JESIEŃ 2020 • NR 10

MESSENGER

Drodzy Czytelnicy!

Z przyjemnością oddajemy w Wasze ręce dziesiąty numer magazynu *MESsenger*.

Od pierwszego wydania minęło 18 lat... W tym czasie zaszło wiele zmian – również w środowisku ANSYS (czy ktoś z Państwa pamięta jeszcze wersję 6.1?). Dotyczyły one nomenklatury, wyglądu interfejsu użytkownika, a przede wszystkim liczby i rodzajów dostępnych symulacji.

Właśnie powitaliśmy najnowsze środowisko ANSYS: 2020 R2. W tym numerze znajdą Państwo m.in. opis zmian w obrębie trzech podstawowych filarów symulacji ANSYS, tj. w analizach mechanicznych, przepływowych i elektromagnetycznych. Oczywiście to oprogramowanie oferuje znacznie więcej – dzięki bogatemu wachlarzowi symulacji multifizycznych pozwala na analizę niemal każdego, dowolnie złożonego modelu rzeczywistego.

Porównując najnowszą wersję programu ANSYS z tą sprzed 18 lat, uświadamiamy sobie, jak bardzo symulacja komputerowa poszła do przodu i że jest obecnie stałym elementem naszej rzeczywistości. Potwierdzeniem tego są opisane w niniejszym numerze projekty naszych klientów (np. analiza zjawiska erozji podwodnych instalacji wydobywczych) i pracowników (np. symulacja turbin wiatrowych z pionową osią obrotu), a także coraz odważniejsze projekty wspieranych przez MESco zespołów studenckich (np. projekt elektrycznego bolidu klasy Formuła Student czy projekt rozkładanej kładki typu nożycowego).

Ponadto polecam lekturę artykułu nt. Particle Works – nowego produktu w naszej ofercie, bazującego na odmiennym podejściu do symulacji przepływów z wykorzystaniem metody MPS (*moving particle simulation*).

Informacjami o tej i innych metodach chcielibyśmy się z Państwem podzielić (podobnie jak to czyniliśmy wcześniej) na naszej corocznej konferencji z cyklu SYMULACJA. W tym roku nasze plany konferencyjne pokrzyżowała pandemia COVID-19, ale już teraz zapraszam Państwa na konferencję SYMULACJA 2021, która odbędzie się w dniach 9–11 czerwca 2021 r. w Łodzi. Z niecierpliwością czekamy na to spotkanie, aby móc Państwu przekazać wiele interesujących materiałów, a przy okazji poznać Państwa dokonania i wymienić się doświadczeniami.

Na razie dzielimy się naszą wiedzą i doświadczeniem poprzez szkolenia online, które zdobyły już Państwa uznanie. Ponieważ jednak bardzo cenimy sobie bezpośredni kontakt z Państwem, dlatego wprowadzamy do naszej oferty szkolenia hybrydowe, czyli spotkania bezpośrednie połączone ze spotkaniami online, na które serdecznie Państwa zapraszam.

Tymczasem życzę Państwu miłej lektury naszego biuletynu!

Adam Łokieć

W TYM NUMERZE:

3 Aktualności
3 Nowy kurs: Skryptowanie w ANSYS Mechanical

4 Co nowego w aplikacji ANSYS Mechanical?
7 Rozkładana kładka o skratowaniu nożycowym
10 ANSYS SpaceClaim – wiązania w szkicowniku i drzewko historii

12 Nowości w oprogramowaniu ANSYS Fluent
13 Analiza zjawiska erozji w podwodnych instalacjach wydobywczych
16 Kompleksowe modelowanie pracy turbin wiatrowych z pionową osią obrotu
19 Projekt pakietu aerodynamicznego pierwszego elektrycznego bolidu klasy Formuła Student zespołu PUT Motorsport
22 Wyznaczanie siły promieniowej działającej na wirnik skrzydełkowego jednostrumieniowego wodomierza
23 Superwydajne modelowanie przepływów z wykorzystaniem metody MPS

26 Usprawnienia w ANSYS AEDT
27 Firma Kompa uczestnikiem ANSYS Startup Program

MESCO

MESCO

Ansys

Konferencja

SymulacjΛ 2021

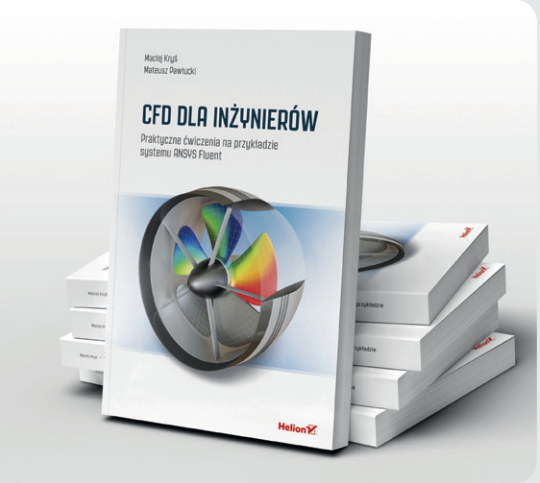
9-11.06.2021

Hotel Vienna House Andel's Łódź

www.mesco.com.pl/symulacja2021

„CFD dla inżynierów. Praktyczne ćwiczenia na przykładzie systemu ANSYS Fluent"

Niektórzy z Was już pewnie wiedzą, że w maju ukazała się drukiem książka „CFD dla inżynierów. Praktyczne ćwiczenia na przykładzie systemu ANSYS Fluent". Jej autorami są nasi koledzy: Maciej Kryś i Mateusz Pawłucki.



Publikację polecamy wszystkim, którzy chcą zdobyć praktyczne umiejętności posługiwania się pakietem ANSYS Fluent, służącym do analiz numerycznych procesów cieplno-przepływowych. Dzięki bogatemu doświadczeniu MESco w rozwiązywaniu problemów przemysłowych, zgłaszanych przez klientów firmy, autorzy książki mogli przekazać czytelnikom wiele cennych wskazówek. Właśnie aspekt praktyczny czyni tę książkę wyjątkową na polskim rynku wydawniczym.

Książkę można zamówić za pośrednictwem firmy MESco oraz na stronie wydawnictwa Helion.

Szkolenia online

Początkowo byliśmy sceptycznie nastawieni do nowej formy szkoleń, ale szybko nabraliśmy wiatru w żagle i nasz terminarz znowu jest bardzo napięty.

Sesja jesienna otwartych kursów zapowiada się naprawdę wyjątkowo. Po raz pierwszy wprowadzamy szkolenia hybrydowe, które będą się odbywać w trybie stacjonarnym w naszej siedzibie oraz online – gdyby ze względu na sytuację epidemiczną przeprowadzenie tradycyjnych zajęć okazało się niemożliwe.

Podczas szkoleń stacjonarnych zachowujemy wszelkie środki zapobiegające rozprzestrzenianiu się epidemii COVID-19 i stosujemy się do wytycznych GIS: ograniczyliśmy liczbę uczestników (zgodnie z zasadą: jeden uczestnik – jeden stolik) oraz oddajemy do ich dyspozycji płyny dezynfekcyjne, jednorazowe maseczki i rękawiczki.

Serdecznie zapraszamy!

Akademia MESco

Okres pandemii nie pozwolił nam na bezpośredni kontakt z klientami, który tak bardzo sobie cenimy. Z tego powodu w naszych głowach zrodził się pomysł krótkich webinariów poświęconych ciekawostkom, poradom oraz nowościom w oprogramowaniu ANSYS.

Nasza inicjatywa zyskała ogromną popularność: w ciągu trzech miesięcy w naszych spotkaniach wzięło udział wzięło ponad 300 unikalnych uczestników.

W drugiej połowie października startujemy z drugą edycją Akademii MESco online, która – mamy nadzieję – spotka się z równie dużym zainteresowaniem. Po więcej szczegółów i informacji o tematyce spotkań zapraszamy na naszą stronę internetową: mesco.com.pl.

Nowy portal szkoleniowy ANSYS

Z końcem sierpnia firma ANSYS uruchomiła nową platformę z bezpłatnymi szkoleniami z zakresu symulacji komputerowej. ANSYS Innovation Courses to interesująca oferta zarówno dla rynku akademickiego, gdzie szkolenia online mogą stanowić urozmaicenie zajęć uniwersyteckich, jak i dla inżynierów, którzy chcą poszerzyć swoją wiedzę i zdobyć nowe umiejętności.

Więcej na ten temat na naszej stronie internetowej: mesco.com.pl.

Konkurs filmowy dla zespołów studenckich wspieranych przez MESco

Sezon wakacyjny zazwyczaj kojarzy się z urlopami i wypoczynkiem. Nie dotyczy to jednak członków zespołów studenckich wspieranych przez MESco. Dla nich wakacje są okresem międzynarodowych zawodów studenckich.

Choć sytuacja epidemiczna pokrzyżowała tegoroczne plany wyjazdowe, my nie pozwoliliśmy się nudzić naszym podopiecznym☺. Rzuciliśmy im wyzwanie, polegające na nakręceniu filmu nt. wsparcia udzielanego przez firmy ANSYS i MESco. Piętnaście kół naukowych podniosło rękawicę i przyłączyło się do zabawy. Wszystkie filmy zrobiły na nas ogromne wrażenie, a wysokie nagrody finansowe już wkrótce powędrują do zwycięzców.

Nowy kurs: Skryptowanie w ANSYS Mechanical

Ansys + python

Już w tej sesji jesiennej wśród szkoleń MESco pojawi się nowy kurs z obsługi środowiska ANSYS Mechanical przy pomocy komend w języku Python. Dzięki temu szkoleniu użytkownicy programu ANSYS Mechanical nauczą się automatyzacji pracy z użyciem skryptów Python, które znacznie usprawniają analizy.

Szkolenie podzieliliśmy na dwie części, aby płynnie przejść od wykorzystania podstawowych komend do skryptów automatyzujących całą analizę. W ramach pierwszej części – opartej na prostych przykładach – uczestnicy poznają możliwości skryptowania na poszczególnych etapach analizy oraz obsługę ANSYS Mechanical z linii komend. Druga część będzie poświęcona analizie praktycznych skryptów do automatyzacji tworzenia i zapisywania wyników analizy, operacji na siatce i geometrii oraz generowania dużej liczby połączeń w modelu. Ponadto w trakcie szkolenia zostaną objaśnione metody zapisu i odczytu danych (w tym danych z Excela).

Oferujemy możliwość personalizacji szkolenia, gdyby przygotowane przez nas przykłady nie odpowiadały rzeczywistym potrzebom uczestników.

Szkolenie jest dostępne w języku polskim i angielskim. Zalecamy podstawową znajomość języka Python oraz środowiska ANSYS Mechanical. Dla osób nieznających języka Python oferujemy samouczek, zawierający opis wykorzystywanych funkcji.

Zapraszamy!

Co nowego w aplikacji ANSYS Mechanical?

Radosław Ciemierkiewicz • MESco • rciemierkiewicz@mesco.com.pl

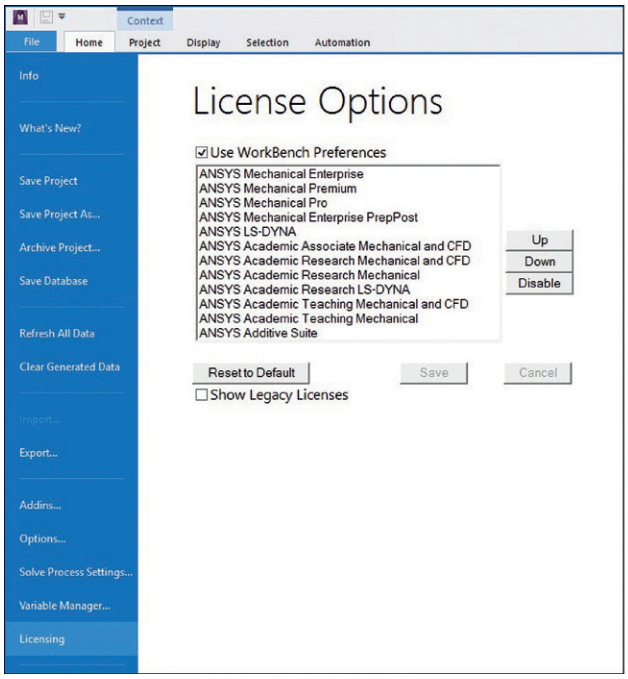
Wersja ANSYS Workbench 2020 R2 przyniosła wyraźne zmiany w aplikacji Mechanical. Firma ANSYS konsekwentnie dba o większą dostępność innowacyjnych narzędzi oraz doskonalenie dotychczasowych rozwiązań i algorytmów obliczeniowych. Lista udogodnień oferowanych obecnie inżynierom mechanikom jest naprawdę długa. Oprócz opcji konfigurowania licencji użytkownicy mają możliwość parametryzowania materiałów, mogą korzystać z nowych kategorii elementów, prowadzić badania z zastosowaniem rozbudowanych algorytmów obliczeniowych i używać nowych funkcji związanych z postprocessingiem.

Po wybraniu w aplikacji Mechanical opcji **Licensing** w zakładce **File** pojawia się zestaw opcji dla dostępnych licencji (rys. 1). Wprowadzenie takiego odrębnego menu licencji pozwala na bardziej precyzyjne zarządzanie zasobami licencyjnymi. Użytkownik może przyjąć ustawienia zgodne z przyjętymi w głównym menu projektu, a także decydować o nadrzędności/podrzędności danej licencji w obrębie przeprowadzanej analizy. Korzystanie z menu licencji jest zalecane zwłaszcza wtedy, gdy w symulacji trzeba uwzględnić ograniczenia licencyjne.

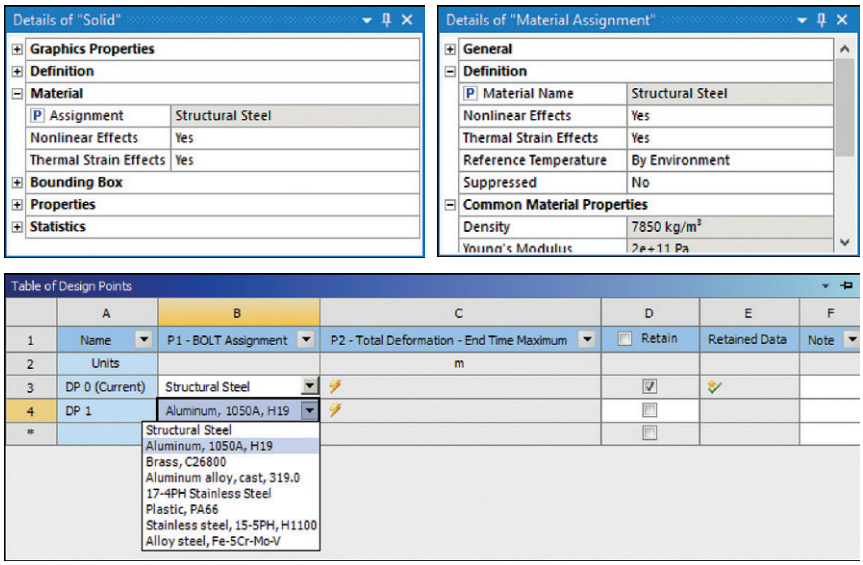
Innowacją, która zasługuje na wyróżnienie, jest parametryzowanie nie tylko wybranych właściwości materiałowych, lecz materiałów w ogóle (rys. 2). Można to zrealizować na dwa sposoby. Pierwszy polega na odwołaniu się do wybranych ciał i zaznaczeniu okna **Checkbox** przy polu **Assignment**, aby wprowadzić osobne parametry wejściowe dla materiałów zdefiniowanych dla wszystkich ciał uwzględnionych w parametryzacji. Aby natomiast przeprowadzić parametryzację dla zespołu komponentów w ramach jednego, zbiorczego typu materiału, należy wprowadzić **Material Assignment** i dokonać parametryzacji przez zaznaczenie okna przy polu **Material Name**.

Omawiane zmiany znacznie usprawniają analizy, zwłaszcza typu *What if*, w których bada się wpływ rodzaju przyjętych materiałów na otrzymywane wyniki.

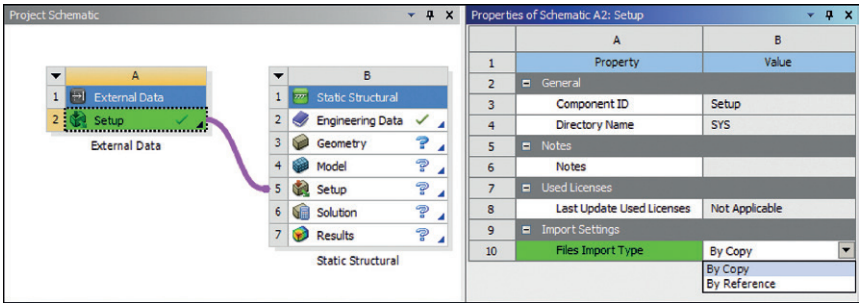
Część wprowadzonych zmian dotyczy modułu **External Data**. Z wykorzystaniem tego bloku można wprowadzać obciążenia termiczne (**Imported Body Temperature**) do analizy modalnej. To jednak nie koniec udogodnień. Użytkownik ma do dyspozycji nową grupę ustawień **Import Settings**, dostępną po wybraniu komórki **Setup** (rys. 3) i wyświetleniu okna właściwości (**Properties**).



Rys. 1. *W wersji ANSYS Workbench 2020 R2 można dostosować priorytety licencyjne w aplikacji Mechanical*

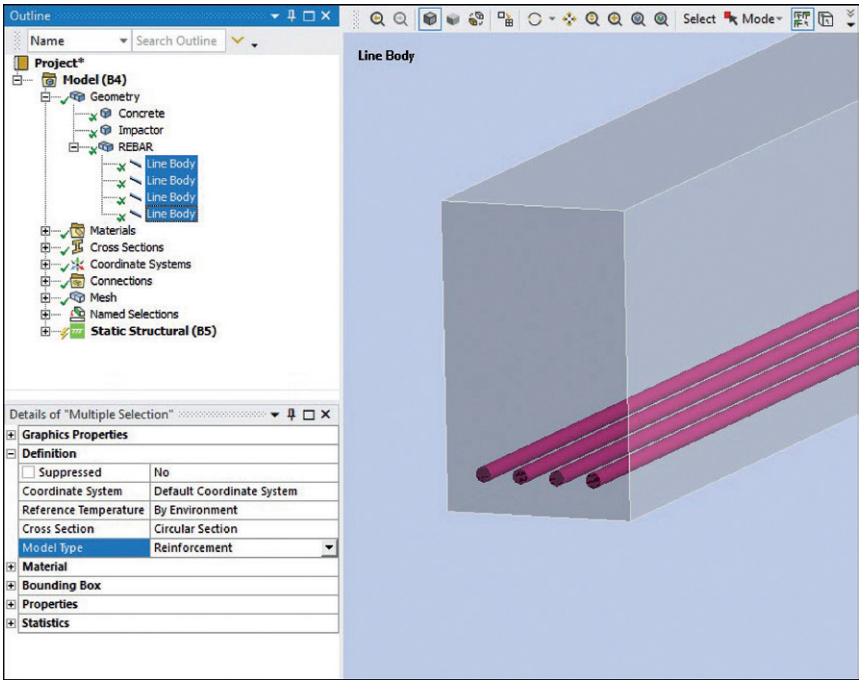


Rys. 2. *Nowa funkcjonalność umożliwia parametryzację materiałów*



Rys. 3. *Wybór jednego z ustawień Files Import Type reguluje kwestie związane z importowaniem plików wejściowych do modułu External Data*

Rys. 4. *Elementy belkowe jako wzmocnienie (reinforcement) w aplikacji Mechanical*



Ta funkcjonalność pozwala określić sposób importowania plików wskazanych w bloku External Data. Domyślne ustawienie (**By Copy***)* powoduje utworzenie kopii importowanych plików w strukturze projektu. Przypisanie do właściwości **Files Import Type** wariantu **By Reference** uniemożliwia utworzenie duplikatu i wymusza odwołanie się do lokalizacji wczytywanych danych, co pozwala na zmniejszenie rozmiaru plików projektowych. To rozwiązanie jest polecane w przypadku wprowadzania dużych plików, gdy nie ma ryzyka utraty dostępu do nich.

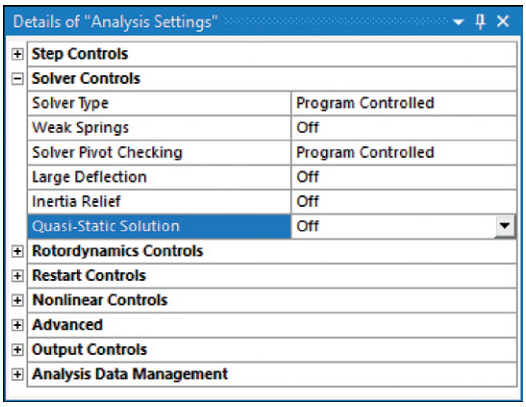
Automatyczne generowanie połączeń kontaktowych usprawnia nieskomplikowane analizy i pozwala na wstępną weryfikację modelu. W najnowszej wersji aplikacji Mechanical możliwe jest samoczynne tworzenie skojarzeń pomiędzy elementami powłokowymi i bryłowymi, najczęściej przez automatyczne łączenie krawędzi ciał powłokowych z powierzchniami ciał bryłowych. Dzięki temu analiza układów złożonych z tego typu elementów staje się znacznie prostsza, a ponadto maleje ryzyko nieuwzględnienia wymaganych par kontaktowych, co bezpośrednio przekłada się na skrócenie czasu przygotowania symulacji i tym samym na wzrost efektywności pracy.

Inżynierowie mechanicy mają do dyspozycji również nową opcję związaną z wprowadzaniem wzmocnień (*reinforcements*) zarówno do układów mechanicznych, jak i termicznych. To ustawienie dotyczy elementów jedno- i dwuwymiarowych, a wprowadza się je przez wybór opcji **Reinforcement** dla **Model Type** (rys. 4). Ciała jednowymiarowe mogą pełnić w modelu funkcję włókien wzmacniających, a elementy powłokowe mogą służyć do modelowania warstw wzmacniających – jednorodnych lub złożonych z równomiernie rozłożonych włókien.

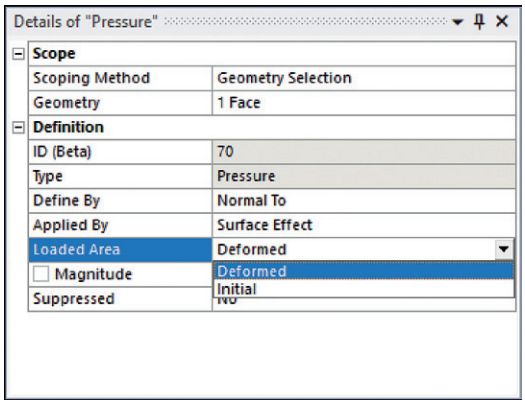
Spostrzegawczy użytkownik zauważy również dodatkową opcję w grupie ustawień **Solver Controls** w obrębie **Analysis Settings**. Oprócz dotychczasowych narzędzi sterowania pracą solvera można aktywować opcję **Quasi-Static Solution** (rys. 5), która okazuje się przydatna zwłaszcza w przypadku problemów z uzyskaniem zbieżności w analizach strukturalnych.

Zmiany objęły też wprowadzanie obciążeń w formie ciśnienia. Za pomocą opcji **Loaded Area**, dostępnej dla obciążeń **Pressure** oraz **Imported Pressure**, użytkownik może wybrać, czy na powierzchni obciążonej ciśnieniem uwzględniane są jej zmiany na skutek deformacji, czy też rozważana jest wstępna postać tej powierzchni.

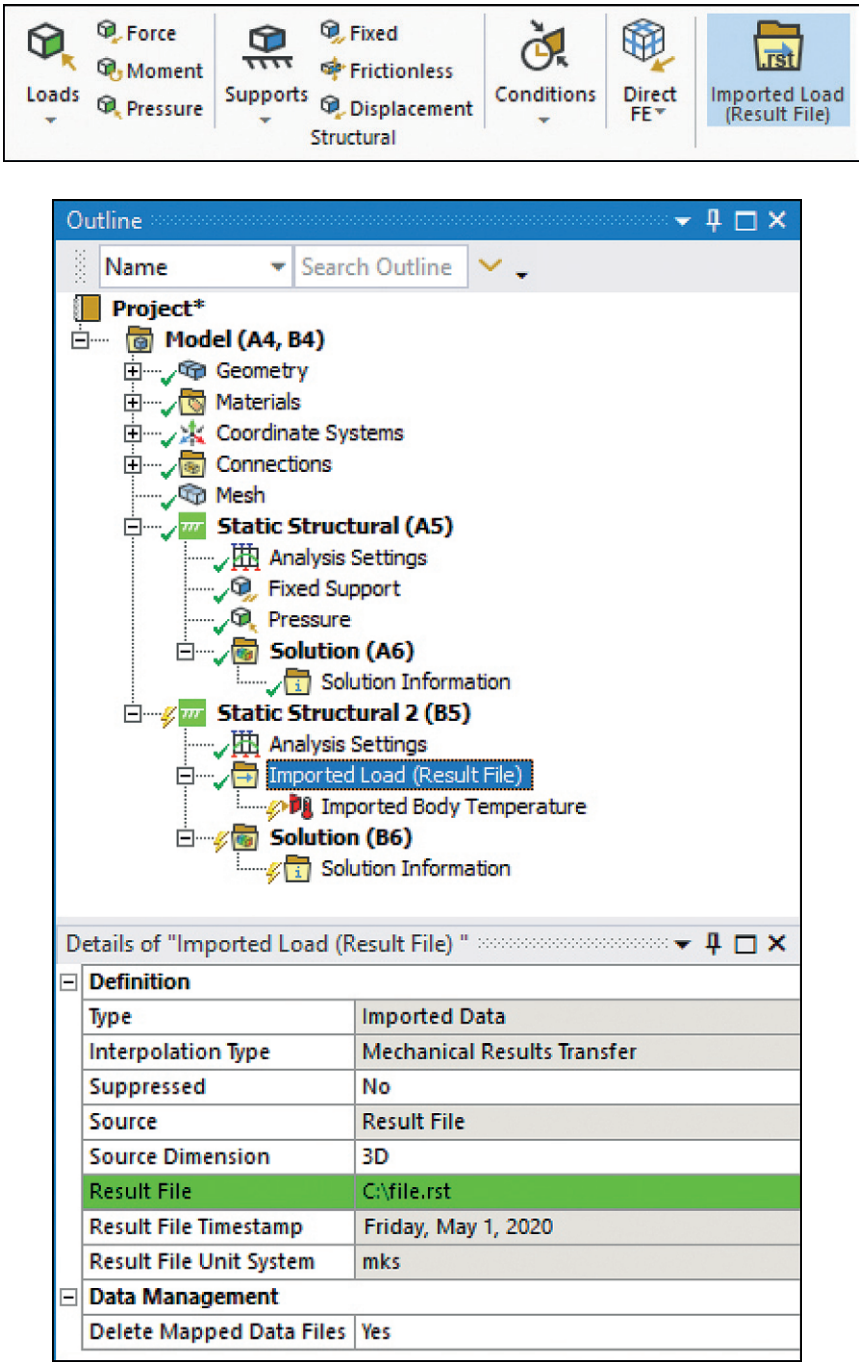
Jedną z nowych funkcjonalności, o której warto wspomnieć, jest bezpośrednie importowanie oraz mapowanie rezultatów poszczególnych analiz (w formie plików *.rst* lub *.rth*) jako warunków



Rys. 5. *Opcja pracy solvera w trybie quasi-statycznym*



Rys. 6. *Nowa funkcjonalność dla powierzchni obciążonych ciśnieniem*



Rys. 7. *Opcja importowania wyników – jako warunku brzegowego – do odrębnej analizy*

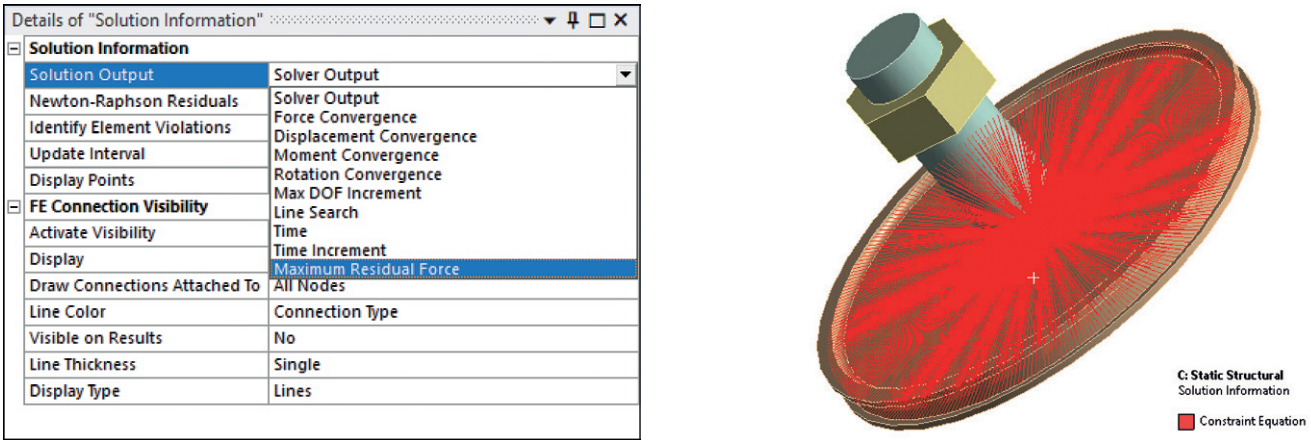
wejściowych do innych analiz (analiz termiczno-mechanicznych ze sprzężeniem słabym oraz analiz z wykorzystaniem submodelingu). Pozwala na to opcja **Imported Load (Result File)** (rys. 7), która znacznie usprawnia pracę i eliminuje potencjalne błędy związane z wprowadzaniem ustawień importowania danych z odrębnej analizy.

W module Mechanical, który wielu inżynierów ceni za możliwości weryfikacji uzyskanych wyników, nie zabrakło dodatkowych funkcji związanych z postprocessingiem. W **Solution Information** znalazło się nowe narzędzie diagnostyczne – **Maximum Residual Force** (rys. 8) – do wyznaczania maksymalnej wartości sił resztkowych w danej iteracji (wyniki są prezentowane zarówno w postaci zbioru danych na wykresie, jak i w formie graficznej). Na uwagę zasługuje mnogość ustawień ułatwiających korzystanie z tego narzędzia – użytkownik może wybrać rodzaj wyświetlanych połączeń, a także tryb wyświetlania węzłów lub wizualizacji połączeń.

Tradycyjnie twórcy oprogramowania ANSYS Workbench dążą do wyeliminowania ograniczeń stosowania dotychczasowych narzędzi. Przykładowo, w obecnej wersji Mechanical narzędzie **Nonlinear Adaptive Region** można z powodzeniem wykorzystywać wraz z warunkami **Remote Force**, **Remote Displacement**, **Moment** oraz **Remote Points**.

* * *

Zaprezentowane tu narzędzia stanowią jedynie fragment specjalistycznych opcji dostępnych dla użytkowników najnowszej aplikacji Mechanical, wchodzącej w skład oprogramowania ANSYS Workbench. Umiejętność ich wykorzystania z pewnością poprawi komfort i wydajność pracy przy rozwiązywaniu mniej lub bardziej złożonych problemów inżynierskich.



Rys. 8. *Opcja Maximum Residual Force pozwala na wyznaczanie maksymalnych wartości sił resztkowych w układzie*

Rozkładana kładka o skratowaniu nożycowym

Adrianna Pustelnik • AGH • adrpustelnik1412@gmail.com
Oskar Mencel • AGH • oskar.mencel@gmail.com
Jonasz Stępień • AGH • stepien.jonasz@gmail.com

W niniejszym artykule opisano projekt techniczny rozkładanej kładki dla pieszych typu nożycowego w skali półtechnicznej. Prace nad kładką obejmowały analizy strukturalne, sporządzenie dokumentacji technicznej i wykonanie rzeczywistego modelu. Konstrukcja nośna jest zbudowana z czterech par skratowań nożycowych. Jedno pojedyncze skratowanie składa się z trzech ramion, które są ze sobą połączone przegubowo w trzech miejscach. Konstrukcja dzieli się na część pracującą poza przyczółkiem, stanowiącą główny ustrój nośny kładki, oraz część pracującą na przyczółku, stanowiącą odciąg konstrukcji wspornikowej. Konstrukcja pracująca jako wspornik ma tylko jeden stopień kinematycznej swobody, co jest zapewnione dzięki ruchowi siłownika nad podporą. Analizy strukturalne wykonano w programie ANSYS 19.2 ACADEMIC. Analizę kinematyczną przeprowadzono na podstawie literatury z zakresu inżynierii mechanicznej.

Ruchome mosty są coraz bardziej popularne ze względu na swą innowacyjność i użyteczność. Spotyka się je zazwyczaj na skrzyżowaniach rzek żeglownych z lądowymi ciągami komunikacyjnymi oraz w miejscach, gdzie nie można zapewnić stałego połączenia drogi kołowej lub szynowej nad przeszkodą wodną.

Takie mosty są konstrukcjami drogimi, biorąc pod uwagę koszty ich projektowania, budowy i utrzymania. Opracowanie tego typu konstrukcji wymaga ścisłej współpracy specjalistów z różnych dziedzin (kooperacji wielu działów w biurach projektowych). Ponadto ruchome mosty podlegają okresowym przeglądom stanu technicznego i muszą być stale monitorowane.

Informacje techniczne dotyczące ruchomych mostów oraz ich klasyfikację podali Zobel i Al-Khafaji [1].

Mosty o skratowaniu nożycowym zostały dobrze rozpoznane już w 1994 r. Ogólne informacje o rozkładanych mostach wykorzystywanych przez wojsko opisano w [2].

Punktem wyjścia dla konstrukcji omawianej w tym artykule były taktyczne mosty nożycowe, wykorzystujące zmienny ustrój przęsła w układzie nożycowym.

Idea modelu

Ruchome mosty, zwłaszcza te o niebanalnej formie architektonicznej, są niewątpliwie atrakcjami turystycznymi. Tego typu obiekt inżynierski może się stać znakiem rozpoznawczym danej lokalizacji i przyciągnąć turystów.

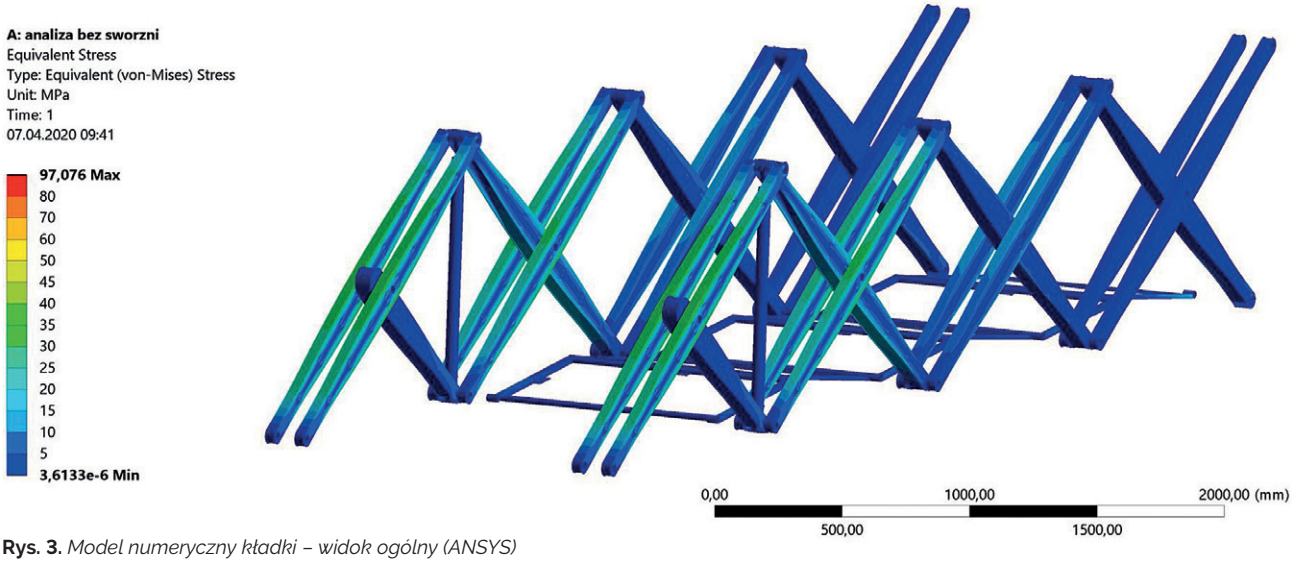
Prace nad projektem technicznym rozkładanej kładki typu nożycowego trwały na Akademii Górniczo-Hutniczej od ponad roku. Konstruktorzy inspirowali się przedmiotami codziennego użytku – skratowania nożycowe są powszechnie stosowane w lampach stołowych, lusterkach łazienkowych, barierkach, podnośnikach itd. Postanowili wykorzystać ten prosty mechanizm w innowacyjnej kładce dla pieszych. Tak powstała konstrukcja zaprojektowana na pograniczu dwóch dziedzin: budownictwa i mechaniki.

Elementy konstrukcyjne kładki

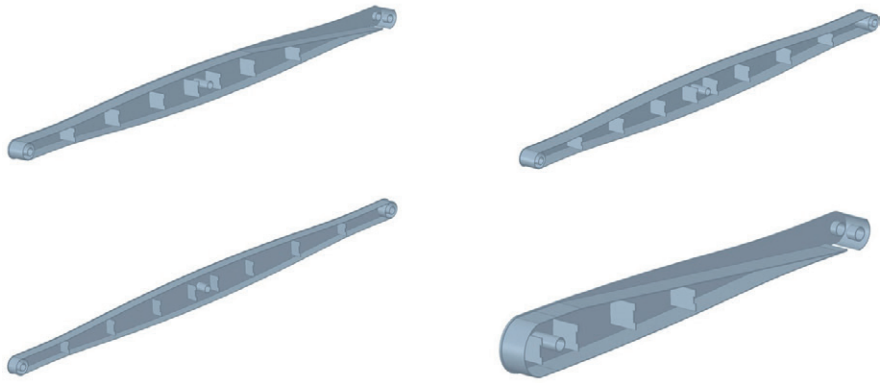
Zaprojektowana konstrukcja (rys. 1–3) składa się z czterech par skratowań nożycowych. Na pojedyncze skratowanie przypadają trzy ramiona, połączone ze sobą przegubowo w trzech miejscach za pomocą sworzni, które są ulokowane w trzech rzędach prostych, równoległych względem siebie. Skratowania są podzielone na dwie części: pierwsza, znajdująca się nad przyczółkiem, pracuje jako odciąg konstrukcji wspornikowej, a druga, znajdująca się za przyczółkiem, pracuje jako wspornik, zanim zostanie nasunięta na drugi przyczółek. Po rozłożeniu kładka pracuje w schemacie belki swobodnie

Rys. 1. *Konstrukcja kładki – widok ogólny (Inventor)*

Rys. 2. *Widok złożonego pomostu i skratowania kładki*



Rys. 3. *Model numeryczny kładki – widok ogólny (ANSYS)*



Rys. 4. *Cztery rodzaje ramion zastosowanych w kładce – widok aksonometryczny przez otwarty przekrój*

podpartej, jednoprzęsłowej. Dolny rząd przegubów współpracuje z pomostem, który ma możliwość składania się razem ze skratowaniami do minimalnej grubości. Kładkę charakteryzuje kontrolowany ruch, co osiągnięto dzięki użyciu siłowników hydraulicznych, sterowanych przez specjalnie zaprojektowany układ hydrauliczny. Pierwsza para ramion porusza się po przyczółku za pomocą wózków jezdnych, dzięki czemu stanowi podporę przesuwną dla konstrukcji. Takie rozwiązanie pozwoliło wyeliminować siły poprzeczne zginające siłowniki. Do ostatniego sworznia przymocowano koła, które zapewniają naprowadzenie ostatniej pary ramion na prowadnicę zespoloną z końcowym przyczółkiem. Konstrukcja pierwszego przyczółka została wsparta przeciwwagą 400 kg.

Skratowanie nożycowe składa się z czterech typów ramion (rys. 4), różniących się grubością środnika oraz kształtem środnika i pasa, w zależności od tego, czy w ramię chowa się siłownik.

W konstrukcji musi być zapewniona prostoliniowość współpracujących rzędów sworzni. W związku z tym przemieszczenie powinno być możliwie najmniejsze. Duże ugięcie ramion spowodowałoby wzrost siły potrzebnej do ich rozłożenia, co mogłoby skutkować trwałymi odkształceniami plastycznymi.

Podczas rozkładania konstrukcja kładki działa jak wspornik. Po jej rozłożeniu i podparciu kół na przyczółku konstrukcja pracuje w schemacie belki jednoprzęsłowej wolnopodpartej. Ruch obrotowy prętów jest zapewniony dzięki zastosowaniu – jako zamienników łożysk – tulei ślizgowych z kołnierzami.

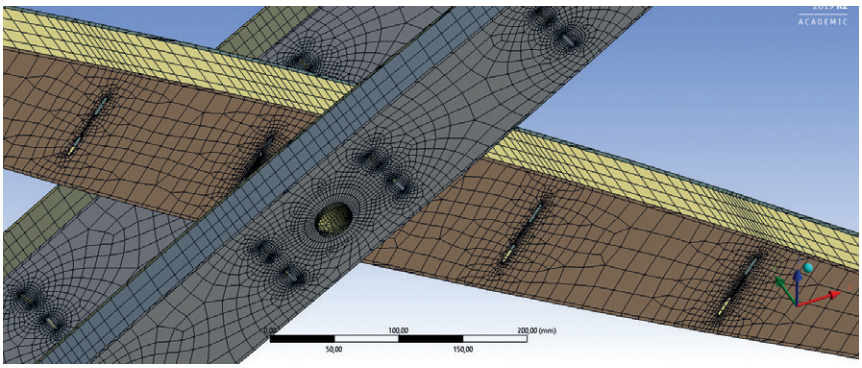
Analiza numeryczna konstrukcji

Celem analizy było sprawdzenie zależności kinematycznych pomiędzy poszczególnymi częściami analizowanej konstrukcji na podstawie wstępnych obliczeń wytrzymałościowych. Modele numeryczne kładki opracowano w systemie ANSYS 19. 2 ACADEMIC FEM (rys. 5).

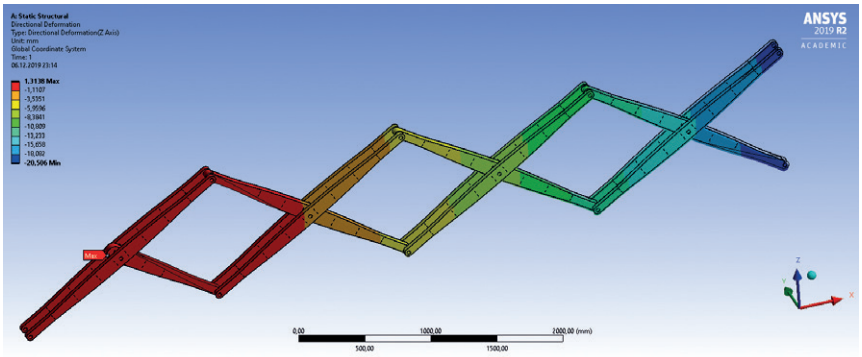
Pojawiło się kilka problemów konstrukcyjnych, związanych z wymiarami poszczególnych części składanej kładki. Każdy element należało kilkakrotnie przeprojektować i sprawdzić, aby podczas rozkładania kładki uniknąć niepożądanego kontaktu tego elementu z innymi elementami. Głównymi wyzwaniami przy projektowaniu geometrii były:

- ukrycie siłownika w elemencie ramienia;
- zaprojektowanie takiego mechanizmu pomostu, który umożliwi najbardziej efektywne składanie;
- zaprojektowanie jednej dodatkowej pary ramion, mogących się poruszać na specjalnie zaprojektowanych szynach na przyczółku – chodziło o to, aby siłownik pracował tylko w zamierzonym kierunku (osiowo).

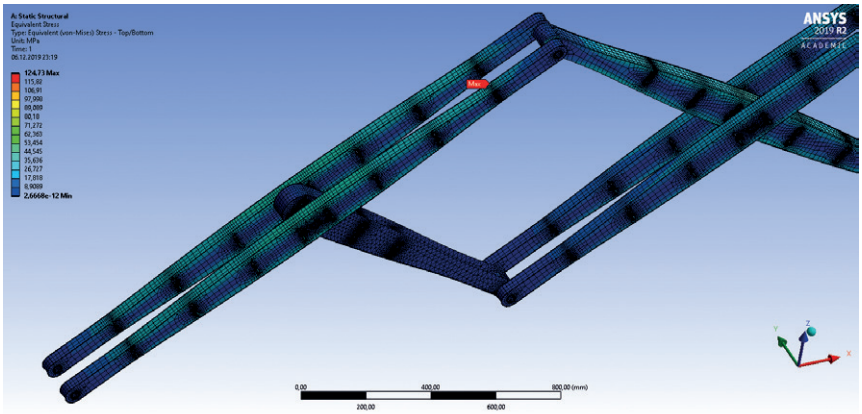
Dla każdego etapu składania wykonano analizy strukturalne MES, aby potwierdzić, że wybrane siłowniki są



Rys. 5. *Siatka elementów skończonych na ramionach poddanych analizie MES*



Rys. 6. *Pionowa deformacja ramion – wspornikowy schemat kładki*



Rys. 7. *Naprężenia zredukowane w ramionach – wspornikowy schemat konstrukcji kładki*

wystarczające do wymuszenia określonego ruchu konstrukcji. W tym celu należało określić minimalną siłę do składania i rozkładania konstrukcji kładki. Istotne było też wykluczenie sił prostopadłych do główki siłownika podczas rozkładania, które mogłyby spowodować deformacje tego elementu i jego zniszczenie.

Na potrzeby statycznej analizy strukturalnej i optymalizacji konstrukcji kilkukrotnie modyfikowano jej wszystkie części. Ostatecznie uzyskano konstrukcję znacznie lżejszą od wyjściowej, bez zwiększania naprężeń w elementach ramion. Ponadto udało się zminimalizować deformacje (duże odkształcenia ramion skutkowałyby brakiem osiowości sworzni, co mogłoby prowadzić do uszkodzeń konstrukcji, znacznego zwiększenia siły na siłownikach oraz wzrostu naprężeń w elementach i uszkodzeń tulei ślizgowych odpowiedzialnych za ruch obrotowy sworzni).

Wyniki analiz i wnioski

Wstępne wyniki analiz okazały się bardzo obiecujące. Potwierdziły, że pomiędzy elementami konstrukcji kładki w poszczególnych fazach jej składania nie dochodzi do niepożądanych kontaktów, co świadczy o prawidłowym zaprojektowaniu geometrii. Dla całego procesu składania kładki przeprowadzono analizy strukturalne, aby określić charakterystyczne zakresy naprężeń. Najważniejsza była analiza konstrukcji pracującej jako wspornik. W tym stanie występują największe wartości odkształceń i naprężeń elementów. Deformacja pionowa podczas pracy kładki w schemacie wspornikowym jest mniejsza niż 20,50 mm (rys. 6). Naprężenia zredukowane w ramionach są zwykle mniejsze niż 85 MPa, z wyjątkiem otworów montażowych na stężenia w postaci przepon pełnościennych, gdzie maksymalne naprężenie na krawędzi otworu wynosi 124,73 MPa (rys. 7).

Wszystkie wyniki uzyskane w toku analiz potwierdziły, że konstrukcja jest dobrze zaprojektowana i gotowa do realizacji. Po zakończeniu montażu kładki można będzie porównać wyniki analizy ze stanem rzeczywistym.

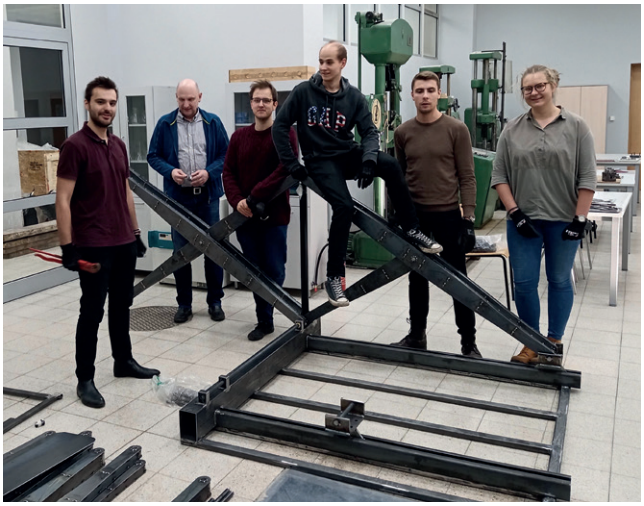
Proces montażu kładki nożycowej powinien się zakończyć w niedalekiej przyszłości. Po zmontowaniu pierwszych elementów okazało się, że mają poprawnie zaprojektowaną geometrię i zostały wykonane z wystarczającą dokładnością.

Wykorzystanie programu ANSYS pozwoliło na zbudowanie modelu w skali półtechnicznej oraz na jego odpowiednie zoptymalizowanie. Geometria stworzona w SpaceClaim została wyeksportowana do programu Autodesk Inventor, dzięki czemu można było wykonać własne rendery i animacje rozkładania kładki.

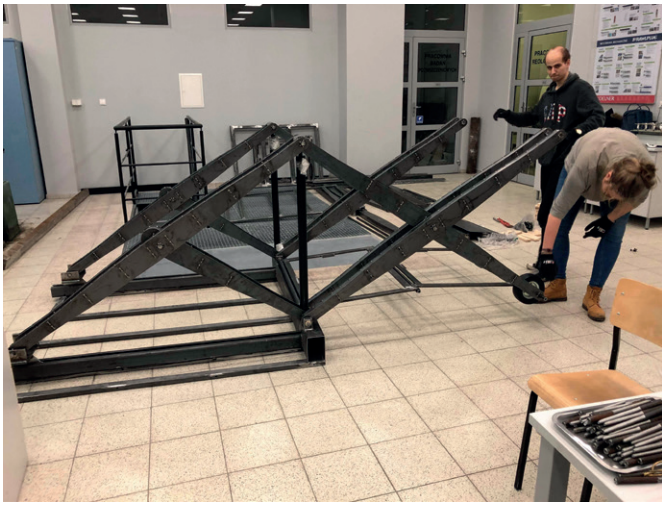
LITERATURA

[1] Al-Khafaji T., Zobel H. *„Mosty ruchome”*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2015.

[2] *„Mosty wojskowe – Podręcznik”*. Warszawa, Wydawnictwo MON, 1994.



Rys. 8. *Zespół Koła Naukowego „AKSJATOR”*



Rys. 9. *Aktualny postęp w montażu kładki nożycowej*

ANSYS SpaceClaim – wiązania w szkicowniku i drzewko historii

Marek Zaremba • MESco • mzaremba@mesco.com.pl

W oprogramowaniu ANSYS SpaceClaim tradycyjne drzewko historii (występujące w klasycznych systemach CAD) zastąpiono możliwością modyfikowania geometrii techniką przeciągnij/puść w czasie rzeczywistym (tzw. *direct modeling*) – dzięki temu stworzono oprogramowanie, które pozwala zaoszczędzić średnio 20–25% czasu potrzebnego na przygotowanie geometrii do obliczeń. Jednakże w niektórych sytuacjach drzewko historii jest nieodzowne, np. w procesie parametryzacji szkicu lub geometrii 3D. W wersji ANSYS SpaceClaim 2020 R2 dodano funkcje nagrywania bloków historii oraz tworzenia wiązań w szkicowniku – od tego momentu program oferuje w pełni funkcjonalne drzewko historii.

Szkicowanie oparte na wiązaniach

W oprogramowaniu ANSYS SpaceClaim pojawiła się nowa zakładka **Sketch** (rys. 1), zawierająca znane już opcje do tworzenia szkicu oraz nowe opcje **Constraints**, służące do definiowania wiązań. Trzeba pamiętać, że w modelowaniu bezpośrednim w ANSYS SpaceClaim wiązania nie są zapamiętywane po przejściu do modelu 3D. Jeśli użytkownik chce mieć później możliwość modyfikowania wiązań lub wymiarów, musi sporządzić szkic z włączoną opcją tworzenia drzewka historii, dostępną w zakładce **Design/Record/Blocks**.

Podczas tworzenia szkicu wiązania są generowane automatycznie. Można też samodzielnie dodać następujące wiązania: Dimension, Coincident, Midpoint, Concetric, Fixed, Horizontal, Vertical, Parallel, Perpendicular, Tangent, Equal Radius oraz Equal Distance. Większość z tych wiązań wymaga wybrania dwóch obiektów rysunkowych. Pierwszy jest celem i zostanie przesunięty, natomiast drugi jest obiektem zakotwiczenia i pozostanie na swoim miejscu. Symbol kursora zmienia się po wybraniu danego typu wiązania – wskazuje cel i kotwicę (rys. 2).

Wprowadzenie wymiarów może służyć do modyfikowania rozmiaru wybranego obiektu. Po utworzeniu wiązania wymiaru należy weń kliknąć dwukrotnie, a następnie zmodyfikować dotychczasową wartość. Linie wymiarowe można ustawić pionowo lub poziomo albo wyrównać z obiektem. Obsługiwane są także wymiary kątowe oraz długości łuku. Aby zwymiarować długość łuku, należy przytrzymać klawisz Ctrl podczas wybierania łuku, a następnie przesunąć kursor, aby ustawić wiązanie.

Korzystając ze szkicowania opartego na więzach, można tworzyć obiekty szkicu zdefiniowane niedostatecznie, w pełni zdefiniowane lub przedefiniowane (rys. 3):

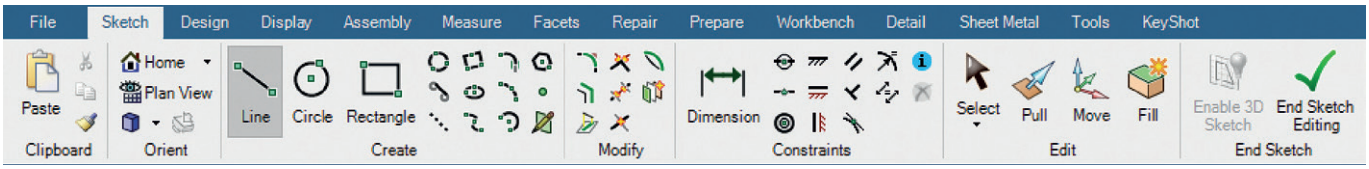
- niedostatecznie zdefiniowane obiekty mają pewien stopień swobody i są podświetlane w oknie projektu na jasnoniebiesko,
- w pełni zdefiniowane obiekty nie mają stopni swobody i są w oknie projektu podświetlone na ciemnoniebiesko,
- przedefiniowane obiekty są podświetlane w oknie projektu na czerwono – dotyczy to również linii nadmiernie związanych wymiarowo; aby kontynuować tworzenie geometrii, należy usunąć jedno lub więcej ograniczeń.

W zakładce **Sketch/Constraints** znajdują się jeszcze dwie interesujące funkcje: **Show Constraint Tips** oraz **Delete Constraint**. Pierwsza służy do przeglądania zastosowanych wiązań, a druga – do ich usuwania.

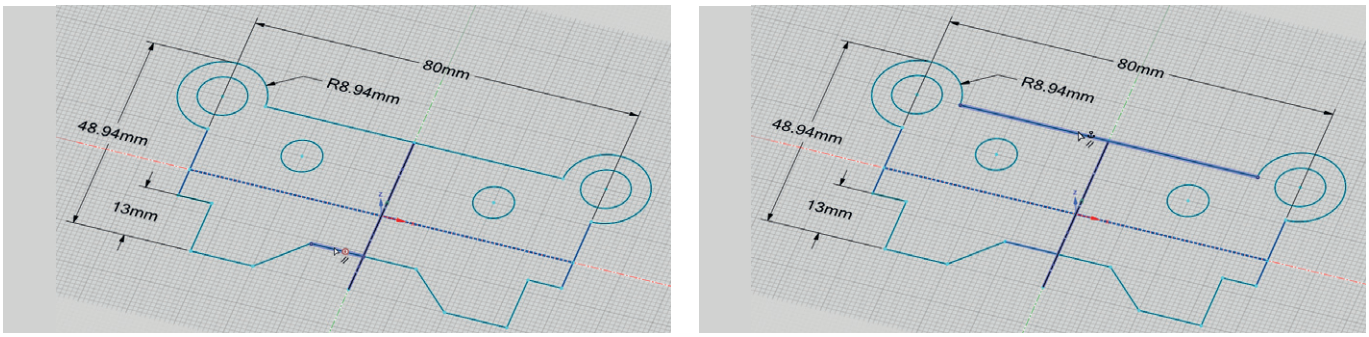
Narzędzie Delete Constraint jest dostępne przy włączonej opcji Show Constraint Tips (rys. 4).

Nagrywanie bloków historii – drzewko historii

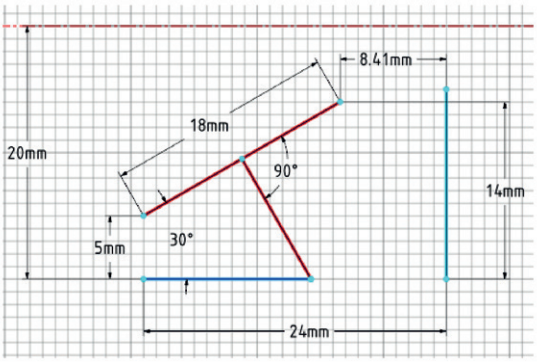
Narzędzie **Block Recording**, dostępne w zakładce **Design/Record/Blocks** (rys. 5), rejestruje w specjalnych blokach wszystkie zmiany modelu. Każdy blok reprezentuje nagrany skrypt, którego można użyć do odtworzenia danej części projektu modelu. Omawiane narzędzie przydaje się do śledzenia zmian w SpaceClaim podczas przygotowań do symulacji. Zapewnia szybsze i łatwiejsze edytowanie modelu z zachowaniem jego pełnej kontroli.



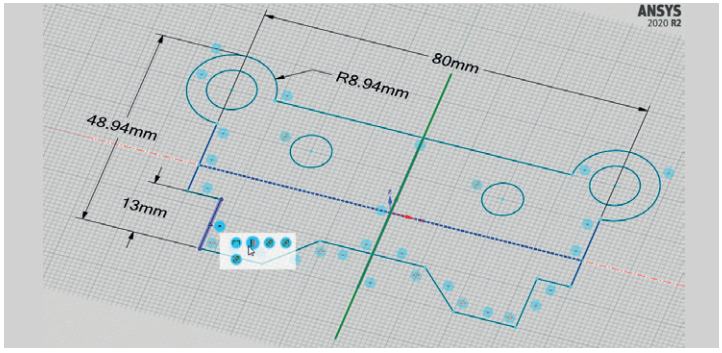
Rys. 1. *Zakładka Sketch*



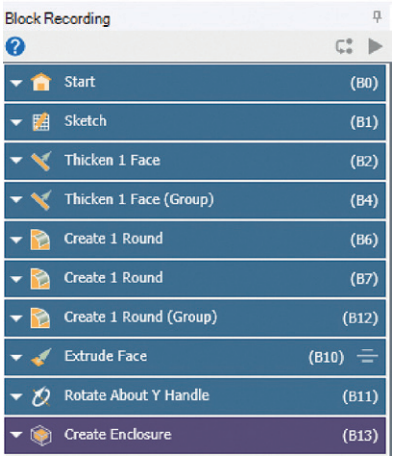
Rys. 2. *Przypisanie wymiarów oraz wiązania typu Parallel*



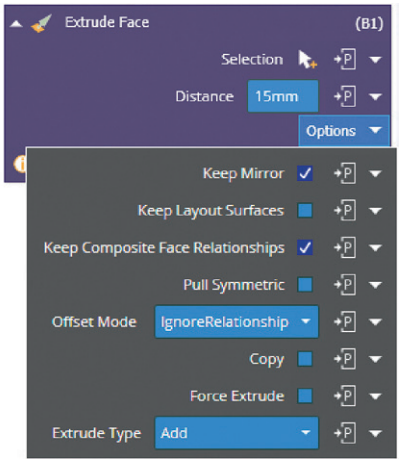
Rys. 3. *Definicja szkicu*



Rys. 4. *Wyświetlanie zastosowanych wiązań*



Rys. 5. *Opcja Block Recording*



Rys. 6. *Edycja wymiarów i opcji dla narzędzia Pull*

Edycja właściwości bloku może się opierać na wymiarze lub zmianie opcji. Po edycji bloku te bloki, które wymagają aktualizacji, są oznaczone ikoną (rys. 6).

Działanie poszczególnych opcji:

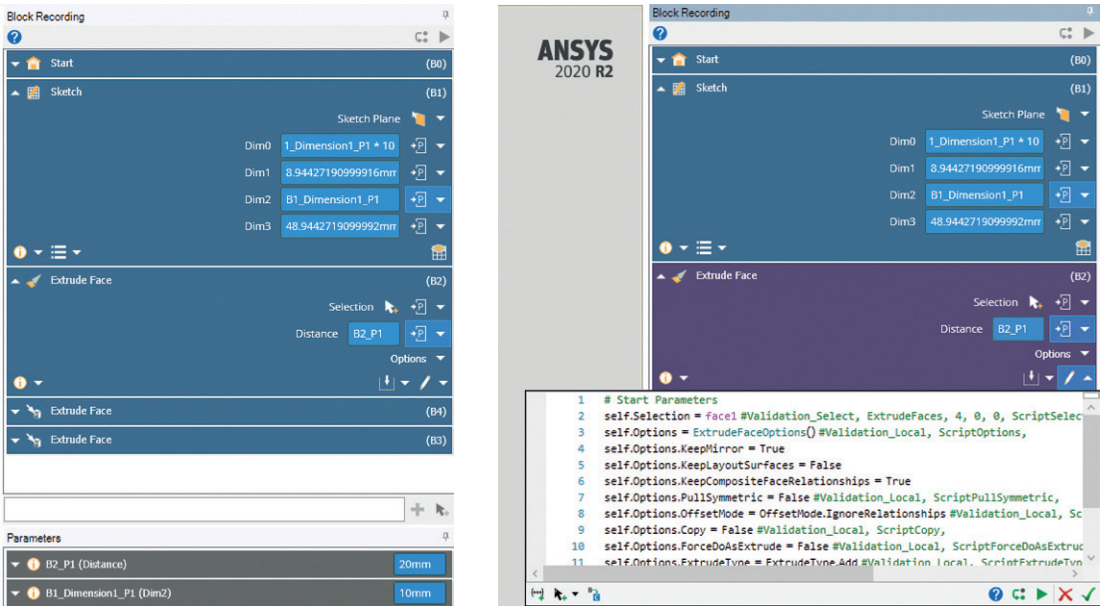
- opcja **Next** pozwala zaktualizować pojedynczy blok i przejść do następnego,
- opcja **Continue** powoduje zaktualizowanie wszystkich bloków i przejście do bloku końcowego,
- opcja **Move to** służy do zmiany kolejności bloków przez wybranie konkretnego bloku i przeciągnięcie go w inne miejsce,
- opcja **Force Regenerate** wymusza aktualizację zaznaczonego bloku,
- opcja **Delete** służy do usuwania wybranych bloków,
- opcja **Supress** wyłącza wybrany blok.

Opcje Move to, Force Regenerate, Delete i Supress są dostępne po kliknięciu prawym przyciskiem myszy na wybrany blok.

Ważną zaletą narzędzia Block Recording jest parametryzacja. Po kliknięciu można utworzyć parametr, który pojawia się w dolnej części okna. Nowościami są parametryzacja wymiarów określonych w szkicowniku oraz możliwość wprowadzania zależności między wymiarami po rozwinięciu opcji **Parameters** – wszystkie zaimplementowane parametry będą widoczne w ANSYS Workbench. Dodatkową funkcjonalnością jest definiowanie zmiennych (**Create Variable**), do których można się odnosić podczas modyfikacji skryptów tworzących dane bloki (rys. 7).

Narzędzie nagrywania można włączyć na każdym etapie tworzenia geometrii, jednak trzeba pamiętać, że jego wyłączenie w dowolnym momencie spowoduje, że oprogramowanie „zapomni" całe drzewko historii i nie będzie możliwości powrotu do niego.

Drzewko historii w ANSYS SpaceClaim to kolejny krok w dobrym kierunku. Obecnie użytkownik oprogramowania ma zapewnioną elastyczność modelowania bezpośredniego, a jednocześnie dysponuje narzędziami niezbędnymi do modelowania parametrycznego.



Rys. 7. *Parametryzacja modelu oraz modyfikacja skryptu danego bloku*

Nowości w oprogramowaniu ANSYS Fluent

Maciej Kryś • MESco • mkrys@mesco.com.pl

Z każdą kolejną aktualizacją oprogramowania ANSYS zmienia się również moduł do symulacji przepływów. Wersja 2020 R2 przynosi użytkownikom oprogramowania Fluent wiele nowości – zarówno na poziomie ogólnym, ułatwiającym obsługę, jak i w zakresie specjalistycznych narzędzi.

Spośród ogólnych usprawnień warto wymienić udoskonalony moduł wyrażeń **Expressions**. Za ich pomocą można obecnie definiować właściwości materiałowe w funkcji temperatury, ciśnienia, lepkości czy siły ścinającej, co w wielu przypadkach wyklucza konieczność pisania UDF-ów.

Bardzo przydatnym nowym narzędziem jest **wyświetlanie wykresów** dla wyrażeń (rys. 1) oraz właściwości materiałowych zadanych klasycznie przez interfejs (np. polynomial czy piecewise-linear). Dzięki temu da się w prosty sposób sprawdzić poprawność wprowadzonych danych.

Do funkcji redukcyjnych Sum oraz Average dodano możliwość wprowadzenia wagi przepływu masowego **Mass Weighted Average**.

Drobną, ale ważną zmianą w kontekście składni wyrażeń jest dodanie wsparcia dla znaku ^ przy potęgowaniu (w poprzednich wersjach używano podwójnej gwiazdki **).

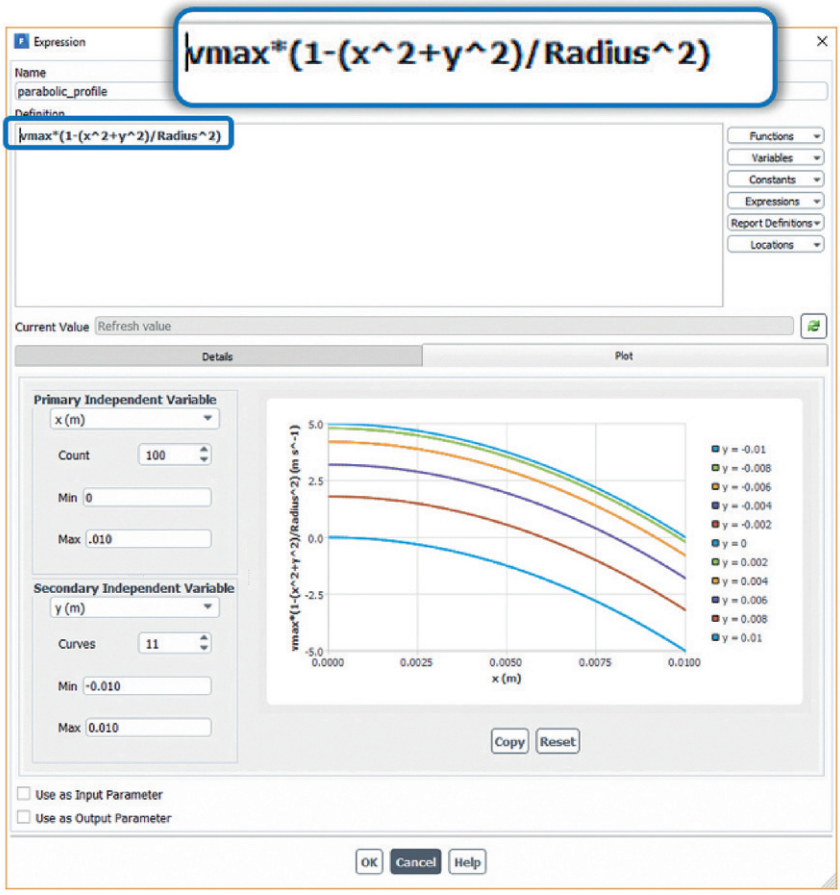
Użytkowników UDF-ów ucieszy zapewne fakt, że obecnie nie ma już obowiązku posiadania zewnętrznego kompilatora – w wersji 2020 R2 został zabudowany **wewnętrzny kompilator C**. Co więcej, przy rekompilacji biblioteki nie trzeba wyładowywać użytego wcześniej UDF-a, co znacznie ułatwia testowanie funkcji.

Wiele zmian nastąpiło w zakresie analiz wielofazowych. Przede wszystkim powstał nowy model obliczeniowy dla podejścia Euler-Euler. Moduł **GENTOP** rozwiązuje zagadnienia wielofazowe, których skala struktur jest trudna do określenia (obszar pomiędzy powierzchnią swobodną a przepływem pęcherzykowym). Usprawniono również schemat dyskretyzacji **Body Force Weighted** oraz model fazy dyskretnej **DPM**.

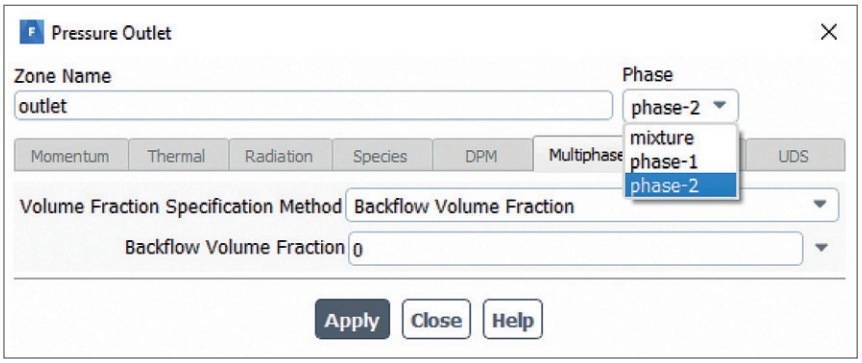
Niewątpliwym ułatwieniem pracy z programem jest **konsolidacja warunków brzegowych** w jednym oknie (rys. 2). Obecnie nie ma już potrzeby wywoływania nowego okna dialogowego przy przełączaniu się między fazami.

Ciekawe usprawnienie dotyczy również pola siatek nakładanych – Overset Mesh. Największymi problemami tej metody są wąskie szczeliny, które przy nieodpowiednim zagęszczeniu generują dużo niesprzężonych elementów (tzw. Orphan Cells), oraz zbyt duża różnica w rozmiarze elementów między siatką tła i części.

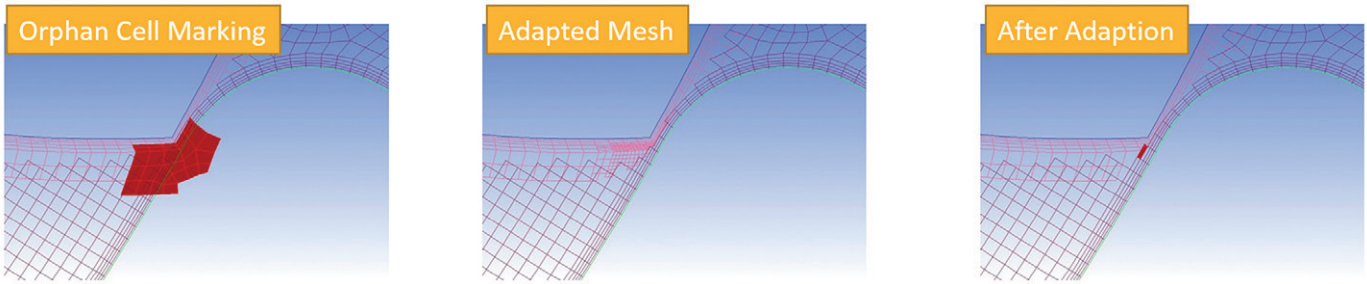
W nowej wersji oprogramowania możliwe jest **adaptacyjne zagęszczenie siatki** na podstawie tych dwóch kryteriów



Rys. 1. *Wykres tworzony na podstawie wyrażenia*



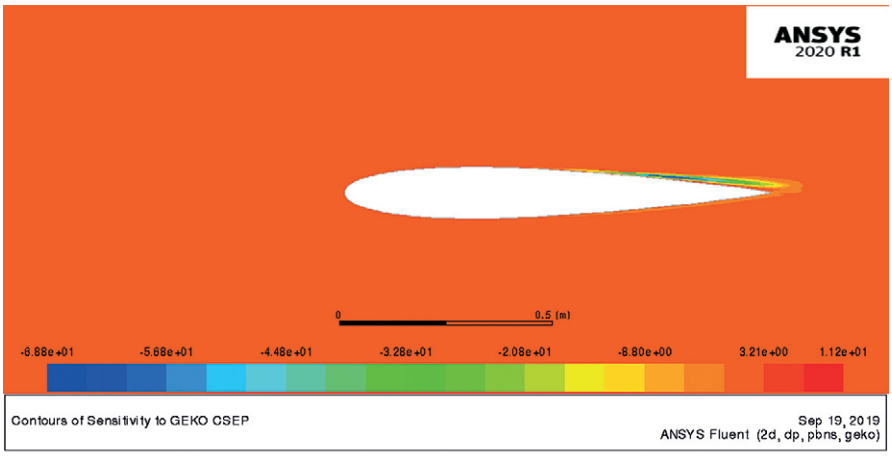
Rys. 2. *Skonsolidowane okno warunku brzegowego w analizie wielofazowej*



Rys. 3. *Przykład adaptacji siatki po stwierdzeniu obecności komórek Orphan*

– obecności tzw. sierotek oraz zbyt dużej różnicy rozmiarów elementów (rys. 3). Na razie działanie tej funkcji ogranicza się do siatek statycznych, lecz w przyszłości zostanie rozszerzone na siatki dynamiczne.

Zmiany nie ominęły również modułu **Adjoint Solver**. Poza drobnymi modyfikacjami interfejsu, mającymi na celu uproszczenie procedury optymalizacyjnej, wprowadzono też ważną zmianę, a mianowicie: możliwość uwzględnienia turbulencji w analizie wrażliwości. Tradycyjnie analiza wrażliwości zakłada tzw. zamrożoną turbulencję. W większości przypadków nie jest to problemem, jednak w wyjątkowych sytuacjach (np. gdy optymalizowany jest model będący blisko optimum) może mieć duże znaczenie. Począwszy od wersji 2020 R2, Adjoint Solver wspiera model turbulencji GEKO w obliczeniach wrażliwości. Oprócz uwzględnienia turbulencji w szacowaniu wrażliwości konstrukcji takie podejście ma dodatkowy atut: pokazuje, które obszary modelu są wrażliwe (i w jakim stopniu) na zmianę parametrów modelu GEKO. Dzięki temu użytkownik otrzymuje wskazówki, jak dobrać parametry, aby najlepiej się dopasować do wyniku eksperymentu.



Rys. 4. *Wykres wrażliwości modelu na jeden ze współczynników GEKO*

Model turbulencji GEKO jest teraz dostępny także dla użytkowników programu CFX. Podobnie jak w programie Fluent możliwe jest dostosowanie czterech współczynników modelu, aby dokładnie dopasować symulację do eksperymentu.

Ponadto rozszerzono interfejs komunikacyjny programu CFX, łączący go z programem GT-Power od Gamma Technologies. Obecnie symulacje w programie CFX można sprzęgać nie tylko z GT-Power, lecz także z pełnym pakietem GT-SUITE, który oprócz symulacji silników spalinowych i turbosprężarek oferuje możliwość modelowania innych systemów, takich jak: układy chłodzenia, wtrysk paliwa, układy przeniesienia napędu czy układy wydechowe.

Analiza zjawiska erozji w podwodnych instalacjach wydobywczych

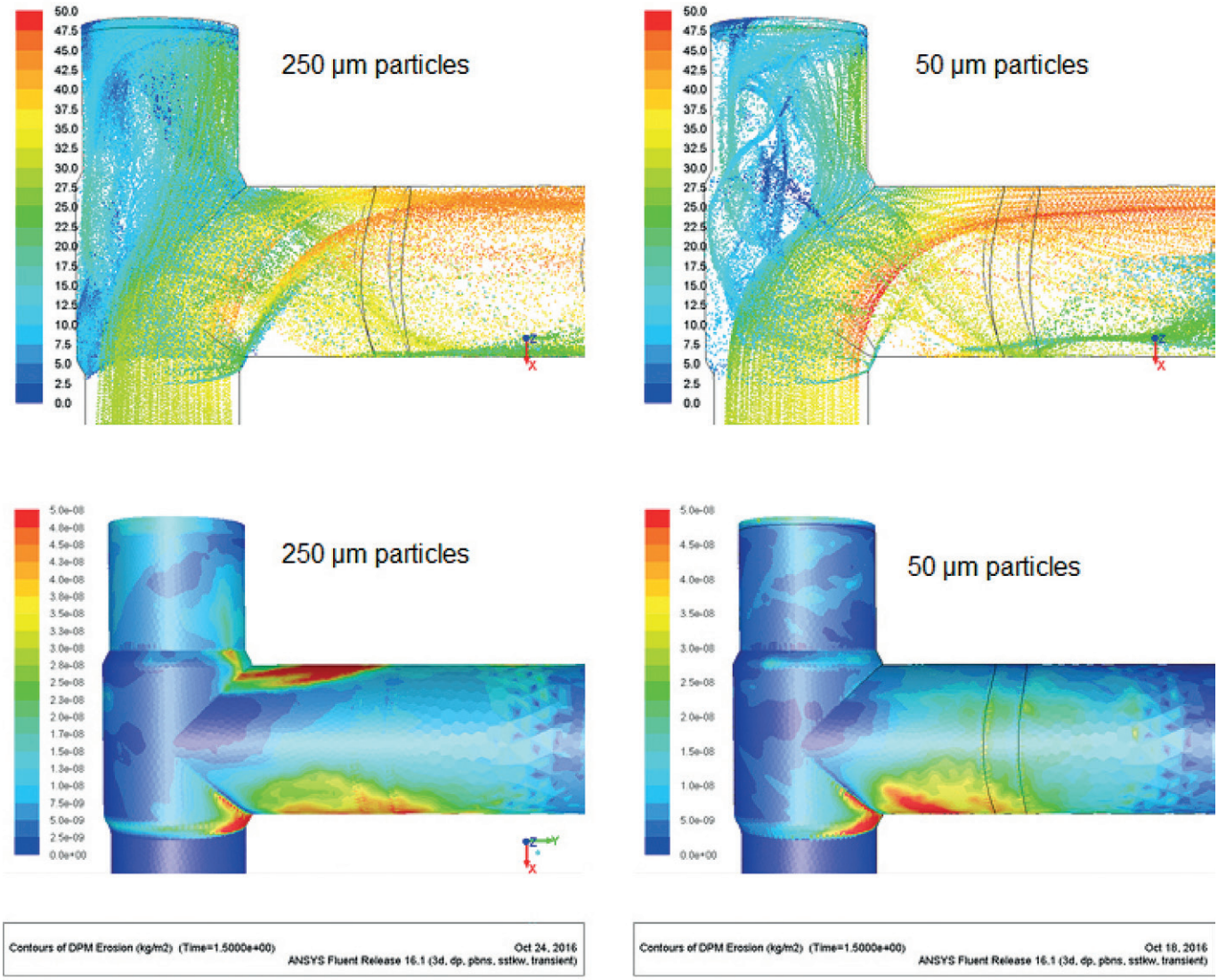
Przemysław Smakulski • TechnipFMC • przemyslaw.smakulski@technipfmc.com

Erozja w instalacjach służących do eksploatacji złóż ropo- i gazonośnych jest związana z tym, że w przepływie mieszaniny płynów podczas procesu wydobywczego występują ziarna piasku. Lokalne powstawanie ognisk erozji może doprowadzić do utraty funkcjonalności urządzenia oraz integralności systemu. Analityczne metody oceny wystąpienia erozji nie uwzględniają złożonej geometrii urządzenia oraz zmiennych warunków przepływowych podczas wydobycia. W procesie projektowania złoża niezbędne jest więc zastosowanie metod numerycznych do określenia czasu eksploatacji instalacji.

Analizy podwodnych instalacji wydobywczych

Firma TechnipFMC oferuje kompleksowe rozwiązania z dziedziny eksploatacji złóż naftowych, zapewniające ciągłość produkcji przez 20, a nawet 35 lat. Planowanie profilu produkcji na przestrzeni lat uwzględnia wiele możliwych scenariuszy wydobywczych, które definiują założenia projektowe. Ze względu na specyfikę pracy instalacji podwodnych analizy przepływowe wykonywane w programie ANSYS Fluent stały się niezbędnym elementem codziennej pracy nad projektem.

Oprócz analizy zjawiska erozji, która jest tematem niniejszego artykułu, oprogramowanie umożliwia m.in.:



Rys. 1. *Ruch cząsteczek oraz erozja instalacji podwodnych dla cząsteczek o różnej średnicy*

- analizę termiczną (obejmującą wychłodzenie, tworzenie hydratów, wysoką temperaturę itp.),
- analizę separacji fazy ciekłej od gazowej,
- analizę zjawiska Joule'a-Thomsona,
- analizę wibracji wywołanych wielofazowym przepływem wewnętrznym i opływem zewnętrznym,
- analizę wibracji na skutek wewnętrznego przepływu jednofazowego (analizę pulsacji w systemach gazowych).

W krakowskim oddziale firmy TechnipFMC wszystkie wymienione rodzaje analiz wykonuje się w oprogramowaniu ANSYS Fluent. Stanowią one integralną część prac projektowych.

Ziarno drąży metal...

Produkcja oleju lub gazu wiąże się z wydobyciem mieszaniny, w której oprócz wspomnianej fazy ciekłej czy gazowej występuje nagromadzenie piasku. W większości złóż poziom produkcji piasku osiąga od 0,1 g/s do nawet 64 g/s. Taki poziom w odniesieniu do przepływu mieszaniny ropy i gazu uzasadnia wykorzystanie podejścia Lagrange'a do symulacji ruchu cząsteczek piasku w płynie.

W analizach podwodnych można rozróżnić dwie główne podgrupy cząstek stałych, biorąc pod uwagę zakres ich średnic: powyżej 100 µm i poniżej 100 µm. W praktyce to rozróżnienie odnosi się do liczby Stokesa (*St*), która definiuje podział na cząsteczki płynące zgodnie z głównym nurtem przepływu ($St < 1$) oraz cząsteczki, dla których uwzględnia się bezwładność ruchu ($St > 1$).

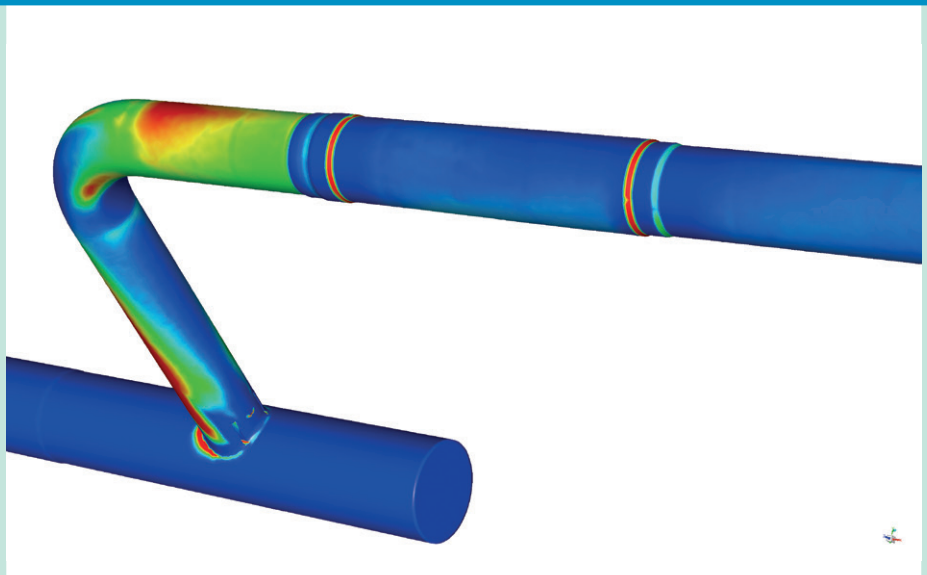
Na rys. 1 pokazano różnice w wynikach uzyskanych dla cząsteczek o średnicach 250 µm i 50 µm, przy tych samych warunkach przepływowych fazy ciągłej.

Aby otrzymać wyniki bardziej zbliżone do rzeczywistych, wykonuje się symulacje CFD w czasie, które obejmują pierwsze kilka do kilkunastu sekund produkcji. Po osiągnięciu stanu quasi-stacjonarnego (kiedy średnia ilość cząsteczek wewnątrz domeny numerycznej osiąga stały poziom) wyniki z symulacji są ekstrapolowane na okres obejmujący dany scenariusz produkcyjny. W analizie typu *transient* bierze się pod uwagę wpływ zjawisk niestacjonarnych, występujących podczas przepływu przez elementy instalacji wydobywczej, na miejsce wystąpienia erozji.

W firmie TechnipFMC inżynierowie wykorzystują specjalny model erozji, przeznaczony do analizy instalacji podwodnych, zweryfikowany przez organ certyfikujący DNV GL [1]. W tym modelu zakłada się, że erozja powstaje wskutek bezpośredniego uderzenia cząsteczki o ściankę wewnętrzną rurociągu, oraz uwzględnia się takie parametry, jak:

- kąt natarcia,
- prędkość cząsteczki,
- średnica cząsteczki,
- stałe materiału erodowanego.

Jako rezultat analizy otrzymuje się mapę z lokalizacją miejsc najbardziej zagrożonych zjawiskiem erozji (rys. 2). Na podstawie oceny stopnia ubytku w cyklu życia produktu konstruktor może zdecydować, czy miejsca występowania erozji należy wzmocnić przez dodanie materiału rezystywnego na zużycie, czy też zastosować zabiegi mające na celu zmianę kierunku przepływu lub rozproszenie cząstek piasku.



Rys. 2. *Ogniska erozji – instalacja podwodna*

Analiza na styku dwóch modeli

Scenariusz produkcyjny zazwyczaj obejmuje wiele lat produkcji, dla których zdefiniowane są parametry wejściowe do analizy (warunki brzegowe), takie jak skład fizykochemiczny mieszaniny ropy i gazu czy ilość piasku, jaki przepływa w ciągu sekundy.

W metodzie oceny ryzyka erozji wykorzystuje się modele analityczne (1D) oraz nakłada na nie parametr korygujący, zależny od współczynnika geometrycznego GF (ang. *geometrical factor*) [2]. Współczynnik GF jest wynikiem analiz numerycznych CFD dla jednego, wybranego ze scenariusza produkcyjnego punktu pracy złoża. Na podstawie wyników analiz CFD, przeprowadzonych dla określonego punktu pracy, oraz przy pomocy gotowych modeli analitycznych 1D inżynier jest w stanie określić łączny poziom ubytku masy, wyrażony w milimetrach straty materiału.

Wybór punktu pracy do analizy CFD bazuje na obliczeniach jednowymiarowych całego scenariusza i oszacowaniu punktu pracy o najwyższym tempie erozji.

Przedstawiona tu metoda reprezentuje podejście konserwatywne, ponieważ dla przyjętych w niej warunków współczynnik GF osiąga wartość maksymalną na przestrzeni lat. Niemniej jednak wykonanie analiz CFD w przebiegu czasowym pozwala dostosować wyniki obliczeń numerycznych i zmniejszyć stopień przeszacowania analiz.

Digital Twin i przyszłość symulacji

Inżynierowie w firmie TechnipFMC pracują nad rozwiązaniami dla światowych liderów z branży oil & gas, takich jak: Total, BP, Equinor czy ExxonMobil Corporation. Dział obliczeń numerycznych w Krakowie świadczy usługi na wstępnym etapie projektowania urządzeń, a jednocześnie coraz mocniej wkracza w obszary związane z serwisem, utrzymaniem ruchu oraz planowaniem eksploatacji. Oferta serwisowa rozszerza się o nowe, niespotykane dotychczas rozwiązania, w których główną oś rozwoju stanowią symulacja w oprogramowaniu ANSYS Fluent oraz analiza danych ze złoża w czasie rzeczywistym. Informacja z pomiarów online umożliwia dostosowanie modelu numerycznego do warunków typowych dla pracującego obiektu oraz wysłanie uaktualnionych danych na temat przyszłego zużycia materiału.

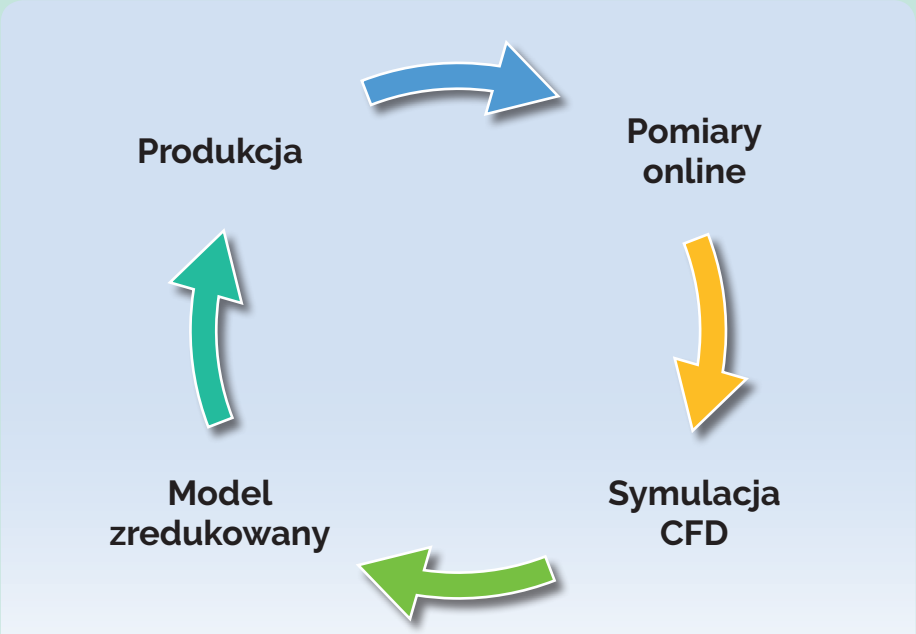
Przedstawiony tu proces zapewnia elastyczność produkcji oraz dostarcza operatorowi dodatkowych informacji na temat przewidywanego czasu pracy elementów konstrukcyjnych. Takie dane są nieocenione z punktu widzenia sterowania produkcją – operator może bowiem na tej podstawie zmienić nastawy poszczególnych zaworów/dławików, aby zapobiec zjawisku nadmiernego zużywania się instalacji wskutek erozji. Innymi słowy: operator jest w stanie zoptymalizować produkcję w taki sposób, aby ilość wydobywanego surowca była maksymalna, a system pozostawał bezpieczny.

Jednym z ważnych kierunków działań firmy TechnipFMC jest maksymalne ograniczanie erozji w podwodnych instalacjach wydobywczych, ponieważ to zjawisko ma istotny wpływ na poziom wydobycia pierwotnego źródła energii. Ten cel firma osiąga dzięki efektywnemu wykorzystaniu danych pomiarowych do dostosowywania modeli numerycznych, czemu sprzyja rozwój aplikacji internetowych (rys. 3). Dzięki innowacyjnym narzędziom i wciąż doskonalonym metodom numerycznym CFD inżynierowie z TechnipFMC potrafią z coraz większą dokładnością określić nie tylko miejsce wystąpienia erozji, lecz także jej rzeczywistą wartość, a to bezpośrednio przekłada się na zyski klientów firmy.

LITERATURA

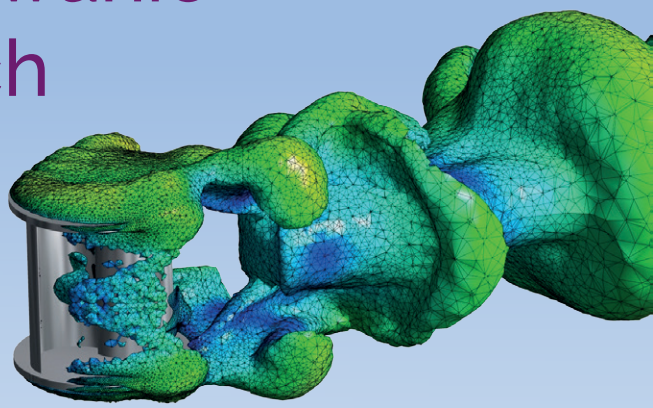
[1] *"DNVGL-RP-O501 Managing sand production and erosion. Recommended practice"*. 2007.

[2] Sanchis A., Skorgen A. "CFD Erosion Modeling of Blind Tees". *12th International Conference on CFD in Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries*. SINTEF, Throndheim (Norway) 2017.



Rys. 3. *Schemat optymalizacji pracy podwodnej instalacji wydobywczej*

Kompleksowe modelowanie pracy turbin wiatrowych z pionową osią obrotu



Łukasz Marzec • Politechnika Śląska • lmarzec@mesco.com.pl
Zbigniew Buliński • Politechnika Śląska • zbigniew.bulinski@polsl.pl
Tomasz Krysiński • Politechnika Śląska • tomasz.krysinski@polsl.pl
Jakub Tumidajski • Politechnika Śląska • kubatum@gmail.com

W ostatnich kilku dekadach można zaobserwować duży wzrost zainteresowania energetyką wiatrową, co znajduje potwierdzenie w niemal wykładniczym wzroście skumulowanej mocy turbin wiatrowych zainstalowanych na świecie. Energetyka zawodowa jest obecnie zdominowana przez duże jednostki z poziomą osią obrotu (HAWT – *horizonal axis wind turbine*). Te konstrukcje charakteryzują się dużą mocą i wysoką sprawnością, jednak ze względu na hałas i dużą wrażliwość na kierunek oraz poziom turbulencji wiatru nie nadają się do produkcji energii w małych przydomowych elektrowniach wiatrowych. Do tego celu bardziej odpowiednie są konstrukcje turbin wiatrowych z pionową osią obrotu (VAWT – *vertical axis wind turbine*), które coraz częściej stają się przedmiotem badań naukowców.

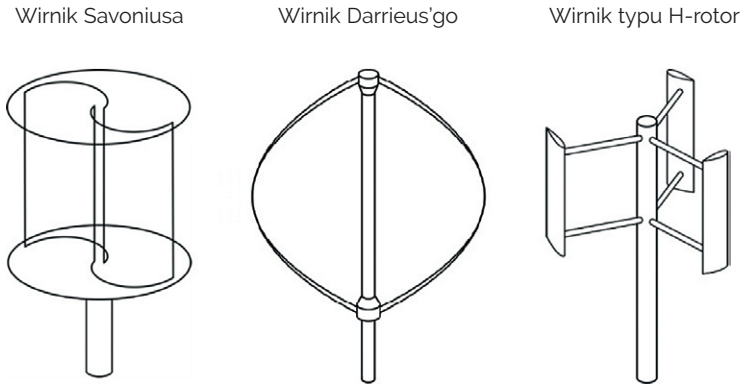
W przyszłości małe przydomowe turbiny wiatrowe typu VAWT mogą się stać bardzo obiecującą alternatywą lub uzupełnieniem dla ogniw fotowoltaicznych. Bardzo niski poziom emitowanego hałasu, wysoka maksymalna prędkość robocza wiatru, bardzo niska wymagana startowa prędkość wiatru, niski wpływ turbulencji na pracę turbiny oraz unikierunkowość – to cechy, dzięki którym VAWT są idealne do przydomowej pracy nawet w silnie zurbanizowanym środowisku. Niestety, oprócz niezaprzeczalnych zalet VAWT wyróżniają się także stosunkowo niską sprawnością i aby mogły w przyszłości stanowić konkurencję dla innych typów odnawialnych źródeł energii, konieczne jest poprawienie tego parametru. Turbiny wiatrowe z pionową osią dzielą się na dwa podstawowe typy: w pierwszym główną siłą napędową jest siła oporu aerodynamicznego, a w drugim – siła nośna. Praca wirnika Savoniusa bazuje na sile oporu aerodynamicznego, natomiast zasada pracy wirnika Darrieus'go opiera się na sile nośnej. Szczególnym przypadkiem wirnika Darrieus'go jest H-rotor (rys. 1).

Obecnie prowadzonych jest wiele prac badawczych – zarówno z wykorzystaniem pomiarów, jak i obliczeń numerycznych za pomocą narzędzi CFD. Analizowane są różne kształty profili łopat wirników typu Savonius [1–3] i H-Rotor [4–6] oraz różne wielkości wirników i kąty natarcia profili aerodynamicznych. Podejmowano też próby optymalizacji kształtu wirników.

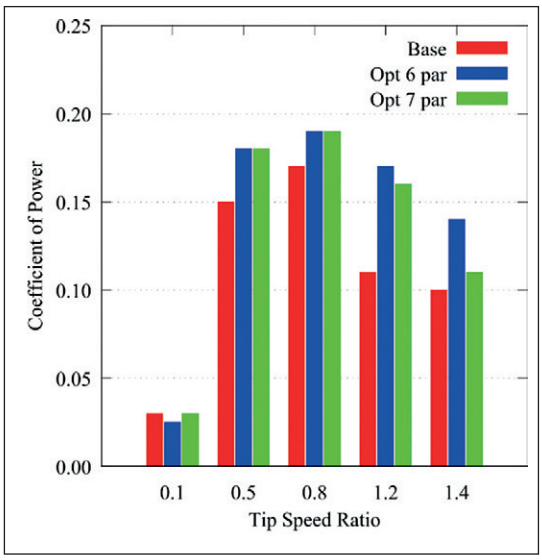
W ramach projektu badawczego realizowanego w Katedrze Techniki Cieplnej Politechniki Śląskiej trwają prace, których głównym celem jest optymalizacja turbin z pionową osią obrotu. Projekt obejmuje zarówno optymalizację kształtu wirników typu Savonius i H-Rotor z wykorzystaniem modeli zredukowanych oraz dwukierunkową sprzężoną analizę przepływowo-wytrzymałościową pracującej turbiny, jak i badania eksperymentalne w przeznaczonym do tego celu tunelu aerodynamicznym. Obliczenia z zakresu mechaniki płynów (CFD) i obliczenia wytrzymałościowe (FEA) są wykonywane odpowiednio w oprogramowaniu ANSYS Fluent i ANSYS Mechanical.

Optymalizacja

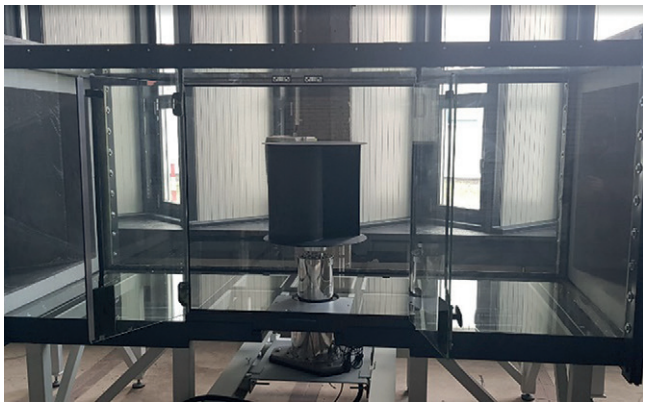
Głównym celem projektu jest opracowanie efektywnego algorytmu, który umożliwi optymalizację kształtu wirnika turbiny z pionową osią obrotu. W związku



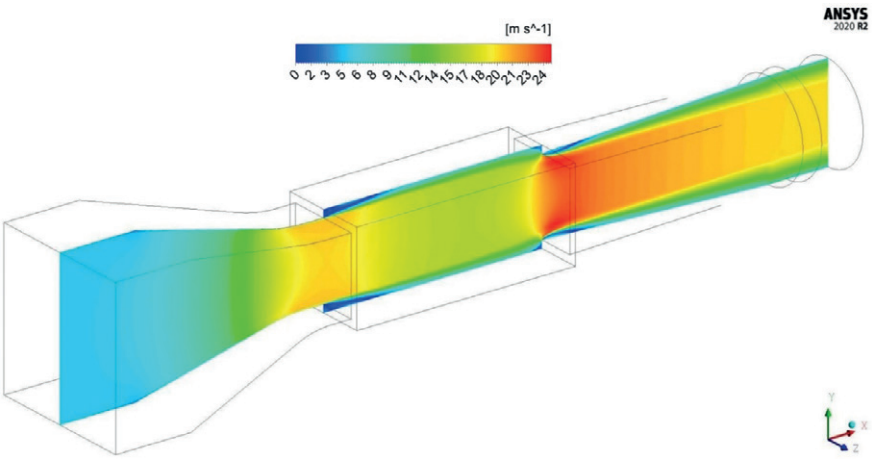
Rys. 1. *Typy wirników turbin wiatrowych z pionową osią*



Rys. 2. *Wykres wartości współczynnika mocy dla bazowego kształtu wirnika typu Savonius oraz dla kształtów zoptymalizowanych*



Rys. 3. *Komora pomiarowa tunelu aerodynamicznego ze stanowiskiem badawczym*



Rys. 4. *Profil rozkładu prędkości w przekroju tunelu aerodynamicznego*

z tym opracowano dwu- i trójwymiarowy model matematyczny opływu powietrza wokół wirników turbin wiatrowych. Do tego celu wykorzystano uśredniony model Reynoldsa (*Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*), a także odpowiednio dobrany i zwalidowany model turbulencji. Problem obejmował wyłącznie izotermiczny przepływ powietrza, który jednak jest silnie nieustalony i silnie turbulentny, przez co obliczenia są niezwykle czasochłonne. Aby umożliwić obliczenia optymalizacyjne, należało opracować modele zredukowane pracującej turbiny. W efekcie pierwszych prac optymalizacyjnych [7] udało się uzyskać nawet 20-procentowy wzrost sprawności turbiny wiatrowej opartej na wirniku typu Savonius.

Tunel aerodynamiczny

Zoptymalizowane wirniki turbin wiatrowych z pionową osią obrotu zostaną przebadane w specjalnym tunelu aerodynamicznym, aby zweryfikować działanie algorytmu optymalizacyjnego i dokładność obliczeń numerycznych. Stanowisko pomiarowe do badań turbin wiatrowych (rys. 3) zostało tak zaprojektowane, że umożliwia pomiary generowanego momentu i parametrów generowanego prądu w rzeczywistych warunkach pracy oraz w założonych punktach pracy pod obciążeniem w tunelu aerodynamicznym.

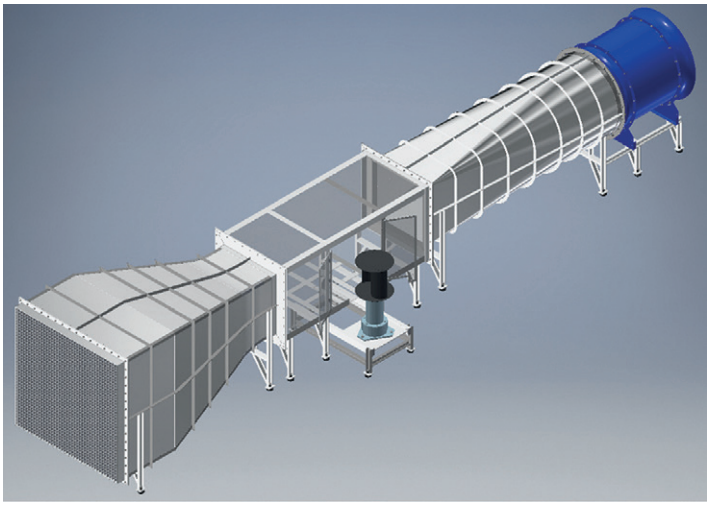
Przepływ w tunelu analizowano w programie ANSYS Fluent, aby zapewnić jak najbardziej wyrównany profil prędkości (rys. 4) w przestrzeni pomiarowej tunelu.

Konstrukcję tunelu zaprojektowano na bazie opracowanej geometrii jego kanału wewnętrznego (rys. 5 i 6). Ściany obszaru pomiarowego wykonano z laminowanego szkła (jego grubość dobrano na podstawie obliczeń wytrzymałościowych w programie ANSYS Mechanical – tak, aby uniknąć niepożądanego ugięcia tafli szkła podczas pomiarów), co pozwoliło na prowadzenie pomiarów opływu powietrza metodą cyfrowej anemometrii obrazowej (PIV – *particle image velocimetry*).

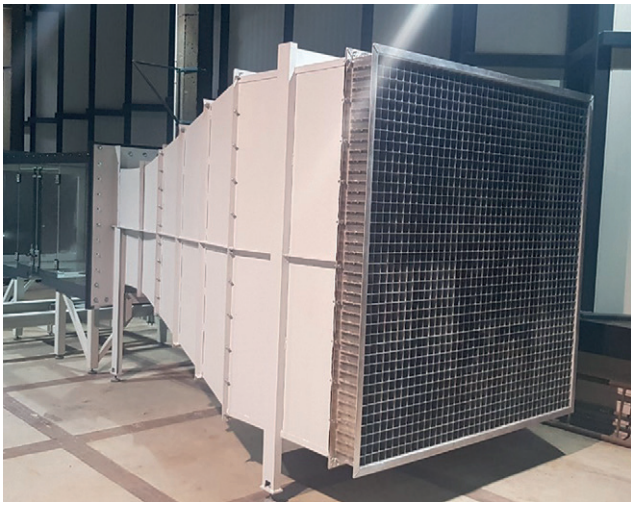
Fluid Structure Interaction

Oprócz opisu kilku prób jednokierunkowych analiz przepływowo-wytrzymałościowych [8–11] brakuje prac na temat wpływu odkształceń pracującej turbiny na jej sprawność. Dzięki wykorzystaniu w oprogramowaniu ANSYS Fluent metodologii *sliding mesh* i *dynamic mesh* oraz połączeniu solvera przepływowego z wytrzymałościowym udało się opracować model do prognozowania wpływu odkształceń wirnika na sprawność turbiny [12].

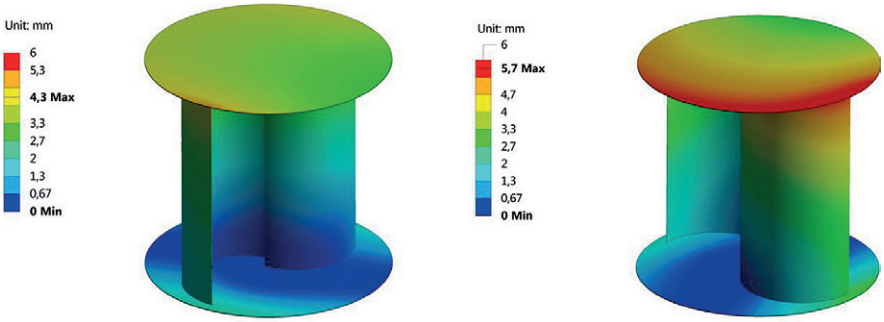
Celem analizy było sprawdzenie, czy w czasie pracy turbiny nie pojawią się niebezpieczne naprężenia, mogące prowadzić do jej uszkodzenia. Przy okazji udało się uchwycić wpływ odkształceń (rys. 7) na efektywność turbiny – jak się nieoczekiwanie okazało, te odkształcenia



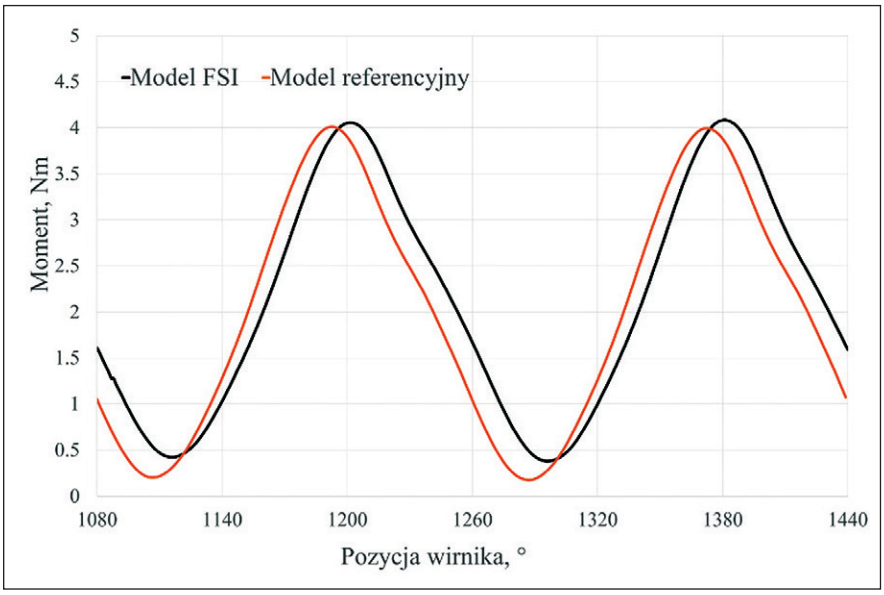
Rys. 5. *Rzut projektu CAD tunelu aerodynamicznego*



Rys. 6. *Widok laminaryzatora tunelu aerodynamicznego*



Rys. 7. *Pole rozkładu odkształceń pracującego wirnika wykonanego z aluminium*



Rys. 8. *Wykres wartości momentu w funkcji kąta obrotu wirnika dla modelu FSI oraz modelu referencyjnego*

powodują niewielki przyrost jej sprawności (rys. 8). Otrzymane wyniki wyznaczają nowy kierunek w projektowaniu wirników zarówno w kontekście optymalizacji zarówno bazowej geometrii, jak i wpływu kształtu zdeformowanego wirnika na jego sprawność. W przyszłości umożliwi to stworzenie takiego wirnika (dzięki odpowiedniemu dobraniu jego właściwości na etapie projektu), którego optymalny chwilowy kształt będzie funkcją aktualnych parametrów pracy.

Podsumowanie

Szeroko zakrojone badania, mające na celu udoskonalenie koncepcji małych przydomowych turbin wiatrowych z pionową osią, są sprawnie i skutecznie realizowane dzięki zastosowaniu oprogramowania ANSYS. Obiecujące wyniki prac dają nadzieję na wyraźne podniesienie sprawności VAWT i tym samym – na wzrost ich konkurencyjności na rynku energii rozproszonej. Obecnie rośnie zainteresowanie firm i instytucji państwowych tematyką energetyki wiatrowej, o czym świadczy m.in. konkurs zorganizowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju: „Wielkie Wyzwanie: Energia". Możliwe, że już za kilka lat nie będziemy mogli wyobrazić sobie krajobrazu przedmieść i miast bez wszechobecnych małych turbin wiatrowych.

* * *

Przedstawione wyniki są efektem badań przeprowadzonych w ramach projektu nr 2017/27/B/ST8/02298 pn. „Heurystyczny algorytm optymalizacyjny ze sprzężoną generacją modeli zredukowanych do obliczeń turbin wiatrowych", finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

LITERATURA

[1] Saha U.K., Thotla S., Maity D. "Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 96 (2008): 1359–1375.

[2] Altan B.D., Atilgan M., Özdamar A. "An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining". *Experimental Thermal and Fluid Science*. 32 (2008): 1673–1678.

[3] Zhou T., Rempfer D. "Numerical study of detailed flow field and performance of Savonius wind turbines". *Renewable Energy*. 51 (2013): 373––381. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.09.046.

[4] Rezaeiha A., Kalkman I., Blocken B. "Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine". *Applied Energy*. 197 (2017): 132–150. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.128.

[5] Rezaeiha A., Montazeri H., Blocken B. "Towards optimal aerodynamic design of vertical axis wind turbines: Impact of solidity and number of blades". *Energy*. 165 (2018): 1129––1148. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.192.

[6] Islam M., Ting D.S.-K., Fartaj A. "Aerodynamic models for Darrieus-type straightbladed vertical axis wind turbines". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12 (2008): 1087–1109.

[7] Krysiński T., Buliński Z., Nowak A.J. "Optimisation of the ellipticaly-shaped rotor of the Savonius wind turbine using evolutionary algorithm". *5th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering*. Politechnika Śląska, 2018: 1533–1540.

[8] Eboibi O., Edwards J., Howell R., Danao L. "Development of velocity flow field measurement method around a vertical axis wind turbine blade using particle image velocimetry". *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. 2 (2014): 1184–1189.

[9] Wang L., Quant R., Kolios A. "Fluid structure interaction modeling of horizontal-axis wind turbine blades based on CFD and FEA". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 158 (2016): 11–25.

[10] Lee K., Huque Z., Kommalapati R., Han A. "Fluid-structure interaction analysis of NREL phase VI wind turbine: Aerodynamic force evaluation and structural analysis using FSI analysis". *Renewable Energy*. 113 (2017): 512–531.

[11] Kumar D., Sarkar S. "Numerical investigation of hydraulic load and stress induced in Savonius hydrokinetic turbine with the effects of augmentation techniques through fluid-structure interaction analysis". *Energy*. 116 (2016): 609–618.

[12] Marzec Ł., Buliński Z., Krysiński T. "Fluid structure interaction analysis of the operating Savonius wind turbine". *Renewable Energy*. 164 (2021): 272–284.

Projekt pakietu aerodynamicznego pierwszego elektrycznego bolidu klasy Formuła Student zespołu PUT Motorsport

Krzysztof Snela • PUT Motorsport • krzysztof.snela5@gmail.com

Przy okazji projektowania pakietu aerodynamicznego dla bolidu klasy Formuła Student zawsze pojawiają się pytania o sens i cel stosowania tego typu komponentów. Te auta poruszają się z niewielkimi prędkościami w porównaniu z samochodami F1 czy F2, gdzie generowane siły docisku liczone są w tysiącach niutonów. Wraz z zagłębianiem się w temat aerodynamiki pojazdów okazuje się, że docisk to nie wszystko. Pakiet aerodynamiczny pozwala na efektywniejsze chłodzenie jednostki napędowej (w tym przypadku jest nią silnik elektryczny i falownik) i szybsze pokonywanie zakrętów, co jest bardzo istotne, ponieważ tory Formuły Student na całym świecie charakteryzują się krótkimi prostymi odcinkami i relatywnie dużą liczbą zakrętów.

Projektowanie pakietu aerodynamicznego rozpoczyna się od wyznaczenia balansu, czyli środka docisku. Siły wytwarzane przez przednie skrzydło, podłogę z dyfuzorem i tylne skrzydło są przenoszone przez koła, czyli zawieszenie auta. Wspólnie z grupą projektującą zawieszenie ustalono, że najlepszą opcją jest uzyskanie możliwie zrównoważonego stosunku, czyli 50:50. Przypadek 65:35 (F:R) oznacza zbyt duży procentowy udział docisku na przednią oś, co w konsekwencji prowadzi do nadsterownego zachowania się auta; analogicznie przypadek 35:65 (F:R) powoduje podsterowność pojazdu.

Proces projektowania pakietu

Na początku określono główne założenia dla nowego pakietu aerodynamicznego. W tym sezonie były one następujące:

- poprawa jakości chłodzenia,
- możliwie niski opór powietrza,
- balans aerodynamiczny 50:50,
- poprawa wykonawstwa pakietu aerodynamicznego,
- rezygnacja z elementów wytwarzanych w technologii FDM,
- redukcja masy pakietu aerodynamicznego.

Pierwszy cel wynika z faktu, że w poprzednich konstrukcjach bolidów spalinowych często występował problem z przegrzewaniem się auta. W przypadku bolidu elektrycznego istnieje regulaminowy zapis, że powyżej temperatury 60°C musi nastąpić rozłączenie układów elektrycznych. Pierwszy bolid elektryczny zespołu PUT Motorsport będzie bazować na konstrukcji bolidu spalinowego z 2015 r. Była to prosta, niezawodna, a jednocześnie ciężka konstrukcja, dlatego jednym z głównych założeń jest uzyskanie minimalnego oporu powietrza. Balans aerodynamiczny wyznaczono wspólnie z grupą odpowiedzialną za zawieszenie. W tym roku planowane jest wykonanie całego pakietu aerodynamicznego wyłącznie z włókna węglowego (nie uwzględniając mocowań), co pozwoli na zredukowanie masy konstrukcji.

Kolejnym krokiem był wybór oprogramowania do symulacji CFD. Zespół PUT Motorsport od kilku lat współpracuje z firmą MESco, od której otrzymuje dostęp do komercyjnej wersji programu ANSYS z dodatkiem Fluent – to właśnie w nim przeprowadzane są wszystkie symulacje przepływu powietrza.

W tym sezonie wystąpiła dość specyficzna sytuacja. Ponieważ bazą dla konstrukcji bolidu elektrycznego miała być konstrukcja pierwszego bolidu spalinowego, zespół PUT Motorsport miał już gotowe sekcje boczne i nos auta. Formy niezbędne do wykonania tych komponentów są znacznie większe niż np. forma na profil lotniczy, dlatego podjęto decyzję, aby nie zmieniać kształtu wcześniej wspomnianych elementów. Przygotowano więc model uproszczony auta bez pakietu aerodynamicznego (rys. 1). W modelu uproszczonym nie uwzględnia się elementów, które nie mają istotnego wpływu na przepływ, np. śrub czy nakrętek.

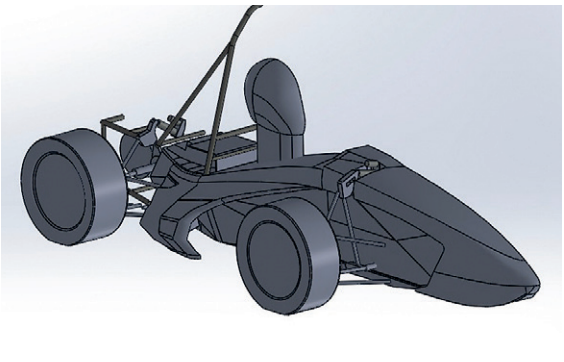
Następnie dla połówki modelu (wykorzystano fakt, że bolid ma oś symetrii, co pozwoliło zredukować liczbę elementów skończonych i skrócić czas obliczeń numerycznych) przeprowadzono symulację, której wyniki zamieszczono w tabeli 1. Na ich podstawie można stwierdzić, że auto wytwarza siłę nośną zamiast siły docisku. Wynika to z faktu, że podczas budowy pierwszego bolidu nie zajmowano się badaniem jego aerodynamiki.

Symulacje 2D

Przed rozpoczęciem symulacji należało dobrać odpowiednie profile lotnicze do wykonania pakietu aerodynamicznego (te elementy muszą być zgodne z zapisami regulaminu zawodów). Od kilku lat zespół PUT Motorsport stosuje profile lotnicze Selig S1223, które charakteryzują się dobrym stosunkiem C_L/C_D. Dodatkowo w zeszłym roku zastosowano profil MH 115 na całe przednie skrzydło.

Następnie przeprowadzono pierwsze symulacje 2D, aby określić optymalne kąty natarcia i ułożenie profili. Wyniki jednej z wielu optymalizacji przedstawiono na rys. 2, na którym zaznaczono najkorzystniejszy układ profili.

Na rys. 3 pokazano rozkład ciśnienia na optymalnie ułożonych profilach przedniego i tylnego skrzydła. Dla tych układów profili utworzono modele 3D i wstawiono je do wcześniej badanego modelu



Rys. 1. *Uproszczony model bolidu elektrycznego*

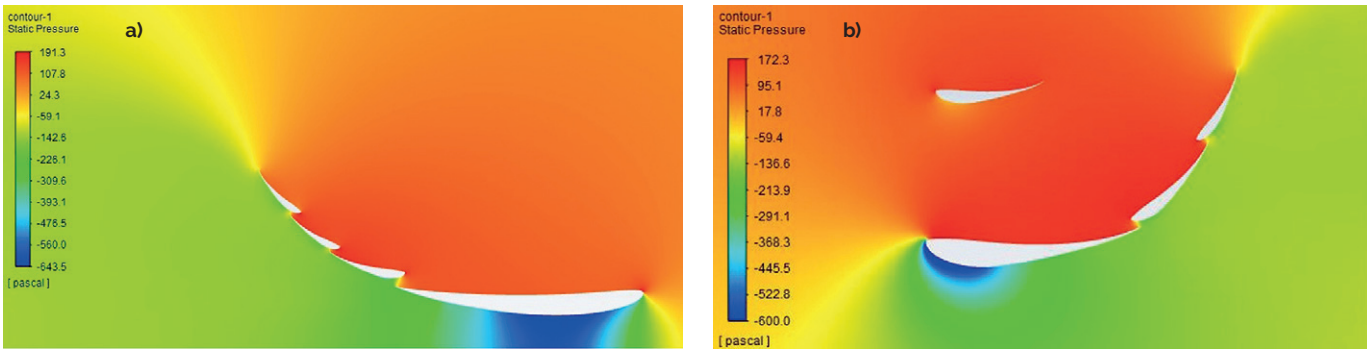
Tabela 1. *Rozkład sił dla bolidu bez pakietu aerodynamicznego przy prędkości 15 m/s*

Element	Siła docisku [N]	Siła oporu powietrza [N]
Poszycie	25	14,2
Przednie zawieszenie	0,3	4,1
Przednie koło	6,1	4,9
Kierowca	2,3	3,8
Rama	0	3,1
Tylne zawieszenie	0,1	3,2
Tylne koło	7,5	9,2
SUMA	**41,3**	**42,5**

Table of Design Points

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Name	P1 - kat_150_1	P2 - kat_150_2	P3 - pol_150_1_x	P4 - pol_150_1_z	P5 - pol_150_2_x	P6 - pol_150_2_z	P7 - Cd	P8 - Cl	Retain	Retained Data
2	Units	degree	degree	mm	mm	mm	mm				
66	DP 63	26	51	1160	580	1325	650	25,91	-323,39		
67	DP 64	31	56	1180	580	1330	690	28,767	-358,62		
68	DP 65	31	56	1180	580	1330	690	28,767	-358,62		
69	DP 66	31	56	1180	580	1330	690	28,767	-358,62		
70	DP 67	24	49	1205	575	1325	675	30,812	-372		
71	DP 68	23	48	1195	585	1325	665	28,786	-333,28		
72	DP 69	26	51	1200	580	1320	670	37,116	-346,3		
73	DP 70	27	52	1200	580	1320	670	33,075	-352,78		
74	DP 71 (Current)	25	50	1200	580	1320	670	28,643	-421,45	✓	
75	DP 72	26	51	1200	580	1320	670	37,116	-346,3		
76	DP 73	25	50	1160	570	1325	700	25,098	-352,81		
77	DP 74	25	50	1165	575	1330	705	24,652	-337,94		
78	DP 75	25	50	1170	565	1325	710	36,23	-295,07		
79	DP 76	25	50	1155	560	1315	695	26,501	-336,36		

Rys. 2. *Wyniki jednej z parametryzacji 2D tylnego skrzydła*



Rys. 3. *Rozkład ciśnienia, uzyskany w wyniku parametryzacji 2D, dla optymalnego ułożenia profili: a) przedniego skrzydła, b) tylnego skrzydła*

uproszczonego. Dodatkowo zaprojektowano podłogę i dyfuzor. Pierwsze symulacje 3D pokazują miejsca, w których wciąż możliwa jest poprawa. W fazie projektowej takich symulacji przeprowadzono ponad 20. Jeśli np. wystąpiło oderwanie na skrzydle, ponownie wykonywano symulację 2D, badano inne opcje ułożenia profili, wybierano ułożenie optymalne i przechodzono symulacji 3D.

Symulacja 3D

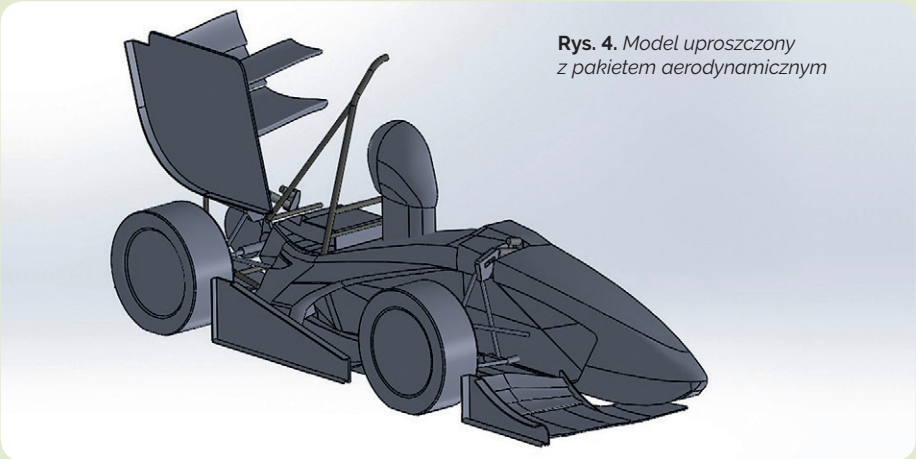
Spośród 20 przeprowadzonych symulacji tu przedstawiono tę, w której uzyskano najlepsze wyniki. Początkowo skoncentrowano się na stworzeniu dobrej jakości siatki, zawierającej jak najmniejszą liczbę elementów skończonych, aby zminimalizować czas obliczeń. Pierwsze symulacje przeprowadzono dla siatek złożonych z ponad 40 mln elementów (mniejsza liczba elementów nie zapewniała wymaganej jakości siatki). Po modyfikacjach modelu uproszczonego udało się ograniczyć liczbę elementów do 28 mln, co pozwoliło skrócić czas obliczeń z trzech dni do jednego dnia (rys. 4).

Dla przedniego skrzydła zastosowano profile o zmiennej cięciwie, aby poprawić jakość przepływu powietrza przez chłodnicę. Zastosowanie tego typu rozwiązania spowodowało wytworzenie się dość silnego wiru z przedniego skrzydła (rys. 5). Z kolei wir wytwarzany przez middleplaty podłogi obraca się w drugą stronę i zmniejsza nieco energię wiru z przedniego skrzydła. Obracające się koło powoduje prawie całkowite wygaszenie wiru z przedniego skrzydła bezpośrednio przed wlotem do kanału na chłodnicę (rys. 6).

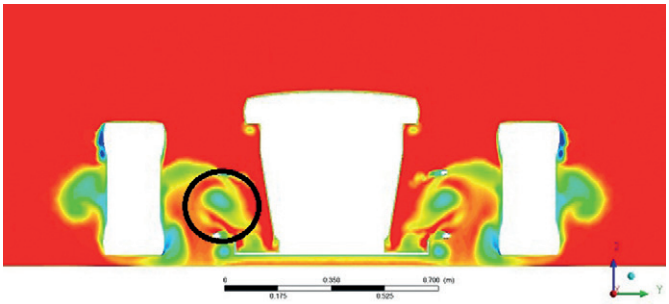
Na rys. 7 widać wpływ obracającego się koła na działanie dyfuzora. Zastosowanie kierownicy powietrza pozwoliło na zamknięcie wiru i wspomogło działanie całego dyfuzora przez wzrost ciśnienia na wylocie i obniżenie ciśnienia pod podłogą. Na rys. 8 pokazano obniżenie wydajności dyfuzora w kanałach zewnętrznych, gdzie został zamknięty wir powstający z obracającego się tylnego koła.

W tabeli 2 zaprezentowano wartości sił dla analizowanej połówki auta z pakietem aerodynamicznym. Całkowity docisk bolidu wynosi 547,4 N. Uzyskano balans aerodynamiczny na poziomie 49:51 (F:R). Rozkład ciśnienia na całym aucie pokazano na rys. 9 i 10. Uzyskano współczynnik C_L równy −3,5 oraz współczynnik C_D równy 1,5.

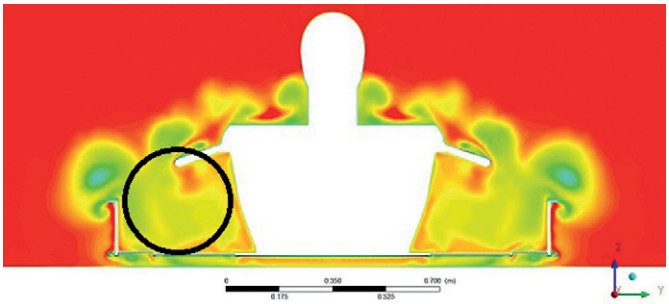
Sporą siłę oporu powietrza wytwarza tylne skrzydło. Z tego względu zastosowano system DRS (ruchome tylne skrzydło), co pozwoliło zredukować opór powietrza do 6,2 N. Odbywa się to oczywiście kosztem zmniejszenia docisku, jednak nie jest on potrzebny na prostych odcinkach toru, po których auto będzie się poruszać z otwartym skrzydłem (przed zakrętem nastąpi zaś zamknięcie skrzydła). Zmianę sił w wybranych iteracjach przedstawiono na rys. 10.



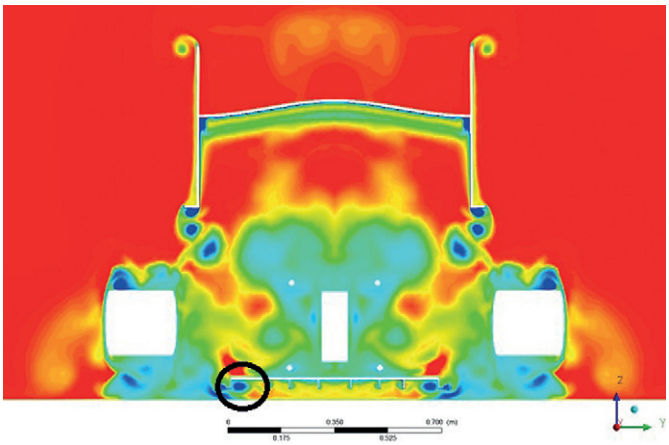
Rys. 4. *Model uproszczony z pakietem aerodynamicznym*



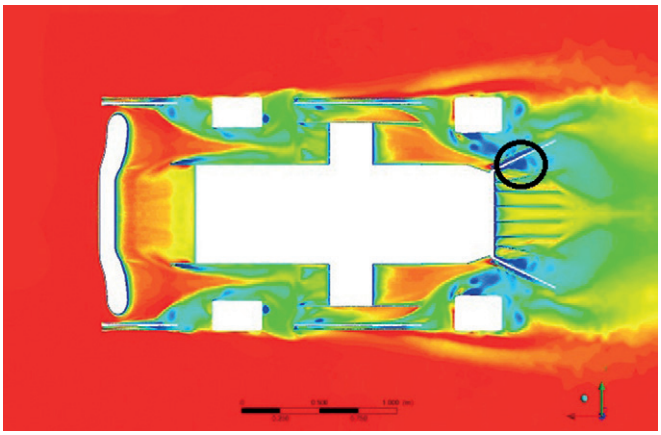
Rys. 5. *Wir z przedniego skrzydła*



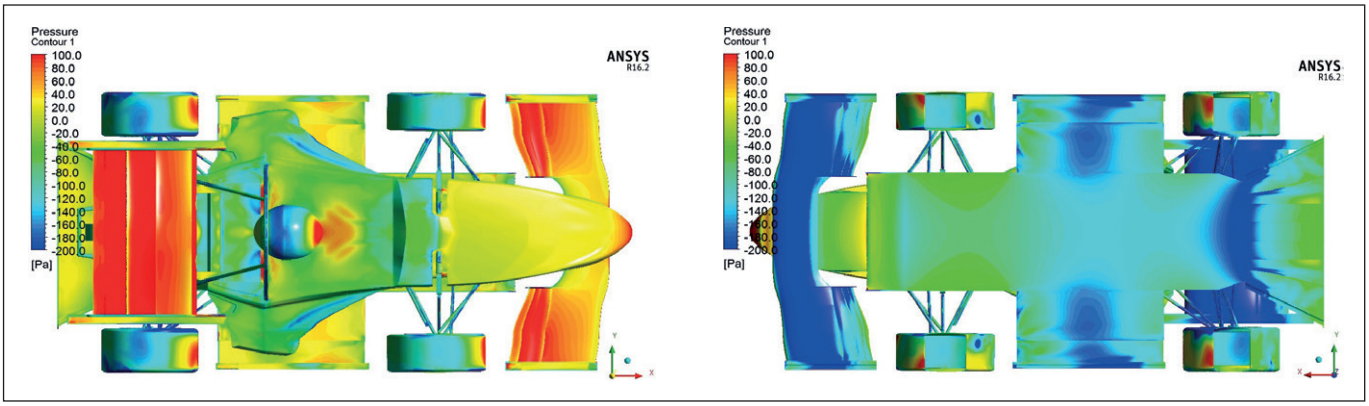
Rys. 6. *Zmniejszenie energii wiru*



Rys. 7. *Wpływ obracającego się koła na działanie dyfuzora*



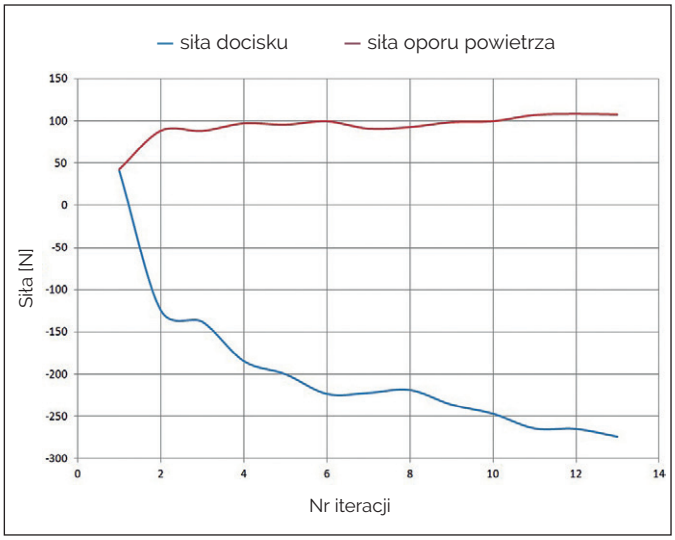
Rys. 8. *Obniżenie wydajności dyfuzora*



Rys. 9. *Rozkład ciśnienia na całym bolidzie*

Tabela 2. *Rozkład sił dla bolidu z pełnym pakietem aerodynamicznym przy prędkości 15 m/s*

Element	Siła docisku [N]	Siła oporu powietrza [N]
Chłodnica	–0,2	5,5
Silnik	–0,4	0,3
Firewall	–1,3	3,4
Rama	0	3,3
Przednie zawieszenie	0,3	4
Przednie koło	6,2	4,2
Przednie skrzydło	–84	13
Kierowca	2,5	4,4
Poszycie z podłogą i dyfuzorem	–85,6	23,2
Tylne zawieszenie	0,1	3,9
Tylne koło	8	9,5
Tylne skrzydło	–119,3	33,2
SUMA	**–273,7**	**107,9**



Rys. 10. *Wzrost siły w kilku wybranych iteracjach*

Wyznaczanie siły promieniowej działającej na wirnik skrzydełkowego jednostrumieniowego wodomierza

Adam Kubiec • Apator Powogaz • adam.kubiec@apator.com

Firma Apator Powogaz jest jednym z czołowych producentów wodomierzy w Polsce i Europie. Ponadto oferta przedsiębiorstwa obejmuje pełen asortyment ciepłomierzy oraz podzielników kosztów ogrzewania. Ważną grupą produktów są wodomierze skrzydełkowe jednostrumieniowe, w których wirnik jest napędzany strumieniem wody napierającym na łopatki po obwodzie. Te urządzenia, podobnie jak każda aparatura pomiarowa, muszą się charakteryzować bardzo dobrą dokładnością pomiarową przez cały okres użytkowania. Aby sprostać temu wymaganiu, konieczne jest dogłębne poznanie zjawisk zachodzących podczas pracy wodomierza.

Jednym z istotnych aspektów związanych z utrzymaniem niezmiennej charakterystyki metrologicznej wodomierza jest trwałość łożysk ślizgowych, umożliwiających obrót skrzydełka. Z badań w warunkach rzeczywistych wynika, że w trakcie przepływu medium przez wodomierz położenie wirnika ulega zmianom ze względu na występujące luzy. Zwiększanie natężenia przepływu przez korpus powoduje stopniowy wzrost sił działających na wirnik i jego stabilizację. Konsekwencją tego jest jednak wzrost nacisku na łożyska ślizgowe, co istotnie wpływa na szybkość ich zużywania się. W związku z tym konieczne było przeprowadzenie badań, aby wyznaczyć wartości tych sił i dobrać na tej podstawie optymalne materiały łożyskowe.

W tym celu przeprowadzono serię przepływowych symulacji numerycznych. Niestety, ze względu na specyficzny charakter pracy wodomierza obliczenia typu *steady-state*, znacznie przyspieszające i ułatwiające analizę, były wykluczone. Siły pochodzące od przepływającego płynu wprawiają wirnik w ruch, więc niezbędne okazało się wykonanie symulacji typu *transient* z wykorzystaniem modułu ruchu bryły sztywnej. Takie rozwiązanie pozwala zarówno na określenie wielkości sił działających na układ, jak i na wyznaczenie charakterystyki błędów wodomierza.

Ze względu na konieczność prowadzenia obliczeń niestacjonarnych dla różnych wartości natężenia przepływu głównym wyzwaniem podczas dyskretyzacji modelu było znalezienie optymalnych parametrów siatki (kształtu i gęstości), które umożliwiłyby uzyskanie poprawnych wyników przy zachowaniu rozsądnego czasu obliczeń. Ponadto zgodnie z wymogami techniki ruchomej siatki utworzono dwie oddzielne domeny – stałego korpusu oraz wirnika poruszającego się ruchem obrotowym wokół własnej osi. Siatki obu domen nie były ze sobą spójne, jednak starano się utrzymać bardzo podobny rozmiar elementów położonych na ścianach interfejsów, aby zminimalizować błędy numeryczne (rys. 1).

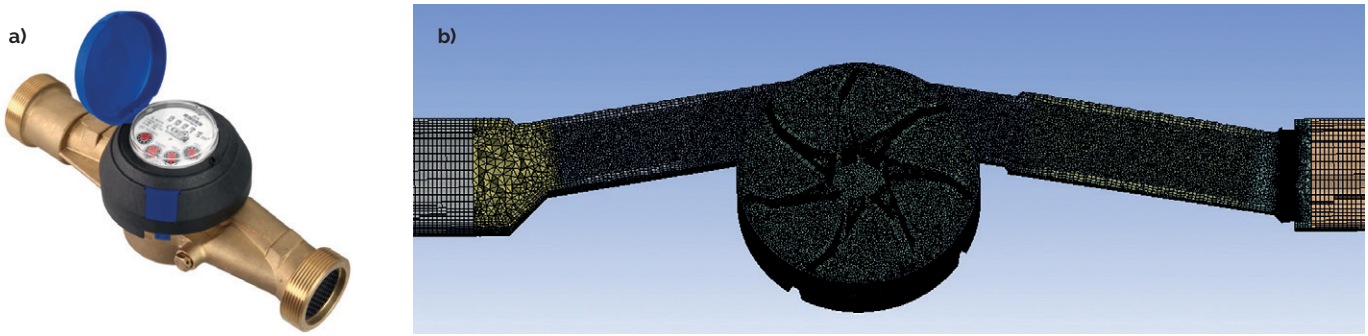
Metodą prób i błędów wygenerowano siatki liczące ok. 3,4 mln elementów czworo- i sześciościennych (*tetrahedral*, *hexahedral*) oraz pryzmatycznych. Uzyskano minimalną ortogonalność na poziomie 0,13 oraz maksymalną skośność równą 0,86, co nasunęło wniosek, że ewentualne problemy z symulacją raczej nie będą skutkiem niewystarczającej jakości elementów.

Badania przeprowadzono w jednym z wiodących na rynku programów do symulacji przepływowych – ANSYS CFX. Jego głównymi zaletami są: intuicyjność obsługi, stabilność obliczeń oraz możliwość dynamicznej zmiany parametrów w trakcie symulacji.

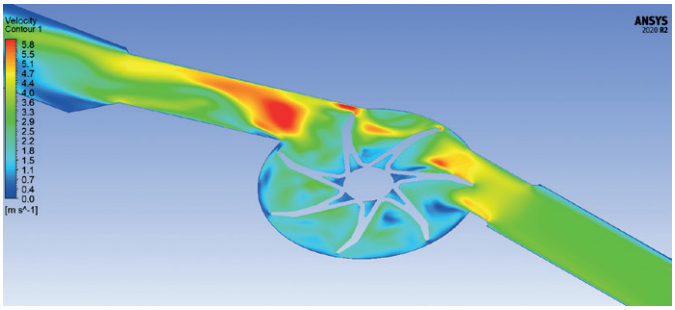
Niezbędnym elementem obliczeń z wykorzystaniem solvera Rigid Body jest zdefiniowanie momentu bezwładności bryły sztywnej. Ze względu na relatywnie niewielkie wymiary oraz masę wirników w wodomierzach skrzydełkowych jednostrumieniowych momenty bezwładności również osiągają małe wartości – rzędu 1e−7 kg·m^2. To niejednokrotnie było powodem braku stabilności symulacji i w konsekwencji – przerwania obliczeń. Konieczne było zatem wyznaczenie (metodą prób i błędów) najmniejszych możliwych wartości, przy których opisane problemy nie wystąpią.

Symulacje prowadzono do momentu, aż obserwowane parametry ustabilizowały się i zaczęły podlegać powtarzającym się wzorcom zmian. Po zakończeniu obliczeń zweryfikowano również ciągłość otrzymanych rozkładów różnych wielkości fizycznych, co jest istotne zwłaszcza w przypadku interfejsu łączącego domenę wirnika z domeną korpusu. Analizy nie wykazały żadnych nieprawidłowości (rys. 2).

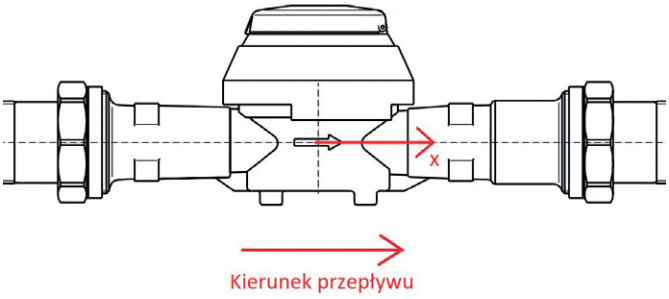
Wodomierze, które mają być dopuszczone do obrotu, bada się w kilku punktach pomiarowych – jest to podyktowane koniecznością uzyskania zgodności z normami europejskimi. Z tego względu również obliczenia prowadzono dla kilku



Rys. 1. *Rzeczywisty model wodomierza (a) oraz jego model numeryczny (w przekroju) z widoczną siatką elementów skończonych (b)*



Rys. 2. *Rozkład prędkości w przekroju wodomierza*



Rys. 3. *Widok wodomierza z boku (X – kierunek działania siły promieniowej)*

objętościowych natężeń przepływu. W przypadku przepływu nominalnego siła promieniowa (kierunek jej działania oznaczono jako *X* na rys. 3), działająca na wirnik, stanowiła niemal 50-krotność jego ciężaru, a w skrajnym przypadku przepływu (definiowanego jako maksymalny strumień objętości dla danego wodomierza) – niemal 100-krotność! Te informacje są bardzo istotne, biorąc pod uwagę badania trwałości, jakim poddawane są tego typu konstrukcje.

Podsumowując, wykorzystanie pakietów do obliczeń numerycznych znacząco ułatwia i przyspiesza badania zarówno modeli prototypowych, jak i produkcyjnych. Wypracowana metodyka przeprowadzania symulacji, w połączeniu z weryfikacją poprawności w testach rzeczywistych, umożliwia wyjaśnienie wielu problemów i zjawisk, które są trudne bądź bardzo kosztowne do sprawdzenia w inny, konwencjonalny sposób.

Superwydajne modelowanie przepływów z wykorzystaniem metody MPS

Adrian Bartoszewicz • MESco • abartoszewicz@mesco.com.pl

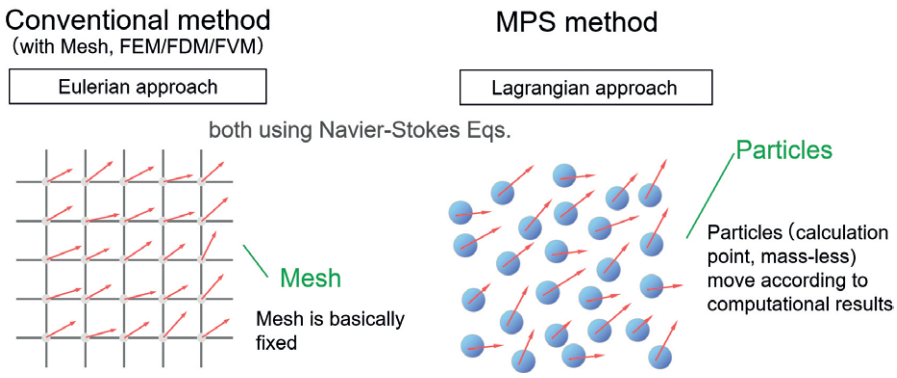
W tym roku portfolio firmy MESco wzbogaciło się o ParticleWorks – kolejny solver przepływowy do symulacji przepływów z powierzchnią swobodną, bazujący na metodzie MPS (*moving particle simulation*). Jest to oprogramowanie przeznaczone do modelowania przekładni, jednak znajdzie zastosowanie w każdej gałęzi przemysłu, zwłaszcza w przypadkach, gdy kończą się możliwości konwencjonalnego podejścia do CFD i gdy liczy się czas.

Zalety

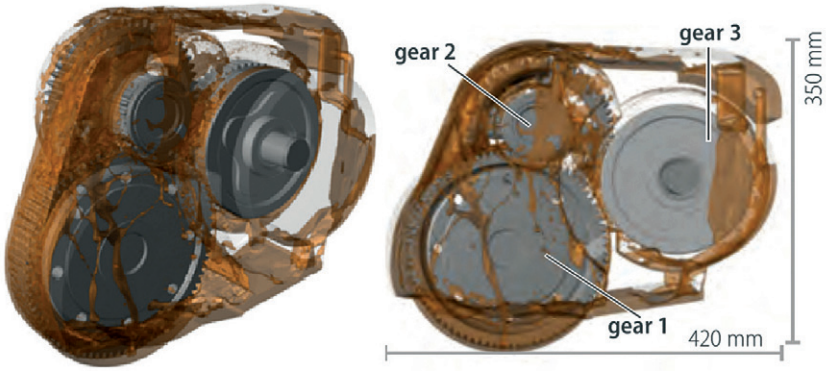
Na czym polega unikalność tego oprogramowania? Otóż jego zasadniczą zaletą jest sposób dyskretyzacji domeny. W tym przypadku podziałowi podlega sam płyn, a nie cała objętość domeny. W analizie przepływu z powierzchnią swobodną stanowi to sporą różnicę pod względem liczby śledzonych elementów lub rozmiaru elementów (przy założeniu tej samej ich liczby). Tę samą objętość płynu można więc modelować dokładniej, z wykorzystaniem takich samych zasobów, lub szybciej, z zachowaniem tej samej rozdzielczości wyniku. Dodatkowo w przypadku metody MPS płyn jest dyskretyzowany za pomocą sfer, które są śledzone w inny sposób niż w klasycznym podejściu. W podejściu klasycznym mamy do czynienia z tzw. eulerowskim punktem odniesienia, co w dużym skrócie oznacza, że te objętości są stacjonarne względem domeny, a ruch cieczy jest modelowany za pomocą równań transportu rozwiązywanych dla każdego elementu. Z kolei metoda MPS polega na śledzeniu ruchu każdej objętości. Elementy płynu fizycznie się poruszają i śledzone są ich położenia oraz wzajemne oddziaływania, jak również oddziaływania ze ścianami geometrii ograniczającej przepływ (rys. 1). Oczywiście zagadnienie jest znacznie bardziej skomplikowane – więcej szczegółów dotyczących samej metody można znaleźć np. w [1].

Niewątpliwą zaletą tego podejścia jest także brak konieczności dyskretyzowania domeny płynu, czyli tworzenia siatki. Ten proces często wymaga sporego uproszczenia geometrii, jest czasochłonny i nierzadko przysparza użytkownikom wielu problemów. W przypadku podejścia MPS wymagana jest jedynie geometria urządzenia w rozszerzeniu STL (*StereoLithography)*, a więc siatka powierzchniowa możliwa do wygenerowania w większości flagowych narzędzi CAD.

Dodatkowym czynnikiem wpływającym istotnie na wydajność modelowania przepływów jest możliwość prowadzenia obliczeń na kartach graficznych lub obliczeniowych. Jest to rozwiązanie znacznie wydajniejsze w porównaniu z obliczeniami wykonywanymi na procesorze. Dzięki wykorzystaniu karty graficznej można nawet kilkakrotnie



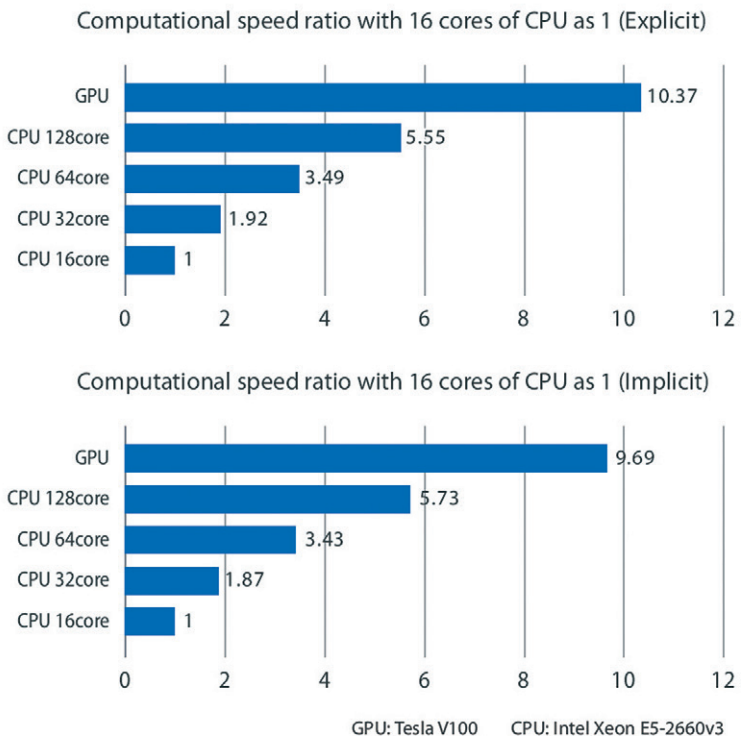
Rys. 1. *Porównanie metody klasycznej i MPS*



Model (number of particles: 4.6mil)

Gear rotation speed	
Gear 1	500 rpm
Gear 2	1739 rpm
Gear 3	1771 rpm

Fluid property	
Density	800 kg/m³
Kinematic viscosity coefficient	1×10^{-5} m²/s
Surface tension coefficient	0.03 N/m



Rys. 2. *Przyspieszenie obliczeń względem CPU (źródło: Prometech Software, Inc.)*

skrócić czas obliczeń (rys. 2). Sumarycznie oszczędność czasu na etapie preprocessingu i obliczeń osiąga nawet kilka do kilkunastu dni.

Możliwości zastosowania

Metoda MPS z definicji jest ograniczona do przepływów nieściśliwych, przy czym oferuje możliwość badania przepływów z dużą lepkością, również z uwzględnieniem lepkości będącej funkcją temperatury czy prędkości ścinania. Pozwala np. na symulacje smaru w łożysku kulkowym (rys. 3), przepływu oleju, żywicy, betonu czy czekolady. Są to przypadki, w których często nie da się zastosować (według klasycznego podejścia) modelu VOF (*volume of fluid*) lub uzyskać wiarygodnych wyników.

Jak dokładny jest program ParticleWorks?

W przypadku modelowania przepływu z wykorzystaniem metody MPS nie występuje problem rozmytego interfejsu pomiędzy cieczą a gazem. Dodatkowo przy tych samych zasobach można uzyskać wyniki o dużo większej rozdzielczości. Ponadto ParticleWorks może pracować poza domyślnym trybem Semi-implicit – w trybie Explicit, co jeszcze bardziej poprawia dokładność rozwiązania [3].

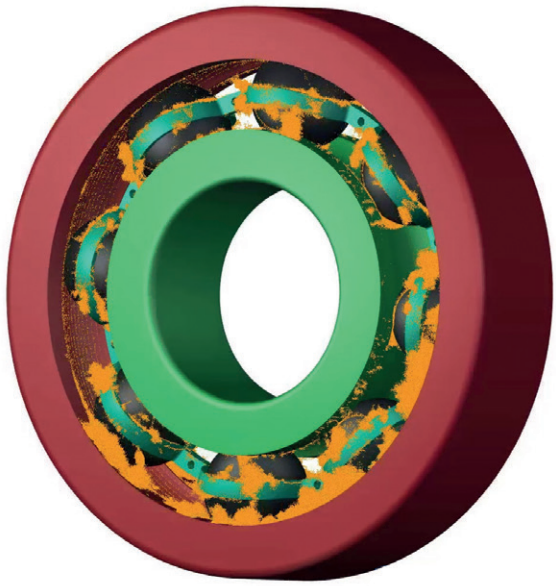
Wykazano dużą zbieżność wyników (pod względem jakościowym i ilościowym) uzyskanych w programie ParticleWorks. Jako przykłady można podać wyniki symulacji: dystrybucji oleju w silniku [4], załamywania się fal [5] czy wycieku oleju z tankowca (rys. 4) [6, 7].

Coupling

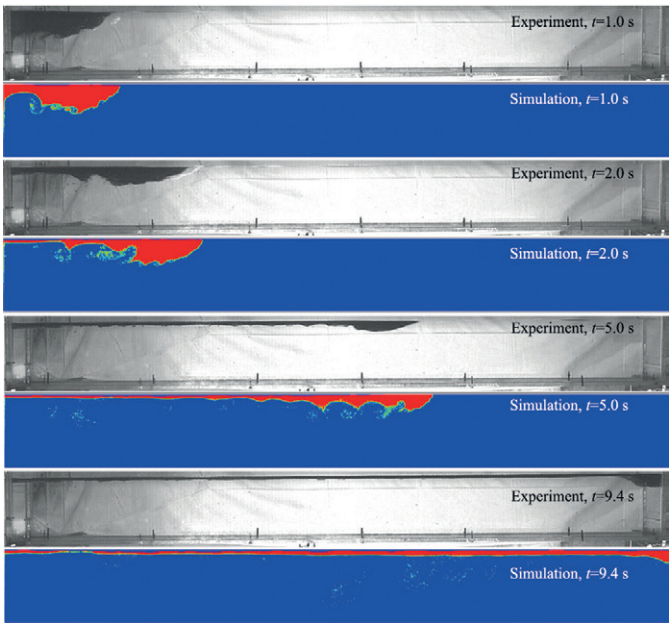
PartilceWorks daje się sprzęgać z oprogramowaniem ANSYS. Istnieje możliwość połączenia wewnątrz platformy Workbench, co pozwala na analizę naprężeń wywołanych przez ruch cieczy lub wpływu ruchu powietrza na ciecz (np. w spryskiwaczach samochodowych). Dostępny jest również interfejs interpolacyjny, zapewniający połączenie ParticleWorks z zewnętrznym oprogramowaniem.

Kolorowe wizualizacje

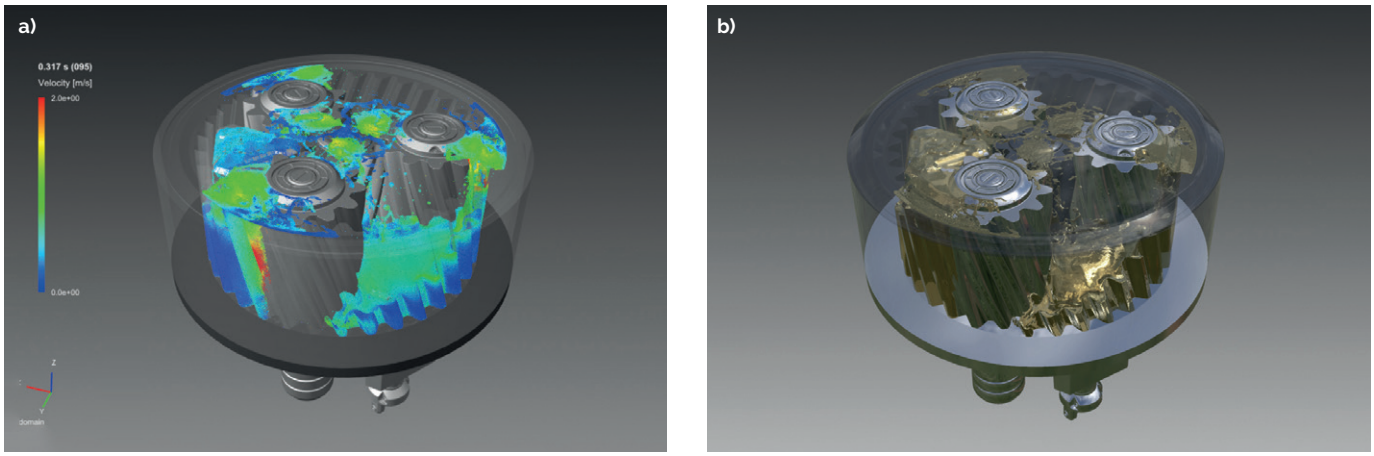
Czym byłoby oprogramowanie CFD bez efektownych wizualizacji? ParticleWorks zapewnia standardową obróbkę wyników (podobnie jak w podejściu konwencjonalnym), a dodatkowo – generowanie statystyk eulerowskich, mapowanie wyników na dowolną powierzchnię (nawet zaimportowaną w postprocessingu) oraz generowanie powierzchni swobodnej cieczy lub powierzchni zwilżanej ścian. Poza tym program pozwala na eksport i obróbkę wyników w zewnętrznym oprogramowaniu, np. Unity Platform (rys. 5), czy oprogramowaniu typu open-source, np. Blender.



Rys. 3. *Symulacja smarowania łożyska*



Rys. 4. *Symulacja wycieku oleju – porównanie z eksperymentem [6, 7]*



Rys. 5. *Przykład renderingu w Unity Platform*

Podsumowanie

ParticleWorks sprawdzi się wszędzie tam, gdzie główną rozpatrywaną dziedziną są przepływy z powierzchnią swobodną i/lub przepływy z uwzględnieniem wysokiej lepkości cieczy. To narzędzie pozwala usprawnić pracę, zaoszczędzić czas i otrzymać wynik, który pod względem dokładności nie odbiega od wyniku uzyskanego według konwencjonalnego podejścia do modelowania przepływów, a często nawet jest dokładniejszy. Dodatkowe atuty ParticleWorks, na które warto zwrócić uwagę, to: możliwość połączenia z oprogramowaniem ANSYS wewnątrz środowiska Workbench (lub z innym oprogramowaniem – dzięki wykorzystaniu zewnętrznego modułu), prostota interfejsu oraz krótki czas wdrożenia.

LITERATURA

[1] Koshizuka S., Oka Y. "Moving-Paricle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid". *Nuclear Science and Engineering*. 123 (1996): 421–434.

[2] Hideyo Negishi et al. "*Fundamental Study on Numerical Analysis of Grease Behavior in Ball Bearings by Using MPS Method*".

[3] Zidi Wang, Kazuya Shibata, Seiichi Koshizuka. "Verification and validation of explicit moving particle simulation method for application to internal flooding analysis in nuclear reactor building". *Journal of Nuclear Science and Technology*. 55, 5 (2018): 461–477. DOI: https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1412364.

[4] Honda R&D Co. Ltd. Makoto Haga. "Simulation of oil separation behavior of breather system for engines". *Honda R&D Technical Review*. 26, 2 (2014).

[5] Koshizuka S., Nobe A., Oka Y. "Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 26, 7 (1998): 751–769.

[6] Se-Min Jeong, Jung-Woo Nam, Sung-Chul Hwang, Jong-Chun Park, Moo-Hyun Kim. "Numerical prediction of oil amount leaked from a damaged tank using two-dimensional moving particle simulation method". *Ocean Engineering*. 69 (2013): 70–78.

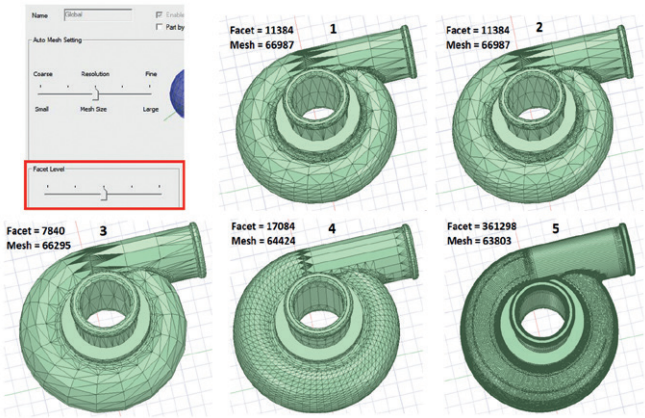
[7] Duan Guangtao, Chen Bin, Zhang Ximin, Wang Yechun. "A multiphase MPS solver for modeling multi-fluid interaction with free surface and its application in oil spill". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 320 (2017): 133–161. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.03.014.

Usprawnienia w ANSYS AEDT

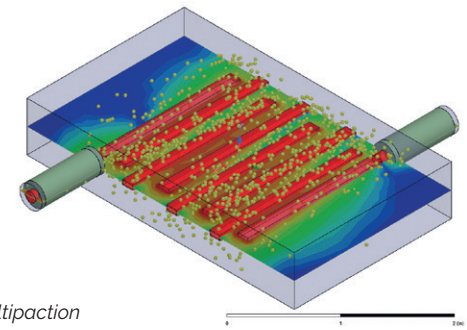
Tomasz Kądziołka • MESco • tkadziolka@mesco.com.pl

Nowy model licencji elekromagnetycznych ANSYS, dostępny od wersji 2020 R1, czyli Pro, Premium i Enterprise, spotkał się z bardzo dobrym przyjęciem wśród użytkowników, ponieważ ujednolicił zawartość poszczególnych modułów. Obecnie każdy użytkownik podstawowej licencji Pro ma dostęp m.in. do programów Maxwell 2D, 2D Extractor i Optimetrics oraz symulatorów obwodowych Simplorer i Nexxim. Wersja Premium w każdej z konfiguracji, tj. Maxwell, Q3D, HFSS, Icepak lub SIwave, zawiera w sobie funkcjonalność wersji Pro. Najwyższa wersja Enterprise oferuje z kolei pełne portfolio narzędzi do analiz elektromagnetycznych, w tym SpaceClaim Direct Modeler.

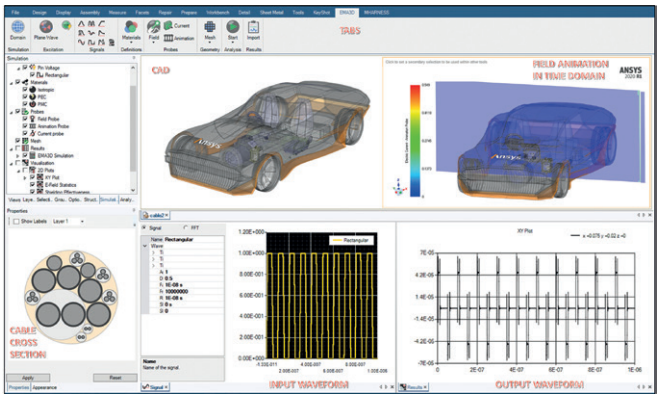
W wersji 2020 R2 programu **Maxwell** wprowadzono opcję uzależnienia strat w żelazie od temperatury – w przypadku modelu strat np. Steinmetza możliwe jest zdefiniowanie zależności parametrów K_h, K_c oraz K_e od temperatury. Analogiczna funkcjonalność znalazła się w warunku brzegowym impedancji, co znacząco usprawnia analizy sprzężone. Dzięki wsparciu OpenMP dla solvera 2D transient zapewniono przyspieszenie obliczeń w przypadku wykorzystania solvera zrównoleglonego w domenie czasu TDM. Nowością jest unikalny model ECE dla maszyn indukcyjnych (technologia modeli zredukowanych ROM pozwala na dokładną identyfikację parametrów maszyn indukcyjnych), oparty na solverze EddyCurrent. Nowy model ECE pozwala na wykonywanie obliczeń silników indukcyjnych wielofazowych z uwzględnieniem prądów indukowanych w klatce; następnie model ECE dla silnika indukcyjnego można wykorzystać w symulatorze obwodowym Simplorer. Electrical Machine Toolkit obsługuje teraz maszyny wielofazowe (3-, 5-, 6- i 7-fazowe maszyny z magnesami trwałymi, indukcyjne i synchroniczne oraz 2–8-fazowe maszyny reluktancyjne) oraz pozwala na uwzględnienie strat AC w uzwojeniu na podstawie zaimplementowanego wcześniej modelu licy lub bezpośrednio wprowadzonych wartości rezystancji AC dla różnych częstotliwości.



Rys. 1. *Ustawienia meshera w nowej wersji programu Icepak*



Rys. 2. *Solver Multipaction*



Rys. 3. *EMA3D Cable – nowe narzędzie do analiz EMI/EMC przewodów*

Icepak w wersji 2020 R2 to przede wszystkim usprawnienia w zakresie tworzenia siatek (rys. 1). Proces generowania siatki może zostać zrównoleglony pomiędzy procesory, a ponadto istnieje możliwość zaimportowania siatki zewnętrznej z programów Fluent lub Icepak Classic. W ustawieniach algorytmu siatkowania dodano opcję pozwalającą na określenie dokładności odwzorowania powierzchni geometrii. W wersji 2020 R2 duży nacisk położono na automatyzację procesów i nowe dodatki ułatwiające pracę. Od kilku wersji wewnątrz AEDT dostępny jest moduł mechaniczny (solvery modal i thermal), a wraz z wersją 2020 R2 wprowadzono możliwość: mapowania współczynników konwekcji otrzymanych w programie Icepak do analizy termicznej w AEDT Mechanical, skalowania strat importowanych oraz importowania strat z różnych modeli, np. Q3D i HFSS, do analizy termicznej w AEDT.

W **HFSS** 2020 R2 znacząco usprawniono działanie solvera 5G mmWave Array oraz komponenty 3D (obecnie każdy komponent może być osobno siatkowany, co przyspiesza proces dyskretyzacji). Wprowadzono nowy Toolkit w ACT – 5G Wizard, który znacząco usprawnia projektowanie anten 5G i umożliwia m.in. wyznaczenie gęstości mocy. Nowy solver Multipaction (rys. 2) pozwala z kolei na wizualizację naładowanych cząsteczek. Rozszerzono bibliotekę gotowych anten o produkty firmy Molex. Interfejs HFSS 3D Layout od wersji 2020 R2 wspiera natywnie komponenty HFSS 3D. W zakresie analizy integralności sygnałów i integralności mocy zmodyfikowano narzędzie SIwave: usprawniono workflow CPA, z uwzględnieniem inteligentnego grupowania pinów, wprowadzono też zmiany w skanerze impedancji, możliwość zadania chropowatości bocznej dla przewodnika (oprócz dostępnej wcześniej górnej i dolnej), wsparcie dla współczynników termicznych SIwave DC w 3D Layout i wiele innych funkcji.

W tym miejscu warto wspomnieć o nowym produkcie firmy ANSYS: **EMA3D Cable** (rys. 3). Jest to narzędzie przeznaczone do analiz EMI/EMC przewodów. Te analizy obejmują m.in. testy związane z certyfikacją automotive, w tym HIRF/EMP dla przewodzenia i promieniowania, a także badania uderzenia pioruna, sprzężenia pomiędzy kablami czy odporności na zakłócenia z zewnątrz. Program EMA3D Cable opiera się na interfejsie SpaceClaim, więc przygotowanie symulacji zredukowane jest do absolutnego minimum, a sam solver jest bardzo szybki i efektywny.

Firma Kompa uczestnikiem ANSYS Startup Program

Kamil Kompa • Kompa • kamil@kompa.eu

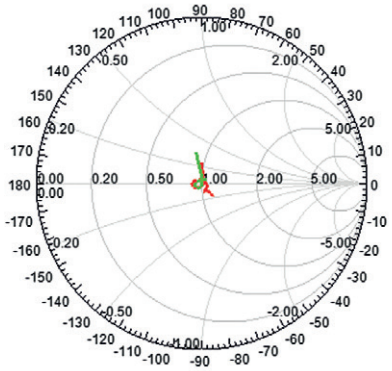
Firma Kompa (www.kompa.eu) projektuje nietypowe urządzenia elektroniczne, a także energoelektroniczne oraz cyfrowe systemy sterowania i przetwarzania sygnałów. W swoich rozwiązaniach stosuje zaawansowane technologie (np. nowoczesne tranzystory bazujące na azotku galu). Specjalizuje się w konstruowaniu tranzystorowych wzmacniaczy mocy na pasma radiowe UHF i VHF, o mocach rzędu dziesiątek kilowatów, które często pracują w instalacjach wymagających przetwarzania sygnałów i sterowania na bazie zaawansowanych układów FPGA.

Opracowanie specjalnego sterownika cyfrowego jest jednym z najbardziej pracochłonnych etapów projektu. Obejmuje dobór elementów, rysowanie schematów, zapewnienie integralności sygnałowej, stworzenie projektu płytki PCB (z tysiącami połączeń układów cyfrowych czy odpowiednim layoutem niskoszumowych przetwornic zasilania), aż wreszcie – opracowanie i debugowanie oprogramowania. Proces ten zajmuje od kilku do kilkunastu miesięcy. Klientów interesuje natomiast szybkie uruchomienie prototypu, testy systemu oraz weryfikacja różnych założeń, zanim podejmą decyzję o realizacji i wdrożeniu danej wersji.

W odpowiedzi na potrzeby rynku specjaliści z firmy Kompa zaprojektowali zaawansowany system DSP, bazujący na układzie FPGA. Pozwala on na przetwarzanie sygnałów o częstotliwości od kilku MHz do 6 GHz bez stosowania dodatkowych elementów zewnętrznych (tzw. technika ultra-wideband) oraz na rozszerzenie tego zakresu dzięki współpracy z zewnętrznymi układami analogowymi.

W systemie obsługiwane są m.in.: 2 GB pamięci RAM DDR3, przetworniki ADC 250MSPS i DAC 3GSPS, 64 TB wbudowanej pamięci SSD, audio i wideo, jak również takie interfejsy, jak Gigabit Ethernet, CAN, RS232/485 czy interfejs do kamery stereograficznej. Ponadto przewidziano możliwość obsługi różnych układów zewnętrznych, np. anten zapewniających elektroniczne kierunkowanie wiązki.

Rys. 1. *Wykres Smitha wizualizujący dopasowanie wzmacniaczy wyjściowych, pracujących w trybie ultra-wideband (SIwave)*

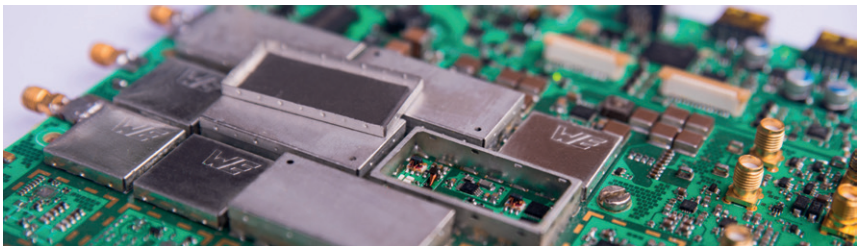


Wszystkie komponenty dobrano do pracy w przemysłowym zakresie temperatury (od −40°C do 85°C). Oprogramowanie obejmuje podstawowe bloki DSP, zoptymalizowane do pracy w matrycy FPGA, oraz specjalną kompilację systemu Linux, realizującą zaawansowany interfejs graficzny.

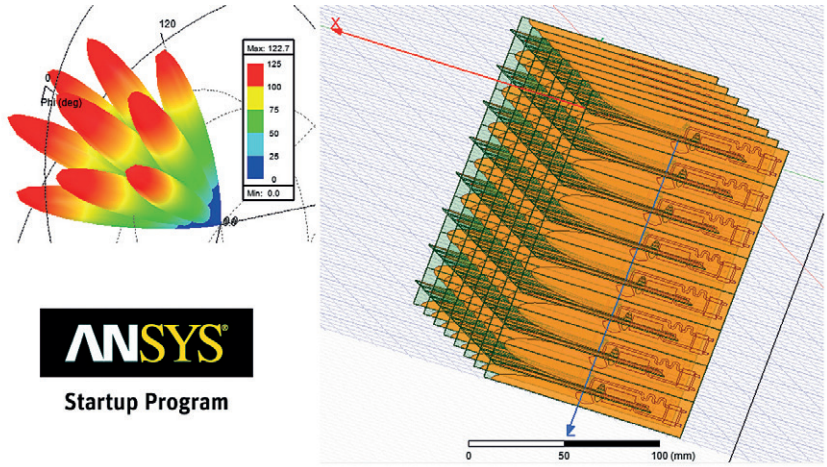
Szybkie układy cyfrowe, które zastosowano w systemie, wymagają odpowiedniego doboru materiałów i grubości warstw płytki PCB, szerokości ścieżek czy układu przelotek, aby zachować odpowiednie impedancje połączeń i parametry sygnałów. Projekt płytki PCB powstaje w oprogramowaniu Cadence OrCAD, a odpowiednio przygotowane skrypty umożliwiają szybki import layoutu do oprogramowania ANSYS SIwave, stosowanego do optymalizacji szybkich połączeń cyfrowych oraz dopasowania układów analogowych. W pierwszej wersji projektu uzyskano zaplanowane szybkości połączeń cyfrowych oraz założone parametry pracy układów analogowych.

Przykładową aplikacją, zrealizowaną na bazie opracowanego systemu, jest analizator widma działający w trybie „persistence", w którym 14 równoległych, wysoko zoptymalizowanych 1024-punktowych transformat FFT umożliwia obserwację pasma 2,4–2,5 GHz bez przerw. W odróżnieniu od typowych analizatorów widma pozwala on rejestrować dowolne krótkotrwałe zdarzenia.

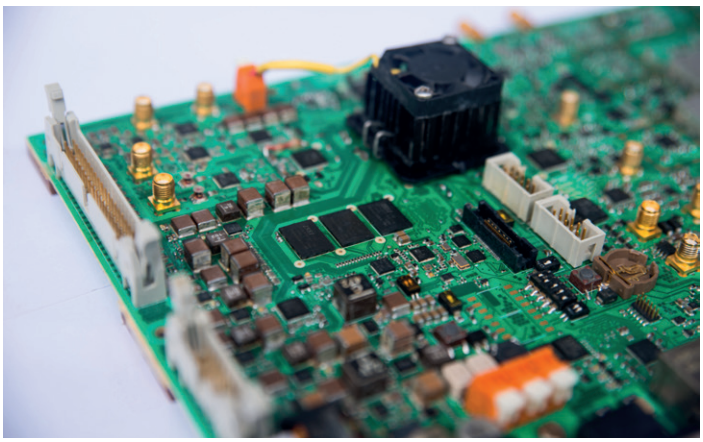
Oprócz wspomnianego analizatora widma uruchomiono też aplikację radaru pracującego w trybie częstotliwościowej modulacji impulsów (FMCW/IFMCW). Ta aplikacja obejmuje: wyświetlanie wykresów oscyloskopowych zsynchronizowanych z impulsami, 4096-punktową transformatę FFT o dużej precyzji czy pomiar widma przed każdym impulsem (w celu oddzielenia zewnętrznych zakłóceń od echa impulsu).



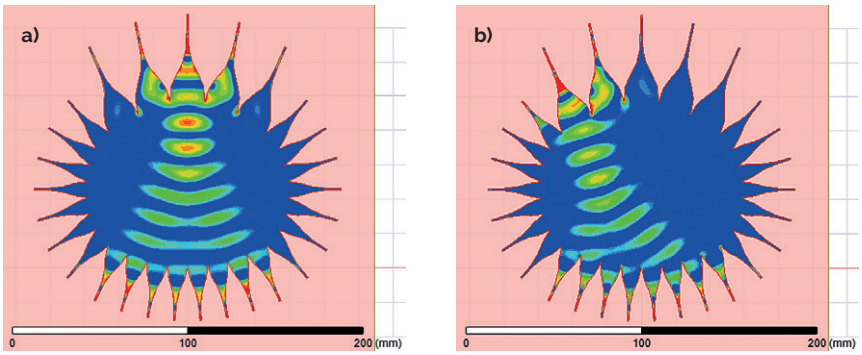
Rys. 2. *Zdjęcie analogowej części systemu*



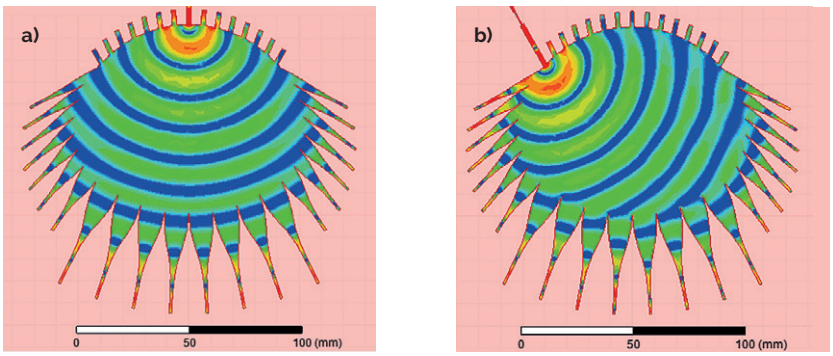
Rys. 3. *Antena matrycowa na pasmo 5,7–5,9 GHz, zapewniająca elektroniczne kierunkowanie wiązki pola o polaryzacji kołowej – widok geometrii anteny i wykres maksymalnych planowanych odchyleń wiązki pola (ANSYS FEM)*



Rys. 4. *Widok cyfrowej części systemu*



Rys. 5. *Mikrofalowa soczewka do anteny odbiorczej. Symulacja pola dla odbioru wiązki padającej: a) na wprost, b) pod kątem (ANSYS FEM)*



Rys. 6. *Mikrofalowa soczewka do anteny nadawczej. Nadawanie wiązki: a) na wprost, b) pod kątem (ANSYS FEM)*

Na potrzeby dalszego rozwoju aplikacji w oprogramowaniu ANSYS HFSS zaprojektowano szerokopasmowe anteny matrycowe oraz mikrofalowe soczewki przeznaczone do elektronicznego kierowania wiązki. Geometrię układów optymalizowano z wykorzystaniem metod matematycznych w środowisku R-Studio. Następnie z poziomu języka R generowano skrypty do automatycznego budowania modeli 3D w środowisku ANSYS, gdzie geometria była optymalizowana z wykorzystaniem pakietu ANSYS Optimetrics. W kolejnych krokach iteracyjnych osiągnięto założone parametry w symulacjach bazujących na metodzie elementów skończonych (ANSYS HFSS). W najbliższym czasie firma Kompa planuje przeprowadzić testy zaprojektowanych prototypów anten i soczewek oraz zestawić i porównać wyniki z symulacji komputerowej i z badań laboratoryjnych.

Zastosowanie oprogramowania ANSYS przyniosło znaczące oszczędności pod względem czasu projektowania i kosztów budowy kolejnych prototypów. Wszystkie zaprojektowane i przetestowane do tej pory układy spełniły (już w pierwszej wersji) założone wymagania. Ponadto dało się przewidzieć granice osiągalnych parametrów pracy dla planowanych kosztów czy rozmiarów symulowanych elementów, a nawet można było przyjąć bardziej ambitne założenia, niż wstępnie planowano. Dzięki opcji podglądu układu pola w miejscach, gdzie nie dałoby się go zmierzyć w układzie, można było wskazać krytyczne punkty i skoncentrować się na ich optymalizacji. Setki szczegółów wykluczyłyby tak wysoki poziom optymalizacji, bazujący wyłącznie na budowie i weryfikacji kolejnych prototypów.

* * *

Dziękujemy firmom ANSYS oraz MESco za możliwość przystąpienia do inicjatywy ANSYS Startup Program.

Ansys
CERTIFIED ELITE CHANNEL PARTNER

MESCO jest przedstawicielem firmy ANSYS w Polsce oraz Preferowanym Partnerem Hewlett-Packard.

Firma wykonuje zlecone symulacje komputerowe z zakresu mechaniki, przepływów i elektromagnetyzmu, tworzy specjalistyczne oprogramowanie, prowadzi sprzedaż i wsparcie techniczne oprogramowania ANSYS.

MESCO jako Partner HP w Polsce oferuje wsparcie IT i dostarcza prekonfigurowane stanowiska pracy, oparte na rozwiązaniach sprzętowych HP – od mobilnych stacji roboczych po serwery obliczeniowe.

Wydawca: MESCO Sp. z o.o.
al. Legionów 4, 41-902 Bytom
tel. +48 (32) 768 36 36
plac Konstytucji 6/83, 00-550 Warszawa
tel. +48 530 785 464
info@mesco.com.pl, www.mesco.com.pl

Redakcja i korekta: Małgorzata Pilewicz, Anna Wojewódzka
Projekt graficzny i skład: Marzena Rosochacz