Obliczenia inżynierskie i symulacja numeryczna

Wstęp

Wykonywanie obliczeń inżynierskich jest rutyną pracy inżyniera. Każdy wymiar części powinien być albo daną projektową, albo wynikiem założeń projektowych (tzw. zmienne swobodne), albo wynikać z obliczeń przeprowadzonych pod kątem wytrzymałości, optymalizacji masy lub innego kryterium adekwatnego do funkcji, jaką dana część pełni. Obliczenia te mogą być przeprowadzane przez specjalizowane oprogramowanie lub przez uniwersalne programy obliczeniowe jak np. Excel.

W programie SE zaprojektowana część lub zespół może być poddana analizie numerycznej pod kątem wytrzymałości (lub innych w zależności od zainstalowanych modułów np. przepływu ciepła). Program w ramach obliczeń zasymuluje zadane obciążenie i więzy i zaprezentuje wyniki analizy w graficznej formie pokazujące stan odkształceń oraz naprężeń w projektowanym elemencie.

Kontrolowanie modelu z plików zewnętrznych

Program SE współpracuje z dokumentami pakietu MS Office, a konkretnie z arkuszami kalkulacyjnymi typu xls, xlsm oraz dokumentami tekstowymi typu doc, docx, docm. Współpraca polega na możliwości skojarzenia danych zawartych we wspomnianych plikach z danymi zawartymi w plikach par, asm i dft. Dzięki temu można przy pomocy Excela wykonać obliczenia inżynierskie, a uzyskane wyniki użyć w modelu. Skojarzenie odbywa się za pośrednictwem zmiennych SE, których wartości są pobierane bezpośrednio z komórki arkusza kalkulacyjnego lub z dokumentu tekstowego. Dane z dokumentów MS Office są nadrzędne w stosunku do zmiennych SE, a skojarzenie blokuje możliwość zmiany jej wartości z poziomu SE. Wartości te da się zmieniać tylko z poziomu dokumentów MS Office, a to powoduje automatyczną aktualizację wyglądu części.

W programie SE cześć zmiennych jest tworzona automatycznie, po wykonaniu jakiejś operacji. Zmienne te określają parametry jej wykonania, np. głębokości wyciągnięć, promienie zaokrągleń, itp. Pierwszą częścią ich nazwy jest, widziana w PF, etykieta operacji, a drugą nazwa parametru. Na przykład *Wyciągnięcie_1_*GłębokośćSkończ oznacza głębokość wyciągnięcia operacji **Przeciągnij**, która jest oznaczona w PF etykietą *Wyciągnięcie 1* (spacje w etykiecie są zamieniane w nazwie zmiennej na znaki "_"). Osobną grupą zmiennych są zmienne wprowadzane więzami wymiarowymi, stąd oczywistym jest, że konieczne jest zwymiarowanie tych elementów, które mają być sterowane z dokumentu MS Office. Zmienne te mają standardowe nazwy *Vnr (nr –* nr nadawany automatycznie) np. V121, dlatego warto im nadać nazwy korespondujące z ich znaczeniem fizycznym.

Aby możliwe¹ było powiązanie między dokumentami SE a MS Office, konieczne jest zapisanie ich na dysku. Powiązanie zmiennej z dokumentem MS Office odbywa się następująco.

- 1. Zamarkować komórkę arkusza Excela lub odpowiednią liczbę w dokumencie Worda i skopiować ją do schowka (polecenie **Kopiuj** lub CTRL–C).
- 2. W SE otworzyć edytor zmiennych poleceniem Narzędzia | Zmienne → Zmienne.
- 3. W tabeli zmiennych w kolumnie **Formuła** kliknąć na pozycji odpowiadającej danej zmiennej i z menu kursora wywołać polecenie **Wklej łącze**.

Wynikiem wykonanych czynności jest wpisane do formuły łącze, wiążące zmienną z komórką Excela lub liczbą w dokumencie Worda. Przykładowe wpisy pokazane są na rys.1. Ramką prostokątną oznaczono zmienne utworzone automatycznie podczas wykonania

 $^{^1}$ Do powiązania zmiennych z arkuszem kalkulacyjnym konieczne jest włączenie opcji Pozwól na powiązania między częściami (Inter-Part) za pomocą \rightarrow Wstawiania łącz w Tabeli zmiennych dostępnej w opcjach SE na karcie Inter-Part.

operacji **Przeciągnij**. Ramką owalną pokazano wstawione łącza do pliku dokumentu zewnętrznego. Strzałkami zaznaczono zmienne wprowadzone przez zwymiarowanie szkicu profilu, którym nadano nazwy a i b.

Punkt ostatni można zrealizować też za pomocą polecenia **Edytor reguł zmiennej**, po zaznaczeniu dowolnej komórki wiersza odpowiadającego danej zmiennej. Polecenie to otworzy (rys.**1**.) okno Edytor reguł zmiennej, w którym, po włączeniu opcji Wartość bazuje na, można przyciskiem (1) wkleić łącze do pola (2).

⚠ Po utworzeniu powiązania nie należy zmieniać ani nazwy pliku Excela, ani jego położenia, ani nazw arkuszy, z którymi skojarzono zmienne.

Zasadniczo lepszym rozwiązaniem jest stosowanie powiązań z dokumentami Excela, a nie Worda. Wklejanie łącza z pliku tekstowego, wiąże się z kłopotami jakie się pojawią po zmianie napisu reprezentującego liczbę – łatwo dochodzi do zerwania powiązania, o czym SE nie informuje. Poza tym Excel lepiej nadaje się do wykonywania obliczeń projektowych niż Word.



Rys. 1. Góra – wklejone łącza do komórek Excela w pola Formuł, dół okno do tworzenia powiązania z dokumentem zewnętrznym

Możliwe jest też połączenie odwrotne, polegające na skojarzeniu komórki Excela ze zmienną w SE – zmienna SE jest wówczas nadrzędna. To może być przydatne do pobrania potrzebnych przy projektowaniu danych obliczonych przez SE, np. masy obiektu lub wymiarów PMI. Aby to zrobić należy:

- 1. Poleceniem 🗹 Filtr wybrać zawartość tabeli np. dodać Właściwości fizyczne.
- 2. Ustawić kursor na wartości danej zmiennej w kolumnie Wartość.
- 3. Z menu kursora wybrać pozycje Kopiuj łącze.
- 4. Przejść do arkusza kalkulacyjnego i w odpowiedniej komórce wykonać polecenie **Wklej specjalnie** (z menu kursora lub z menu **Edycja**), z opcją **Wklej łącze**.

Po wklejeniu łącza do komórki zostanie wstawiony tekst składający się z: liczby, spacji i wymiaru np. dla masy **25,89 kg**. Aby użyć tego do dalszych obliczeń, trzeba wydzielić z komórki samą liczbę. Zakładając, że zawartość przykładowej komórki **C3** zawiera masę jw., to dla rozbicia jej na wartość liczbową i nazwę jednostki, w komórkach przeznaczanych na nie należy wpisać następujące formuły (między znakami " " jest pojedyncza spacja!):

Komórka na wartość :	= WARTOŚĆ(LEWY(C3 ;ZNAJDŹ(" "; C3)))	→ 25,89
Komórka na jednostkę:	= PRAWY(C3 ;DŁ(C3)-ZNAJDŹ(" "; C3))	\rightarrow kg

 \triangle Niektóre dane, a zwłaszcza właściwości fizyczne (np. masa), aby były prawidłowo wyświetlane w arkuszu Excela, po zmianie parametrów, od których one zależą, powinny w SE zostać zaktualizowane.

Skopiowane z tabeli zmiennych łącze, można wkleić (poleceniem **Wklej łącze**) także do kolumny **Formuła** w tabeli zmiennych innej części. Zatem hierarchia powiązań może mieć charakter skupiony na arkuszu Excela np.: Excel \rightarrow część_1, Excel \rightarrow część_2 itp. lub łańcuchowy np.: Excel \rightarrow część_1 \rightarrow część_2 \rightarrow itd. lub mieszany. Wybór należy do projektanta i w tym względzie należy kierować się wygodą, przejrzystością, a przede wszystkim zdrowym rozsądkiem.

Z dokumentu zewnętrznego można sterować nie tylko na wymiarami części, ale i także wykonaniem wybranych operacji. Do tego celu służy specjalna zmienna zwana zmienną blokowania, którą tworzy się poleceniem **Dodaj zmienną blokowania**, wydanemu z menu pod-ręcznego, po zaznaczeniu operacji w PF. W tabeli zmiennych pojawi się ona pod nazwą w postaci *Operacja_Blokuj*, gdzie *Operacja* jest etykietą operacji widzianą w PF, np. Faza_1_Blokuj jest zmienną blokującą operację o etykiecie Faza 1. Wartość zero zezwala na wykonanie operacji, a wartość niezerowa (zwykle 1) ją blokuje. Wartości tej zmiennej mogą albo być wpisane bezpośrednio do kolumny Formuła, albo być wynikiem obliczeń np. funkcji warunkowej **if** (..., ..., ...), albo być powiązane z komórką arkusza kalkulacyjnego, dzięki czemu można z niego sterować różnymi wariantami wykonania części. Zmienną blokowania usuwa się poleceniem **Usuń zmienną blokowania** z menu podręcznego. Nadanie zmiennej blokowania jakiejś wartości, ma taki sam skutek jak wykonanie polecenia **Blokuj/Odblokuj**. \triangle Ta zmienna jest dostępna w module Część, tylko dla operacji *wykonanej metodą sekwencyjną* oraz dla operacji i relacji w module Złożenie.

Analiza wytrzymałościowa

Każdy system mechaniczny, składający się z pewnego zbioru współpracujących ze sobą części, jest matematycznie opisany układem 15 równań różniczkowych cząstkowych, do których zalicza się: równania równowagi (3), związki fizyczne (prawo Hooke'a) (6) i związki geometryczne (6). Wymienione równania wiążą ze sobą 15 wielkości, na które składają się składowe wektora przesunięcia (3), tensora odkształcenia (6) i tensora naprężeń (6). Wielkości te są funkcjami określonymi w przestrzeni i opisują stan odkształcenia oraz naprężenia w obszarze części. Analiza wytrzymałościowa polega na określeniu tych funkcji dla zadanego kształtu części i sposobu jej obciążenia.

Trzeba podkreślić, że układ równań różniczkowych (r.r.) jest zawsze taki sam dla każdego systemu mechanicznego. To co odróżnia poszczególne przypadki, to kształty części, określające *dziedzinę* szukanych funkcji i sposoby ich obciążenia, które stanowią tzw. *warunki brzegowe*. Ta sama liczba niewiadomych i równań teoretycznie wystarczy do uzyskanie rozwiązania analitycznego. Problem polega na tym, że, poza niewielką grupą szczególnych przypadków, analityczne rozwiązanie układu r.r. jest niewykonalne. Podobnie sprawa ma się w przypadku innych analiz układów fizycznych, opisanych zbiorem równań różniczkowych, szczególnie cząstkowych, jak np. analiza przepływu ciepła, analiza przepływu płynu, symulacja obwodów elektrycznych itp.

Z kłopotu można wybrnąć stosując metody numeryczne zamiast metod analitycznych. Metody te polegają na przekształceniu małego, ale nierozwiązywalnego, układu równań różniczkowych na równoważny mu duży, ale dający się rozwiązać, układ równań algebraicznych. Innymi słowy, jest to zastąpienie układu ciągłego, o nieskończonej liczbie stopni swobody, układem dyskretnym, o skończonej liczbie stopni swobody. Cenę jaką się płaci za możliwość rozwiązania układu jest to, że uzyskane rozwiązanie jest przybliżone a szukane funkcje są w postaci dyskretnej (tabelarycznej). Podstawową cechą metod numerycznych jest dyskretyzacja obszaru dziedziny szukanych funkcji (czyli objętości zajmowanej przez część), polegająca na wybraniu w nim pewnej liczby punktów, tzw. *węzłów*, a następnie, na tej podstawie i na podstawie innych kryteriów, przekształcenia układu r.r. na układ równań algebraicznych, w którym niewiadomymi są wartości funkcji w wybranych węzłach. Dokładność rozwiązania wzrasta wraz z liczbą węzłów, ale zwiększenie dokładności jest okupione wydłużeniem czasu obliczeń, który w przypadku dużej liczby węzłów może być liczony w godzinach, a nawet w dobach, wszystko zależy od mocy obliczeniowej komputera. Dlatego w przypadkach szczególnie złożonych, jak np. przewidywanie pogody, do obliczeń stosuje się superkomputery.

Opracowano wiele sposobów zamiany układów r.r. na układy równań algebraicznych, które, w zależności od przyjętej koncepcji, doprowadziły do powstania metod numerycznych znanych pod nazwami: metoda różnic skończonych, metoda elementów skończonych, metoda elementów brzegowych, metoda objętości skończonych oraz metody bezsiatkowe.

Metoda elementów skończonych - MES

W systemach CAE² najpopularniejszą metodą stosowaną do analizy wytrzymałościowej jest *metoda elementów skończonych* MES (ang. FEM – *finite elements method*)³. Polega ona na interpolacji poszukiwanej funkcji, na zbiorze węzłów, które powstają w wyniku podziału jej dziedziny (dyskretyzacja) na tzw. *elementy skończone*. Elementy te są małymi wielościanami, o możliwie prostym kształcie. Najczęściej są to czworościany (ang. *tetrahedron*), w których węzły są lokowane w wierzchołkach, na krawędziach rys.2, a czasami we wnętrzu. Efektem podziału jest przestrzenna siatka, stanowiąca dyskretną reprezentację badanego obszaru.



Rys. 2. Czorościenny element z zaznaczonymi węzłąmi i przykładowa siatka będąca efektem dyskretyczji obiektu.

Interpolacji w obrębie elementu dokonuje się za pomocą prostych funkcji bazowych tzw. *funkcji kształtu*, będących wielomianami możliwie niskiego stopnia. Zamiana układu r.r. na układ równań algebraicznych, jest oparta o koncepcję minimalizacji funkcjonału dobranego do danego równania różniczkowego. Wielkościami podlegającymi wyznaczeniu w MES są wartości szukanych funkcji i jej pochodnych w węzłach podziałowych. Podstawową zaletą MES jest możliwość uzyskiwania rozwiązań dla obszarów o skomplikowanych kształtach i sposobach obciążeń.

Metoda elementów skończonych została zaimplementowana w postaci pakietów obliczeniowych, tzw. *solverach*, jak np. NASTRAN, ANSYS, COSMOS/M itp. Solvery te są używane przez oprogramowanie CAE takie jak: Catia, Creo (dawny Pro/ENGINEER), Inventor i Siemens NX, którego częścią jest Solid Edge. Solid Edge stosuje solver NX NASTRAN. Analiza układów fizycznych przy pomocy MES odbywa się standardowo w trzech etapach, realizowanych za pomocą przeznaczonych do tego modułów:

² CAE = *Computer Aided Engineering* – projektowanie wspomagane komputerowo.

³ Jednym z ojców MES jest Olgierd Cecyl Zienkiewicz brytyjski inżynier i matematyk polskiego pochodzenia.

- 1° Tworzenie modelu preprocesor.
- 2° Znalezienie rozwiązania solver.
- 3° Prezentacja wyników postprocesor.

Symulacja numeryczna części

Większość wymienionych kroków symulacji numerycznej⁴ jest realizowana w SE modułem *Solid Edge Simulation* dostępnym na karcie Symulacja, który zastąpił, stosowany w starszych wersjach SE, moduł *Simulation Express*. Polecenie **Simulation Express** jest dostępne na wstążce **Narzędzia | Środowiska**, ale nie można go używać do tworzenia nowych analiz, a jedynie do przeglądania wyników utworzonych starszymi wersjami. Analiza wytrzymałościowa pojedynczej części przebiega wg następującego scenariusza (w nawiasie etapy analizy MES):

- 1. Utworzenie modelu bryłowego części (1°)
- 2. Wybór materiału (1°)
- 3. Otworzenie nowej analizy
- 4. Zadanie obciążeń i utwierdzeń (1°)
- 5. Generowanie siatki (2°)
- 6. Obliczenia (2°)
- 7. Przeglądanie wyników (3°)

Krok 1 jest oczywisty i polega na wykonaniu modelu bryłowego dowolną metodą synchroniczną, sekwencyjną lub mieszaną.



Rys.3. Karta Symulacja i jej elementy – (a) stan początkowy, (b) po zakończeniu symulacji

Wszystkie elementy związane z analizą numeryczną, są dostępne w rozwijalnym panelu bocznym na karcie **■ Symulacja** umieszczonej (rys.3) w pionowym pasku, po lewej stronie okna aplikacji. Gdyby pozycja Symulacja nie była widoczna, to włącza się ją poleceniem **Widok | Pokaż → Okienka**. Przyciski **☑** sterują widocznością elementów w oknie graficznym. W danym modelu części lub złożenia można zrealizować wiele różnych analiz, a wszystkimi zarządza się z karty Symulacja.

 $^{{}^4\} https://docs.sw.siemens.com/pl-PL/doc/246738425/PL20200701135947994.sesim/aboutsesim1a$

Wybór materiału

Wybór materiału wykonuje się podwójnym kliknięciem na pozycji Materiał na karcie *PF*. W wyświetlonym oknie Tablica materiałów, należy wybrać jeden z dostępnych materiałów lub zdefiniować własny.

W lewej części okna jest lista zdefiniowanych materiałów. Lista ma strukturę hierarchiczną. Materiały pogrupowane są w biblioteki $\stackrel{{}_{\frown}}{=} \stackrel{{}_{\bullet}}{=} \cdots$, a potem dalej w grupy $\stackrel{{}_{\bullet}}{=} \stackrel{{}_{\bullet}}{=} \cdots$, podgrupy itd. aż do pojedynczych materiałów oznakowanych symbolem $\stackrel{{}_{\bullet}}{=} \cdots$. Zarządzanie i polecenia dotyczące tworzenia, usuwania zmiany nazw itp. są dostępne z menu podręcznego, wywołanego nad odpowiednią pozycją.

Do zdefiniowania własnego materiału należy użyć polecania **Nowy materiał**, z menu podręcznego wywołanego nad dowolną nazwą **P** arupy materiałów. Jeżeli nowy materiał jest wariantem już istniejącego, to lepiej jest skopiować, dane najbliższego odpowiednika istniejącego już w bibliotece (polecenie **Kopiuj** – menu podręczne wywołane nad daną pozycją), a następnie użyć polecenia **Wklej** wywołanego z menu podręcznego, po zaznaczeniu grupy docelowej. Na koniec wystarczy zmienić odpowiednie parametry i zapisać zmiany.

Zaznaczony w drzewie materiał przypisuje się do modelu przyciskiem Zastosuj do modelu. Materiał może być wybrany także po otworzeniu nowej analizy z listy Lista materiałów (panel Analiza) lub zlokalizowanym obok niej przyciskiem **E** Tablica materiałów.

Otworzenie nowej analizy

Do otwarcia nowej analizy służy polecenie **Nowa analiza**. Jeżeli jakieś analizy były już wykonane, to do przełączania między nimi służy **Lista analiz** w panelu **Analiza**. Po zainicjowaniu nowej analizy, w wyświetlonym oknie Utwórz analizę, należy wybrać jej typ, typ siatki oraz wielkości fizyczne, które mają być wyznaczone.

Typ analizy

Do dyspozycji są Statyka liniowa, Częstotliwość drgań oraz Wyboczenie w zakresie liniowym. W wersji pełnej (nie edukacyjnej) dostępne są też analizy typu Analiza cieplna (badania przepływu ciepła oraz powstawania naprężeń i odkształceń termicznych) i Analiza dynamiczna (uwzględniająca dodatkowe efekty np. tłumienie i sztywność, które ulegają zmianom w funkcji częstotliwości lub czasu).

Analiza **Statyka liniowa** jest podstawowym typem analizy i służy do obliczania przemieszczeń, odkształceń, naprężeń i sił reakcji powstających pod wpływem przyłożonych obciążeń. W tej analizie przyjmuje się, że wszystkie obciążenia są przykładane powoli do momentu osiągnięcia ich pełnych wielkości. Po osiągnięciu zadanych wielkości obciążenia pozostają potem niezmienne w czasie.

Analiza **Częstotliwość drgań** to modalna analiza częstotliwości, służąca do określenia postaci i częstotliwości drgań własnych. Używa się ją do wyszukania częstotliwości, przy których części lub złożenia swobodnie wibrują. Celem jest sprawdzenie, czy częstotliwości drgań własnych nie są zbliżone do częstotliwości roboczych wymaganych w danym projekcie. Jeśli część pracuje przy częstotliwości zbliżonej do częstotliwości drgań własnych (rezonansowej), to należy się spodziewać problemów z niezawodnością, ponieważ przyłożone obciążenia mogą być wzmocnione drganiami własnymi.

Analiza wyboczenia w zakresie liniowym, pozwala wyznaczyć obciążenie, przy którym konstrukcja staje się niestabilna. Jeśli model zawiera smukłe części, do których przykładane jest obciążenie w kierunku osiowym, to mogą one podlegać wyboczeniom przy stosunkowo niewielkich obciążeniach osiowych. W przypadku takich konstrukcji obciążenie wyboczeniem staje się krytycznym współczynnikiem projektowym.

Rodzaj siatki

Program oferuje następujące opcje: Czworościenna, Powierzchnia, Mieszana. Do obiektów bryłowych stosuje się siatkę czworościenną (rys.2.) i jest to jedyny typ siatki jaki jest do wyboru. Typ Powierzchnia ma zastosowanie do elementów blaszanych, a Mieszana do przypadku analizy połączonych elementów bryłowych i elementów blaszanych.

Wielkości do wyznaczenia

Do dyspozycji są: Przemieszczenie, Naprężenie, Odkształcenie, Przyłożona siła, Siły reakcji oraz Energia odkształcenia. Odpowiednie wielkości zaznacza się u dołu okna w kolumnach Węzły i Elementy.

Zadanie obciążeń i więzów

Kolejnym krokiem jest zadanie, w dowolnej kolejności, obciążeń i utwierdzeń działających na element(y). Obciążenia dzielą się na trzy grupy: *obciążenia elementów geometrii modelu* (np. lic, krawędzi, punktów), *obciążenia modelu* (masowe) i *obciążenia termiczne*.

Pierwsza grupa pozwala na zadanie następujących obciążeń: *siły, ciśnienia, momentu siły* oraz wymuszenie *przemieszczenia* i obciążenia typu *łożysko*. Druga grupa służy do zadawania tzw. *sił masowych*, takich jak obciążenia od siły odśrodkowej i grawitacyjnej. Siły masowe działają na cały model, tzn. na każdy element objętości, proporcjonalnie do jego masy.

W poleceniach służących do zadawania obciążeń, które wymagają podania kierunku stosowane jest koło sterujące, obsługiwane tak samo jak w trybie synchronicznym, którego główna półoś lub oś obrotu (tj. oś prostopadła do torusa) ustalają stosowne kierunki. Do zmiany zwrotu stosuje się przycisk(i) **Przełącz kierunek** lub klawisz F. Wartości obciążeń i inne dane wpisuje się w pływającym okienku edycyjnym, w domyślnych jednostkach ustawionych w opcjach. Jeżeli wybrano więcej niż jeden element, na który działa dane obciążenie, to aktywując przycisk **m Obciążenie całkowite** można zaznaczyć, że obciążenie wejściowe jest sumą obciążeń przyłożonych do wszystkich wybranych elementów, w przeciwnym przypadku zadana wartość będzie dotyczyła każdego elementu z osobna.

Z każdym typem obciążenia i utwierdzenia skojarzony jest symbol graficzny (strzałki, kulki itp.), umieszczany na bryle w miejscu przyłożenia. Po kliknięciu w ten element, na ekranie wyświetlana jest etykieta obciążenia lub więzu. Klikając dalej w etykietę, można przejść w tryb edycji tego elementu. W paskach poleceń służących do zadawania obciążeń i utwierdzeń, na jego końcu dostępna jest grupa przycisków ustalających 🗳 kolor symbolu, ni rozmiary i odstępy symboli i 🕍 widoczność etykiety z wartościami obciążeń.

Zadane obciążenia i więzy pojawiają się jako pozycje listy w panelu Symulacja, w grupie Obciążenia i Więzy. Poleceniami z menu podręcznego można je usunąć (**Usuń**), zablokować/odblokować (**Blokuj/Odblokuj**) lub wykonać inne czynności, np. zmienić nazwę. Blokowanie może być przydatne przy wykonywaniu obliczeń wariantowych. Klikając podwójnie PPM na nazwie pozycji, przechodzi się do edycji obciążenia lub więzu. Jeżeli nie da się zmienić jakichś parametrów, to trzeba obciążenie skasować i wstawić na nowo.

Siła

To obciążenie zadaje się poleceniem \leq Siła. Siłę można przyłożyć do lica, krawędzi, punku lub elementu – wyboru rodzaju miejsca dokonuje się z listy Typ zaznaczania. Przycisk Sposób określenia kierunku oferuje trzy opcje definiowania kierunku siły. Wzdłuż wektora wymaga odpowiedniego zorientowania półosi wielkiej koła sterującego. Normalny do lica oznacza, że wektor będzie prostopadły do wskazanego lica lub lic elementów. Opcja Składowe (lub Komponenty) służy do określenia składowych wektora siły w kierunkach X, Y, Z układu współrzędnych wybranego z listy przyciskiem 🖾 Wybierz układ współrzędnych. Przyłożenie siły do lica, w pewnych warunkach, jest równoznaczne z zadaniem ciśnienia, o wartości równej polu lica podzielonemu przez siłę.

Ciśnienie

Do zadania ciśnienia służy polecenie Ziśnienie i jego realizacja polega na wyborze lica, na który ma ono działać, zwrotu i ustalenia wartości. Ciśnienie działa zawsze wzdłuż normalnych do lica. Zadanie ciśnienia w pewnych warunkach jest równoznaczne z przyłożeniem siły do lica, o wartości równej polu lica pomnożonemu przez ciśnienie.

Moment siły

Zadanie momentu polega na wyborze *miejsca jego przyłożenia, kierunku osi i wartości,* a służy do tego celu polecenie 🏟 **Moment skręcający**. Moment można przyłożyć tylko lica.

Przemieszczenie

Polecenie Przemieszczenie służy do wymuszenia przemieszczenia lica, krawędzi, wierzchołka lub elementu, np. wynikającego z połączenia z inną częścią, której przemieszczenie jest znane. Program NX NASTRAN wymaga, aby na części istniał więz pasujący do obciążenia wynikającego z przemieszczenia. Wymagany więz można wygenerować automatyczne, jeśli wybierze się opcję **Przegubowe**.

Łożysko

Poleceniem A **Łożysko** służy do modelowania warunków obciążeń na walcowych i niewalcowych częściach oraz na powierzchniach, takich jak koła zębate, krzywki i koła toczne. Polecenie wymaga określenia miejsca przyłożenia, kierunku, kąta obciążenia i wartości. Obciążenie przykłada się do lica (niekoniecznie walcowego). Kierunek obciążenia musi być skierowany w stronę lica. Zwrot tego obciążenia jest domyślnie skierowany do lica, ale można go odwrócić korzystając z opcji **‡ Trakcja**. Włączenie opcji **> Normalna do powierzchni**, kieruje obciążenia łożyska prostopadle do powierzchni, tak jak obciążenie ciśnieniowe, rozkładając je równomiernie na zadanym kącie.

Obciążenia od siły odśrodkowej

Skutkiem wirowania obiektu wokół osi jest powstanie siły odśrodkowej działającej na cząstki obiektu proporcjonalnej od ich odległości od osi obrotu. Polecenie Siła odśrodkowa służy do przykładania obciążenia pochodzącego od siły odśrodkowej do części lub złożenia. Obciążenie jest stosowane w odniesieniu do *całego modelu*. Obciążenie od siły odśrodkowej jest reprezentowane przez dwa symbole kierunku obrotu na modelu, które oznaczają prędkość kątową i przyspieszenie kątowe. Można dla nich ustawić niezależnie kierunek zgodny ze wskazówkami zegara lub przeciwny do wskazówek zegara, albo je wyłączyć. Na danym modelu można zadać tylko jedno takie obciążenie.

Grawitacja

Polecenie **W** Grawitacja służy do przykładania sił masowych o jednorodnym rozkładzie przestrzennym do całego modelu wybranego do analizy. Obciążenie to należy rozumieć jako siłę masową wynikającą z przyspieszenia, które jest *sumą wektorową* przyspieszenia grawitacyjnego oraz przyspieszenia bezwładności ruchu prostoliniowego jednostajnie przyspieszonego całego obiektu, jak np. gwałtowne hamowanie lub start. Program SE oblicza obciążenie grawitacyjne, jako iloczyn podanego przyspieszenia (sumarycznego) i masy modelu. Wartość przyśpieszenia sumarycznego grawitacji i sił bezwładności użytkownik musi wyliczyć sam, dowolną metodą i wynik wpisać w pływającym oknie. Obliczenia można sobie ułatwić, wpisując do okna odpowiednią formułę. Na danym modelu można zadać tylko jedno takie obciążenie.

Zadanie więzów

W analizie wymagane jest, aby został zdefiniowany *co najmniej jeden więz*, w celu ograniczenia ruchu postępowego i obrotowego modelu jako całości. Można umieścić więz na tym samym licu, na którym zdefiniowano obciążenie, ale obciążenia zastosowane do tego lica zostaną zignorowane podczas przetwarzania rozwiązania. Więzy można przykładać do lic, krawędzi, punktów lub wybranego elementu modelu. Główną rolą więzów jest odebranie określonych stopni swobody (3 przemieszczenia i 3 obroty) ruchu punktu lub elementu siatki obliczeniowej. Różnica między nimi zasadza się tylko do rodzaju i liczby stopni swobody, które są przez nie odbierane.

Więzy można zakładać używając poleceń z grupy Więzy, na karcie Symulacja. Można też zdefiniować więzy z poziomu menu podręcznego w okienku widoku drzewa Symulacja. Te polecenia są dostępne, gdy analiza jest aktywna, a geometria została wybrana. Założone więzy pojawiają się jako pozycja w panelu Symulacja w grupie Więzy. Obsługa analogiczna, jak w przypadku obciążeń. Tu podobnie, jak przy obciążeniach, z każdym typem utwierdzenia skojarzony jest symbol graficzny (strzałki, kulki itp.), umieszczany na bryle w miejscu wystąpienia. Obsługa więzów: edycja, kasowanie itp. także identyczna jak w przypadku obciążeń.

Polece	nie	Opis
V°	Utwierdzenie	Odbiera wszystkie 6 stopni swobody. Służy do całko- witego unieruchomienia elementu bryły.
Ŕ	Bez obrotu	Odbiera wszystkie 3 stopnie ruchu obrotowego.
₹_	Przegubowe	Odbiera wszystkie 3 stopnie ruchu postępowego.
	Symetria wzgl. płaszczyzny	Tworzy wiązanie symetrii względem płaszczyzny na licu płaskim.
	Cylindryczne	Stosowany tylko do lic cylindrycznych. Blokuje do wy- boru: ruch promieniowy, obrotowy lub posuwowy względem wybranej osi.
	Niestandardowe	Blokuje ruch postępowy wzdłuż wybranych osi wybra- nego ukł. współrzędnych i obroty elementów blasza- nych. Służy do symulowania ruchu w wybranym kie- runku lub kierunkach. Np. pozwala symulować pod- porę ruchomą belki.

Tabela. 1. Polecenia do zakładania więzów stosowane w analizie wytrzymałościowej

Generowanie siatki

Po założeniu wszystkich obciążeń i utwierdzeń, następnym krokiem jest generowanie siatki do obliczeń przy pomocy polecenia **Siatka**. Po jego uruchomieniu, w oknie Siatka czworościenna, należy ustalić parametry siatki i jej rozmiar. Służy do tego celu suwak pozwalający ustawić subiektywny rozmiar siatki lub przycisk **Opcje**, pozwalającego na uszczegółowienie parametrów generowania siatki.

Generalnie wybór właściwych wartości parametrów wymaga doświadczenia. Na początku można zdać się na wartości proponowane przez program. Należy pamiętać, że im drobniejsza siatka, tym dokładniejsze obliczenia, ale tym dłuższy czas obliczeń. Ustawienie skrajnie małych wartości może doprowadzić do bardzo długiego czasu obliczeń, a program może sprawiać wrażenie, że się zawiesił. Siatkę generuje się przyciskiem Siatka lub Siatka i obliczenia. Prawidłowo utworzona siatka jest oznaczana w drzewie karty Symulacja symbolem ^{*}. Symbol ^{*} oznacza siatkę niskiej jakości, która wymaga poprawy. Symbol [!] oznacza, że utworzenie siatki nie powiodło się a symbol [!], że dane wejściowe siatki zostały zmodyfikowane i trzeba ją utworzyć na nowo. Jakość siatki można poprawić stosując polecenia: I Rozmiar na krawędzi – ustala liczbę węzłów na wskazanej krawędzi; Rozmiar na powierzchni – poprawia jakość siatki na wskazanym licu oraz Rozmiar na bryle – do zwiększenia dokładność siatki na obiektach bryłowych i powierzchniach. Rozmiar siatki jest stosowany do modelu w następującej kolejności: rozmiar obiektu, rozmiar powierzchni i rozmiar krawędzi.

Obliczenia

Obliczenia inicjuje się poleceniem [©] **Rozwiąż**. Uruchamia ono proces obliczeniowy i jeżeli nie będzie błędów, to po zakończeniu program przełączy się do środowiska wyświetlania wyników. Obliczenia można uruchomić też z poziomu polecenia **Siatka** przyciskiem **Siatka i obliczenia**. Aby obliczenia mogły być uruchomione konieczne jest przypisanie materiału, zdefiniowanie co najmniej jednego utwierdzenia blokującego ruch i obrót bryły jako całości (możliwe tylko odkształcenia) oraz jednego rodzaju obciążenia.

Przerwanie za długo trwających obliczeń jest możliwe tylko z poziomu Menadżera zadań systemu Windows, ale wówczas traci się niezapisane zmiany. Można w opcjach programu, na karcie Symulacja, w polu Maksymalny czas rozwiązania (jest u dołu karty) ustawić sensowny czas obliczeń w minutach np. 15 min. Domyślna wartość 1000 min (16,6 h) może być na początek zbyt duża.

Przeglądanie wyników

Do przeglądania wyników symulacji służy środowisko, które wywoływane jest automatycznie po zakończeniu obliczeń, albo na żądanie przyciskiem **Wyniki**. Zamknięcie środowiska i powrót do modułu nadrzędnego przyciskiem **Zamknij wyniki symulacji**. Przeglądanie wyników polega na ustaleniu dwu zasadniczych elementów i są to:

- 1. Wielkość fizyczna, która ma być wyświetlona
- 2. Format wyświetlania i układ ekranu

Wyboru wielkości fizycznej do wyświetlenia ustala się na karcie Narzędzia główne, w sekcji Wybór danych. Wybiera się ją z listy Rodzaj wyników oraz Składnik wyniku. Lista zawiera tylko pozycje, które zostały ustalone w oknie Utwórz/Modyfikuj analizę. Składnik wyniku jest zależny od wybranej wielkości. Składnikami są składowe wektorów, tensorów lub inne wielkości zależne od typu wielkości. Na przykład w przypadku naprężenia domyślnie wybierana jest pozycja Naprężenia zredukowane Hubera–von Misesa reprezentująca wytężenie w materiale, które należy porównać z naprężeniem dopuszczalnym k, liczonym jako iloraz granicy plastyczności R_e przez współczynnik bezpieczeństwa X, czyli $k = R_e/X$.

Niezależnie od wybranej wielkości fizycznej program ma możliwość pokazania jak odkształci się analizowana część. Pokazane odkształcenie może być rzeczywiste lub znormalizowane wg podanej wartości bezwzględnej lub względnej odniesionej do maksymalnego wymiaru elementu. Ustala się to na karcie Narzędzia główne w panelu Odkształcenie zaznaczając odpowiednią opcję. W celach porównawczych, na modelu odkształconym można wyświetlić bryłę w stanie nieodkształconym – **Opcje wyświetlania → Model bez odkształceń**.

Wybrana wielkość wyświetlana jest w postaci kolorowanej mapy rys.4. Zestaw dodatkowych danych, jaki ma zostać wyświetlony, zleży od wyboru odpowiednich opcji, w oknie przywołanym przyciskiem **Opcje wyświetlania**. Format mapy wyników ustala się przyciskiem **Style konturów**, z karty Narzędzia główne. Skala kolorów oraz inne szczegóły wyświetlania ustalana jest na karcie Pasek kolorów. Na tej karcie można też wymusić wyświetlanie odnośników do miejsc gdzie dana wielkość przyjmuje wartości ekstremalne.



Rys. 4. Okno z wynikami obliczeń.

Program ma możliwość animacji (przycisk **Animacja**), pokazującej przebieg deformacji części pod wpływem stopniowo narastających obciążeń. Wyniki można eksportować (przycisk **Raport**) do dokumentu MS Word lub pliku strony WWW (format **html**), albo w postaci filmu (format **avi**) lub obrazu (formaty: **bmp**, **jpg**, **tif**).

 \triangle Po wykonanej analizie, z danym plikiem **par** skojarzony jest plik **ssd** zawierający dane wejściowe i wyniki obliczeń MES. Plik ten **może mieć znaczne rozmiary**, które dla gęstej siatki obliczeń, nawet w przypadku prostych części, liczone są w dziesiątkach MB.

Uproszczenia modelu

Czasami niewielkie detale geometrii modelu zmuszają do wybrania małego rozmiaru elementów siatki, co skutkuje wzrostem ich liczby i wydłużeniem czasu obliczeń. Detale te to zaokrąglenia, fazy, otwory lub inne lica o niewielkich rozmiarach, które znajdują się w takim miejscu, że nie przenoszą istotnych obciążeń np. fazowania stępiające ostre krawędzie. Ich uwzględnienie często nie poprawia znacząco dokładności symulacji i można by je, dla celu analizy, zablokować. Blokowanie nie jest wygodne bo prowadzi do niespójności między symulacją a modelem.

Ten problem rozwiązuje zastosowanie środowiska uproszczeń pozwalające na stworzenie uproszczonego wariantu modelu nie tylko dla celów symulacji, ale także dla celów tworzenia złożeń. W tym drugim przypadku uproszczone warianty modelu pozwalają na szybsze wyświetlanie i manipulowanie złożeniami, zwłaszcza wtedy, gdy liczba komponentów jest duża lub gdy występują komponenty o skomplikowanej geometrii, takie jak koła zębate, sprężyny itp.

Wykonanie wariantu uproszczonego wymaga przejścia do *środowiska uproszczeń*. Służy do tego polecenie **Uprość** z grupy **Model** na karcie **Narzędzia**. Po wywołaniu środowiska można użyć dowolnych poleceń prowadzących do zmiany modelu na prostszy. Do usunięcia

zbędnych detali NIE NALEŻY UŻYWAĆ polecenia **Usuń**, ale poleceń usuwania zgromadzanych w grupie **Modyfikuj** na karcie **Narzędzia główne** (rys.5 – lewa strona).

Polecenia te, czyli **Usuń lica**, **Usuń fragmenty**, **Usuń otwory** i **Usuń zaokrąglenia**, można też używać w wariacie projektowym i zostały one przewidziane do modyfikowania modeli importowanych z innych aplikacji, nieposiadających drzewa operacji, oraz modyfikowanie modeli utworzonych w SE bez konieczności korzystania z drzewa operacji. Taki sposób edycji nazywa się *edycją bezpośrednią*.



Rys. 5. Uproszczenie modelu. A – wariant podstawowy, B – wariant uproszczony (małymi strzałkami zaznaczono usunięte elementy).

W środowisku uproszczeń nie wszystkie polecenia są aktywne np. **Otwór**, **Faza**, **Zaokrąglaj** itp. Dostępne polecenia trzeba stosować tak, by uzyskać bryłę o prostszej geometrii. Na przykład uproszczenie modelu *A* z rys.5, prowadzące do wariantu *B*, a które zostało wykonane wspomnianymi poleceniami usuwania, można by zrealizować jednym poleceniem **Przeciągnij** pokrywającego wyciągniecie Walec w z części sekwencyjnej, czyli faktycznie powtórzenia tej operacji w środowisku uproszczeń.

Aby wykonać analizę w wariancie uproszczonym, trzeba najpierw przejść do środowiska uproszczeń, a dopiero potem wywołać polecenie **Nowa analiza**. Tak wykonana analiza będzie dodana do węzła Uproszczenia, w okienku drzewa Symulacja, wraz z częścią uproszczoną zdefiniowaną jako geometria analizy.

Optymalizacja

Optymalizacja⁵ jest zagadnieniem poszukiwania ekstremum pewnej funkcji (maksimum lub minimum) zwanej *funkcją celu* przy zadanych *ograniczeniach danych układem nierówności*. Na przykład minimalizacja masy *m* pręta poddanej określonemu obciążeniu, tak by współczynnik bezpieczeństwa *X* nie obniżył się poniżej wartości dopuszczalnej. Funkcją celu jest tu wyrażenie na masę pręta m = f(...), zaś ograniczeniem dolna wartość współczynnika bezpieczeństwa $X(...) > X_{kr}$. Argumentami funkcji celu oraz ograniczeń są pewne zmienne, tzw. *zmienne swobodne* lub *projektowe*, które mogą przyjmować dowolne wartości np. średnica pręta. Celem optymalizacji jest ustalenie jakie wartości zmiennych swobodnych realizują ekstremum funkcji celu, przy zadanych ograniczeniach.

 $^{^5\} Przykład:\ https://docs.sw.siemens.com/pl-PL/doc/246738425/PL20200701135947994.sesim/xid612963$

Dptymalizacja 2				X		
Cel projektowy Ograniczenia projektowe	rojektowy niczenia projektowe					
Zmienne projektowe	Nazwa E	Bieżąca wartość 🛛 🛛 🛛	Rodzaj ograniczenia	Wartość docelowa		
Parametry sterujące	Masa 0	0.051 kg	Minimalizuj			
Parametry konwergencji						
"W celu wykonania optymalizacji należy zdefiniować cel projektowy, co najmniej jedno ograniczenie projektowe i jedną zmienną projektową.						
Dodaj ograniczenie						
	Nazwa	Bieżąca wartość	Reg Wartość o	graniczenia		
	Współczynnik bezpieczeń:	stwa 2.030	[2.00;8.00]	1		
Dodaj zmienną modelu Dodaj zmienną zewnętrzną Usuń zmienną						
	Typ Nazwa	Bieżąca wartoś	ć Reg Zakres			
	Dim d	18.57 mm	[10.00	mm;100.00 mm]		
·						
< Wstecz Dalej > Zapisz Anuluj Optymalizuj Pomoc						

Rys.6. Okno dialogowe optymalizacji

W programie SE optymalizacja związana jest z konkretnym typem analizy i dodaje się ją do niej poleceniem Rowa optymalizacja, z karty Symulacja w panelu Analiza, które otwiera okno dialogowe optymalizacji rys.6. W oknie tym trzeba ustalić, co najmniej po jednym z trzech elementów:

- 1. Cel projektowy czyli zdefiniować funkcję celu (przycisk **Zdefiniuj cel ...**) każda optymalizacja może mieć TYLKO JEDEN CEL projektowy.
- 2. Ograniczenia projektowe (przycisk Dodaj ograniczenie ...).
- 3. Zmienne projektowe (zmienne swobodne) przycisk Dodaj zmienną modelu....

W czasie definiowania celu i ograniczeń projektowych wyświetlane jest okno rys.7, w którym należy wybrać wymagane parametry.

Pogrupowane są one w dwóch kategoriach Właściwości fizyczne i Wyniki analiz symulacji. Po wyborze celu, trzeba, klikając w kolumnie Rodzaj ograniczenia, wybrać rodzaj ekstremum (minimum/maksimum) lub wartość do jakiej się dąży. Definiując ograniczenia oraz zmienne projektowe, w oknie edytora reguł (rys.7.), należy ustalić zakres zmienności. Nie można przypisać tej samej właściwości do celu projektowego i do ograniczenia projektowego. Zmiennymi projektowymi mogą być jedynie te zmienne, które można zmienić i są to:

- Zmienne wymiarowe utworzone w Tabeli zmiennych podczas tworzenia geometrii. Obejmują one zablokowane wymiary PMI na elementach synchronicznych, szkicach i w relacjach w złożeniu.
- Zmienne niestandardowe wprowadzone w Tabeli zmiennych.
- Zmienne zewnętrzne udostępniane za pośrednictwem złożenia.
- Zmienne reprezentujące parametry wykonania operacji.
- Zmienne symulacji dodawane do Tabeli zmiennych automatycznie po umieszczeniu obciążenia lub wybraniu geometrii powierzchni.

Jako zmiennych projektowych nie można wybrać:

- Zmiennych zawierających wartości dyskretne i zmiennych opartych na formule lub we wklejonym łączu.
- Zmiennych tylko do odczytu, takich jak wymiary PMI na części sekwencyjnej.

Zdefiniuj cel	
Właściwości fizyczne Właściwości fizyczne Właśa Objętość Pole powierzchni Wyniki analiz symulacji Przemieszczenie Naprężenie Naprężenie nomalne X Naprężenie nomalne Y Naprężenie nomalne Z Naprężenie ścinające XY Naprężenie ścinające XZ Maksymalne naprężenie główne Minimalne naprężenie główne Pośrednie naprężenie główne Makasymalne naprężenie główne Makasymalne naprężenie główne Makasymalne naprężenie główne Makasymalne naprężenie główne Makasymalne naprężenie główne Makasymalne	Edytor reguł ograniczenia projektowego Ograniczenia projektowe: Współczynnik bezpieczeństwa Bieżąca wartość: 2.030 Ograniczenie min./maks. Ograniczenie min.: Ograniczenie min.: Większe niż lub równe Większe niż lub równe Wartość: 2.000 OK Anuluj Pomoc
Maksymalne Minimalne Maksymalne Minimalne Maksymalne Minimalne Maksymalne OK Anuluj	Rys.7. Okno wyboru parametrów dla celu lub ograniczeń projektowych z lewej. Okno reguł u góry.

Po ustaleniu wszystkich danych, optymalizację uruchamia się przyciskiem **Optymalizuj**.... Jeżeli nie było zastrzeżeń, co do wprowadzonych danych, to program przystąpi do wykonywania szeregu iteracji, zmierzających do znalezienia wartości zmiennych projektowych, spełniających założony cel. Każda iteracja polega na przeprowadzeniu obliczeń metodą MES dla szeregu automatycznie zadawanych wartości zmiennych projektowych. Operacja ta może być czasochłonna, jeśli liczba zmiennych będzie duża.

Zakończony sukcesem proces, kończy wyświetlenie okna dialogowego z komunikatem Optymalizacja jest zbieżna ..., w którym można użyć przycisku **Wyświetl podsumowanie** generującego raport z przebiegu optymalizacji, w postaci arkusza Excela lub **Wyświetl wykresy** wyświetlającego wyniki symulacji dla zoptymalizowanej geometrii (czerwoną czcionką oznaczone są wartości przekraczające ograniczenie projektowe). Wyniki optymalizacji zawsze można podejrzeć za pośrednictwem polecenia **Widok**, z menu podręcznego wywołanego nad odpowiednim parametrem (np. Współczynnik bezpieczeństwa), dostępnym na karcie Symulacja w węźle Optymalizacje, po rozwinięciu wykonanej optymalizacji i wyborze iteracji do podglądu.

Dla danej analizy można wykonać wiele optymalizacji. Każda optymalizacja jest dostępna i może być zarządzana z karty Symulacja. Optymalizacje przypisane dla danej analizy są umieszczane w węźle Dotymalizacje i noszą z góry ustalone nazwy Dotymalizacja *n*. Standardowo, wszystkie niezbędne polecenia związane z optymalizacją są zgromadzone w menu podręcznym wywoływanym nad odpowiednią pozycją po rozwinięciu węzła Optymalizacje. Na przykład, parametry optymalizacji można zmienić, wybierając polecenie Edytuj optymalizację, a zmienione wartości zmiennych można zresetować do stanu początkowego, wybierając polecenie **Resetuj geometrię**.

Podręcznik inżynierski

Na karcie Podręcznik inżynierski umieszczonej w pionowym pasku, po lewej stronie okna aplikacji modułu Złożenie, są dostępne polecenia generujące typowe elementy mechaniczne. Gdyby pozycja ta nie była widoczna, to włącza się ją poleceniem Widok | Pokaż \rightarrow Okienka. Podręcznik ten jest też dostępny na karcie Narzędzia panel Środowiska.

Podręcznik składa się z 13 modułów, pozwalających zaprojektować typowe elementy mechaniczne, takie jak: wały, krzywki, przekładnie, sprężyny, koła pasowe, belki i pręty. Każdy z tych modułów jest sterowany za pomocą okna dialogowego, które posiada dwie karty: kartę Parametry projektowe, w której wprowadza się dane do obliczeń oraz kartę Wyniki obliczeń, na której oprócz wartości liczbowych pokazane są wykresy. W zależności od modułu niektóre wykresy mają charakter interaktywny – można klikać na nich myszą, np. w celu odczytania wartości.

 \triangle Korzystanie z podręcznika wymaga znajomości zagadnień i pojęć z podstaw konstrukcji maszyn.

U dołu we wszystkich oknach jest ten sam zestaw przycisków. Przycisk **Oblicz** powoduje wykonanie obliczeń dla zadanych parametrów wejściowych i przełącza na kartę Wyniki obliczeń. Przycisk **Utwórz** generuje, na podstawie obliczeń, część lub części i złożenie, które zapisuje do plików **par** oraz **asm**. Przycisk **Raporty** tworzy plik tekstowy **txt** zawierający dane wyjściowe i wyniki obliczeń.



Rys.8. Okno podręcznika Projektowanie wałów

Na rys.8 pokazano okno modułu projektowania wałów. W czasie projektowania ustala się liczbę stopni wału (na rys. są to liczby 1 .. 5), położenie podpór (są tylko 2 podpory) oraz

obciążenia⁶ (siła skupiona, moment gnący i moment skręcający), wraz z ich lokalizacją. Opis tego i każdego innego okna jest dostępny po użyciu przycisku **Pomoc**.

Wykorzystanie funkcji Visual Basic*

Ten nadprogramowy* podrozdział demonstruje jak użyć do obliczeń funkcji zdefiniowanych w języku Visual Basic (VB). Procedura jest przedstawiona na przykładzie. Są dwa warunki wstępne, które muszą być spełnione.

- 1. Plik źródłowy zawierający definicje funkcji w języku VB musi być plikiem ASCII z rozszerzeniem **bas** utworzonym dowolnym edytorem ASCII np. systemowym notatnikiem (notepad.exe).
- 2. Plik powinien być umieszczony w takim folderze, by ścieżka do niego nie zawierała spacji oraz znaków używanych w wyrażeniach czyli: przecinka, plusa, minusa, nawiasów itp. Dozwolone są polskie znaki diakrytyczne i podkreślnik "_".

W niniejszym przykładzie listowany niżej plik źródłowy **mech.bas**, znajdujący cię w folderze: T:\Dydaktyka\VB, zawiera definicję funkcji obliczających moment bezwładności oraz wskaźnik na zginanie przekroju prostokątnego.

Listing pliku – T:\Dydaktyka\VB\mech.bas

```
'Obliczanie momentu przekroju prostokątnego: b-szerokość, h-wysokość
Function MomentProst( b As Double, h As Double) As Double
MomentProst = b * h ^ 3 / 12
End Function
'Obliczanie wskaźnika na zginanie dla przekroju j.w.
Function WskZgProst( b As Double, h As Double) As Double
WskZgProst = b * h * h / 6
End Function
```

Z poziomu SE identyfikatorem funkcji VB jest jej nazwa z pliku źródłowego, np. **MomentProst** poprzedzona kropka, nazwą pliku (bez rozszerzenia) i ścieżką do niego np.

T:\Dydaktyka\VB\mech.MomentProst

Identyfikatora tego można używać tak samo, jak nazwy każdej innej funkcji dostępnej w SE. Wywołanie funkcji VB składa się z nazwy w formacie jw. uzupełnionej parametrami aktualnymi, zawartymi w nawiasach () i oddzielonych przecinkami np.

T:\Dydaktyka\VB\mech.MomentProst(a,b)

Powyższy przykład jest wywołaniem funkcji **MomentProst** z parametrami aktualnymi reprezentowanymi zmiennymi **a** i **b**, zdefiniowanej w pliku T:\Dydaktyka\VB\mech.bas. Wywołanie to można użyć w wyrażeniu umieszczanym w polu Formuła. Na rys.9 pokazano okno **Tabeli zmiennych**, z prostym wyrażeniem zawierającym tylko wywołanie funkcji.

By nie popełnić błędu i ułatwić wpisywanie nazwy funkcji, odwołanie do niej dla konkretnych parametrów można zrealizować za pomocą kreatora funkcji – przycisk 🖻 Formuła wg następującej procedury:

- 1. W czasie pisania wyrażenia należy kliknąć przycisk Formuła.
- 2. W oknie Kreator funkcji: Krok 1 z 2 z listy Kategoria funkcji wybrać Visual Basic.
- 3. Odszukać i otworzyć właściwy plik bas.

 $^{^6}$ Uwaga w wersji SE 2020 w sekcji Obciążenia jest błędny opis 2 pozycji (rys. 8 czerwone podkreślenie), który powinien brzmieć Numer elementu.

- 4. Wybrać z listy Nazwa funkcji właściwą funkcję może być konieczne poszerzenie okna, aby odsłonić pełne nazwy funkcji.
- 5. Wypełnić pola w oknie **Kreator funkcji: Krok 2 z 2**, określające aktualne parametry wywołania w polach tych można użyć wyrażeń i zmiennych SE.

Wywołanie funkcji zostanie wstawione NA KOŃCU WYRAŻENIA, po użyciu przycisku **Zakończ**. Ewentualne błędy składniowe można poprawić w zwykłym trybie edycji pola.

Część1:Tabela zmiennych					
Typ jednostki: skalar 🗸 214 🗄 📑 🝸 🏂 📰 🕼 🚱 📑 隆 Pomoc					
Тур	Nazwa	Wartość	Jednostki	Formuła	Komentarz
Dim	а	30,00	mm		
Dim	b	50,00	mm		
Dim	L	473,69	mm		
Var	PhysicalProperties_Density	0,000	kg/m^3		
Var	PhysicalProperties_Accuracy	0,990			_
Var	Jx	312500,000		T:\Dydaktyka\VB\mech.MomentProst(a , b)	

Rys. 9. Przykład odwołania się do funkcji VB w edytorze zmiennych

Zmienne formalne funkcji VB można zadeklarować w postaci uproszczonej pomijając deklaracje typu parametru oraz funkcji (np. As Double) i na przykład wówczas nagłówek funkcji MomentProst mógłby mieć postać:

```
Function MomentProst(b, h)
```

Taki zapis jest poprawnie interpretowany przez SE. Nie należy deklarować typu zmiennych **Double** i **Single** przy użyciu znaków typu jak **#** lub **!**, na co pozwala np. VBA Excel.

Zadania – obliczenia inżynierskie

Zad.1.

Wykonaj model kostki powiązany z arkuszem kalkulacyjnym.

- 1. Wykonaj poleceniem **Przeciągnij** sześcian, którego płaszczyznami symetrii będą płaszczyzny główne modelu. Zwymiaruj boki prostokąta stanowiącego profil. Operacje nazwij **Kostka**.
- 2. W edytorze zmiennych pozycji Kostka_Głębokość Skończ, która reprezentuje rozmiar wyciągnięcia nadaj nazwę c a pozostałym nadaj nazwy a i b rys. rys. Z–1b.
- 3. Zapisz plik pod nazwą Kostka.par.
- 4. Otwórz arkusz Excela i wypełnij komórki jak na rys. Z-1a.



Rys. Z–1.

- 5. Zapisz plik pod tą samą nazwą Kostka.xlsx.
- 6. Zamarkuj wartość C5 odpowiadającą zmiennej *a* i skopiuj ją do schowka.
- 7. Otwórz edytor zmiennych i poleceniem Wklej łącze z menu kontekstowego wstaw łącze do kolumny Formuła zmiennej a.
- 8. Powtórz dwa ostatnie kroki dla zmiennych b i c i zamknij edytor zmiennych.

Teraz zmieniając wartości komórek C5, C6, C7 możesz zmieniać rozmiary sześcianu z poziomu arkusza.

- 9. Przypisz do modelu jakiś materiał. Otwórz edytor zmiennych kliknij przycisk 🗹 Filtr; w ukazanym oknie zaznacz pozycję Właściwości fizyczne i zamknij okno. Od tego momentu w edytorze zmiennych pojawią się nowe pozycje między innymi Masa.
- 10. W kolumnie Wartość kliknij PPM na pozycji Masa i wybierz polecenie Kopiuj łącze.
- 11. Przejdź do arkusza i w komórce **B8** wpisz Masa= a potem kliknij PPM na komórce **C8** i poleceniem **Wklej specjalnie** z opcją **Wklej łącze** wstaw wyliczoną wartość.

Zmieniając wartości komórek **C5**, **C6**, **C7** zaobserwuj czy wartość masy się zmieniła. Brak zmiany oznacza, że musi być ona zaktualizowana z poziomu SE. W tym celu wywołaj polecenie **Właściwości fizyczne** z karty Kontrola i użyj przycisku **Aktualizuj**.

Zad.2.

Analiza wytrzymałościowa okrągłego pręta, przy różnych obciążeniach i sposobach utwierdzenia oraz porównanie wyników analizy z obliczeniami wytrzymałościowymi wykonanymi zgodnie ze wzorami znanymi z teorii sprężystości – rys. Z–2.

- 1. W środowisku TT wykonaj pręt \emptyset 50 mm o długości L = 300 mm, którego oś pokrywa się z osią X a jeden z końców leży na pł. YZ. Nadaj zmiennym wymiarowym nazwy D oraz L.
- 2. Poleceniem **Podziel** wykonaj podział końcowych lic wybierając jako narzędzie podziału (**Krok: wybór geometrii podziału**) pł. *XY*. Efektem operacji będą krawędzie *k* (rys. Z–2a) na obu podstawach walca. Ta operacja jest konieczna dla zamodelowania podpór dla symulacji zginania.



- 3. Na pł. *XY* wykonaj szkic wąskiego prostokąta *P* jak na rys. Z–2b. Szerokość prostokąta przyjmij 1 mm (oznacz go w tabeli zmiennych *dx*), jego wysokość równa średnicy pręta (powiąż relacjami połączenia wierzchołki z krawędziami sylwetki pręta) a odległość *środka boku* poziomego od pocz. ukł. współrzędnych ustaw na 120 mm i oznacz przez *a*.
- 4. Poleceniem Rzutowana zrzutuj profil P na lico cylindryczne pręta otrzymując krzywą rzutowaną R.
- 5. Podobnie jak w punkcie 2 poleceniem **Podziel** wydziel z lica cylindrycznego małe lico ograniczone krzywą R, która będzie narzędziem podziału. To lico będzie stanowiło pole, do którego zostanie przyłożona poprzeczna siła zginająca w symulacji zginania.
- 6. Wyłącz widoczność szkicu P i krzywej rzutowanej R i innych zbędnych elementów.
- 7. Przypisz do modelu materiał Polipropylen wysokoudarowy.
- 8. Zapisz plik.
- 9. Przejdź na wstążkę Symulacja i wywołaj polecenie Nowa analiza typ Statyka liniowa. Zamknij okno.
- 10. Rozwiń boczną kartę Symulacja, zaznacz pozycję Analiza statyczna 1, wciśnij F2 i zmień nazwę na Rozciąganie.
- 11. Poleceniem **Utwierdzenie** załóż więz utwierdzenia na końcu pręta przy układzie współrzędnych.
- 12. Poleceniem **Siła** przyłóż siłę skierowaną wzdłuż X do przeciwnego lica płaskiego typ zaznaczania: Lico wskaż obie połówki podzielonej podstawy. Upewnij się, że przycisk **Dociążenie całkowite** jest aktywny. Wartość siły ustaw na 0,1 kN.
- 13. Wywołaj polecenia Siatka. Ustaw suwakiem rozmiar siatki na 4. Wciśnij Siatka i obliczenia.
- 14. Przejrzyj wyniki i porównaj otrzymane wynik maksymalnego wydłużeni
a Δl_{max} z symulacji z wartością wyliczoną ze wzoru:

$$\Delta l_{max} = \frac{Fl}{SE} \qquad \text{gdzie} \quad S = \frac{\pi D^2}{4}$$

E – moduł Younga odczytany z danych materiałowych.

- 15. Utwórz nową analizę jak w pkt. 9 i zmień jej nazwę jak opisano to w pkt. 10 na Zginanie_podpory.
- 16. Poleceniem **Przegubowe** załóż więz na krawędzi *k* pręta dzielącej podstawę przy układzie współrzędnych na dwie części – typ zaznaczania Krawędź/naroże. Ten więzu symuluje podporę przegubowa stałą.
- 17. Poleceniem Niestandardowe załóż więz na krawędzi pręta k dzielącej podstawę po przeciwnej stronie na dwie części – typ zaznaczania Krawędź/Naroże. Wyłącz osie Y, Z symbolu utwierdzenia. Ten więzu symuluje podporę przegubowa ruchomą.
- 18. Poleceniem Siła przyłóż siłę do lica wydzielonego krzywą R typ zaznaczania: lico. Siłę skieruj przeciwnie do osi Z. Wartość siły ustaw na 0,1 kN.
- 19. Powtórz punkty 13, 14.

20. Porównaj otrzymane wyniki ugięć z symulacji z wartościami wyliczonymi ze wzorów.



21. Wykonaj samodzielnie kolejną symulacje zginania, ale dla belki utwierdzonej i obciążonej jak na poniższym rysunku – nadaj jej nazwę Zginanie_utwierdzenie.



Zad.3.

Wykonaj analizę wałka o wymiarach i obciążeniu jak na rys. Z–3. Obciąż wałek siłą F = 1 kN i utwierdź lico U.



Rys. Z–3.

Obliczenia wykonaj dla materiału Aluminium 1060 w wariancie pełnym (jak na rys. Z–3) oraz uproszczonym bez zaokraglenia R10. Zastosuj siatki: zgrubna (wskaźnik subiektywny 3) oraz dokładna (wskaźnik 10). Porównaj uzyskane maksymalne wartości naprężeń dla obu wariantów i dla obu rozmiarów siatki.

Zad.4.

Wykonaj symulację drgań membrany – typ analizy Częstotliwość drgań. Membrana ma wymiary \emptyset 100 mm, grubość 1 mm i wykonana jest z brązu 90%.

Zad.5.

Wykonaj symulację obciążenia zbiornika ciśnieniem wewnętrznym 0,2 MPa. Ścianki zbiornik mają grubość g = 3 mm (rys. Z–5). Oba końce są zamknięte dnami pseudoeliptycznymi $D_n = 700 \text{ mm}$ (średnica wew.) z cylindrycznym płaszczem o wysokości 1080 mm i podporami rozmieszczonym symetrycznie w odległości 720 mm. Do symulacji utwierdź spód jednej podpory a spód drugiej niech ma możliwość swobodnego przesuwu tylko wzdłuż linii równoległej do osi zbiornika (oś X na rys. Z–5)





Zwróć uwagę na relację styczności i prostopadłości na szkicu ilustrującym wykonanie dna.

• Użyj dna z zad. 3 ćw.1 lub wykonaj je wg szkicu z rys. Z–5 poleceniami **Obróć** i **Bryła** cienkościenna (pogrubienie 3 mm na zewnątrz). Odbij dno (Kopia lustrzana elementu) i połącz je płaszczem cylindrycznym. Dodaj podpory i przejdź do analizy statycznej. Materiał wybierz wg własnego uznania.

Zad.6.

Wykonaj optymalizację masy pręta utwierdzonego na jednym końcu i obciążonego poprzeczną siłą analogicznie jak w zad.2. pkt. 21 (ostatni). Wykonaj optymalizację w dwóch wersjach. W pierwszej jako ograniczenie projektowe wybierz Naprężenia zredukowane Hubera-von Misesa (mniejsze równe granicy plastyczności materiału podzielonej przez 2) a w drugiej Współczynnik bezpieczeństwa (zakres zmienności 2 - 8). Zmienną projektową niech będzie średnica pręta – zakres zmienności dobierz wg własnego uznania posiłkując się wynikami analizy MES z zad. 2.

Zad.7.

Korzystając z Podręcznika inżynierskiego (wywołanego z modułu Złożenie) zaprojektuj wał o następujących parametrach rys. Z–7:

PARAMETRY WAŁU

Stopień 1: Typ przekroju: Rowek klinowy (d) Średnica: 28.00 mm (L) Długość: 50.00 mm (B) Szerokość rowka klinowego: 7.00 mm (T) Głębokość rowka klinowego: 3.50 mm (L1) Długość rowka klinowego: 15.00 mm (x) Odległość od krawędzi: 32.5 mm Stopień 2: Typ przekroju: Prosty (d) Średnica: 32.00 mm (L) Długość: 20.00 mm Stopień 3: Typ przekroju: Rowek klinowy (d) Średnica: 36.00 mm (L) Długość: 36.00 mm (B) Szerokość rowka klinowego: 6.00 mm (T) Głębokość rowka klinowego: 8.00 mm (L1) Długość rowka klinowego: 30.00 mm

```
(x) Odległość od krawędzi: 3.00 mm
Stopień 4:
   Typ przekroju: Prosty
   (d) Średnica: 42.00 mm
   (L) Długość: 2.00 mm
Stopień 5:
   Typ przekroju: Prosty
   (d) Średnica: 32.00 mm
   (L) Długość: 20.00 mm
PODPORY
Numer podpory: 1
   Numer elementu: 2
   Odległość: 10.00 mm
   Sztywne osiowo: Nie
Numer podpory: 2
   Numer elementu: 5
   Odległość: 10.00 mm
   Sztywne osiowo: Tak
OBCIĄŻENIA
Numer obciążenia: 1
```



▲ Przed utworzeniem elementu zapisz raport obliczeń – przyda się do porównania z wynikami symulacji. Dokonaj analizy statycznej wału symulując zadane obciążenia i podpory. Porównaj z wynikami w raporcie.