

WYKORZYSTANIE PROGRAMÓW BAZUJĄCYCH NA METODZIE ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH DO NAUCZANIA PROJEKTOWANIA ZŁOŻONYCH I WIELKOGABARYTOWYCH KONSTRUKCJI CIENKOŚCIENNYCH

Lech MURAWSKI¹, Adam MUC², Adam SZELEZIŃSKI¹

1. Wydział Mechaniczny, Akademia Morska w Gdyni
e-mail: l.murawski@wm.am.gdynia.pl , a.szelezinski@wm.am.gdynia.pl
2. Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni
e-mail: a.muc@we.am.gdynia.pl

Streszczenie: W artykule przeprowadzono ocenę oprogramowania wykorzystywanego do nauki projektowania złożonych i wielkogabarytowych konstrukcji cienkościennych. Większość oferowanych środowisk graficznych umożliwia zamodelowanie struktury przestrzennej obiektu i przeprowadzenie badań symulacyjnych obejmujących np.: analizę wytrzymałościową i statyczną, obliczenia drgań własnych i wymuszonych. Moduł obliczeniowy w tego typu programach bazuje na metodzie elementów skończonych. W pracy zamieszczono przykładową ścieżkę projektową i analizę pokładu okrętu typu RO-RO, na którym zaparkował samochód ciężarowy. W przedstawionym przykładzie wykorzystano oprogramowanie firmy MSC z preprocesorem Patran i modułem obliczeniowym Nastran.

Słowa kluczowe: projektowanie, metoda elementów skończonych, symulacja, Patran, Nastran, konstrukcje wielkogabarytowe, konstrukcje złożone.

1. WSTĘP

W przypadku pewnych kierunków studiów technicznych nie ma fizycznej możliwości realizacji, następnie przetestowania wykonywanych podczas zajęć złożonych projektów maszyn i urządzeń. Ze względu na koszty i specyfikę studiów na kierunku mechanicznym ważne jest wykorzystywanie podczas procesu dydaktycznego programów projektowych i symulacyjnych. Wykonywanie projektów jest tym obszarem edukacji na poziomie studiów wyższych podczas, którego bardzo ważne jest wykorzystywanie metod i technik dydaktycznych kształtujących u studentów umiejętności praktyczne i samodzielne rozwiązywanie postawionych przed nimi problemów. Techniki symulacyjne stosowane w dydaktyce uznawane są za jedno z najefektywniejszych narzędzi edukacyjnych. Korzystanie z nich jest w pełni uzasadnione ponieważ wymusza aktywne zaangażowanie studenta w zajęcia i realizację projektu, motywuje do nauki oraz uczy odpowiedzialności ponieważ w trakcie symulacji student musi podjąć decyzje, od których zależy zachowanie badanej symulacyjnie konstrukcji.

Projektowanie jest istotnym elementem kompetencji zawodowych inżynierów mechaników. Przykładowo, w programie studiów na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn realizowanym na Wydziale Mechanicznym Akademii Morskiej w Gdyni w Katedrze

Podstaw Techniki treści kształcenia z projektowania realizowane są na zajęciach: Podstawy Konstrukcji Maszyn + CAD I, II, III (na III, IV, V semestrach studiów). Program nauczania Podstaw Konstrukcji Maszyn zawiera treści związane z procesem projektowania i jego fazami, optymalizacją konstrukcji oraz komputerowym wspomaganie procesu projektowania (rysunkiem technicznym 2-D, modelowaniem 3-D, analizą obliczeniową metodą elementów skończonych).

2. PRZEGLĄD OPROGRAMOWANIA WSPOMAGAJĄCEGO PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI

Inżynierowie mechanicy mogą korzystać z szerokiego spektrum programów komputerowych umożliwiających modelowanie 3D, np.: Autodesk Inventor Professional [1], Autodesk Algor Simulation Solid Edge [1], Solid Works [2], Ansys [3], Abaqus [4], MSC Nastran [5]. Na rynku dostępne są również wielomodułowe systemy wspomagające projektowanie wykorzystujące jednocześnie moduły CAD (ang. *Computer Aided Design* – Komputerowo Wspomagane Projektowanie Wyrobów i Metod Wytwarzania)/CAM (ang. *Computer Aided Manufacturing Control* – Komputerowe Sterowanie Wytwarzania)/CAE (ang. *Computer Aided Engineering* – Komputerowo Wspomagane Konstruowanie). Ze względu na duże podobieństwo w funkcjonalnościach, które można wyróżnić dla tego typu oprogramowania, w tabeli 1 zestawione zostały wspólne ich zalety i wady.

Tabela 1. Zestawienie zalet i wad programów CAE [1, 2, 6]

Lp.	Zalety	Wady
1.	Łatwy import z innych programów CAD, z różnych formatów.	Znaczne wymagania sprzętowe do bardziej zaawansowanych obliczeń.
2.	Liczne narzędzia do obróbki i poprawy zamodelowanego modelu.	Wymagane doświadczenie do wykonywania modelu z odpowiednimi stopniami uproszczenia.

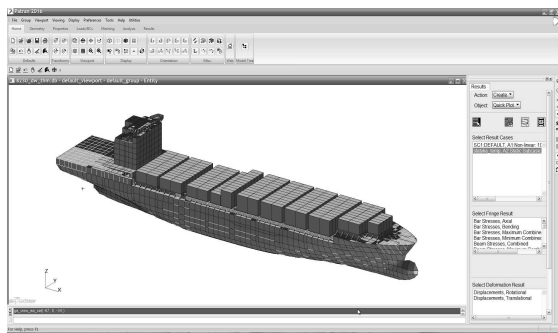
3.	Możliwość wygenerowania skomplikowanej geometrii w środowisku programu.	Wiedza z zakresu dynamiki konstrukcji i jej zachowania pod względem zadanych obciążeń.
4.	Proste i szybkie metody nakładania siatki na model.	Skomplikowany sposób dobierania odpowiednich warunków brzegowych.
5.	Kontrola siatki poprzez możliwość zagęszczenia w newralgicznych miejscach ilości elementów umożliwia otrzymanie dokładniejsze wyniki.	Bardziej skomplikowane analizy typu wyoboczenia czy analizy nieliniowe wymagają interpretacji wyników powiązanej z doświadczeniem badacza.
6.	Nadawanie bardzo dużej ilości stanów obciążeń.	Posiadanie ograniczonego zaufania do otrzymanych wyników.
7.	Łatwa modyfikacja nadanych obciążeń i możliwość łączenia ich ze sobą.	Czasochłonne szukanie błędów, po których nie możliwe jest uzyskanie wyników.
8.	Możliwość definiowania oddziaływań pomiędzy elementami poprzez elementy rigid i mass.	Czasochłonność wykonywania niektórych analiz przez dany solver.
9.	Wybór szerokiej gamy analiz.	
10.	Duże możliwości wizualizacji wyników poprzez kolorowe bitmapy oraz różnego rodzaju animacje deformacji lub zmiany naprężeń.	
11.	Łatwe przygotowanie raportu końcowego z obliczeń poprzez eksport uzyskanych bitmap oraz samych danych liczbowych do programu Matlab lub Excel, co umożliwia łatwą ich obróbkę.	
12.	Możliwość stworzenia szerokiej biblioteki materiałów oraz znormalizowanych elementów konstrukcji poprzez pliki z formatem esp.	

Różnice pomiędzy oprogramowaniem CAE oferowanym przez poszczególnych producentów to: różne środowiska graficzne budowane na innych podstawach graficznych (tak zwane krenele – część budowana w oparciu o Parasolid lub część w oparciu o ACIS), różnica w składni języka stosowanego do napisania danego solveru, różne metody stosowane do obliczeń, stosowanie różnych preprocesorów w celu przygotowania danych dla różnych solverów, duże rozbieżności w czasie uczenia się programu przez początkującego użytkownika, różnice w specjalizacji danego programu (czy lepiej radzi sobie z bryłami czy

z elementami powłokowymi), znaczne różnice cenowe pomiędzy solverami [6,7,11].

Programy do modelowania bryłowego 3D pozwalają na przedstawienie konstrukcji w taki sposób jak wygląda w rzeczywistości, czyli przestrzenie. Zaprojektowaną w ten sposób konstrukcję można obejrzeć z każdej strony. Po wykonaniu modelu bryłowego, wykorzystując odpowiednie funkcje, można wygenerować z modelu dokumentację płaską 2D. Wykonywanie nowoczesnego modelowania bryłowego 3D ma ogrom zalet i zapewne w krótkim okresie czasu doprowadzi do wykonywania projektowania 2D jedynie w takich dziedzinach techniki jak geodezja, kartografia, instalacje elektryczne, budownictwo [4, 5]. Programy do projektowania 3D konstrukcji mechanicznych pozwalają na modelowanie konstrukcji i przeprowadzanie badań symulacyjnych (analiz wytrzymałościowych, analizy naprężeń z obliczeniami numerycznymi i wizualizacją rezultatów doświadczenia). Programy tego typu określa się skrótem CAE. Pierwsze programy typu CAE początkowo traktowane były jako innowacyjne ciekawostki, a nie efektywne i wydajne programy wspomagające pracę inżyniera. Natomiast wraz z ewolucyjnym rozwojem i wprowadzaniem do przedsiębiorstw produkcyjnych oprogramowania typu CAE doprowadzają obecnie wręcz do całkowitego odejścia od tak zwanych tradycyjnych metod projektowania. Projektowanie w programach typu CAE ma ogrom zalet. Najistotniejsze z nich to: skrócenie czasu projektowania, skrócenie procesu wdrażania nowych konstrukcji, zmniejszenie kosztów projektowania, zmniejszenie liczby wykonywania modeli prototypowych, możliwość sprawdzenia konstrukcji wirtualnie (przed jej wyprodukowaniem). Przykładem takiego rodzaju oprogramowania jest system CATIA [3].

Tryb dydaktyczny prowadzenia zajęć projektowych z przedmiotu Podstawy Konstrukcji Maszyn na Wydziale Mechanicznym Akademii Morskiej w Gdyni przewiduje przeanalizowanie właściwości wytrzymałościowych konstrukcji mechanicznej za pomocą pakietu programów MSC Bundle, w skład których wchodzi preprocesor Patran i program obliczeniowy Nastran. Oprogramowanie firmy MSC Software stosuje się w pracy inżynierskiej oraz podczas dydaktyki do: obliczeń metodą elementów skończonych w zakresie statyki (liniowej i nieliniowej), wyoboczeń, analizy drgań własnych, analizy drgań wymuszonych, przewodnictwa cieplnego, analizy wytrzymałości kompozytów, analiz osiowo – symetrycznych, akustyki, zjawisk aerostaticznych itp. Omawiane oprogramowanie pozwala również na optymalizację topologiczną oraz topograficzną. Umożliwia zastosowanie opisów materiałów liniowych, biliniowych, ortotropowych, anizotropowych i hiperelastycznych. Program MSC Nastran pozwala na wprowadzanie więzów kinematycznych oraz umożliwia obliczenia ze zastosowaniem napięcia wstępnego, kontaktu powierzchni ślizgowych i innych. MSC Nastran opiera się na pracy wykonywanej przez naukowców z NASA i jest używany do projektowania systemów o znaczeniu krytycznym w każdej branży. Znaczny procent konstrukcji takich jak statek, samolot, pojazd zaprojektowanych w ciągu ostatnich lat został podany analizie przy użyciu MSC Nastran. Wykonywanie symulacji konstrukcji mechanicznej w programie MSC Nastran nie wymaga znajomości szczegółowego opisu matematycznego przez użytkownika systemu.



Rys. 1. Model statku typu RO-RO

Doświadczeni projektanci uważają to za zaletę ale niekiedy jest to też ich wadą. Bez wątpienia, jako zaletę tego rozwiązania można uznać uproszczenie tworzenia modelu obliczeniowego. Jako wadę natomiast ograniczoną możliwość badania zjawiska, które nie zostało uwzględnione w bibliotekach narzędziowych. Walorem analizy wytrzymałościowej konstrukcji mechanicznej z wykorzystaniem MSC Nastran jest bogata grafika prezentacyjna zjawiska.

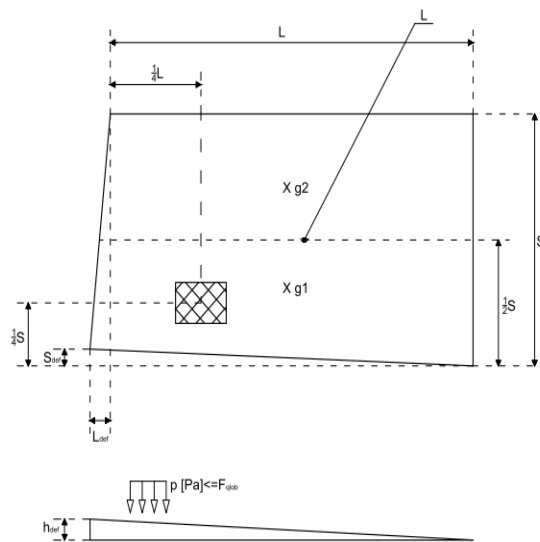
3. METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH W OPROGRAMOWANIU INŻYNIERSKIM

Metoda elementów skończonych MES jest współcześnie najbardziej rozpowszechnioną metodą komputerową wykorzystywaną do numerycznej analizy wytrzymałościowej konstrukcji. Założeniem tej metody jest zastąpienie ciągłego modelu układu mechanicznego (opisanego zwykle w postaci układu równań różniczkowych) modelem dyskretnym o prostym opisie matematycznym (układem równań algebraicznych). Model dyskretny w metodzie MES powstaje poprzez podział ciągłego analizowanego detalu na skończoną liczbę elementów o podobnym kształcie topologicznym. Elementy te określa się w przestrzeni dzięki węzłom konstrukcyjnym, w których zadane jest obciążenie konstrukcji czyli parametry węzłowe (na przykład: siły, przemieszczenia, temperatura). Bardzo ważnym zadaniem węzłów jest również łączenie sąsiednich elementów co gwarantuje ciągłość całej konstrukcji. Kolejnym etapem metody MES jest określenie funkcji kształtu (interpolacyjnej), która ma zagwarantować ciągłość poszukiwanej funkcji wewnątrz detalu. Funkcje te są takie same dla danego rodzaju elementu [1]. Dla analizowanej konstrukcji, łącznie z warunkami brzegowymi, budują układ równań algebraicznych. Wynikiem ich rozwiązania jest określenie poszukiwanej funkcji w skończonej liczbie węzłów konstrukcji. Następnie, obliczenie tej funkcji w węzłach pozwala otrzymać przybliżone rozwiązanie dla całej konstrukcji mechanicznej. Efektem końcowym w metodzie MES jest graficzna prezentacja wygenerowanych wyników. Analiza wytrzymałościowa konstrukcji mechanicznej metodą MES pozwala na symulacyjne określenie rozkładu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w określonych jej warunkach pracy. Obliczenia wytrzymałościowe metodą MES można wykonywać dla pojedynczego zespołu jak również dla całej konstrukcji przez ściśle określenie kontaktu pomiędzy elementami. Analiza wytrzymałościowa metodą MES składa się z następujących po sobie faz: wybór modelu obliczeniowego, nałożenia warunków brzegowych na model elementu, określenia stanu obciążeń, podziału na elementy skończone, obliczeń, wizualizacji [2]. Upowszechnienie

MES nastąpiło w latach 80 XX wieku co spowodowane było zdecydowanie większym dostępem inżynierów do komputerów osobistych (PC) oraz doskonaleniem się grafiki komputerowej. Współcześnie MES jest wyodrębnioną dziedziną naukową i dydaktyczną na uczelniach technicznych.

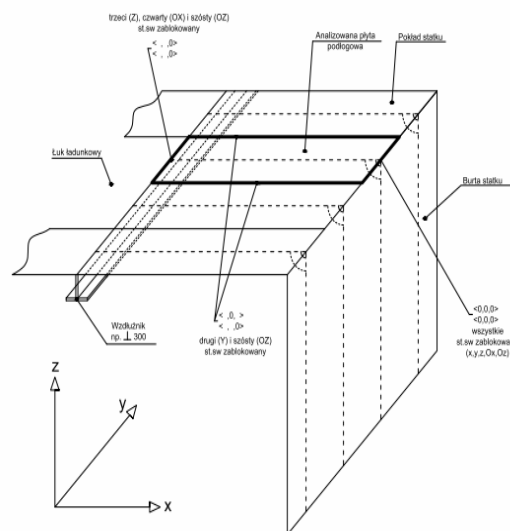
4. BADANIE SYMULACYJNE PŁYTY POKŁADU

W celu zaprezentowania możliwości projektowych i obliczeniowych programu Patran-Nastran przedstawiony został przykład, w którym zasymulowana została płyta pokładu statku typu RO-RO (rys. 1) obciążona lokalnym ciśnieniem poprzecznym do powierzchni. Uwzględniono dodatkowo imperfekcję montażową płyty pokładu określoną na rysunku 2 oznaczeniami S_{def} oraz h_{def} . Następnie zostały wykonane obliczenia wytrzymałości statycznej oraz drgania własne i wymuszone. Obciążenie zostało zamodelowane kołami samochodu ciężarowego, który zaparkował w dowolnym miejscu na pokładzie. Model płyty oraz przyjęte do obliczeń warunki brzegowe przedstawione zostały na rysunkach 2 i 3.



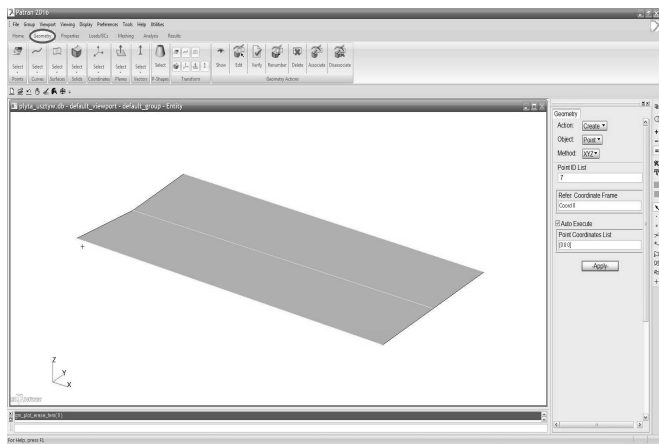
Rys. 2. Model usztywnionej płyty pokładu

Na rysunku 2 została również naniesiona analizowana pozycja samochodu.



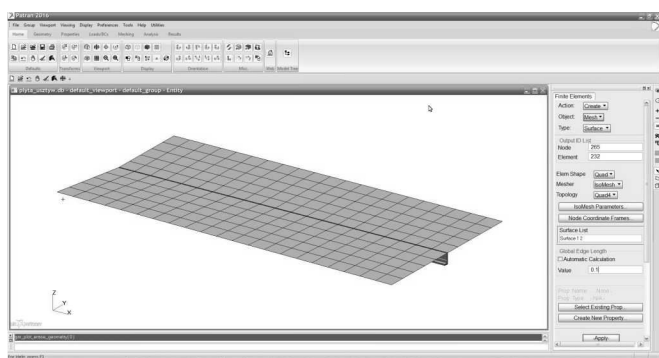
Rys. 3. Model usztywnionej płyty pokładu

Założono, że obiekt jest nieruchomy względem pokładu statku. Rozpoczynając prace projektowe i obliczeniowe w programie MSC Nastran należy zacząć od określenia geometrii modelowanej konstrukcji mechanicznej i jej właściwości materiałowych. Można tę czynność wykonać korzystając z zakładki *Geometry* (rys. 4).

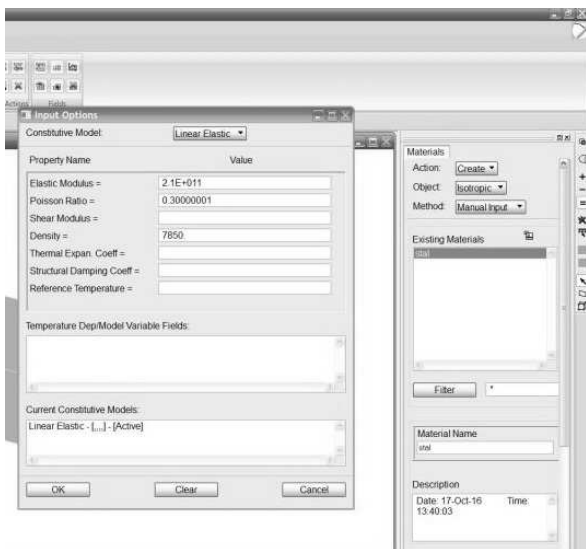


Rys. 4. Ustawianie geometrii modelu

Dla narysowanej geometrii obiektu ważne jest również dobranie właściwej siatki, a w szczególności jej gęstości. Podział modelu (*geometrii*) na elementy skończone przeprowadza się korzystając z zakładki *Meshing* (rys. 5).



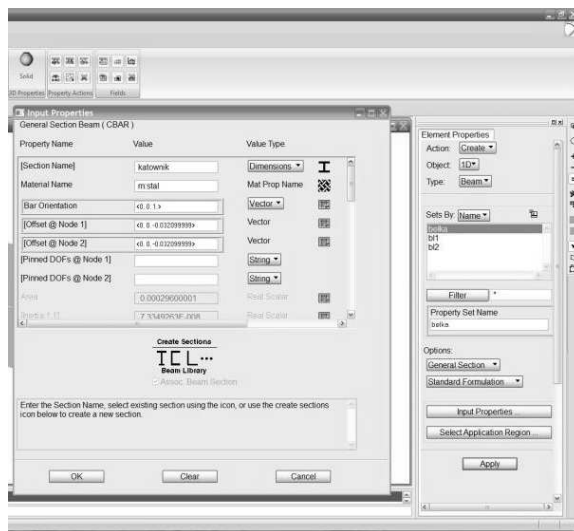
Rys. 5. Ustawienie siatki i jej parametrów



Rys. 6. Definiowanie danych materiałowych

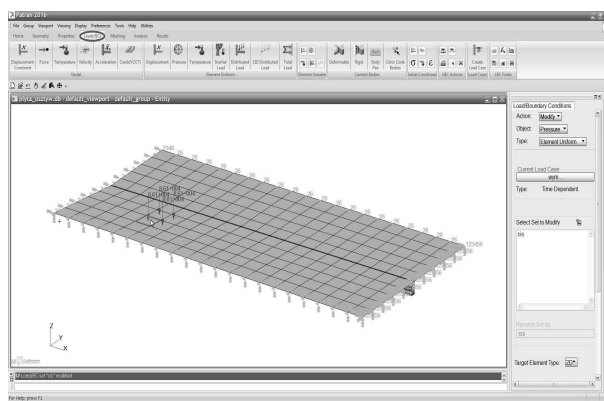
Właściwości materiałowe i elementów konstrukcji zadaje się w zakładce *Property* (rys. 6 i 7). Z poziomu okna dialogowego *Property* należy ustawić dane materiału, takie jak: moduł Younga, liczbę Poissona czy masę właściwą materiału (rys. 6).

W kolejnej zakładce okna *Property* ustawia się właściwości płyt i belek, takie jak: grubość płyty, pole przekroju belki czy momenty bezwładności (rys. 7).



Rys. 7. Definiowanie właściwości płyt i belek

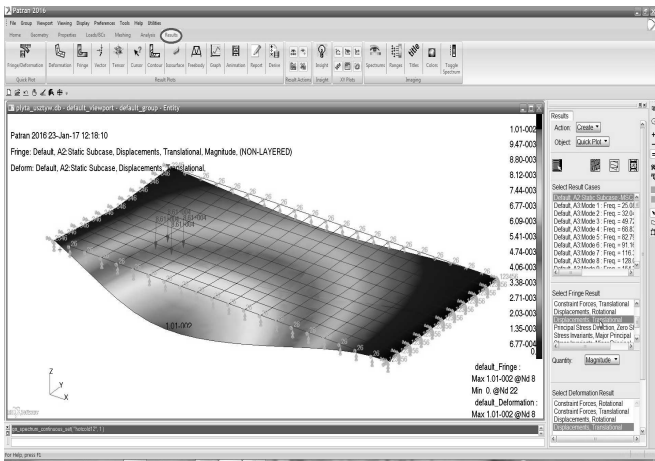
Do poprawnego wykonania obliczeń w prezentowanym przykładzie niezbędne jest zdefiniowanie warunków brzegowych, tak jak przedstawiono to na rysunku 8. Warunki brzegowe oraz zadawanie obciążeń w programie MSC Nastran wprowadza się korzystając z zakładki *Loads/BCs* (rys. 8). Właściwości, warunki brzegowe i obciążenia mogą być przypisane albo do geometrii modelu albo bezpośrednio do elementów skończonych.



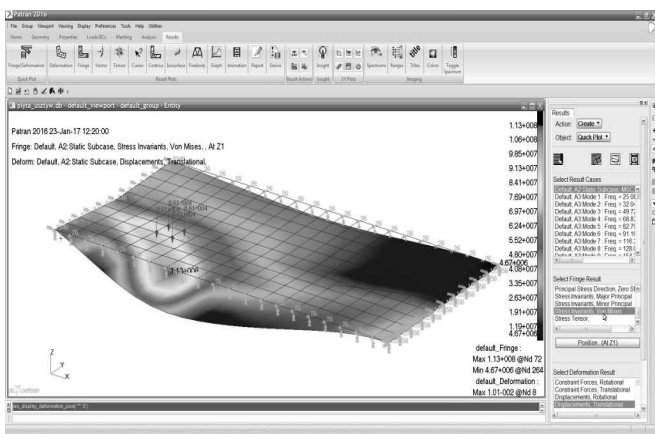
Rys. 8. Ustawienia warunków brzegowych i zadanie obciążeń

Jednymi z ważniejszych zakładek programu Nastran, które warto znać to *Home* i *Analysis*. Zakładka *Home* wykorzystywana jest głównie do zmian wizualizacji modelu. Zakładka *Analysis* służy do tworzenia tekstowego zbioru danych do programu obliczeniowego Nastran oraz do wczytywania wyników obliczeń uzyskanych z Nastrana. Opcja *Results* służy do wizualizacji wyników obliczeń na wygenerowanym modelu (rys. 9-11).

W wyniku statycznych obliczeń wytrzymałościowych (ang. *Static analysis*) uzyskano rozkład deformacji i naprężeń płyty (rys. 9). Można również wykonać obliczenia rozkładu naprężeń Von Mises'a (rys. 10).

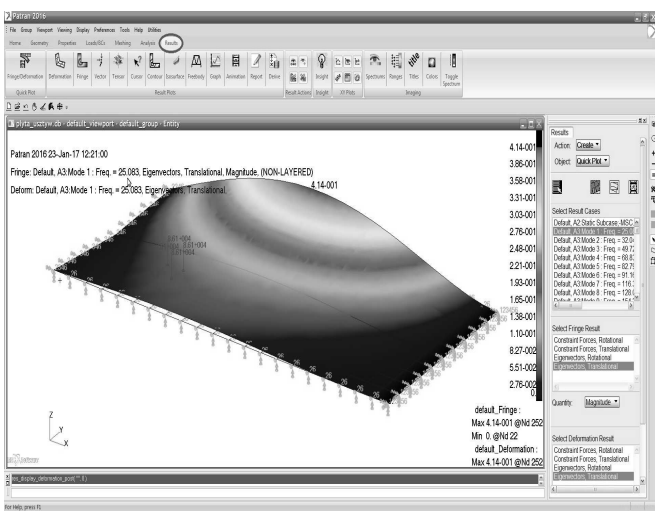


Rys. 9. Rozkład deformacji od obciążenia statycznego



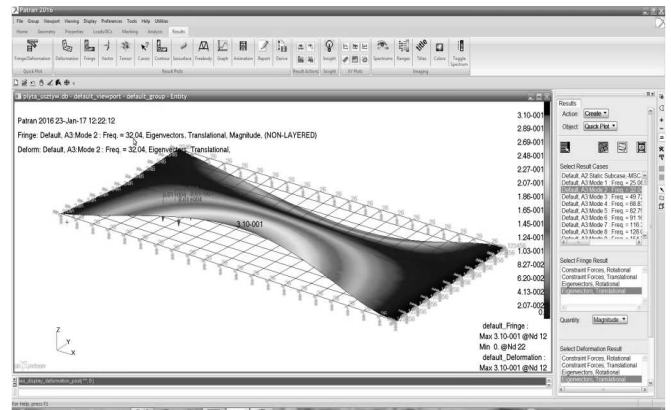
Rys. 10. Rozkład naprężeń Von Mises'a

Przykładowe wyniki obliczeń drgań własnych (ang. *Normal modes*) dla pierwszej (25,1 Hz) i drugiej (32,0 Hz) postaci zostały zaprezentowane na rysunkach 11 i 12.



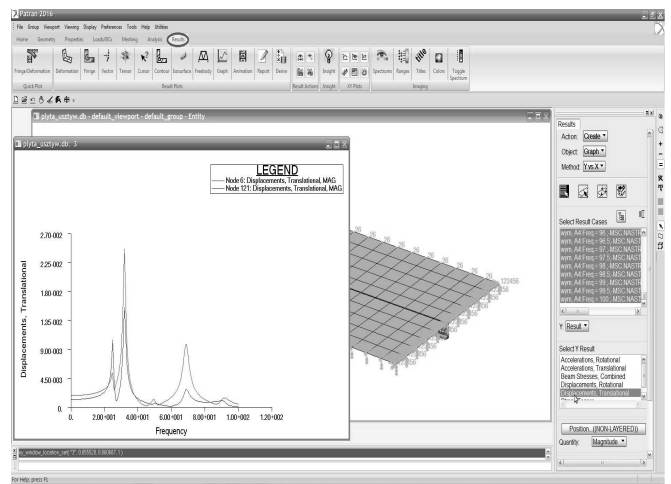
Rys. 11. Pierwsza postać drgań własnych dla 25,1 Hz

Program pozwala na obliczenie i wyrysowanie krzywych rezonansowych drgań wymuszonych (ang. *Frequency response analysis*) dla wybranych punktów. Przykładowo, krzywa rezonansowa (amplituda drgań w funkcji częstotliwości wymuszeń) zaprezentowana na rysunku 13 powstała w dwóch punktach.



Rys. 12. Druga postać drgań własnych dla 32 Hz

Krzywe rezonansowe z rysunku 13 obliczone zostały dla krawędzi płyty przy obciążeniu i dla środka belki (kątownika) dla odkształcenia usztywniającego.



Rys. 13. Krzywe rezonansowe (drgania wymuszone) dla kilku punktów

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Zdobycie przez inżynierów mechaników umiejętności posługiwania się programami komputerowymi w procesie projektowania konstrukcji wielkogabarytowych skutkuje znacznym skróceniem czasu opracowywania projektu, zmniejszeniem kosztów wykonywania projektu, zwiększeniem dokładności realizacji założeń konstrukcyjnych oraz możliwością przetestowania powstałej wirtualnie konstrukcji. Metoda elementów skończonych charakteryzuje się dużym stopniem skomplikowania, dlatego jej implementacja przez młodego inżyniera byłaby trudnym zadaniem. Natomiast korzystanie z niej za pośrednictwem zwartego środowiska, w którym wystarczy opanować znajomość interfejsu, jest dużym ułatwieniem.

Podczas generowania i identyfikacji potrzeb konstrukcji mechanicznej inżynier korzystający z zaawansowanego programu projektowego ogranicza do niezbędnego minimum liczbę eksperymentów i prototypów tworzonego zespołu.

Pomimo bogatej gamy programów projektowych oferowanych na rynku przez różne firmy, w każdym z nich wykorzystywane są podobne funkcje i narzędzia graficzne, z których korzysta się podczas wykonywania konstrukcji bryłowych. Większe zróżnicowanie dostrzega się natomiast na poziomie modułu obliczeniowego, który zazwyczaj

opiera się na metodzie elementów skończonych. Mimo, że jest to ta sama idea obliczeniowa, to metoda MES jest różnie implementowana w programach. To ten szczegół często decyduje, czy w danym programie projektowany obiekt będzie można przebadać symulacyjnie, czy też będzie to niemożliwe. W szczególności problemy obliczeniowe generują obiekty złożone i wielkogabarytowe, takie jak statki, samoloty czy mosty. Wymagają one od programu generowania skomplikowanej siatki przestrzennej i zdefiniowania zmiennych oraz nieliniowych warunków brzegowych.

Oprogramowanie firmy MSC Software charakteryzuje się bardzo wysokim zaawansowaniem zaimplementowanej metody elementów skończonych. Ich wiarygodność jest na tyle wysoka, że nie podlega weryfikacji przez instytucje zatwierdzające analizy (np. okrętowe towarzystwa klasyfikacyjne). Są one zaliczane do nielicznej czołówki światowych programów (obok Ansys, Adina, Abakus, SAP2000), których przyczyną powstania była realizacja przez NASA programu lotów na księżyc Apollo. Praktycznie każde zadanie inżynierskie jest możliwe do analizy za pomocą w/w oprogramowania. Wadą tego typu programów jest ich komplikacja. Inżynier - obliczeniowiec musi mieć dużą wiedzę teoretyczną i doświadczenie w użytkowaniu tego oprogramowania. Celem zajęć prowadzonych w Akademii Morskiej jest przygotowanie przyszłych odbiorców (a nie wykonawców) analiz obliczeniowych.

6. BIBLIOGRAFIA

1. www.autodesk.com – poradnik do programu, czas odczytu 02.2017r.
2. www.solidworks.com – poradnik do programu, czas odczytu 02.2017r.
3. www.ansys.com – poradnik do programu, czas odczytu 02.2017r.
4. www.simuleon.com/simulia-abaqus/ – poradnik do programu, czas odczytu 02.2017r.
5. www.mscsoftware.com/product/msc-nastran - poradnik do programu, czas odczytu 02.2017r.
6. Król K.: Metoda elementów skończonych w obliczeniach konstrukcji, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2006, s. 220 - 226
7. Szturomski B.: Podstawy metody elementów skończonych, Wydawnictwo Akademickie AMW, ISBN 978-83-60278-5, Gdynia 2011
8. Gendarz P., Salamon S., Chwastyk P.: Projektowanie inżynierskie i grafika inżynierska, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2014
9. Zalewski M., Szymańczak M., Kubiak P.: Podstawy konstrukcji maszyn z elementami BHP, Wydawnictwo Nowa Era, Warszawa 2015
10. Boś P., Sitarz S.: Podstawy konstrukcji maszyn część I, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2013
11. Labocha S., Skotny Ł.: Liniowa i nieliniowa analiza MES, Seria wydawnicza CAX dla praktyków, Wrocław 2014

THE APPLICATION OF FINITE ELEMENT METHOD SOFTWARE TO THE TEACHING OF DESIGNING OF COMPLEX AND LARGE-SCALE THIN-WALLED STRUCTURES

In the paper the software to the teaching of designing of complex and large-scale thin-walled structures was evaluated by the authors. The bundle of MSC software, named Patran-Nastran, was presented. The software is based on Finite Element Method. The authors, during the teaching process, focus on basic analyses: linear static strength analysis, normal mode (eigenvectors) analysis and frequency response analysis (forced vibrations calculations). An example of RO-RO ship's deck analysis was presented. The deck was loaded with the wheels of truck. A short description of the modeling process as well as the results of the analyses are presented in the paper. Discussion about objectives of the teaching process was carried out. In the authors' opinion, knowledge of that very specialized software is important not only for a calculating engineer. All mechanical engineers should have basic knowledge about the calculations process because they will be recipients of the calculations performed during structure designing. Thin-walled structures are very useful for teaching because during the structure modeling we have to choose types of FEM elements. Stiffeners may be modeled by 1-D elements (with offset) and the plates should be modeled by 2D elements. Differences between beam and rod 1D elements as well as shell, plate and membrane 2D elements should be stressed during the teaching process

Keywords: engineering design, finite element method, computer simulation, Patran, Nastran. large-scale structures, thin-walled structures.