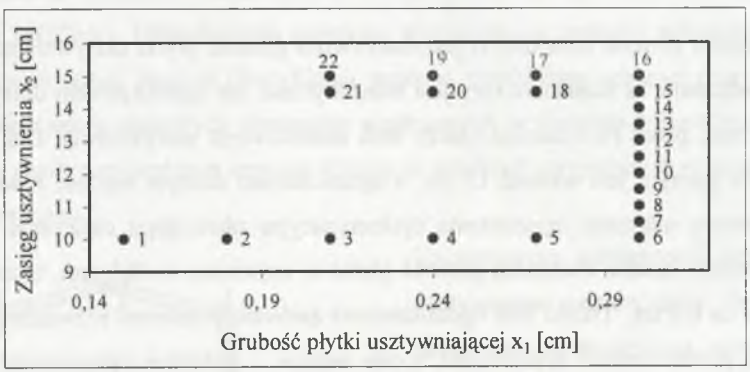
ε_{0i} – odkształcenie i-tego punktu otrzymane doświadczalnie,

$\varepsilon_i(\mathbf{x})$ – odkształcenie i-tego punktu otrzymane w sposób teoretyczny,

k – numer schematu obciążeniowego.

Dla tak sformułowanego zadania przeprowadzono analizę optymalizacyjną. W pierwszym etapie zadania poszukiwano rozwiązania minimalizującego funkcję celu $f_1(\mathbf{x})$. Analizę prowadzono posługując się metodą Gaussa-Seidela. Kolejnym etapem zadania było odnalezienie zbioru ocen i rozwiązań niezdominowanych. W tym celu wykorzystano metodę orto-diagonalną [1].

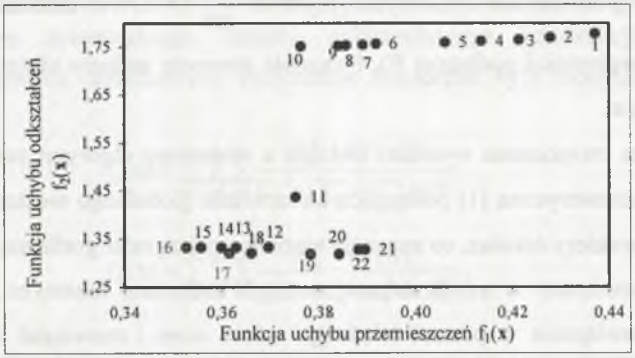
Postępując zgodnie z algorytmami zastosowanych metod otrzymano rozwiązanie zadania w postaci trójelementowego zbioru ocen i rozwiązań niezdominowanych [1], który obrazują punkty 16, 17 i 19 (rys. 5, 6). Ze zbioru ocen niezdominowanych wybrano ocenę preferowaną $\mathbf{y}_{17}$ posługując się metodą funkcji dystansowej z normą $||p|| = 2$ [1]. Odpowiadające jej rozwiązanie $\mathbf{x}_{17} = [0{,}27; 15]$ uznano za najlepiej godzące przyjęte kryteria.



Rys. 5. Zbiór rozwiązań analizowanych w pierwszym cyklu ewolucji
Fig 5. Set of solution under analyzed in the first evolutional cycle

Porównując wyniki teoretyczne i doświadczalne zauważono, że charakterystyczną cechą badanej konstrukcji jest jej większa sztywność niż wynika to z analizy numerycznej modelu obli-

czeniowego. Dotyczy to zarówno przemieszczeń, jak i odkształceń. Istnieją więc zapewne inne czynniki mające wpływ na pracę analizowanej konstrukcji. Istotny jest również fakt, że wynikiem obliczeń optymalizacyjnych przeprowadzonych w pierwszym cyklu ewolucji jest zbiór rozwiązań niezdominowanych, z których wszystkie znajdują się na górnym ograniczeniu kostkowym zmiennej x_2.



Rys. 6. Zbiór ocen rozwiązań analizowanych w pierwszym cyklu ewolucji
Fig. 6. Evaluation set of solutions under analyzed in the first evolutional cycle

5. Sformułowanie zadania identyfikacji w drugim cyklu ewolucji

Na podstawie wniosków wyciągniętych po przeprowadzeniu pierwszego cyklu ewolucji zmodyfikowano sformułowanie zadania. Stwierdzono, że jednym z czynników powodujących zwiększoną sztywność ramy może być moduł sprężystości podłużnej. Do obliczeń w pierwszym cyklu przyjęto normową wartość E równą dla stali 205 GPa, która ustalona jest tak, aby prawdopodobieństwo wystąpienia wartości niższej było niewielkie. Kolejnym czynnikiem wpływającym na zwiększoną sztywność konstrukcji jest rzeczywista wartość momentu bezwładności oraz pola przekroju elementów, z których została wykonana rama (rys. 3c). Wartości te są prawdopodobnie wyższe od podanych w katalogu, które przyjęto do obliczeń w poprzednim cyklu.

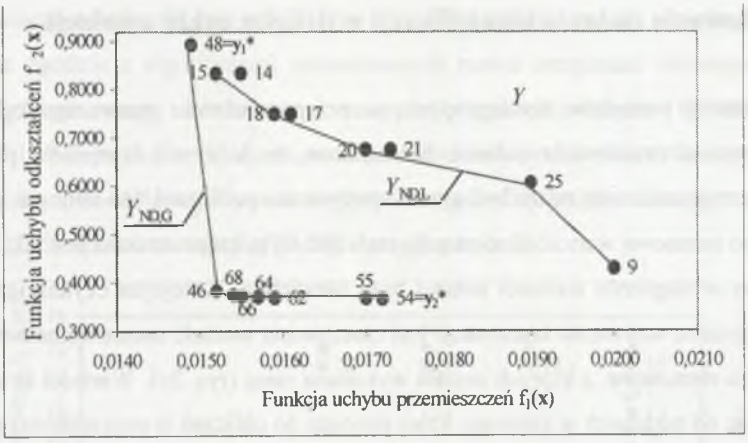
Opierając się na wyciągniętych wnioskach w drugim cyklu ewolucji poszerzono wektor zmiennych decyzyjnych o współczynnik $\xi = x_3$ zwiększający sztywność elementów, z których jest wykonana rama

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T \tag{10}$$

Współczynnik ten uwzględnia losowe rozkłady wartości modułu Younga oraz parametrów opisujących przekrój pozwalając stworzyć model matematyczny bliższy rzeczywistej konstrukcji. Podczas analizy iloczyny wyrażające sztywność giętną EI oraz wzdłużną EA elementów ramy przemnażano przez zmienną x_3. Na zmienną x_3, podobnie jak na pozostałe, nałożono ogranicze-

nia kostkowe i dyskretyzacyjne. Dolnym ograniczeniem nowo zdefiniowanej zmiennej jest wartość 1, ponieważ prawdopodobieństwo tego, że zarówno wartość modułu E, jak i momentu bezwładności I dla elementów ramy będą niższe od normowych i katalogowych, jest znikome. Ograniczeniem górnym współczynnika ξ jest wartość $\frac{250}{205} = 1{,}22$. Zmian x_3 dokonywano zgodnie z przyjętym ograniczeniem dyskretyzacyjnym co $\frac{5}{205}$ (5 GPa to zalecana dokładność określania modułu sprężystości podłużnej E). Pozostałe elementy zadania identyfikacji przyjęto jak w cyklu pierwszym.

Ze względu na zwiększenie wymiaru wektora **x** zmieniono algorytm zadania. Zastosowano dekompozycję parametryczną [1] polegającą na zamianie globalnego wektora zmiennych decyzyjnych na dwa wektory lokalne, co znacznie ułatwiło analizę oraz graficzną interpretację wyników. Zadanie rozwiązano w trzech etapach zwanych zadaniami lokalnymi. W każdym etapie otrzymywano rozwiązanie w postaci lokalnego zbioru ocen i rozwiązań niezdominowanych. W końcowej fazie ze zbiorów tych wyłoniono globalny siedmioelementowy zbiór ocen i rozwiązań niezdominowanych (rys. 7).



Rys. 7. Zbiór ocen niezdominowanych uzyskany w drugim cyklu ewolucji
Fig. 7. Set of nondominated evolutional of solutions in the second evolution cycle

Ze zbioru ocen niezdominowanych odrzucono oceny y_{48}, y_{54}, y_{55} ze względu na duże wartości funkcji celu. Następnie posługując się metodą funkcji dystansowej [1] wybrano ocenę preferowaną y_{68} i odpowiadające jej rozwiązanie preferowane $x_{68}=[0{,}3;\ 9;\ \frac{250}{205}]^T$.

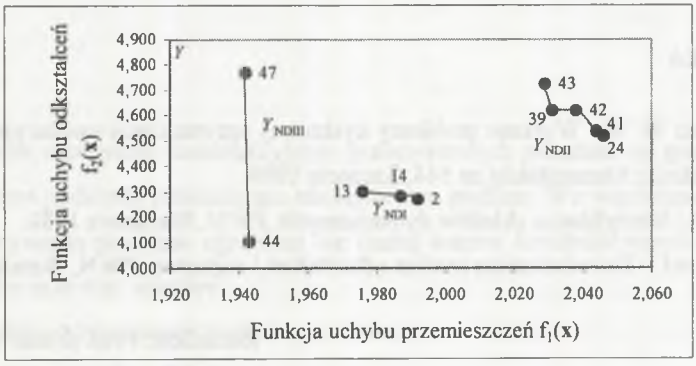
6. Sformułowanie zadania identyfikacji w trzecim cyklu ewolucji

W trzecim cyklu ewolucji zadanie rozszerzono o dwa dodatkowe schematy statyczne, na uzyskanie których pozwoliła konstrukcja podpór ramy (rys. 3a). W tym celu zbudowano numeryczny model ramy trójprzegubowej oraz ramy z dwoma słupami zamocowanymi. Takie sformułowanie zadania pozwoliło na weryfikację otrzymanych dotychczas wyników oraz na stworzenie bardziej uniwersalnego modelu obliczeniowego konstrukcji. W związku z uwzględnieniem dwóch dodatkowych schematów konieczna była modyfikacja przyjętych funkcji celu [1].

$$f_1(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{n}\sum_{s=1}^{3} \frac{[\delta_{0i}^{sk} - \delta_i^{sk}(\mathbf{x})]^2}{[0{,}5\cdot(\delta_{0i}^{sk} + \delta_i^{sk}(\mathbf{x}))]^2}, \tag{11}$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{n}\sum_{s=1}^{3} \frac{[\varepsilon_{0i}^{sk} - \varepsilon_i^{sk}(\mathbf{x})]^2}{[0{,}5\cdot(\varepsilon_{0i}^{sk} + \varepsilon_i^{sk}(\mathbf{x}))]^2}, \tag{12}$$

Pozostałe założenia zadania nie uległy zmianom – przyjęto taki sam wektor zmiennych decyzyjnych, ograniczenia obszaru dopuszczalnego oraz metody optymalizacji. Analizę przeprowadzono posługując się metodami wykorzystanymi w drugim cyklu ewolucji. Wynika to ze zbliżonego charakteru obydwu zadań. W wyniku rozwiązania otrzymano dwuelementowy zbiór ocen niezdominowanych (rys. 8), z których na drodze dyskusji wybrano ocenę preferowaną.



Rys. 8. Zbiór ocen niezdominowanych uzyskany w trzecim cyklu ewolucji
Fig. 8. Set of nondominated evolutional of solutions in the third evolution cycle

Ponieważ oceny rozwiązań niezdominowanych wykazują duże różnice wartości drugiej funkcji celu $f_2(\mathbf{x})$, natomiast wartości funkcji $f_1(\mathbf{x})$ są zbliżone, jako ocenę preferowaną wybrano $\mathbf{y}_{44}$. Przeciwobrazem wybranej oceny jest rozwiązanie preferowane $\mathbf{x}_{44} = [0{,}3;\ 11{,}5;\ \frac{250}{205}]^T$ [1]. Oznacza to, że połączenie płaskownika usztywniającego ze ściankami przekroju jest monolityczne, a zasięg usztywnienia wynosi 11,5 cm. Współczynnik korygujący sztywność konstrukcji ξ przyjął wartość $\frac{250}{205}$.

7. Wnioski

Rozwiązaniem preferowanym zadania identyfikacji jest wektor $x_p = [0,3;\ 11,5;\ 1,22]^T$, co oznacza, że połączenie płaskownika usztywniającego węzły ze ściankami wewnętrznymi przekroju jest w pełni monolityczne, zasięg usztywnienia wynosi 11,5 cm, natomiast sztywność jest o 22% większa od sztywności normowej i katalogowej. Uzyskane rozwiązanie poddano testom, podczas których porównano istniejące odkształcenia konstrukcji z wynikami teoretycznymi. Stwierdzono, że odchylenia procentowe wynoszą około 5%, co w porównaniu ze schematem wyjściowym oznacza trzykrotną poprawę zgodności wyników. Rozbieżności wyników doświadczalnych i teoretycznych tłumaczyć należy istnieniem czynników losowych, których nie ujęto w modelu obliczeniowym – odchyleniem wielkości geometrycznych, niewielkim tarciem w przegubach, asymetrią budowy ramy itp.

Zastosowanie koncepcji ewolucji zadania optymalizacji pozwoliło na dokładną analizę deformacji i sił wewnętrznych ramy pod wpływem kontrolowanych obciążeń. Można stwierdzić, że dzięki takiemu podejściu do procesu identyfikacji możliwe jest uzyskanie modelu obliczeniowego obiektu, który najlepiej odpowiada rzeczywistej konstrukcji w sensie ustalonych wcześniej kryteriów.

LITERATURA

1. Paczkowski W. M.: Wybrane problemy dyskretnej optymalizacji ewolucyjnej, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 544, Szczecin 1999.
2. Eykhoff P.: Identyfikacja układów dynamicznych, PWN, Warszawa 1980.
3. Orłoś Z. (red.): Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń, PWN, Warszawa 1977.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Paweł Śniady

Abstract

The work presents process of the steel frame analytical model identification. There have been made empirical tests on construction. Under controlled external loading values of displacements and strains have been registered. After that approximated theoretical model has been created with use linear finite elements. The model has been analyzed with polyoptimization methods. Compatibility criteria of theoretical and empirical model have been sums of square differences between displacements and strains. The problem has been solved in three evolutional cycles.