

Przedmowa

Oprogramowanie inżynierskie dedykowane konstruktorom (w skrócie taką grupę oprogramowania określamy CAE¹, patrz rozdział 1) ciągle się rozwija i proponuje coraz większy stopień automatyzacji obliczeń i wymiarowania, por. [34]. Programy przeznaczone do projektowania wybranych rodzajów konstrukcji (np. hale stalowe) potrafią przeprowadzić cały proces projektowania przy minimalnej wiedzy i zaangażowaniu autora obliczeń. Warunkiem takiej procedury są oczywiście standardowe rozwiązania proponowane przez program komputerowy.

Z drugiej strony używane są programy obliczeniowe, ogólnego zastosowania, gdzie proces automatyzacji ogranicza się np. tylko do obliczeń statycznych metodą elementów skończonych. Programy takie, najpopularniejsze wśród konstruktorów, także proponują wiele narzędzi z zakresu automatyzacji poszczególnych etapów obliczeń, ale też wymagają pewnej wiedzy z zakresu stosowania metody elementów skończonych.

Użytkownicy często zafascynowani możliwościami systemów obliczeniowych generują skomplikowane układy obliczeniowe, pozornie dążąc do dokładnych obliczeń. W wielu przypadkach przejście od modelu 3D do modelu obliczeniowego obarczone jest tak wieloma błędami, że uzasadnienie takiego postępowania dokładniejszymi rezultatami obliczeń wydaje być wątpliwe.

Łatwość otrzymywania modeli obliczeniowych złożonych konstrukcji budowlanych zachęca konstruktorów do sięgania do skomplikowanych modeli, gdzie wyniki są trudno weryfikowalne prostymi metodami. Wraz ze wzrostem popularności systemów CAD² i BIM³, por. [19, 23, 27, 38, 44], wzra-

¹CAE – ang. *Computer Aided Engineering*

²CAD – ang. *Computer Aided Design*

³BIM – ang. *Building Information Modeling*

sta liczba projektów przygotowanych w 3D, z których dość szybko używamy złożone modele obliczeniowe powłokowo-prętowe. Z doświadczeń autorów niniejszej książki wynika, że modele takie, często bezrefleksyjnie, przyjmowane są jako najdoskonalsze (najdokładniejsze) w obliczeniach metodą elementów skończonych [5, 61, 64, 68]. Autorzy obliczeń, niekiedy bez odpowiedniej wiedzy z podstaw MES, ufają bez weryfikacji otrzymanym wynikom. Weryfikacja obliczeń złożonych konstrukcji jest skomplikowana i niechętnie przeprowadzana przez konstruktorów.

Do napisania niniejszej pracy skłoniła autorów coraz większa tendencja do wykonywania złożonych obliczeń przy słabej znajomości ograniczeń metody elementów skończonych i bez należytej weryfikacji. Tendencja ta jest widoczna zarówno w praktyce projektowej, jak i w programach nauczania uczelni technicznych.

Pracę nad książką zaczęliśmy od wykonania obliczeń dla wybranych konstrukcji, stosując różne modele obliczeniowe. Chcieliśmy pokazać konsekwencje modelowania rzeczywistych konstrukcji 3D modelami prętowymi, powłokowymi czy bryłowymi. Rozpoczynając pracę, założyliśmy wstępnie, że nie będziemy pisać o teorii metody elementów skończonych. Zrezygnowaliśmy z tego założenia, ponieważ szybko okazało się, że aby opisać konsekwencje przyjęcia wybranego modelu, trzeba odwołać się np. do opisu elementu skończonego. Założenia poczynione przy wyprowadzaniu elementu skończonego są istotne dla oceny wiarygodności wyników.

Szybko więc odpowiedzieliśmy na pytanie – czy znajomość MES-u jest niezbędna do prowadzenia komputerowych obliczeń inżynierskich? Tak – jest niezbędna. Problemem jest „tylko”, co to znaczy „znajomość MES-u”. Zdaniem autorów znajomość MES-u przez konstruktorów może być dość powierzchowna w zakresie podstaw teoretycznych, ale pełna w zakresie wykorzystywanych elementów skończonych⁴. Wiedza związana z metodą elementów skończonych zależy również od rodzaju wykonywanych analiz.

Niezbędna jest umiejętność świadomego konstruowania modeli obliczeniowych. Nie jest do tego potrzebna znajomość zaawansowanej teorii MES-u, ale niezbędna jest wiedza z podstaw metody w zakresie niezbędnych do zrozumienia zasad stosowania poszczególnych elementów skończonych oraz wiedza z zakresu oceny wiarygodności obliczeń.

Przykładowo, jeśli konstruktor analizuje płytę średniej grubości i wykorzystuje płytowy element skończony, nie musi znać wyprowadzenia równań opisujących ten element, ale powinien znać ogólne zasady stosowania takie-

⁴Rozważania ograniczamy tylko do statycznej analizy liniowej. W przypadku zadań nieliniowych i dynamiki musimy wybierać różne algorytmy numeryczne oraz modele geometryczne i fizyczne.

go elementu (w tym warunki stosowalności teorii płyt średniej grubości), a szczególnie warunki (i ścieżkę) zbieżności (patrz rysunek 2.13).

W miarę prac nad przykładami powiększaliśmy rozdział o podstawach metody elementów skończonych. Poszukiwaliśmy sposobu, by jak najprościej opisać teorię MES dla użytkowników programów obliczeniowych. Uważamy, że dobry system obliczeniowy dla konstruktorów musi dostarczać użytkownikom tzw. „podręcznik teorii”. Pewnym wyjątkiem są systemy obliczeniowe dedykowane tylko konstrukcjom prętowym w zakresie liniowym. Tutaj podręcznik teorii może być odwołaniem do popularnych podręczników z mechaniki budowli w ujęciu komputerowym.

Propagujemy podejście, w którym poziom znajomości MES-u powinien zagwarantować użytkownikowi umiejętność poprawnego zbudowania modelu obliczeniowego (stopnie swobody w węzle, znakowanie sił, układy współrzędnych, elementy skończone – wykorzystane teorie, znakowanie, informacje o zbieżności, ...) oraz interpretacji wyników. Bardzo ważna jest wiedza z zakresu sposobów aproksymacji wyników w postprocesorze, a także weryfikacji, walidacji i ewentualnie kalibracji modeli. Użytkownik systemu powinien potrafić ocenić, na ile wiarygodne są obliczenia, oszacować błąd.

Jeszcze 30–40 lat temu najbardziej czasochłonnym etapem analizy konstrukcji były obliczenia arytmetyczne. Obecnie najbardziej czasochłonnym i najtrudniejszym etapem jest przygotowanie odpowiedniego modelu obliczeniowego generującego wiarygodne, weryfikowalne wyniki.

Wśród wykładowców MES-u popularne jest powiedzenie: *Analiza metodą elementów skończonych czyni z dobrego inżyniera wielkiego, ale ze słabego inżyniera – niebezpiecznego*.⁵

Obliczenia komputerowe stały się standardem w pracy konstruktora. Warto jednak pamiętać o starym powiedzeniu doświadczonych konstruktorów: „należy dobrze rozumieć *pracę* konstrukcji”.

W prezentowanych przykładach obliczenia wykonywaliśmy, korzystając z następujących programów obliczeniowych: Abaqus [65], ARSAP [71], FEAS [22].

Od kilku lat wyraźny staje się trend modelowania wybranych fragmentów konstrukcji bryłami (trójosiowy stan naprężenia). Zjawisko takie widzimy w oprogramowaniu przeznaczonym np. do projektowania połączeń konstrukcji stalowych. Modelowanie bryłowe znacznie upraszcza problemy modelowania, np. współosiowość elementów. Bariery w upowszechnieniu modelowania bryłowego jest oczywiście liczba niewiadomych w modelu obliczeniowym. Bariery ta znika w miarę rozwoju sprzętu komputerowego.

⁵Autorem cytatu jest Robert D. Cook, profesor Uniwersytetu Wisconsin

Celem niniejszej pracy jest pokazanie możliwości modelowania konstrukcji, skutków modelowania i możliwie najprostszego przedstawienia teorii MES umożliwiającego odpowiedzialne prowadzenie obliczeń i ich weryfikację. W rozdziale 5 próbowaliśmy sformułować standardy obliczeń inżynierskich wspomaganych komputerem. Mamy świadomość, że zamieszczone w tym rozdziale informacje są zaledwie przyczynkiem do tego ważnego elementu pracy inżyniera.

Książka dedykowana jest konstruktorom budowlanym, studentom kierunku budownictwo, uczestnikom kursów użytkowników programów wspomagających i automatyzujących projektowanie konstrukcji.