WIOSNA 2021 • NR 11

MESSENGER

Drodzy Czytelnicy!

Minęło kolejne pół roku COVID-owej rzeczywistości. Wiele osób odczuwa jej negatywne skutki, natomiast u nas, jakby na przekór, bardzo dużo się dzieje. Nietypowa sytuacja uruchomiła w nas dodatkowe pokłady kreatywności, dzięki czemu powstały ciekawe inicjatywy, jak Akademia MESco czy kolejne odsłony kursów. Bardzo nam brakuje osobistych spotkań z Państwem, ale mamy nadzieję, że już niedługo będzie to możliwe. Cały czas się rozwijamy, zatrudniamy nowe osoby, wprowadzamy nowe produkty, dostajemy nagrody...

W tym numerze przedstawiamy kilka nowości ze świata ANSYS-a i MESco. Oczywiście moglibyśmy pisać o ostatnim nabytku ANSYS-a – firmie AGI, dzięki której wzbogaciliśmy się o narzędzia do planowania misji satelity, rakiety czy helikoptera, ale – bądźmy szczerzy – na co dzień satelita jest nam potrzebna do łapania sygnału GPS, a głównym zmartwieniem większości z nas jest zaprojektowanie połączenia śrubowego lub chłodzenia układu. Dlatego wracamy na ziemię!

Łukasz Marzec przedstawia nowy produkt – długo wyczekiwaną licencję CFD Pro – okrojoną wersję Fluenta. Bardzo dobrze się sprawdza w prostszych analizach bez potrzeby pójścia na kompromis w kwestii jakości wyników. Tomasz Kądziołka i Jacek Maj piszą o nowym narzędziu do symulacji niezawodności elektroniki – ANSYS Sherlock. Obecnie prawie każdy produkt ma zabudowaną elektronikę, a jej niezawodność jest tak samo kluczowa jak wytrzymałość zmęczeniowa produktu. Moja ostatnia zmywarka wróciła do fabryki właśnie po awarii sterownika.

Nie byłoby nowości bez mechaniki. Marek Zaremba opowiada o narzędziu do automatycznego liczenia połączeń śrubowych w programie ANSYS. Każdy, kto liczy coś skręconego, doceni to rozwiązanie.

Nie może zabraknąć także artykułów naszych klientów i ciekawostek od studentów. Mamy coś o optymalizacji połączeń ogniw w bateriach, o analizie silnika rakietowego (a jednak wracamy na orbitę) oraz opis projektu bolidu Formuły Student. Bardzo ciekawy jest tekst firmy biorącej udział w programie dla start-upów.

Zapraszam do lektury!

Stanisław Wowra

W TYM NUMERZE:

3 Aktualności

4 Analiza wytrzymałości konstrukcji z uwzględnieniem obciążeń zewnętrznych

6 Moduł Bolt Assessment inside ANSYS – przydatny do oceny śrub

8 Analiza i optymalizacja kształtu kanałów chłodzących dyszy silnika rakietowego na podstawie konstrukcji silnika RL10A-3-3

10 CFD Pro – nowe narzędzie w portfolio firmy ANSYS

12 Zastosowanie oprogramowania ANSYS w procesie projektowania bolidu Formuły Student

14 Realne i wirtualne oblicza pomyślnych prądów dla krajowej energetyki wiatrowej. Jak oprogramowanie ANSYS sprzyja uelastycznieniu rozwiązań nie tylko *stricte* technicznych?

16 Wspomaganie projektowania studenckich rakiet sondażowych

18 Analizy niezawodności układów elektronicznych

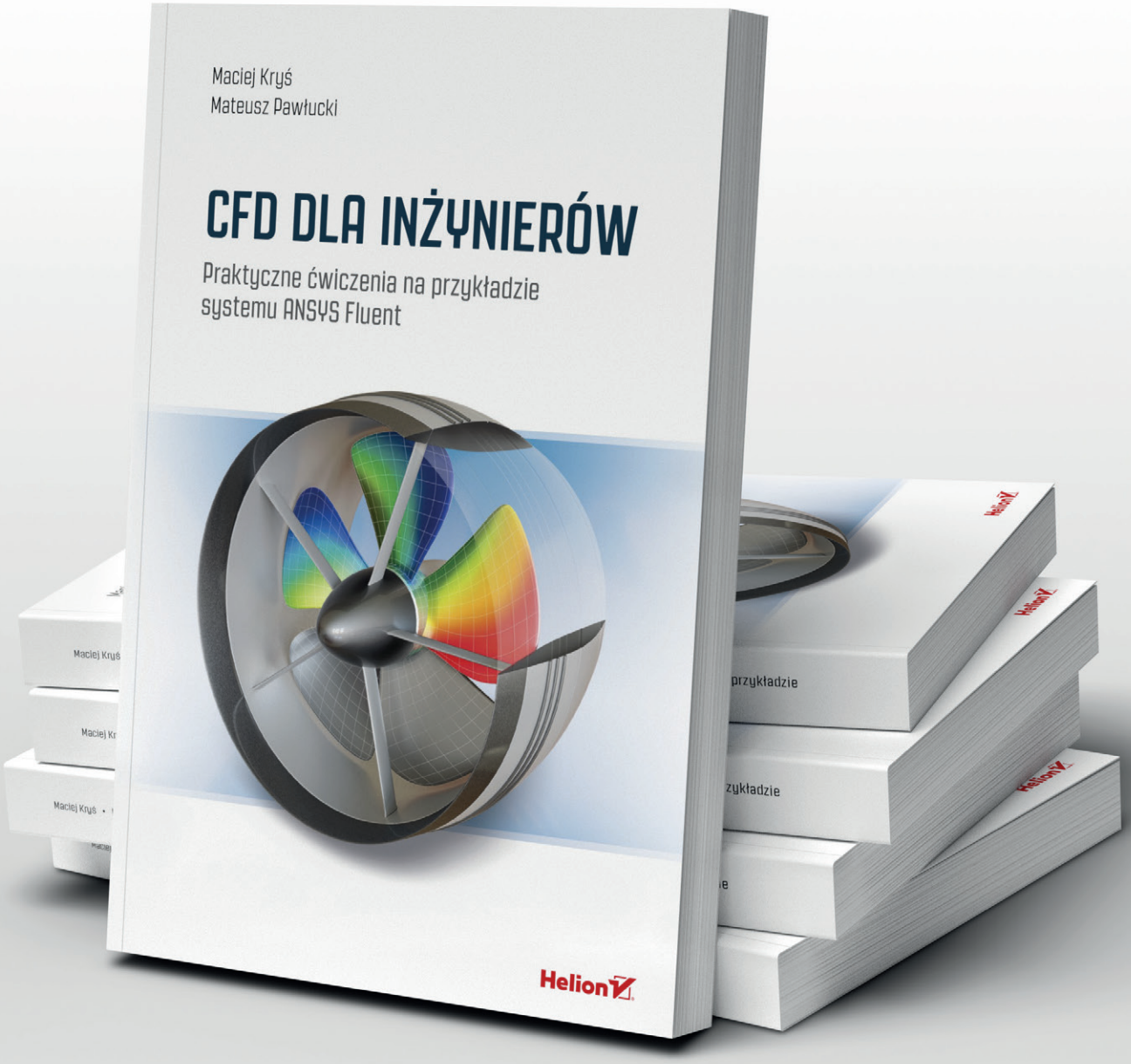
21 Optymalizacja połączeń ogniw w baterii elektrycznego motocykla LEM Photon

MESco

Ansys

MESco

PIERWSZA TAKA KSIĄŻKA
w języku polskim



Tylko w MESco i Helion

ANSYS Customer Loyalty Award 2020

Mamy przyjemność poinformować, że drugi rok z rzędu zdobyliśmy Customer Loyalty Award!

Nagroda jest przyznawana trzem partnerom firmy ANSYS na świecie, którzy osiągają najlepsze wyniki w obsłudze klienta. Wśród 57 Channel Partnerów z obszaru EMEA (Europa, Bliski Wschód i Afryka) to właśnie MESco ponownie otrzymało ten tytuł.

Dziękujemy za to wyróżnienie.

Nowa wersja ANSYS-a

W styczniu pojawiła się najnowsza wersja oprogramowania – ANSYS 2021R1.

Aktualizacja pozwala na jeszcze łatwiejszą i wydajniejszą pracę, co może znacząco przyspieszyć rozwój produktów. O wprowadzonych zmianach można przeczytać na naszej stronie internetowej. Na naszym kanale YouTube dostępne jest nagranie z webinarium: „Co nowego w ANSYS 2021R1?".

Akademia MESco II

Za nami Akademia MESco II – kolejna seria krótkich webinariów poświęconych ciekawostkom, praktycznym poradom oraz nowościom w oprogramowaniu ANSYS.

Podobnie jak poprzednio nasze webinaria cieszyły się niezwykłą popularnością wśród klientów. Dziękujemy wszystkim za udział w spotkaniach. Dla tych, którym nie udało się w nich uczestniczyć, na naszym kanale YouTube została przygotowana playlista z nagraniami wszystkich poruszanych zagadnień.

Praca i staże w MESco

Mimo pandemii firma MESco nie zwalnia. W związku z dynamicznym rozwojem szukamy pracowników na stanowiska:

- Account Manager/Product Manager,
- Application Engineer – symulacje mechaniczne,
- Application Engineer – symulacje elektroniki.

Jeśli jesteś pasjonatem symulacji nastawionym na rozwój, dołącz do zespołu i razem z nami miej wpływ na transformację cyfrową w Polsce.

Prowadzimy również rekrutację na staże wakacyjne. Szczegóły naborów są dostępne na naszej stronie internetowej.

Nowe kursy w ofercie szkoleniowej

Przed nami już końcówka sesji wiosennej szkoleń ogólnodostępnych. Z powodu sytuacji epidemicznej szkolenia nadal mają formę hybrydową – można w nich uczestniczyć stacjonarnie w naszej siedzibie, a także online.

Na liście oferowanych szkoleń pojawiły się nowości:

- ANSYS SpaceClaim Meshing,
- Analizy zmęczeniowe złącz spawanych,
- Skryptowanie w ANSYS Mechanical z wykorzystaniem języka Python.

Część szkoleń prowadzona jest również w języku angielskim.

Serdecznie zapraszamy!

Tworzymy elektronikę przyszłości

Energoelektronika to dziedzina przyszłości.

W połączeniu z niemiecką jakością, za którą stoi marka TRUMPF, polskie rozwiązania technologiczne są stosowane w najbardziej innowacyjnych produktach na świecie.

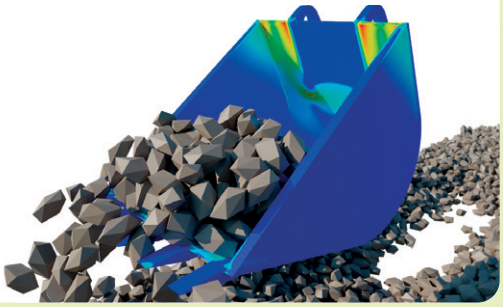
TRUMPF Huettinger jest wiodącym **centrum kompetencyjnym techniki plazmowej i światowym liderem w produkcji zasilaczy plazmowych.** Myśląc o różnych przedmiotach, z którymi spotykamy się na co dzień, takich jak: smartfony, telewizory, ogniwa fotowoltaiczne, samochody, samoloty, noże czy wiertła, nie zdajemy sobie sprawy, że w jednym z istotnych etapów procesu ich produkcji wykorzystane zostały zasilacze powstające właśnie w Zielonce koło Warszawy.

TRUMPF Huettinger ma za sobą **ponad 25 lat doświadczenia** na międzynarodowym rynku i nie przestaje się rozwijać. Firma zatrudnia ponad 600 wysoko wykwalifikowanych pracowników. Posiada 4 nowoczesne budynki, w których mieszczą się m.in.: **Dział Badawczo-Rozwojowy** (z jedynym w Polsce laboratorium niezawodnościowym i największym systemem próżniowym do testowania zasilaczy i rozwiązań klienckich), **Dział Produkcji** (wspierany przez najnowocześniejszą automatykę produkcyjną, w tym robota do automatycznego montażu układów energoelektronicznych) i najnowocześniejsza linia SMT do produkcji elektroniki (PCB).

TRUMPF Huettinger to także firma odpowiedzialna społecznie. Rok 2020 był ekstremalnie trudny dla wielu osób, firm i instytucji. Dlatego spółka zaangażowała się w pomoc i działania charytatywne – wspiera finansowo lokalne placówki oświatowe, domy pomocy społecznej, dom samotnej matki, szpital powiatowy czy dom dziecka. „**#pomagamyjakmożemy**" – tak TRUMPF Huettinger opisuje swoje działania na swoim profilu społecznościowym. Nie sztuką jest dawać sobie radę w trudnych realiach – każda firma czy gospodarstwo domowe mierzy się z tym na co dzień. Sztuką jest działać tak, aby z aktywności firmy mogły czerpać także osoby i jednostki, które w danym momencie potrzebują wsparcia, dzięki któremu przetrwają gorsze chwile.

Analiza wytrzymałości konstrukcji z uwzględnieniem obciążeń zewnętrznych

Zdarza się, że w analizie wytrzymałości konstrukcji trzeba uwzględnić obciążenia zewnętrzne. Mogą to być: wiatr napierający na konstrukcję, ciężar cieczy w zbiorniku czy warstwa śniegu na dachu. W tych przypadkach rozwiązanie jest dość proste i można zastosować obciążenia wyznaczone analitycznie (np. znając ciężar śniegu), zabudowane narzędzia (np. warunek brzegowy naporu hydrostatycznego) czy – w ostateczności – jedno- lub dwukierunkowe sprzężenie z oprogramowaniem CFD. Czasem jednak żadna z tych metod nie oddaje obciążeń, jakim poddawana jest analizowana konstrukcja albo maszyna.

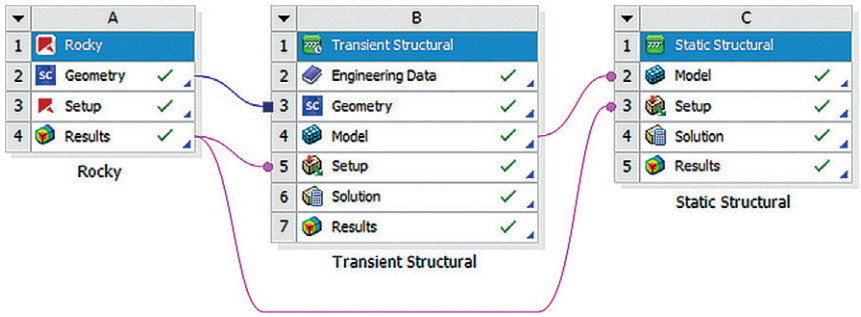


Adrian Bartoszewicz • MESco
abartoszewicz@mesco.com.pl

Dobrym przykładem jest tu kontakt z materiałem sypkim, np. silos wypełniony węglem czy wagon z kruszywem. W przypadku analiz statycznych istnieją oczywiście pewne normowe rozwiązania w postaci wzorów empirycznych, jednak wciąż daje to tylko przybliżony obraz obciążenia konstrukcji. Rozwiązanie to ponadto pokazuje obciążenie w funkcji ciągłej, bez miejscowych pików, wynikających choćby z nacisku ostrych krawędzi kamienia na ścianę. Brakuje też narzędzi umożliwiających rzetelne przeprowadzenie analiz ze zmiennym obciążeniem w czasie (np. podczas zagarniania materiału łyżką koparki czy pracy urządzeń rolniczych).

Sprzężenie ANSYS Mechanical z Rocky

W portfolio firmy MESco obok produktów ANSYS-a znajduje się oprogramowanie Rocky, służące do analizy materiałów sypkich. Narzędzie to pozwala nie tylko na analizę transportu materiału, lecz także na uwzględnienie kształtu drobin oraz ich kruszenia. Można też uwzględnić wiele innych czynników, takich jak zawilgocenie materiału czy transport wilgoci pomiędzy drobinami złoża. Prócz tego narzędzie to jest kompatybilne ze środowiskiem Workbench, co pozwala na wykonanie analizy parametrycznej, a nawet sprzężenie z innymi produktami ANSYS-a... i w tym miejscu powraca omawiany problem.



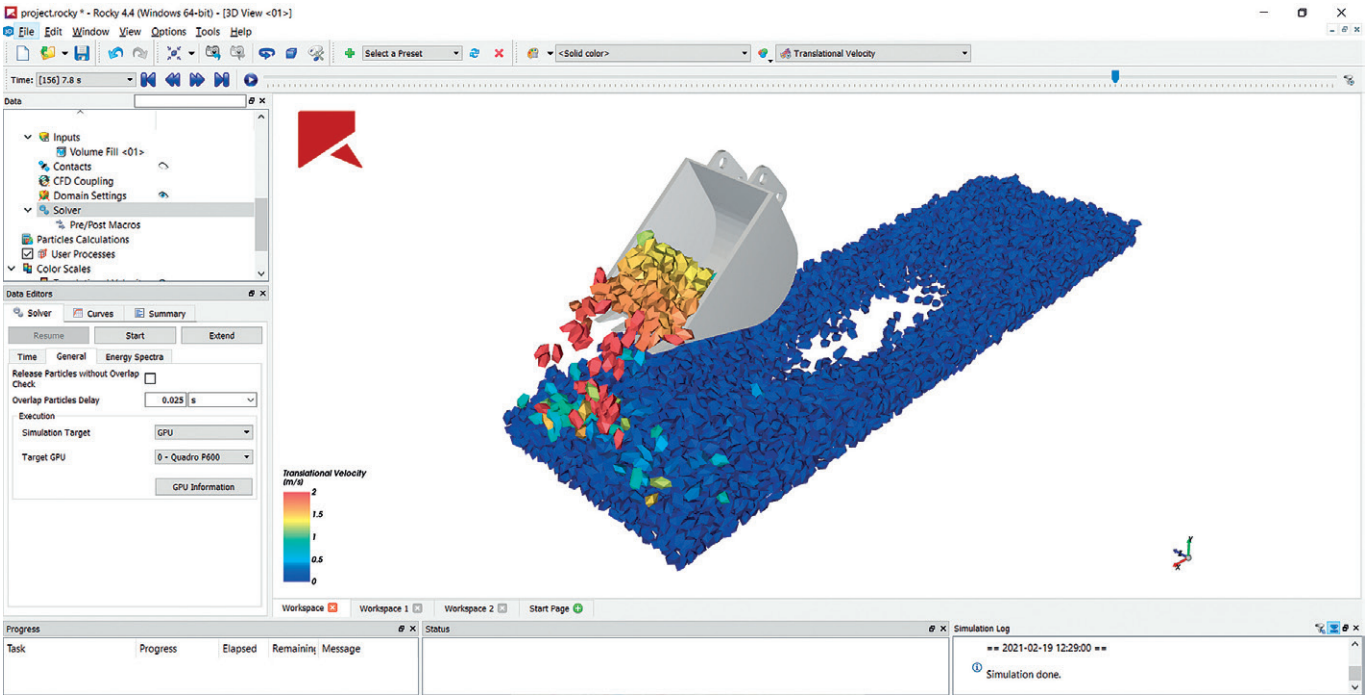
Rys. 1. *Przykład sprzężenia Rocky–ANSYS Mechanical*

Sprzężenie Rocky–ANSYS Mechanical pozwala na przeprowadzenie analizy statycznej materiału zalegającego w danej objętości, a także analizy zjawisk niestacjonarnych, łącznie z obciążeniami wynikającymi z procesu transportu i kruszenia materiału oraz dodatkowo – lokalnymi kolizjami obiektów o ostrych krawędziach z badaną geometrią.

Jak to wygląda w praktyce?

Przeanalizujmy przypadek nabierania kruszywa łyżką koparki. Po pierwsze najważniejszy jest dobór odpowiednich właściwości materiałowych dla złoża. Tak aby jego zachowanie było zgodne z rzeczywistością. Często ciężko jest znaleźć szczegółowe informacje na ten temat. O ile dane o gęstości nasypowej i kącie usypu są łatwo dostępne, to uzyskanie wartości współczynnika tarcia cząstka–cząstka czy współczynnika restytucji może stanowić wyzwanie. Wykorzystuje się więc dostępne informacje, a resztę dobiera, odtwarzając warunki testowe (np. usypanie pryzmy czy zsuwanie materiału po pochylonej powierzchni). Baza tego typu eksperymentów jest dostępna dla każdego użytkownika Rocky i pozwala na taki dobór parametrów złoża, aby odzwierciedlić jego zachowanie, mając przy tym poparcie obranych parametrów w eksperymencie na małą skalę.

Kolejnym etapem jest wykonanie sprzężonej analizy Rocky i ANSYS Mechanical – odbywa się to poprzez połączenie bloczka Rocky oraz Transient Structural na poziomie geometrii i wyników (rys. 1). Po uruchomieniu Rocky należy przepisać uzyskane właściwości materiałowe, zdefiniować ruch oraz ustawić i uruchomić symulację.



Rys. 2. *Interface Rocky*

Analiza mechaniczna nie różni się tu od pracy z innymi importowanymi obciążeniami (np. External Load lub klasycznym jednokierunkowym FSI). Po uruchomieniu symulacji wystarczy poczekać na wyniki.

Wynik przykładowej analizy przedstawia rozkład naprężeń badanej konstrukcji (rys. 4). Jak widać na rys. 3, rozkład ciśnień nie jest równomierny, co wynika z charakteru złoża, i w przypadku cienkościennych elementów (np. ściany silosu) może mieć zasadniczy wpływ na lokalne odkształcenia oraz zużycie powierzchni.

Podsumowując, trudne do tej pory analizy stają się znacznie prostsze, a dokładność tego rozwiązania została potwierdzona nie tylko w badaniach [1–3] ale – co najważniejsze – przez wiele firm stosujących takie podejście [4].

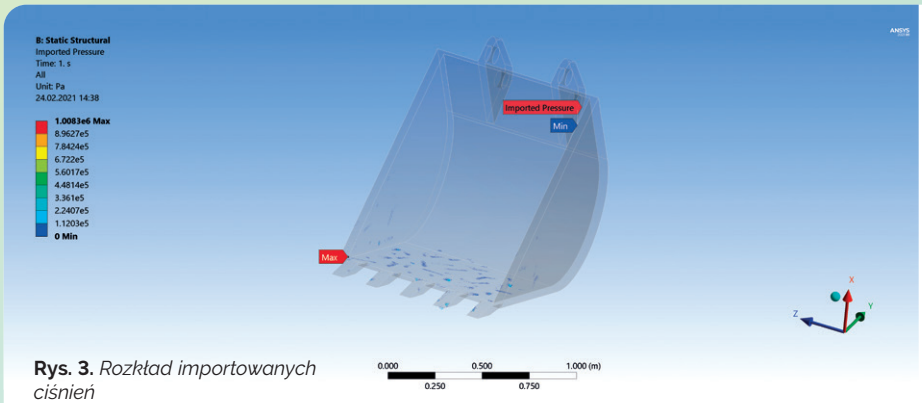
Opcje dostępu do narzędzia Rocky

W praktyce jednak wszystko sprowadza się do ceny. Co jeśli taką analizę potrzebujemy wykonać tylko kilka razy do roku? Wtedy również istnieje rozwiązanie.

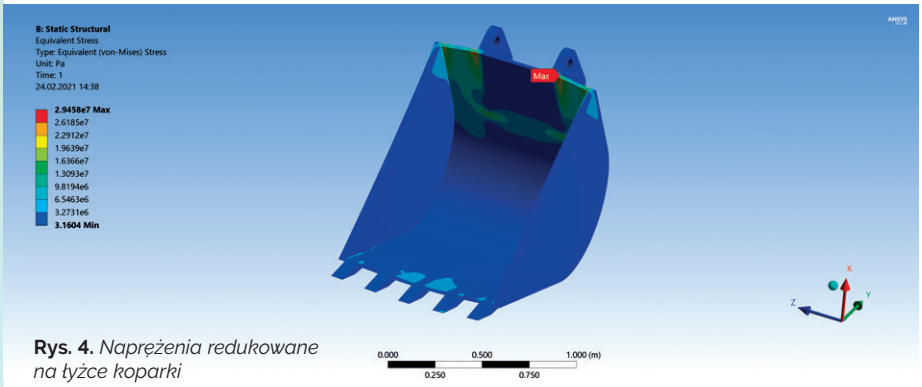
Licencjonowanie Rocky wygląda tak jak innych pakietów ANSYS-a. Można go kupić albo wybrać dzierżawę krótkoterminową lub pakiet LaaS (*License as a Service*), czyli pulę godzin do wykorzystania na żądanie w ciągu roku. Jest to najbardziej elastyczne rozwiązanie, ponieważ użytkownik jest rozliczany z przepracowanych godzin. Ma więc do dyspozycji gotowe narzędzie, pozwalające w dowolnej chwili przeprowadzić analizę złożonego zagadnienia prosto, szybko, a przede wszystkim dokładnie.

LITERATURA

[1] Phung Tu, Vanissorn Vimonsatit. “Silo quaking of iron ore train load out bin – A time-varying mass structural dynamic problem”. *Advanced Powder Technology*. 28, 11 (2017): 3014–3025, https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.09.012.
[2] Katinas E., Chotěborský R., Linda M., Jankauskas V. “Wear modelling of soil ripper tine in sand and sandy clay by discrete element method”. *Biosystems Engineering*. 188 (2019): 305–319, https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.022.
[3] Ilic D., Roberts A., Wheeler C., Katterfeld A. “Modelling bulk solid flow interactions in transfer chutes: Shearing flow”. *Powder Technology*. 354 (2019): 30–44, https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.058.
[4] https://rocky.esss.co/cases/



Rys. 3. *Rozkład importowanych ciśnień*



Rys. 4. *Naprężenia redukowane na łyżce koparki*

Moduł Bolt Assessment inside ANSYS – przydatny do oceny śrub

Marek Zaremba
MESco • mzaremba@mesco.com.pl

Bolt Assessment inside ANSYS to rozszerzenie napisane przez firmę CADFEM, które służy do automatycznej oceny śrub na podstawie normy VDI 2230. W obecnej wersji moduł współpracuje ze śrubami zamodelowanymi jako bryły 3D oraz belki 1D, odpowiadające modelowi III i II klasy, opisane w normie VDI 2230 Part II.

Dodatek ACT to bardzo proste narzędzie, oparte na definiowaniu przez użytkownika parametrów śrub, tj. typu rozpatrywanej śruby, jej klasy, rozmiaru i długości. W narzędziu tym można wprowadzić wartość wstępnego napięcia lub wartość momentu dokręcenia śruby. Dodatkowo użytkownik może uwzględnić straty napięcia wstępnego lub straty momentu dokręcenia wynikające z chropowatości powierzchni w połączeniu śrubowym, zgodnie z normą VDI 2230 (rys. 1).

Na podstawie analizy MES wyznacza się siły i momenty działające w połączeniu śrubowym. Następnie te wyniki oraz zdefiniowane wcześniej parametry są przenoszone do zewnętrznego solvera, który oblicza współczynniki bezpieczeństwa:

- Safety against yield point,
- Safety against fatigue,
- Safety against pressure,
- Safety against sliding (rys. 2).

Współczynniki te są bezpośrednio wyświetlane w ANSYS Mechanical, co pozwala użytkownikowi szybko zidentyfikować krytyczne śruby. Ponadto generowane są raporty obliczeniowe dla każdej śruby, które da się otworzyć bezpośrednio w ANSYS Mechanical. Raport można wygenerować w systemie metrycznym lub imperialnym.

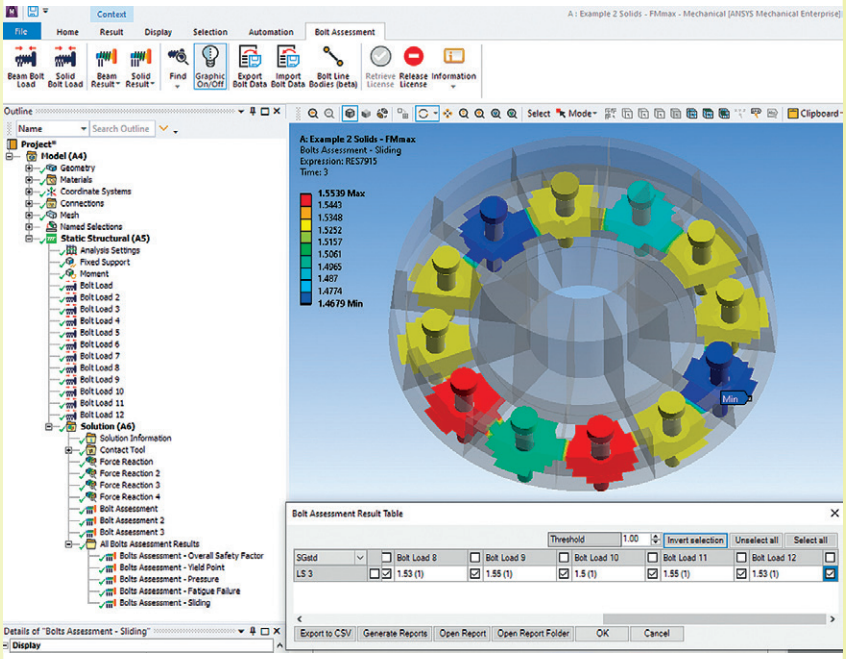
Details of "Bolt Load"

Bolt Selection	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Top Area	1 Face
Bottom Area	1 Face
Head Bearing Area	1 Face
Interfaces	
Evaluating Safety against Sliding	Yes
Number of Interfaces to evaluate	1
Interface 1	36 Faces
Friction Coefficient 1	0.15
Pinball Parameter 1	0.9
Pretension and Embedding	
Cutting Plane Offset	0 mm
Definition	Standard
Define By	Force
Preload Force	118800 N
Embedding Definition	Manual
Embedding	0.011 mm
Pretension History	OK - Click to modify
Bolt Data	
Bolt Type	Hexagon head screw with shank (A B) DIN EN ISO 4014:2001
Strength Grade	10.9
Nominal Diameter	16 mm
Bolt Length	80 mm
Thread Manufacturing	Final heat treated
Type of Bolting	
Type of Bolting	Nut
Standard	DIN EN 24032:1992 (ISO 4032)
Determine Nut Tightness (beta)	by Strength Class
Strength Class (beta)	10
Ratio of Shearing Stress (beta)	0.6
Washer	
under Bolt Head	No
under Nut	No
Bore Definition	
Standard	Own Input
Diameter	17.7 mm
Chamfer at Head	0 mm
Chamfer at Nut	0 mm
Basic Data	
Friction Factor in the Thread	0.12
Friction Factor in the Bearing Surface	0.12
Friction Factor in the Nut Support	0.12
Limiting Surface Pressure (Head)	850 MPa
Limiting Surface Pressure (Nut)	850 MPa
Number of Load Cycles	2000000
Report Units	U.S.
Reduction Coefficient	0.5
Calculate SF with MSA	Yes
Data used by KISSsoft	

Details | Section Planes

Rys. 1. *Okno szczegółów do wprowadzenia parametrów połączenia śrubowego*

Rys. 2. *Współczynnik bezpieczeństwa poślizgu dla śrub*



TechnipFMC

TechnipFMC – lider branży energetycznej – kompleksowo dostarcza produkty, projekty, technologie i usługi. Dzięki zastrzeżonym technologiom i systemom produkcyjnym, wiedzy oraz nowoczesnym rozwiązaniom podnosi wydajność projektów swoich klientów.

Trzy segmenty biznesowe – Subsea, Surface Technologies i Technip Energies – maksymalizują wydajność w całym cyklu projektu. Pomagają klientom w rozwijaniu zasobów energii i pozycjonowaniu, aby sprostać wyzwaniom transformacji energetycznej. Firma ma ok. 37 000 pracowników w 48 krajach świata. W Krakowie jest obecna od 2006 r., zatrudnia prawie 400 osób i nadal rozwija zespół.

Śledź naszą stronę internetową i bądź na bieżąco z prowadzonymi procesami rekrutacyjnymi.

Czego się spodziewać?

- zgranego zespołu i pozytywnej atmosfery,
- ciekawych zadań,
- międzynarodowej współpracy,
- elastycznego czasu pracy,
- rozbudowanego procesu wdrożenia i opieki mentora,
- szkoleń (ponad 5000 szkoleń online oraz lekcji języka angielskiego i norweskiego),
- nowoczesnego, komfortowego biura,
- benefitów typu: prywatna opieka medyczna, karta MultiSport, kluby sportowe, ubezpieczenie na życie i w podróży, długoterminowy wynajem samochodów, dofinansowanie wakacji, optymalizacja podatku dochodowego.

Nasze działy:

Dział Subsea Production Systems dostarcza rozwiązania inżynierskie do systemów wydobycia ropy naftowej i gazu w sektorze podwodnym (*subsea*). Projektuje: urządzenia do prowadzenia odwiertów, kolektory i elementy instalacji podwodnych, głowice wydobywcze (Xmas Tree), rury wiertnicze, urządzenia warsztatowe, urządzenia do instalacji i interwencji oraz zawory.

Dział Controls & Automation dostarcza układy sterowania i automatyki do systemów wydobycia ropy i gazu ze złóż podmorskich. W oparciu o zewnętrzne i wewnętrzne rozwiązania systemowe projektuje moduły sterowania, przyrządy OEM, przepływomierze oraz systemy sterowania i monitoringu topside. Rozwija oprogramowanie i aplikacje cyfrowe wspomagające klientów. Jest zaangażowany w projekty badawczo-rozwojowe w dziedzinie elektrotechniki i dostarcza systemy analizy niezawodności i konserwacji zapobiegawczej do zastosowań *subsea*.

Dział Support Services ma różne specjalizacje – dostarcza innym jednostkom TechnipFMC doświadczonych i kompetentnych pracowników świadczących usługi związane z: zarządzaniem projektami i dokumentacją, planowaniem materiałowym, logistyką i analizami biznesowymi.

Dział Subsea Services wspiera operacyjnie projekty *subsea* zarówno poprzez zdalne wsparcie inżynieryjne, projektowe oraz przygotowanie animacji treningowych, jak i oddelegowanie do projektów na całym świecie. Nasi pracownicy to doświadczeni menedżerowie projektu, inżynierowie serwisu oraz technicy zajmujący się dokumentacją projektową, instalacją urządzeń i ich konserwacją na polach naftowych.

Zespół Global Sourcing & Procurement zapewnia TechnipFMC najlepszą pozycję na rynku z zachowaniem bezpieczeństwa, jakości, terminowości dostaw i kontroli kosztów. Dział zakupów negocjuje najlepsze warunki handlowe, abyśmy byli konkurencyjni na rynku. Dba o przekazywanie precyzyjnych informacji o cenach i terminach dostaw, składa zamówienia i identyfikuje oszczędności. Dział sourcingu blisko współpracuje z zespołem Direct Category Management, zarządza globalnymi łańcuchami dostaw, które zaopatrują kluczowe segmenty TechnipFMC: Subsea, Surface i Onshore/Offshore.

Analiza i optymalizacja kształtu kanałów chłodzących dyszy silnika rakietowego

na podstawie konstrukcji silnika RL10A-3-3

Michał Sobota • Politechnika Śląska • michal.sobota.pl@gmail.com

Silniki rakietowe o cyklu regeneratywnym stanowią najwydajniejszą grupę silników rakietowych z napędem czysto chemicznym. Są więc chętnie stosowane jako napęd wyższych stopni rakiet. Mają jednak kilka wad. Jedną z nich jest problem stworzenia silnika o standardowej geometrii komory spalania i dyszy wytwarzającego ponad 150 kN ciągu. To ograniczenie wynika z tego, że ściany komory spalania i dyszy są jednocześnie wymiennikami ciepła, a stosunek ich powierzchni do objętości silnika maleje wraz ze zwiększaniem ciągu. Celem pracy inżynierskiej realizowanej na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej było ominięcie tego fenomenu poprzez zmianę geometrii komory spalania i dyszy silnika RL10A-3-3. Miało to zwiększyć standardowy ciąg silnika RL10A-3-3 z 67,7 kN do 270,8 kN, co znacznie wykracza poza teoretyczną maksymalną moc klasycznych silników o cyklu regeneratywnym.

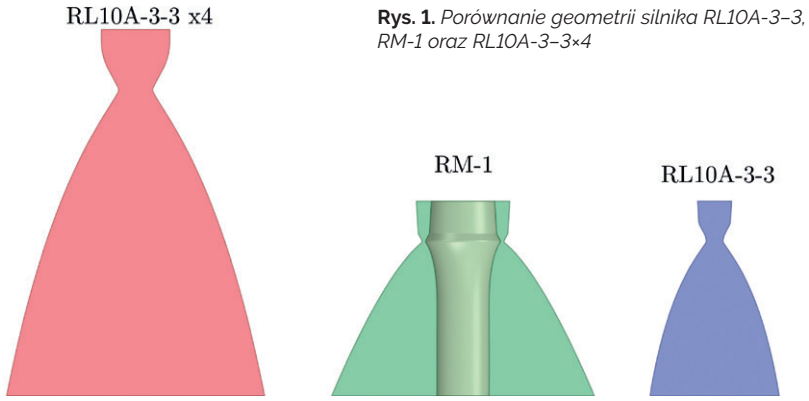
Główne zadania

Analiza pracy silnika w programie ANSYS 2020 R2 Fluent obejmowała stworzenie modelu gazów spalinowych oraz ciekłego wodoru chłodzącego ścianki, sprawdzenie wpływu radiacji pary wodnej na przepływ ciepła, parametryzację i optymalizację kształtu kanałów chłodzących oraz – co najważniejsze – wyznaczenie ciągu i maksymalnej temperatury ścianek silnika. Aby otrzymać optymalny kształt dyszy silnika, skorzystano z metody charakterystyk. Ponieważ możliwych kształtów było wiele, wybrano jeden, dla którego przeprowadzono wszystkie analizy w celu skrócenia zadania.

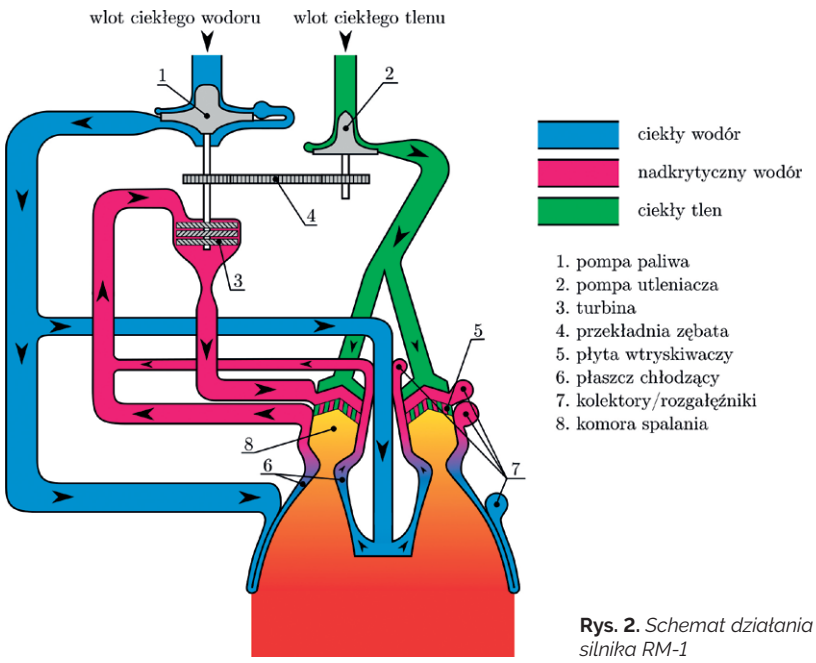
Jego kształt pokazano na rys. 1 – oznaczony jako RM-1. Dla porównania czerwony kontur przedstawia, jak teoretycznie wyglądałby silnik RL10A-3-3 mogący wytworzyć 270,8 kN ciągu. Uproszczony schemat działania silnika RM-1 przedstawiono na rys. 2.

Modelowanie zagadnienia

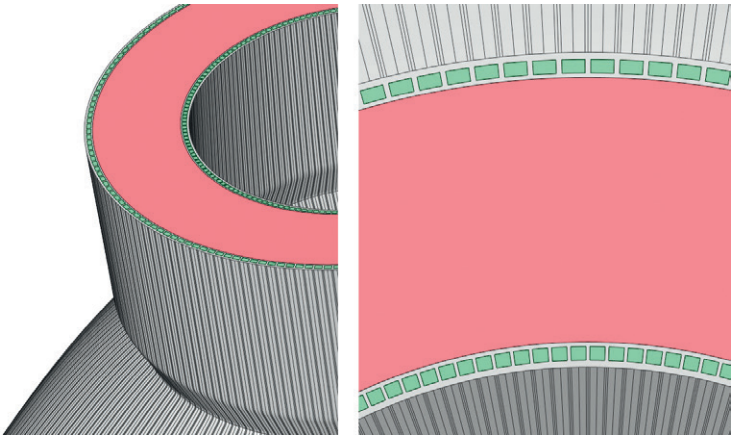
Ponieważ ścianki boczne występują wewnątrz i na zewnątrz komory spalania oraz dyszy silnika RM-1, konieczne było zastosowanie dwóch układów kanałów chłodzących (rys. 3). Kanały te miały prawie prostokątne przekroje o stałej grubości promieniowej, a ich szerokość zależała od odległości od osi symetrii. Parametryzacji poddano ich chropowatość, grubość, szerokość oraz grubość ścianki wewnętrznej, zewnętrznej i dzielącej. Ścianki kanałów wykonano ze stopu miedzi o nazwie GRCop-42, stworzonego na potrzeby druku 3D.



Rys. 1. *Porównanie geometrii silnika RL10A-3–3, RM-1 oraz RL10A-3–3×4*

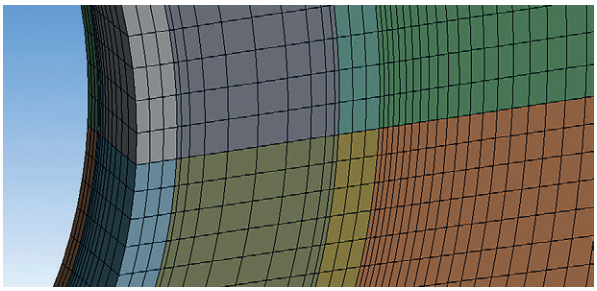


Rys. 2. *Schemat działania silnika RM-1*



Rys. 3. *Przykładowa geometria kanałów chłodzących*

Rys. 4. *Siatka w okolicach gardła dyszy*



Modelowanie spalania wodoru z tlenem jest złożonym zagadnieniem, jednak nie było ono konieczne, ponieważ zastąpiono je źródłem ciepła. W tym celu mieszankę gazów zamieniono na jednoskładnikowy gaz, którego parametry fizykochemiczne otrzymano z analizy przeprowadzonej w programie Rocket Propulsion Analysis Standard Edition. Modyfikowanie właściwości gazu w programie Fluent okazało się bardzo łatwe, dzięki nowej opcji generowania wykresów właściwości fizykochemicznych w zależności od temperatury, dającej bezpośredni podgląd wprowadzanych zmian. Paraboliczna funkcja intensywności źródła ciepła zależała od odległości osiowej i była zapisana w programie Fluent bez konieczności tworzenia UDF-ów.

Ciekły wodór można zamodelować przez zastosowanie modelu gazu rzeczywistego NIST wywoływanego komendą, jednak ograniczeniem tego rozwiązania jest brak możliwości użycia innych substancji niż zawarte w bazie danych NIST. Konieczne więc było stworzenie nowego modelu wodoru – podobnie jak dla gazu spalinowego. Do tego posłużył program mini-REFPROP.

Table of Schematic B4: Optimization

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Parameter	Objective			Constraint			
2			Type	Target	Tolerance	Type	Lower Bound	Upper Bound	Tolerance
3	Seek P12 = 1030 K; P12 <= 1030 K	P12 - max_wall_temp-op	Seek Target	1030	0.01	Values <= Upper Bound		1030	1
4	Maximize P14	P14 - avg_temp_h2_outlet_-op	Maximize	0		No Constraint			

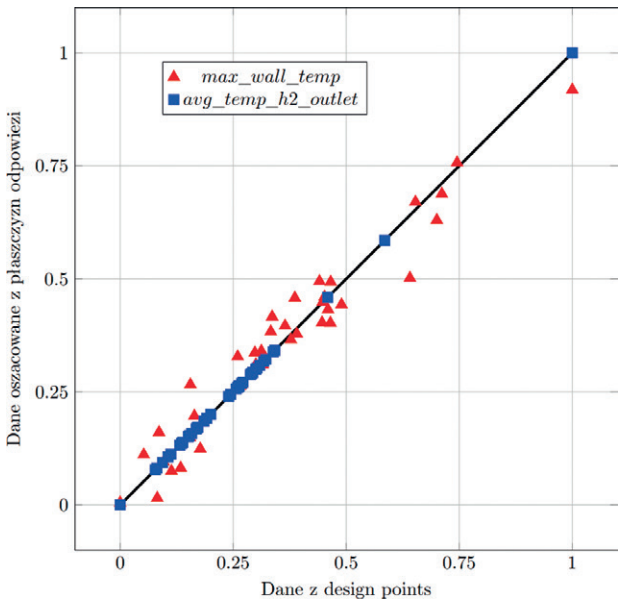
Rys. 5. *Ustawienia celów optymalizacji parametrycznej*

Aby porównać ten model z modelem gazu rzeczywistego NIST, przeprowadzono symulację nagrzewania wodoru w pojedynczym kanale. Wyniki różniły się o niecałe 0,04%.

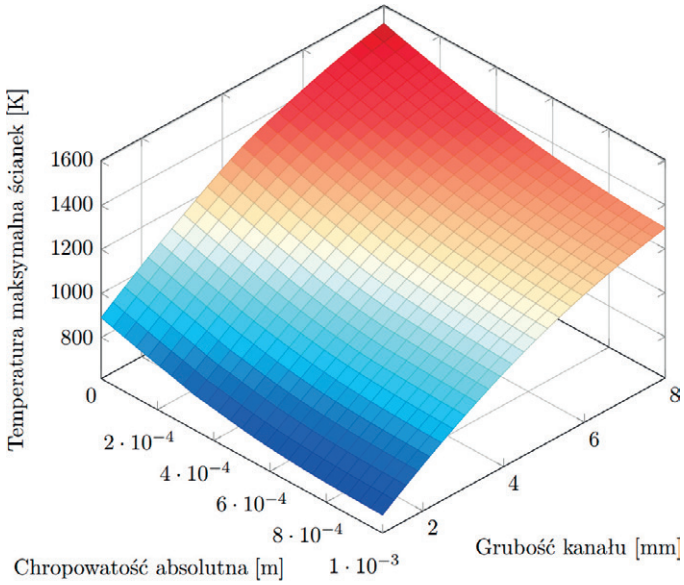
Do sprawdzenia udziału radiacji w całkowitej wymianie ciepła użyto modelu Discrete Ordinates. Obliczenia pokazały, że radiacja odpowiada za zaledwie 0,16% wymiany ciepła, co pozwoliło na jej pominięcie i uproszczenie głównej analizy.

Geometria silnika umożliwiła zastosowanie domeny obliczeniowej składającej się z kątowego wycinka silnika, obejmującego połowę kanału chłodzącego i połowę ścianki bocznej, z założeniem warunku symetrii na tych płaszczyznach. W celu generowania domen dla różnych parametrów geometrycznych skorzystano z opcji skryptowania w programie SpaceClaim. Odpowiedni podział domeny pozwolił na uzyskanie strukturalnej siatki heksahedralnej (rys. 4).

Optymalizacja parametryczna została przeprowadzona za pomocą modułu DesignXplorer z wykorzystaniem Response Surface Optimization. Za parametry wyjściowe posłużyły maksymalna



Rys. 6. *Wykres Goodness of Fit*



Rys. 7. *Wykres maksymalnej temperatury ścianek*

temperatura ścianek, która nie mogła przekroczyć 1030 K, oraz wzrost temperatury ciekłego wodoru, który miał być jak największy (rys. 5).

Wyniki

Po przeliczeniu 50 Desing Points wyniki pokazały maksymalną różnicę ciągu rzędu 2% względem założonych 270,8 kN. Powierzchnie odpowiedzi otrzymane z analizy dobrze przewidują wpływ parametrów wejściowych na wyjściowe, co pokazuje wykres na rys. 6. Przykładowa powierzchnia odpowiedzi została przedstawiona na rys. 7.

Aby znaleźć odpowiednią geometrię kanałów, skorzystano z optymalizacji metodą Screening. Wybrała ona trzy zestawy parametrów, z których pierwszy okazał się najlepszy (rys. 8). Co ciekawe, wzrost temperatury wodoru o 192,17 K jest bardzo zbliżony do wzrostu temperatury wodoru w rzeczywistym silniku RL10A-3-3, który wynosi około 190 K.

8	Candidate Points			
9		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
10	P1 - inner_wall_thickness	1.321	1.7245	1.9576
11	P2 - outer_wall_thickness	0.63025	1.9059	1.4307
12	P3 - canal_thickness	1.4531	4.2729	5.6503
13	P4 - wall_angle	0.16024	0.14369	0.28716
14	P5 - canal_angle	0.7861	0.23608	0.21413
15	P10 - absolute_roughness	0.00096733	6.8694E-05	0.00081305
16	P12 - max_wall_temp-op (K)	1028.9	1030.7	1030.5
17	P14 - avg_temp_h2_outlet_increase-op (K)	192.17	168.56	160.85
18	P15 - wall_flux_whole_engine-op (W)	1.5346E+07	1.0221E+07	6.4647E+06

Rys. 8. *Trzy zoptymalizowane zestawy parametrów*

LITERATURA

[1] "*Design report for RL10A-3–3 rocket engine*". USA: Pratt & Whitney Aircraft Florida Research and Development Center, 1966.

[2] Sutton G.P., Biblarz O. "*Rocket Propulsion Elements*". USA: John Wiley & Sons, 2001.

[3] Pudlik W. „*Wymiana i wymienniki ciepła*". Gdańsk: Biblioteka Główna Politechniki Gdańskiej, 2012.

[4] Pizzarelli M. "Regenerative cooling of liquid rocket engine thrust chambers" (2017). https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.13140%2FRG.2.2.30668.92804.

[5] Binder M., Tomsik T., Veres J.P. "RL10A-3-3A Rocket Engine Modeling Project". *NASA Technical Memorandum 107318*. NASA Technical Reports Server (NTRS), (1997).

[6] Menter F.R. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications". *AIAA Journal*. 32, 8 (sierpień 1994): 1598–1605, https://doi.org/10.2514/3.12149.

[7] Gradl P.R., Protz C., Cooper K., Garcia C. "GRCop-42 Development and Hot-fire Testing Using Additive Manufacturing Powder Bed Fusion for Channel-cooled Combustion Chambers". *55th AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* (2019), https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.2514%2F6.2019–4228.

[8] Di Matteo F., De Rosa M., Onofri M. "Transient Simulation of the RL-10A-3-3A Rocket Engine". *Conference: Space Propulsion Conference 2012* (2012), https://www.ecosimpro.com/wp-content/uploads/2015/02/SpacePropulsion2012_2355411.pdf.

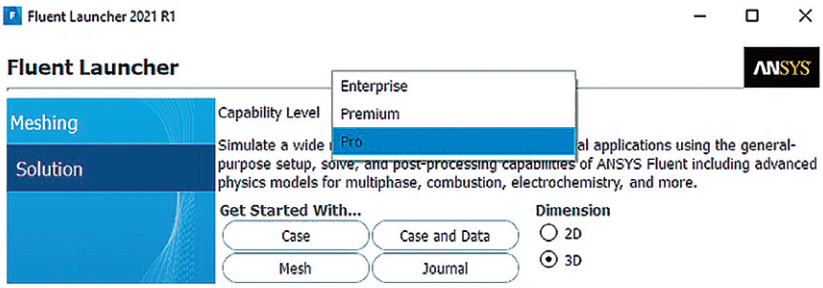
CFD Pro – nowe narzędzie w portfolio firmy ANSYS

Łukasz Marzec • MESco • lmarzec@mesco.com.pl

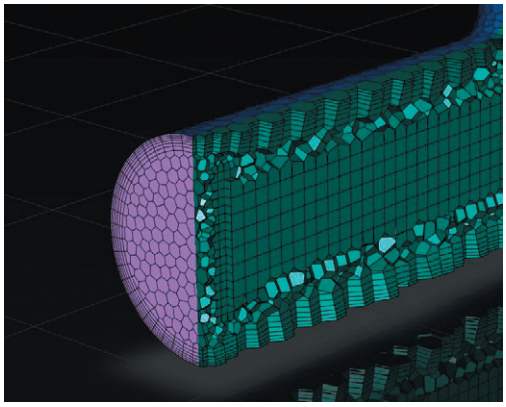
Nie wiesz, czym jest AIAD i uważasz, że symulacje magnetohydrodynamiki to już lekka przesada? Nie interesuje Cię symulacja plazmy, ale przez ostatni tydzień przeliczyłeś 348 kolejnych wersji kierownic w kanale spalin? A może w firmie jest jedna licencja Fluenta i na karku czujesz oddech kolegi, który niecierpliwie chce sprawdzić wymarzony model DPM do VOF, a Tobie znowu się przeciągają obliczenia spadków ciśnienia na trójniku?

ANSYS Fluent to najpotężniejsze komercyjne narzędzie do obliczeń CFD. Da się w nim zrobić praktycznie wszystko, a nawet jeśli jakiejś funkcjonalności brakuje, zawsze można sięgnąć po UDF-y. Mało kto wykorzystuje jednak cały potencjał Fluenta, a większość użytkowników wykonuje symulacje z użyciem tylko podstawowych modeli fizyk. Zazwyczaj, mimo mniejszych potrzeb, wiele osób decyduje się na Fluenta ze względu na niezaprzeczalne zalety, takie jak niezawodność, dokładność i stabilność obliczeń. W odpowiedzi na potrzeby rynku od wersji 2021 R1 dostępna jest licencja w wersji Pro w bardzo atrakcyjnej cenie.

Już w oknie startowym ANSYS Fluent 2021 R1 (rys. 1) można wybrać poziom licencji. Fluent w wersji Pro oferuje mniejsze możliwości w stosunku do znanych już wersji CFD Enterprise oraz CFD Premium, bazując na tych samych algorytmach. Jednak „mniejsze" nie znaczy małe, a zyskuje się rzetelność obliczeń, której próżno szukać u konkurencji. Co więcej, licencja CFD Pro pozwala na przejście do trybu dokładnych obliczeń Refine w Discovery 2021 R1.



Rys. 1. *Okno wyboru poziomu licencji we Fluent Launcherze*



Rys. 2. *Siatka numeryczna typu Poly-Hexcore wykonana w CFD Pro*

Fluent Pro skupia się na przeprowadzeniu użytkownika przez cały proces symulacji w jednym oknie, całkowicie poza Workbenchem. Ścieżka pracy biegnie od importu geometrii z zewnętrznego oprogramowania CAD, przez siatkowanie we Fluent Meshingu, ustawienie solvera i rozwiązanie, aż do zaawansowanego postprocessingu.

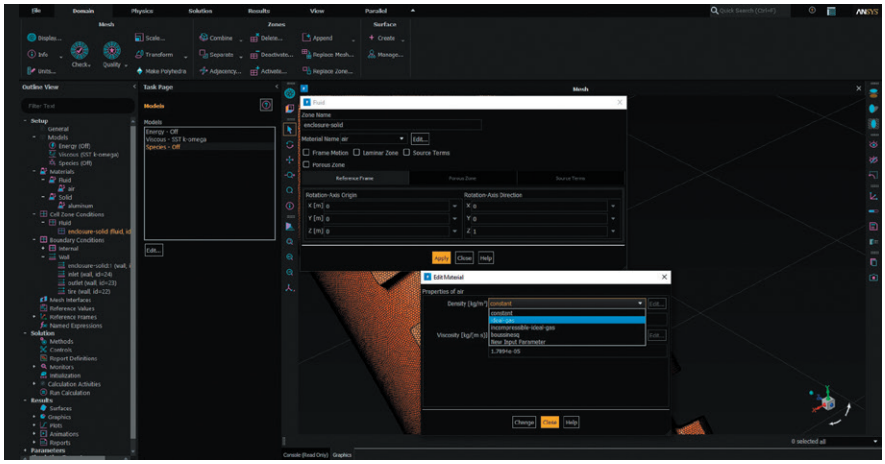
Watertight Geometry Workflow we Fluent Meshingu pozwala na tworzenie siatek tetrahedralnych, polyhedralnych oraz siatek Poly-Hexcore (rys. 2) z wykorzystaniem technologii Mosaic.

W CFD Pro można przeprowadzić symulacje w stanie ustalonym, także z uwzględnieniem przepływu ciepła oraz konwekcji naturalnej (rys. 3). Są tam podstawowe modele turbulencji, takie jak: laminar, k-ε, k-ω SST oraz Spalart-Allmaras. Zapewniono dostęp do parametrów oraz wyrażeń. Nie zabrakło modelu MRF, modelu wentylatora 2D, stref porowatych oraz tworzenia mieszanin płynów. Możliwe jest wykonywanie obliczeń na większej liczbie rdzeni z wykorzystaniem pakietów HPC Pack.

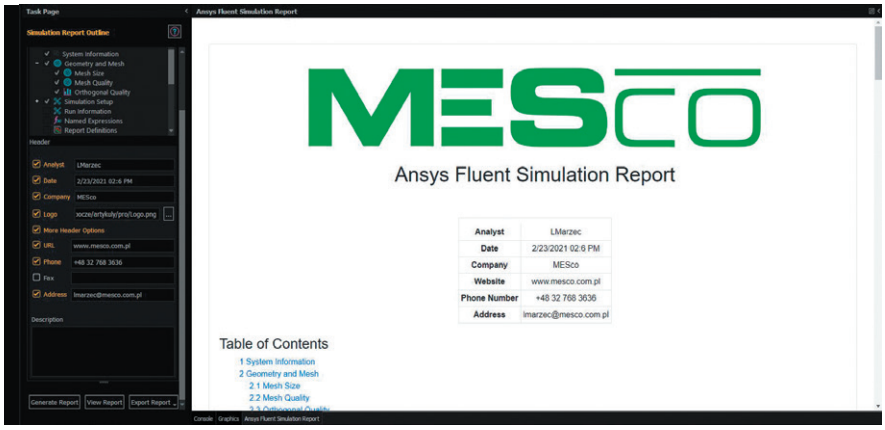
Warto zaznaczyć, że od wersji 2021 R1 funkcje wbudowanego postprocessingu zostały znacznie rozwinięte, wliczając w to możliwość automatycznego tworzenia raportów (rys. 4). Raport można zapisać w formacie *.pdf* lub *.html*. We Fluencie Pro jest też nowy system zarządzania oknami graficznymi (rys. 5).

Pozostałe funkcje znane z podstawowego Fluenta są niedostępne z poziomu GUI, aby zapewnić klarowność oferowanych funkcjonalności.

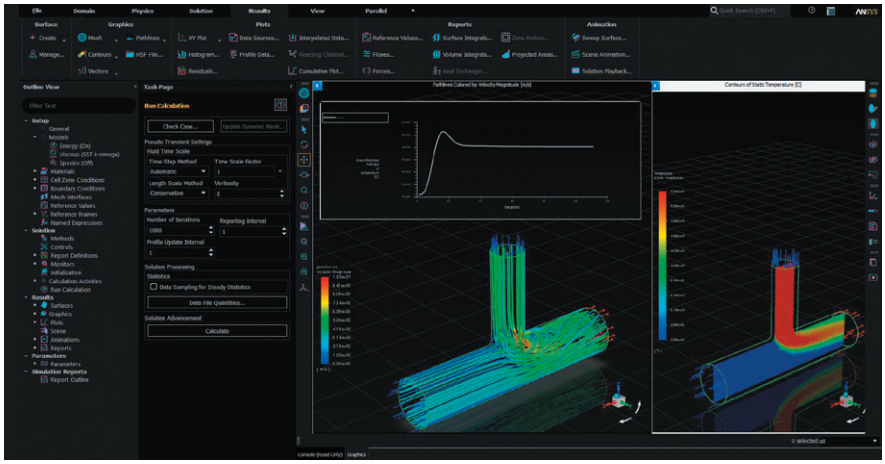
Fluent w wersji Pro otwiera całkowicie nowe perspektywy. Taka licencja może być używana jako niezawodne narzędzie do prostych symulacji CFD lub jako druga, dodatkowa licencja obok wersji podstawowej. Dzięki pracy na dwóch stanowiskach, przystosowanych do aktualnych potrzeb, można małym kosztem znacznie poprawić wydajność bez konieczności zakupu kolejnej pełnej wersji.



Rys. 3. *Model gazu idealnego w ANSYS Fluent Pro*



Rys. 4. *Generator raportów*



Rys. 5. *Nowe podejście do obsługi okien graficznych*

Zastosowanie oprogramowania ANSYS w procesie projektowania bolidu Formuły Student

Wiktoria Bogudzińska • PRz Racing Team • bogudzinskawiktoria@poczta.fm

Rys. 1. *Bolid PMT-03*

Projektowanie bolidu Formuły Student to niemałe wyzwanie. Zespół ma do dyspozycji jedynie wytyczne określone w regulaminie, na bazie których trzeba wykonać projekt, przeprowadzić go przez etap symulacji, a potem test w rzeczywistych warunkach na torze – czyli: od zera do bohatera. Najnowsza konstrukcja stworzona przez rzeszowskie koło naukowe PRz Racing Team – bolid PMT-03 – powstała w 2020 r. Zaprojektowano ją z użyciem komercyjnej wersji oprogramowania ANSYS, udostępnionej przez firmę MESco. Kluczowymi modułami programu użytymi podczas projektowania były Fluent oraz Static Structural.

Go with the flow!

Zgodnie z trendami wyznaczanymi przez nowoczesne technologie cały pakiet aerodynamiczny PMT-03 – obejmujący przednie i tylne skrzydło oraz podłogę – został zoptymalizowany z zastosowaniem modułu Fluent. Zarówno skrzydła, jak i podłoga zostały zaprojektowane z myślą o maksymalizacji siły docisku. Dodatkowymi kryteriami były: umiejscowienie aerodynamicznego środka parcia blisko środka ciężkości (rozkład masy 47 : 53) oraz minimalizacja oporu z zastosowaniem dodatkowych rozwiązań aerodynamicznych. Oba skrzydła składają się z płata głównego i kilku klap – trzech dla przedniego skrzydła, a dwóch dla tylnego skrzydła – wykorzystujących koncepcję klapy wieloszczelinowej. Pozwala to na uzyskanie większego kąta natarcia i wyższego współczynnika siły nośnej.

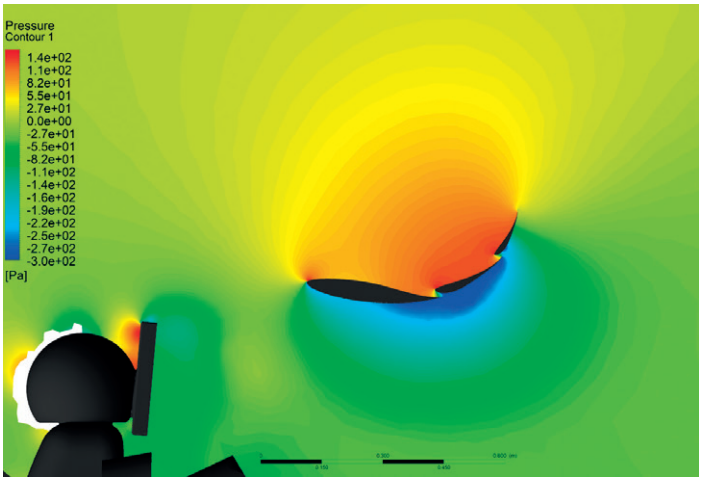
Dzięki oprogramowaniu ANSYS Fluent zbadano rozkład ciśnienia na skrzydłach (rys. 2) i dostosowano ich wzajemne ustawienie oraz kąty natarcia. W efekcie skrzydła są mocno wysklepione, co sprzyja generowaniu siły docisku. Wyposażono je w płyty krańcowe, które zmniejszają opór indukowany oraz straty siły nośnej. Płyty boczne wykorzystują prawie cały obszar dopuszczony przez regulamin, żeby zmaksymalizować korzyści.

Metody numeryczne, stosowane w programach typu ANSYS, opisujące przepływ, umożliwiły wyznaczenie w przybliżeniu rozkładu prędkości (rys. 3), ciśnienia (rys. 4), temperatury oraz innych pożądanych parametrów. Wizualizacje opływu danego elementu pakietu pokazują miejsca oderwania strugi powietrza czy obszar turbulencji, co pozwala na zredukowanie wszelkich niedoskonałości konstrukcji poprzez zapętlone obliczenia aż do osiągnięcia ostatecznej geometrii.

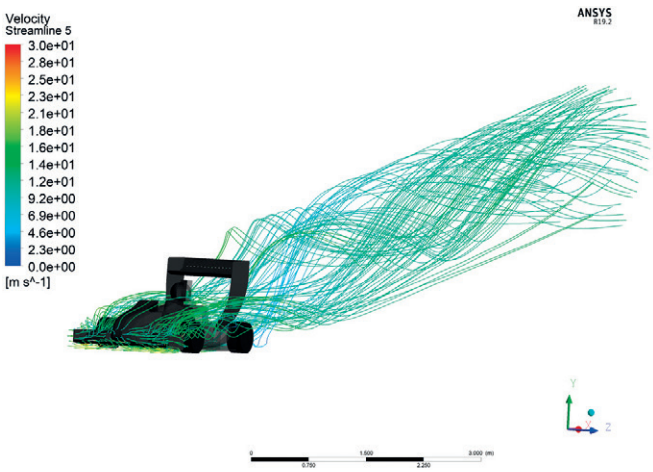
Podczas symulacji sprawdzono wzajemną interakcję elementów pakietu i na tej podstawie zweryfikowano ich położenie oraz wyznaczono optymalny balans aerodynamiczny. Udało się uzyskać założony docisk (tabela) i wysoką stabilność w prowadzeniu pojazdu. Pakiet wspomaga dynamikę auta i zapewnia doskonałą manewrowość. Wystarczy spytać naszego kierowcy.

Tabela. *Najważniejsze parametry aerodynamiczne bolidu*

Współczynnik siły nośnej	–2,86
Współczynnik siły oporu	1,16
Rozkład siły docisku	42 : 58 : 00
Docisk przy 15 m/s	39,2 kg

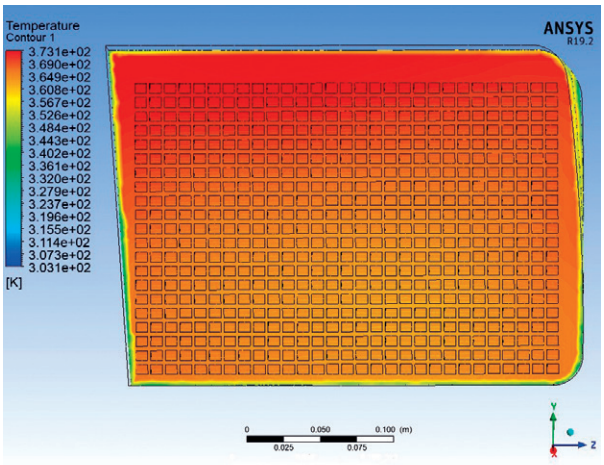


Rys. 2. *Rozkład ciśnienia na tylnym skrzydle bolidu*



Rys. 3. *Linie prądu powietrza opływającego bolid PMT-03*

Rys. 4. *Rozkład ciśnienia na bolidzie PMT-03*



Rys. 5. *Rozkład temperatury w rdzeniu chłodnicy*

Cool, bro!

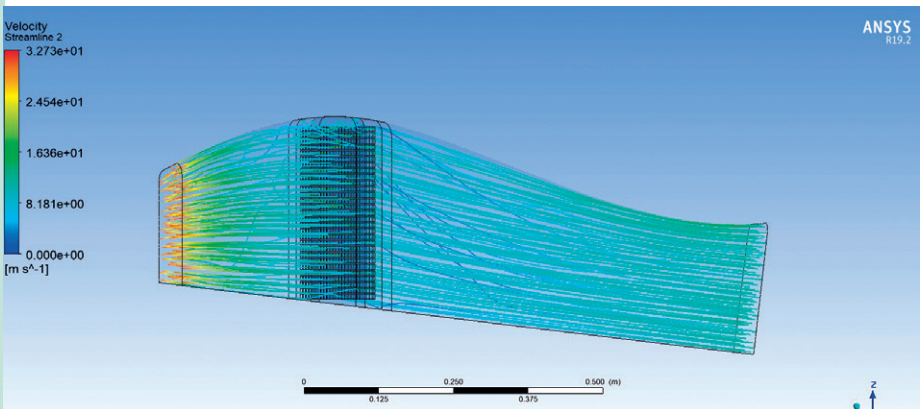
Analiza 3D całego pakietu aerodynamicznego stanowiła punkt wyjścia do zaprojektowania ostatecznej formy kanału chłodnicy zwanego sidepodem. Z symulacji wynikało, że średnia prędkość przepływu strug w miejscu wlotu powietrza do sidepoda wynosi 12 m/s. Kąt napływu strug to około 10°. Aby zapewnić wydajność kanału chłodnicy, należało zmniejszyć prędkość przepływającego przez nią powietrza.

Stało się to możliwe dzięki zastosowaniu odpowiedniego kształtu kanału, w którym wlot jest umieszczony w określonej odległości przed rdzeniem chłodnicy, a sam przekrój poprzeczny między tymi elementami stopniowo się zwiększa, by zapobiec oderwaniu strugi. W efekcie prędkość przepływu maleje, a ciśnienie statyczne rośnie. Zmniejszenie prędkości wpływa także na redukcję oporu, gdyż straty ciśnienia spiętrzenia na radiatorze, które przekładają się na opór, zależą od prędkości przepływu w rdzeniu. Samą krawędź wlotu warto jest odpowiednio ukształtować, aby zdobyć kontrolę nad punktem spiętrzenia oraz uzyskać odpowiedni gradient ciśnienia, który nie pozwoli na oderwanie przepływu na wlocie do kanału.

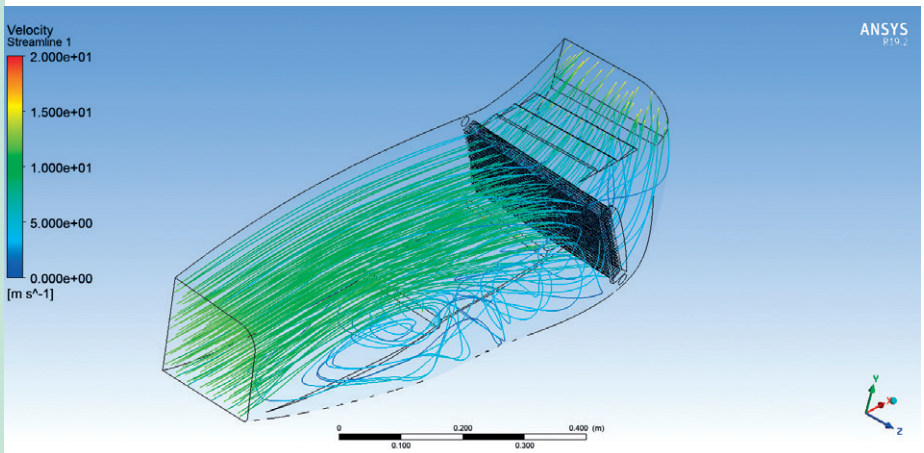
Wyniki symulacji pokazały, że zastosowane rozwiązanie jest w stanie efektywnie chłodzić silnik. Na rys. 5. przedstawiono rozkład temperatury w chłodnicy. Średnia temperatura osiąga wartości ok. 365 K, czyli 92°C.

Weight reduction, bro!

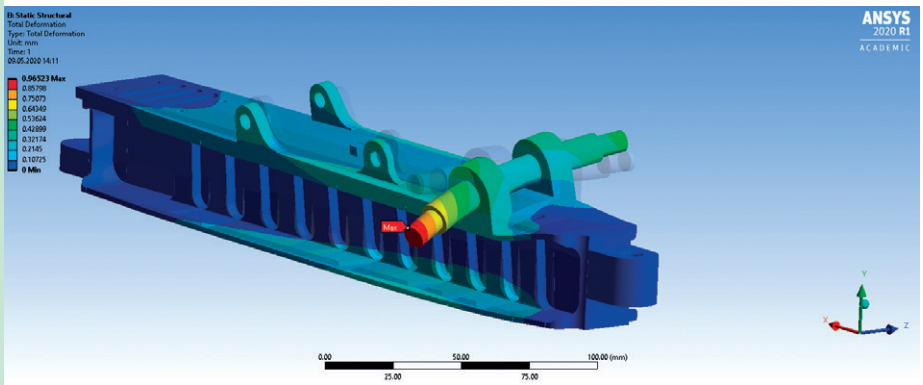
Silnik, sidepod, pakiet aerodynamiczny czy inne podzespoły składające się na konstrukcję bolidu wymagają właściwego zamocowania, aby stworzyć spójną całość. Odpowiada za to rama, stanowiąca szkielet całego bolidu. Głównym celem była maksymalizacja sztywności skrętnej z zachowaniem jak najmniejszej masy oraz zapewnieniem bezpieczeństwa i ergonomii kierowcy. Odchudzanie „chassis" przy utrzymaniu odpowiedniej wytrzymałości dotyczy każdej części, nawet tak niewielkiej jak element łączny.



Rys. 6. *Przepływ powietrza przez sidepod – widok z góry*



Rys. 7. *Przepływ powietrza przez sidepod – widok izometryczny*



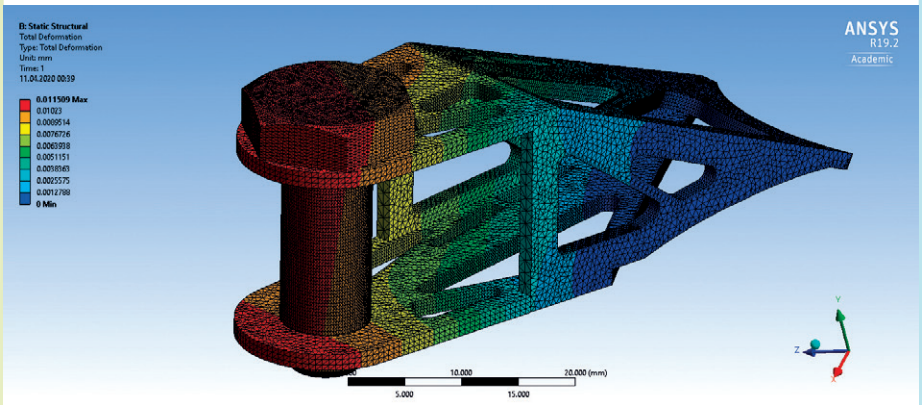
Rys. 8. *Analiza wytrzymałościowa złożenia szyny pedalboxa, nakładki oraz pręta tytanowego, na którym obraca się pedał*

Z myślą o zachowaniu poprawności symulacji trzeba niekiedy dokonać symulacji złożenia danego elementu, by uzyskać wynik odkształcenia dla samego mocowania. W przypadku pokazanym na rys. 8 założono odkształcenie o wartości nieprzekraczającej 1 mm.

W kwestii mocowań podzespołów elektronicznych analiza musiała uwzględniać nie tylko wagę elementu (i przyspieszenie), lecz także sposób jego wykorzystania (np. naciśnięcie wyłącznika bezpieczeństwa z określoną siłą).

W celu weryfikacji wytrzymałości mocowania pokazanego na rys. 9 do uwierzytelnienia wyników zastosowano program ANSYS. Uzyskano maksymalne naprężenie na poziomie 91 MPa, przyjmując współczynnik bezpieczeństwa równy 3. Maksymalne przemieszczenie wyniosło 0,011 mm. Odnotowano spadek wagi o 49%, a ostateczna waga mocowania wyniosła 21 g.

Podsumowując: sama analiza mocowań podzespołów elektronicznych umożliwiła zespołowi zastosowanie o 223 g lżejszych elementów łącznych.



Rys. 9. *Analiza wytrzymałościowa mocowania siłownika do sprzęgła*

ANSYS, ANSYS everywhere!

Oprogramowanie ANSYS jest stosowane przez zespół projektowy przekrojowo w całym bolidzie. Nie sposób przedstawić wszystkich jego zastosowań, jednak użycie go do przeprowadzania symulacji zarówno dla całego bolidu, jak i najmniejszego mocowania świadczy o sile tego narzędzia. Jesteśmy wdzięczni za możliwość rozwoju, wspartego niewątpliwie posiadaniem dostępu do tak wszechstronnego programu. Wiele rozwiązań, które powstały na kanwie wniosków wyciągniętych z poprzednich konstrukcji oraz świeżych pomysłów, udało się urzeczywistnić dzięki symulacjom w ANSYS-ie, będącym zdecydowanie ogromnym wsparciem na drodze do ulepszenia bolidu.

Realne i wirtualne oblicza pomyślnych prądów dla krajowej energetyki wiatrowej

Jak oprogramowanie ANSYS sprzyja uelastycznieniu rozwiązań nie tylko *stricte* technicznych?

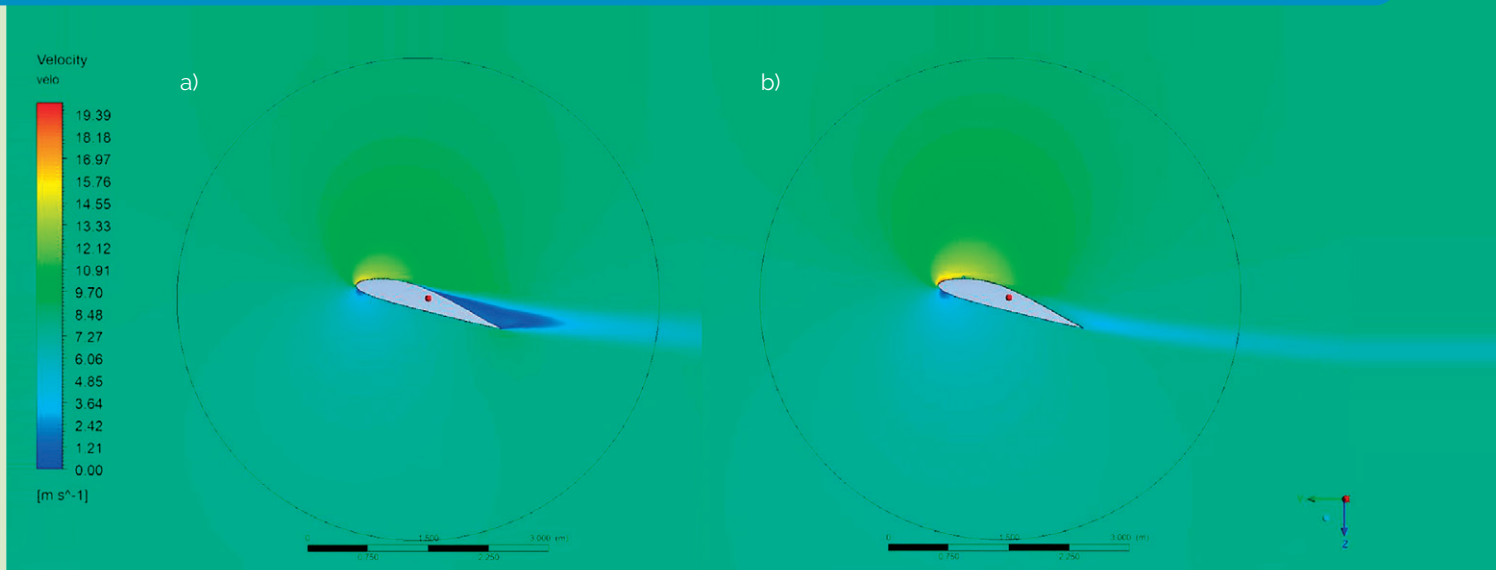
Adam Szymański • WindTak • adamszymanski@interia.eu
Piotr Wiklak • WindTak • piotr.wiklak@windtak.pl
Maciej Karczewski • WindTak • maciej.karczewski@windtak.pl

WindTAK Sp. z o.o.

18 lutego 2021 r. weszła w życie przełomowa dla polskiego rynku odnawialnych źródeł energii (OZE) ustawa o promowaniu wytwarzania energii elektrycznej w morskich farmach wiatrowych. Już dziś pod względem energetyki wiatrowej Polska jest szóstym rynkiem w Europie. Do 2023 r. powstanie dodatkowo 3,5 GW dzięki aukcjom energii z lat 2018–2020. W dalszej perspektywie, do 2040 r., w polskiej wyłącznej strefie ekonomicznej Morza Bałtyckiego w sektorze *offshore wind* powstanie kolejne 11 GW.

Wyraźnie widoczna jest wzrostowa tendencja branży OZE i coraz większa rola energetyki wiatrowej w krajowym miksie energetycznym. Realny jest także jej wpływ na codzienne życie każdego z nas. Elektrownie wiatrowe mogą już bowiem pokryć zapotrzebowanie na energię ok. 6,7 mln gospodarstw domowych w Polsce. Tylko w 2020 r. do polskiej sieci przyłączono 731 MW nowych mocy z farm wiatrowych na lądzie. Znalazło to także odzwierciedlenie w opublikowanej niedawno przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska „Polityce energetycznej Polski do 2040 r.". Szósty Projekt Strategiczny to wdrożenie morskiej energetyki wiatrowej.

Pole do unowocześnień i innowacji jest rozległe. Sektor napędzany turbinami wiatrowymi to bowiem nie tylko świetlane perspektywy rozwoju. Sceptycy bardzo często podnoszą kwestie związane z recyklingiem łopat, oddziaływaniem na środowisko (zwłaszcza na awifaunę i chiropterofaunę), zagospodarowaniem przestrzennym, krajobrazem, emisją hałasu i efektem stroboskopowym oraz niestabilnością dostaw. Jednocześnie energia wiatrowa jest powszechnie uznawana za najbardziej niskoemisyjne źródło energii odnawialnej (w całym cyklu życia instalacji).



Rys 1. *Profil łopaty: a) z widoczną strefą oderwania oraz b) po zastosowaniu turbulizatora przepływu poprawiającego właściwości aerodynamiczne*

Wyzwania, na które mogą odpowiadać zaawansowane modelowanie inżynieryjne i IoT, nie zawsze – jak się okazuje – mają podłoże czysto techniczne. Spoglądając na polską energetykę wiatrową (na lądzie), szybko się przekonamy, że inżynierowie i operatorzy farm muszą brać pod uwagę przede wszystkim złożone kwestie regulacyjne. Zdaniem wielu specjalistów potencjał branży ogranicza (zbyt) konserwatywne założenie przyjęte w kontrowersyjnej zasadzie „10H".

Przypomnijmy tylko, że zasada „10H" w dużym uproszczeniu nakazuje lokalizowanie turbin w odległości od zabudowań lub obszarów chronionych nie mniejszej niż 10-krotność ich całkowitej wysokości (wysokości wieży wiatrowej + długości łopaty). Przedstawiciele branży wskazują, że tzw. ustawa odległościowa w całej Polsce zatrzymała na różnych etapach projekty o mocy 4,1 GW, w tym 3,4 GW z podpisanymi umowami przyłączeniowymi. Jakkolwiek wiele się mówi o prawdopodobnej liberalizacji zasady „10H", a zwłaszcza odstępstwach od jej stosowania w gminach, w których zostaną wprowadzone odpowiednie zapisy w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego, to jednak nie zmienia to innego problemu.

Mianowicie wiek większości instalacji funkcjonujących na polskim rynku oscyluje pomiędzy 5 a 10 latami. Turbiny te są często nadmiernie eksploatowane, a jednocześnie brak jest perspektyw na ich *repowering* (czyli np. instalowanie turbin nowocześniejszych, wydajniejszych, wyższych). Stoją za tym oczywiście wymienione ograniczenia regulacyjne, ale także utrudniony dostęp do środków kapitałowych i dotacji w porównaniu choćby z obecnie obserwowanym boomem na rozproszoną energetykę fotowoltaiczną.

Przychodzi tu w sukurs zasada: *Nie możesz liczyć na nowe? Maksymalnie zoptymalizuj i wykorzystaj zasoby, które masz!* Notabene zgodna z zasadą gospodarki o obiegu zamkniętym, która ma tu szczególne zastosowanie w obliczu trudności z recyklingiem łopat wirników.

Rozwiązanie łódzkiego start-upu technologicznego WindTak interesująco zagospodarowało wyzwania i możliwości rozwojowe, które obecnie towarzyszą krajowej energetyce wiatrowej na lądzie, z pomocą oprogramowania ANSYS. Zaprojektowano specjalne dodatki – elementy aerodynamiczne do bezpośredniego montażu na łopatach wirników oraz unikatowy system czujników monitorujących ich pracę.

Z jednej strony pozwalają one poprawić uzysk energetyczny dzięki elementom stworzonym z użyciem zaawansowanych metod projektowania typu *smart* (tzw. *vortex generators*). Taki dodatek może poprawić efektywność energetyczną urządzenia na poziomie od 1 do 3%. Przekłada się to na zyski rzędu nawet dziesiątek tysięcy złotych w roku obliczeniowym dla indywidualnej turbiny. Z drugiej zaś strony zastosowanie innowacyjnych czujników – opartych na koncepcji generowania i agregacji wielowymiarowych danych dotyczących różnorodnych parametrów pracy urządzenia w formule Internet of Things (IoT) – umożliwia bardzo pożądane (z uwagi na konieczność zapewnienia maksymalnej i możliwie bezawaryjnej pracy urządzenia) zaawansowane monitorowanie całej instalacji.

Czujniki te umieszcza się w specjalnie zaprojektowanych miejscach, wzdłuż łopat oraz w gondoli turbiny, a zdalny system komputerowej agregacji danych gromadzi, oblicza i modeluje je w czasie rzeczywistym. Całość funkcjonuje w ultrawydajnym standardzie sieci telekomunikacyjnej 5G/NB-IoT, zwłaszcza w jej części *broadband*, tzw. LTE-Cat M1.

System ten – znajdujący się cały czas w fazie rozwojowej – już teraz wprowadza nowe, przełomowe standardy w dziedzinie monitoringu i możliwości przewidywania awarii oraz konserwacji predykcyjnej wirujących części maszyn w czasie rzeczywistym. To zwiększa przychód operacyjny z tytułu sprzedaży nadwyżki energii, ale także obniża koszty operacyjne i utrzymania (O&M). Zastosowanie tej technologii zdecydowanie ułatwia wykrywanie wad, identyfikację potencjalnych zagrożeń, pęknięć i ponadnormatywnych wibracji. W sposób oczywisty wpływa to na przeciwdziałanie awariom, ułatwia planowanie napraw i zakup części eksploatacyjnych, a także planowanie prac ekip serwisowych i dbanie o ich bezpieczeństwo.

Zawansowane oprogramowanie ANSYS firmy MESCO okazało się kluczowe w procesie projektowania najważniejszych cech aeromechanicznych generatora *vortex* w zakresie obrazowania skomplikowanych przepływów w warstwie przyściennej łopaty turbiny wiatrowej.

Równie istotne okazało się wyznaczenie optymalnego położenia na profilu aerodynamicznym (przekroju łopaty turbiny), aby zoptymalizować wartości siły nośnej. W ten sposób start-up, który ze swej natury ma ograniczone środki, może zmniejszać nakłady na rozwój strategicznego produktu firmy z użyciem nowoczesnych narzędzi CAD/CAE zawartych w oprogramowaniu ANSYS.

W całym zaś zidentyfikowanym łańcuchu dostaw polskich farm wiatrowych wzmacnia to zwłaszcza tzw. *local content*, czyli udział polskich firm w tworzeniu wartości dodanej na rzecz krajowych morskich, ale i lądowych farm wiatrowych. Rozwiązanie to ma oczywisty potencjał globalny, lecz już dziś da się zaadaptować do nie najłatwiejszych realiów polskiego rynku ery transformacji energetycznej.

LITERATURA

[1] www.windtak.pl
[2] „Polityka energetyczna Polski do 2040", www.gov.pl
[3] http://psew.pl/
[4] https://www.ure.gov.pl/pl

Wspomaganie projektowania studenckich rakiet sondażowych

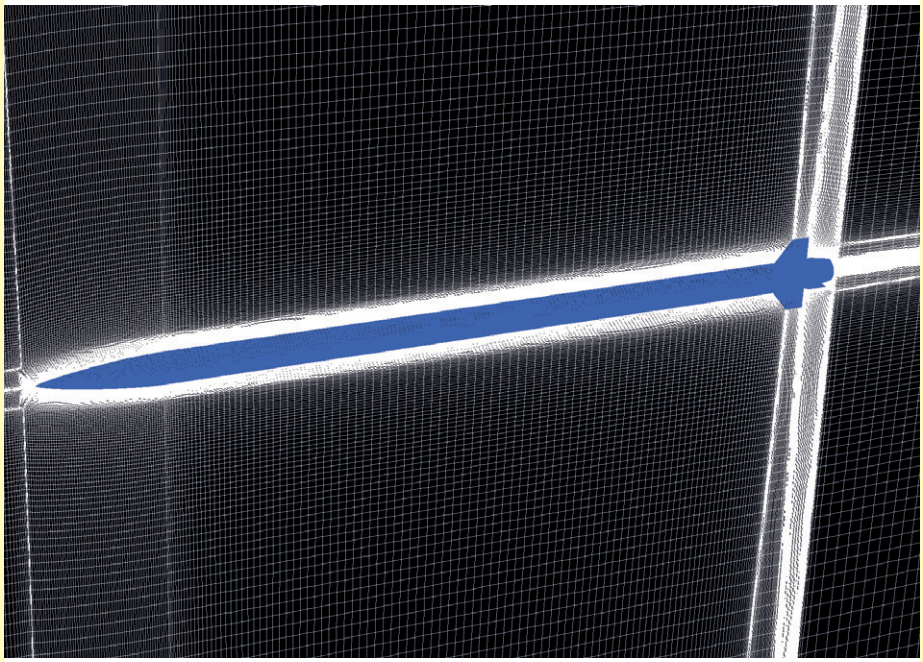
Bartosz Ziegler • Politechnika Poznańska • bartosz.ziegler@put.poznan.pl

Od 2018 r. na Politechnice Poznańskiej działa Koło Naukowe PUT Rocketlab (które rozpoczęło swoją działalność jako Koło Naukowe Technologii Lotniczych i Kosmicznych). Głównym celem działań PUT Rocketlab jest projektowanie i budowa rakiet sondażowych na konkurs Spaceport America Cup, odbywający się co roku w Stanach Zjednoczonych. Po raz pierwszy zespół miał wystartować w 2020 r., ale zawody zostały zawieszone z powodu pandemii COVID-19. Ten dodatkowy czas zespół wykorzystał na dopracowanie i udoskonalenie rakiety o nazwie HEXA-2 z myślą o jej udziale w kolejnych edycjach SA Cup.

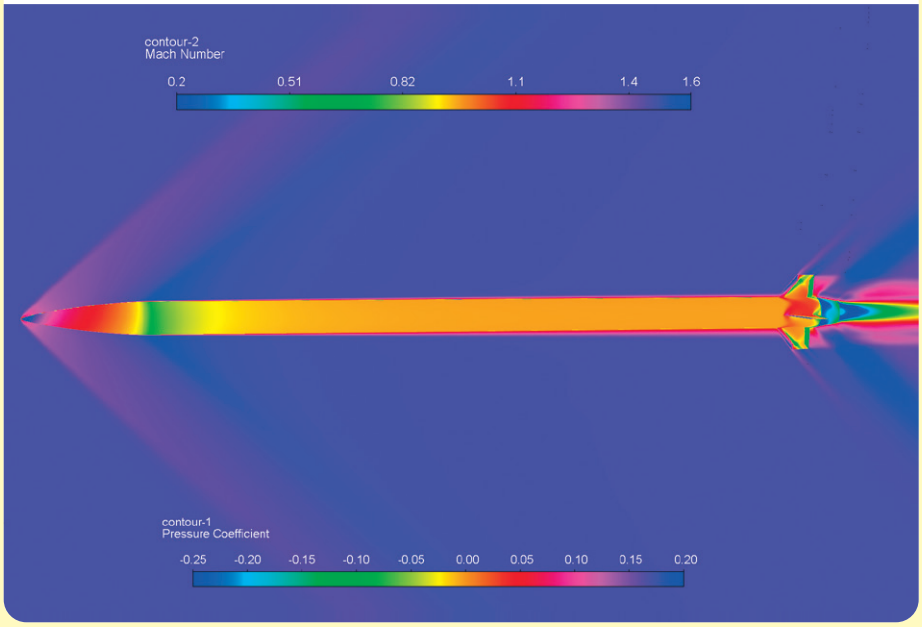
Studencka grupa badawcza – ze względu na interdyscyplinarny charakter technologii rakietowych – zrzesza studentów z wielu wydziałów, m.in.: mechaników, elektroników, programistów i chemików. Projektowany obecnie model powstaje z myślą o koronnej kategorii SA Cup, tj. Liquid/Hybrid 30k SRAD (rakiety wykorzystujące zaprojektowane, zbudowane i przebadane w całości przez studentów zespoły napędowe, zdolne do wynoszenia ładunku odpowiadającego trzem CubeSatom na pułap 30 000 stóp AGL). Z uwagi na ograniczenia narzucone zasadami konkursowymi budowa takiej rakiety wymaga wysokiego stopnia optymalizacji zarówno pod kątem charakterystyki aerodynamicznej, jak i strukturalnej rakiety. Narzędziami w sposób niebagatelny wspomagającymi studentów są tu programy CAE z oferty firmy ANSYS.

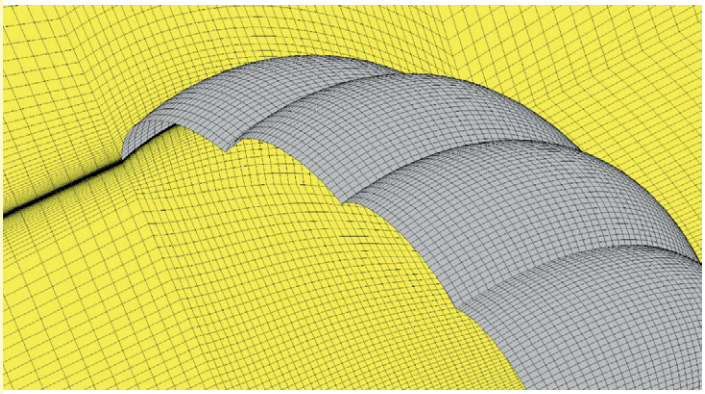
Rys. 1. *Wizualizacja rakiety HEXA-2*

Rys. 2. *Wieloblokowa strukturalna siatka utworzona w programie ICEM (13 mln elementów)*

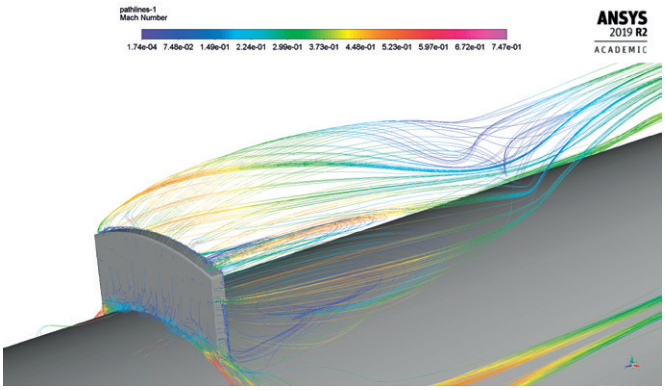


Rys. 3. *Pole liczby Macha i współczynnika ciśnienia na powierzchni rakiety (zakresy wielkości zawężone dla czytelności)*





Rys. 4. *Siatka w obszarze spadochronu*



Rys. 5. *Linie prądu wokół wysuwanego hamulca aerodynamicznego*

Analiza obliczeniowa zamiast badań eksperymentalnych

Na wielu etapach projektowania rakiet i ich układów napędowych niemal niewykonalne jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych. Aerodynamika zewnętrzna rakiety sondażowej jest związana z prędkościami naddźwiękowymi przy wartościach liczby Reynoldsa rzędu nawet 140 mln, co jest poza zakresem dostępnych tuneli aerodynamicznych. Jeśli zaś chodzi o silniki rakietowe, to możliwe jest wykonanie testów statycznych i zmierzenie takich wartości, jak ciąg czy średnie ciśnienie w komorze spalania, ale już nie da się eksperymentalnie wyznaczyć pola przepływowego w komorze spalania ze względu na panujące wewnątrz temperatury (przekraczające 3000°C) i ciśnienie sięgające kilkudziesięciu barów.

Z tych powodów decyzje projektowe często trzeba podejmować na podstawie analiz obliczeniowych. To czyni kluczowym poziom ufności wobec stosowanych analiz, zwłaszcza wobec niemożności ich eksperymentalnego walidowania.

Analizy przepływowe

Istotnym obszarem zastosowań narzędzi CAE w przypadku projektowania rakiety są analizy przepływowe. Wykonuje je się w celu wyznaczenia charakterystyk sił aerodynamicznych w spodziewanym zakresie liczb Macha.

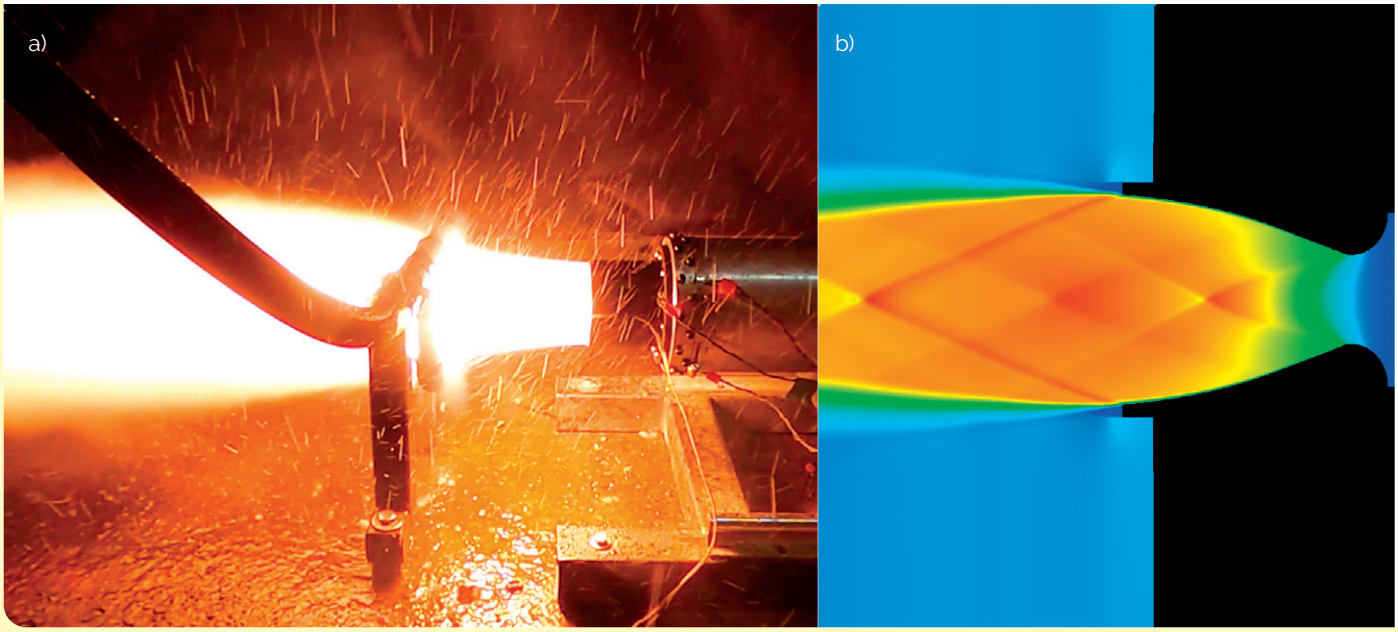
Rakieta sondażowa w trakcie pionowego lotu osiąga prędkość znacząco przekraczającą prędkość dźwięku. Jej współczynnik oporu odczuwalnie się zmienia, przede wszystkim podczas przejścia przez zakres transoniczny. Dodatkowo, w momencie wystąpienia spodziewanego maksymalnego ciśnienia dynamicznego, siły aerodynamiczne są tak duże, że nawet niewielkie odchylenie osi rakiety od kierunku napływu (wywołane ruchem rakiety lub np. turbulencją atmosferyczną) jest w stanie generować przyspieszenia boczne rzędu kilkunastu G, powodując znaczne obciążenie konstrukcji.

Z tych powodów uzyskanie wysokiej jakości charakterystyk aerodynamicznych (współczynnika oporu, pierwszej pochodnej współczynnika siły bocznej po kącie natarcia, a także istotnego z punktu widzenia stateczności rakiety położenia środka parcia aerodynamicznego) jest kluczowe w całym zakresie operacyjnych liczb Macha. Wynikowe charakterystyki aerodynamiczne są punktem wyjścia zarówno do analiz balistycznych, jak i określenia obciążeń strukturalnych, jakie będzie musiała przenosić konstrukcja rakiety. Dlatego ich wyniki są sprzężone z zapotrzebowaniem na impuls całkowity, a także budżetem masy konstrukcji – najważniejszymi aspektami projektowanej konstrukcji.

Aby spełnić te wymagania, analizy wykonuje się z zachowaniem wszystkich dobrych praktyk, takich jak wysoka ortogonalność siatki, rozdzielczość warstwy przyściennej pozwalająca na rozwiązywanie profilu prędkości w podwarstwie laminarnej ($y+$ pierwszego elementu poniżej 1,0) i wykorzystanie wyższych rzędów schematów dyskretyzacji członów konwekcyjnych wszystkich rozwiązywanych równań (w tym wypadku schematu *third order* MUSCL).

Na rys. 2 i 3 przedstawiono odpowiednio siatkę utworzoną w programie ANSYS ICEM oraz pole przepływowe przy liczbie

Rys. 6. *Ujęcie z nagrania pracującego silnika (a) i pole liczby Macha jego dyszy wylotowej uzyskane w programie ANSYS Fluent (b)*



Macha = 1,5 dla projektowanej rakiety na niewielkim (1°) kącie natarcia. Analizy aerodynamiczne rakiety zostały wykonane z użyciem solvera *density based* w programie ANSYS Fluent, z oceną zbieżności rozwiązań opartą na zbieżności wszystkich składowych sił aerodynamicznych. Wymuszało to niejednokrotnie po kilkadziesiąt tysięcy iteracji dla pojedynczego przypadku obliczeniowego.

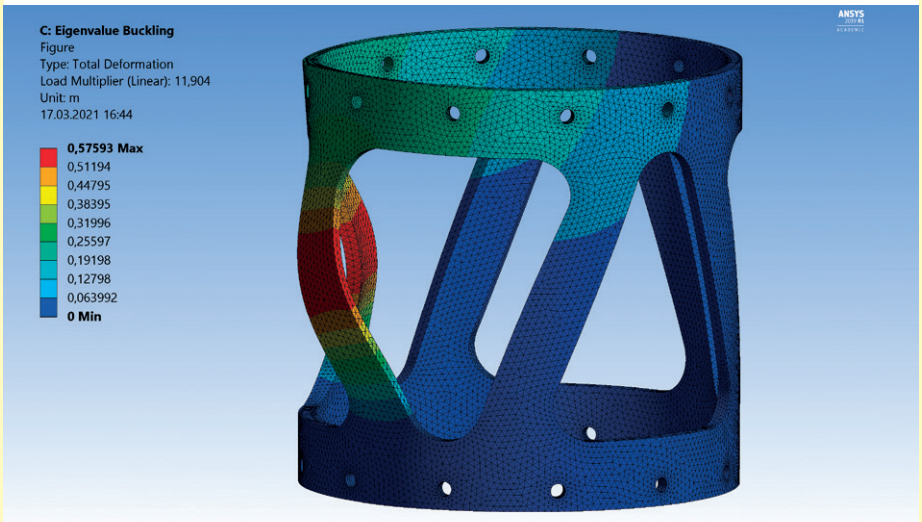
Analizy podzespołów

W ramach badań aerodynamiki zewnętrznej wykonywane są także analizy takich podzespołów, jak spadochrony czy hamulce aerodynamiczne (rys. 4 i 5). Same spadochrony również są projektowane w ramach działalności koła naukowego, z wykorzystaniem własnych narzędzi projektowych (w tym uproszczonych numerycznych narzędzi analitycznych i optymalizatorów opartych na algorytmach genetycznych). W celu aktualizacji założeń aerodynamicznych dla algorytmów projektujących przeprowadza się analizy numeryczne w oprogramowaniu ANSYS Fluent.

Także elementy projektu silnika rakietowego poddawane były analizom numerycznym. Dotyczy to zwłaszcza przepływu przez dyszę, a także balistyki wewnętrznej silnika. Na rys. 6 przedstawiono pole liczby Macha dyszy zbieżno-rozbieżnej oraz ujęcie z nagrania pracującego silnika.

Analizy strukturalne

Ostatnim obszarem zastosowań narzędzi ANSYS są oczywiście analizy strukturalne. Optymalizacja rakiety pod kątem jej masy przy jednoczesnych bardzo dużych wartościach sił aerodynamicznych i ciągu silnika (ponad 4 kN) sprawia, że komponenty strukturalne muszą być projektowane na niewielkie współczynniki bezpieczeństwa, bez zbędnego materiału.



Rys. 7. *Wyboczenie łącznika aluminiowego pod wpływem jednoczesnego działania siły ciągu i momentu sił aerodynamicznych*

Analizowane elementy to przede wszystkim elementy przenoszące siły pomiędzy kompozytowymi fragmentami ponadczterometrowej rakiety, jej zbiornikiem, silnikiem czy statecznikami. Dobrym przykładem są tu analizy wyboczeniowe łącznika pomiędzy silnikiem a zbiornikiem rakiety. Element ten jest frezowany z fragmentu rury ze stopu aluminium (rys. 7). Wyfrezowane otwory nie tylko zmniejszają jego masę, lecz także pozwalają na dostęp do znajdującego się w jego wnętrzu komputera i zrobotyzowanego zaworu kulowego sterującego dopływem podtlenku azotu do silnika.

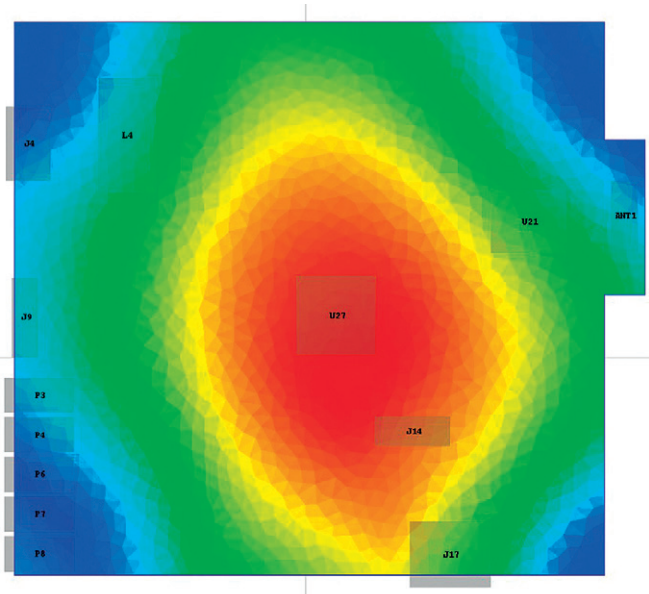
Niektóre ze wspomnianych analiz i projektów stanowią podstawy prac inżynierskich i magisterskich studentów należących do PUT Rocketlab. Są nie tylko wkładem w projekt rakiety konkursowej, ale też wizytówką świadczącą o ich *rocket science grade* kompetencjach oraz obyciu w używaniu nowoczesnych narzędzi inżynierskich.

Przedstawione grafiki są efektami prac studentów należących do PUT Rocketlab i nie mogą być rozpowszechniane dalej bez zgody PUT Rocketlab.

Analizy niezawodności układów elektronicznych

Tomasz Kądziołka • MESco • tkadziolka@mesco.com.pl
Jacek Maj • MESco • jmaj@mesco.com.pl

Physics-of-failure (PoF) to numeryczna metoda opisu procesu fizycznej degradacji w elementach elektronicznych w wyniku działania określonych obciążeń (naprężeń, drgań, temperatury). PoF pozwala np. na zidentyfikowanie szkodliwych częstotliwości drgań własnych, poznanie mechanizmu tworzenia się uszkodzeń oraz określenie obszarów o zwiększonym prawdopodobieństwie awarii. Metoda ta została stworzona, aby precyzyjniej oszacować żywotność układów elektronicznych i poszczególnych komponentów.



Rys. 1. *Drgania harmoniczne*

ANSYS Sherlock to oprogramowanie wykorzystujące metodę PoF do analiz niezawodności (*reliability engineering*) urządzeń elektronicznych – od wyboru optymalnych komponentów pod kątem zmęczenia termicznego po analizę harmoniczną pełnego układu elektronicznego.

Na każdym etapie ANSYS Sherlock pozwala szybko i dokładnie przewidzieć czas życia badanego urządzenia i wybrać najlepszy zestaw komponentów. Prosty interfejs i szybkość działania sprawiają, że ANSYS Sherlock idealnie się sprawdza na wczesnym etapie projektowania.

Około 70% kosztów rozwoju produktów elektronicznych pochłania proces iteracyjnego eliminowania problemów pojawiających się w fazie budowania prototypu. Przyczyną jest brak symulacji komputerowej w procesie walidacji projektu. Zamiast tego często stosuje się pętlę: test – niepowodzenie – naprawa – powtórzenie. ANSYS Sherlock pozwala znacząco skrócić ten proces, ponieważ umożliwia konstruktorom dokładne modelowanie zjawisk mechanicznych, termicznych i procesów produkcyjnych, mających kluczowy wpływ na żywotność obwodów drukowanych, płytek PCB, układów scalonych itp.

Ze względu na gigantyczną liczbę elementów w płytkach PCB wykonanie standardowej analizy mechanicznej zawsze się wiązało ze sporym wysiłkiem ze strony elektroników. Właśnie dlatego powstał ANSYS Sherlock, którego kluczowymi zaletami są szybki import i automatyczne przekształcenie geometrii typu ECAD w modele numeryczne, pozwalające na wykonanie np. symulacji mechanicznych. ANSYS Sherlock korzysta z zabudowanej bazy ponad 500 tys. komponentów, która jest ciągle aktualizowana, co dodatkowo skraca czas przygotowania modelu. Każdy komponent ma automatycznie przypisane dane materiałowe – takie rozwiązanie nawet przy małych układach elektronicznych jest dużym ułatwieniem.

ANSYS Sherlock to jedyne na rynku oprogramowanie, które dostarcza całościowych informacji o przewidywanej żywotności badanej konstrukcji. Zamiast robić kilka testów zmęczeniowych po tysiące godzin każdy, w ANSYS Sherlock można w kilka minut oszacować żywotność produktu z uwzględnieniem połączeń lutowanych oraz poszczególnych elementów. W efekcie uzyskuje się ogromną oszczędność czasu i pewność, że test walidacyjny się powiedzie. Dodatkowo modele ANSYS Sherlock można wykorzystać do dalszych analiz w środowisku ANSYS Workbench.

Sporą przewagą ANSYS Sherlock jest możliwość uwzględnienia w analizach tzw. technologiczności konstrukcji (*design for manufacturability* – DFM). Dzięki temu finalny projekt zawiera informacje np. o maksymalnych możliwych naprężeniach w procesie produkcji, co pozwala uniknąć uszkodzeń lutów, płytki drukowanej i komponentów.

Program ułatwia i usprawnia ocenę niezawodności, korzystając z unikatowego procesu podzielonego na trzy etapy: definicji danych wejściowych, wykonywania obliczeń oraz generowania raportu wraz z rekomendowanymi zmianami.

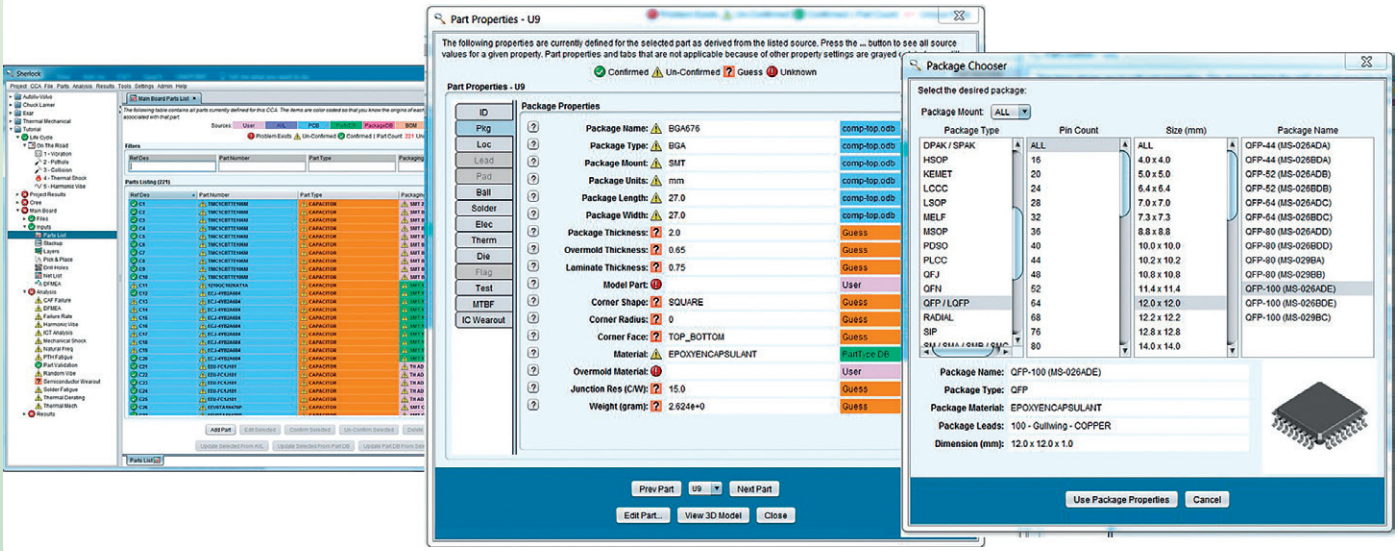
Dane wejściowe

Na podstawie danych wejściowych z pliku EDA (schematów, layoutu, komponentów) Sherlock automatycznie buduje model obliczeniowy, identyfikując komponenty i zadając odpowiednie własności materiałowe (dostępna biblioteka obejmuje: komponenty, laminaty, układy scalone i spoiwa lutownicze).

Analiza

W programie można wykonać kompleksową analizę niezawodności. Umożliwia on konstruktorom przeprowadzenie kompleksowej symulacji z uwzględnieniem pracy w różnych warunkach, transportu urządzenia, a także mechanizmów awarii, które mogą się pojawić w trakcie życia produktu.

Rys. 2. *Biblioteki dostępne w ANSYS Sherlock obejmują: komponenty, laminaty, układy scalone i spoiwa lutownicze*



Symulacje w ANSYS Sherlock obejmują m.in.:

- *thermal cycling,*
- *mechanical shock,*
- *natural frequency,*
- *harmonic vibration,*
- *bending,*
- *integrated circuit/semiconductor wearout,*
- *thermal derating,*
- *condictive anodic filament (CAF) qualification,*
- *high-fidelity PCB modeling.*

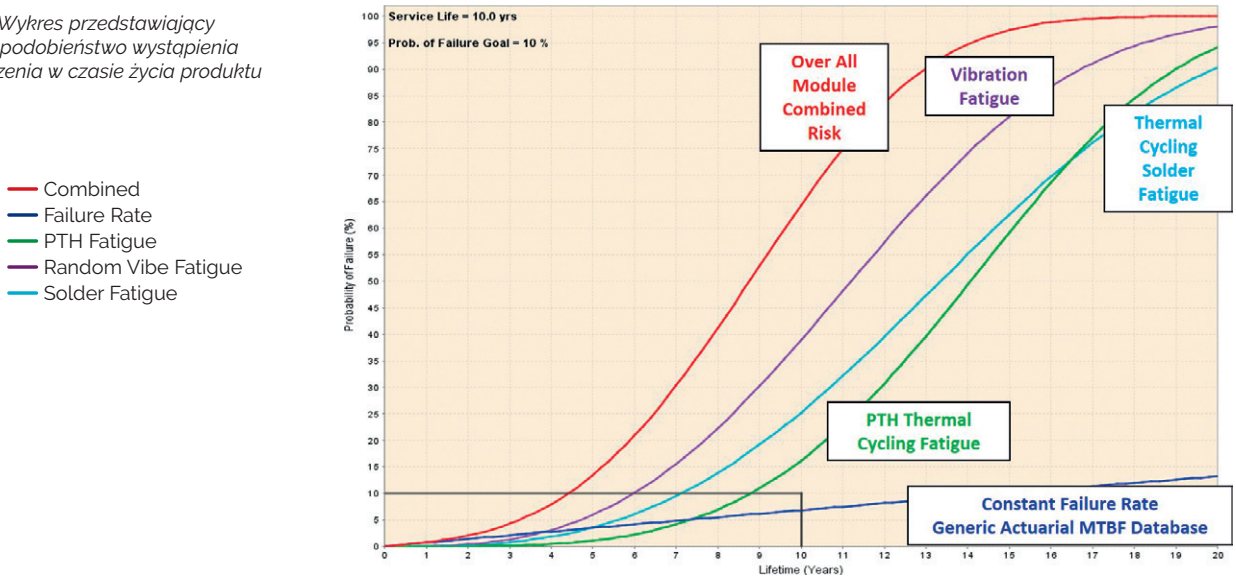
Raporty z symulacji

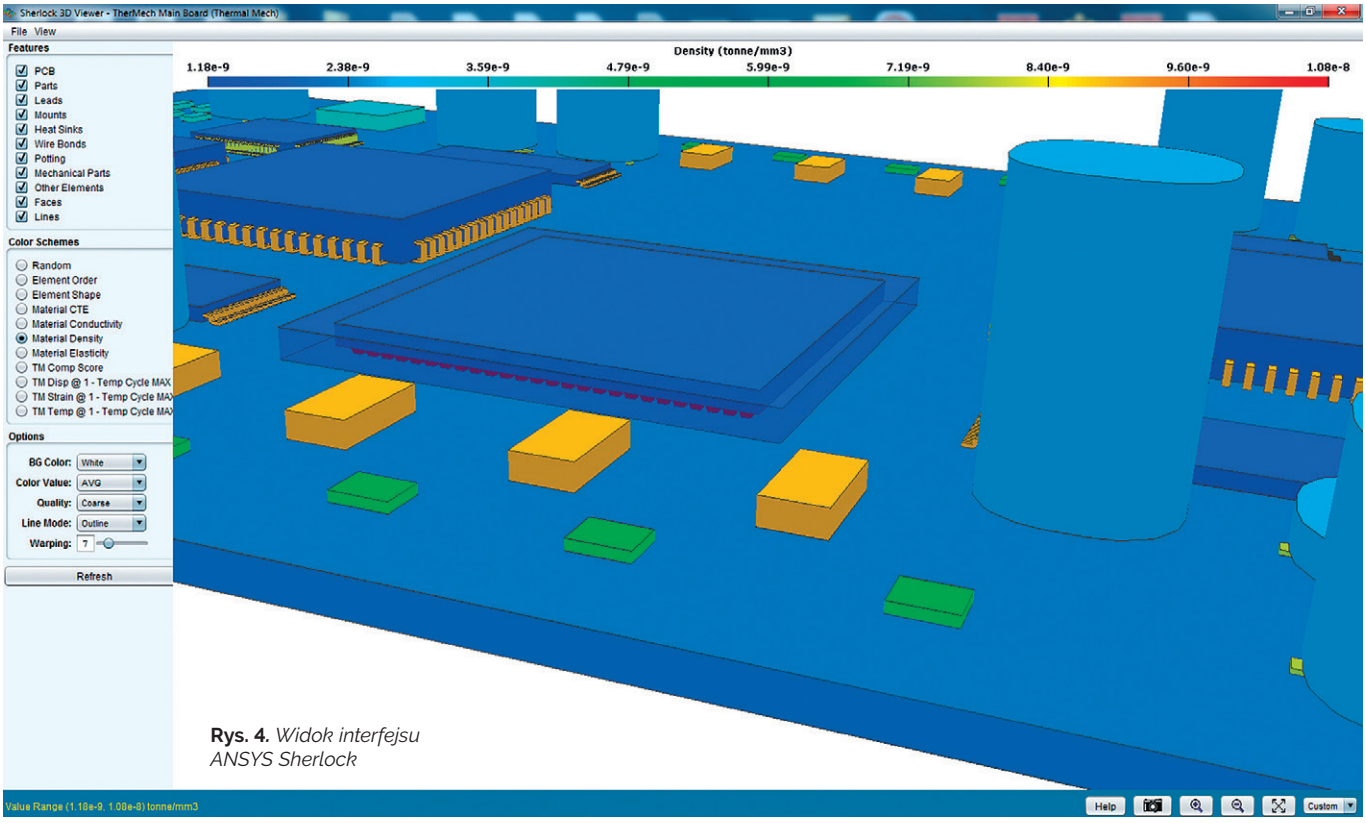
Dostępne raporty z symulacji i zalecenia obejmują:

- *life curve,*
- *red-yellow-green risk indicators,*
- *tabular display,*
- *graphical overlay,*
- *binned results based on reliability goals,*
- *automated report generation,*
- *locked IP model for review by suppliers/customers.*

ANSYS Sherlock to nie dodatek do procesu projektowego, ale kluczowe narzędzie dla inżynierów i specjalistów elektroników. Pozwala uniknąć budowy nieudanych prototypów oraz precyzyjnie oszacować żywotność elementów i układów elektronicznych bez konieczności wykonywania testów fizycznych (które często bardzo długo trwają). Przy tym jest bardzo prosty w obsłudze, a zabudowana biblioteka komponentów nie tylko przyspiesza czas budowy modelu, lecz również minimalizuje prawdopodobieństwo popełnienia błędu przy ustawianiu symulacji. Dodatkowo ANSYS Sherlock współpracuje z flagowymi modułami ANSYS, poszerzając obszar badań symulacyjnych, które można przeprowadzić na etapie projektowania produktu.

Rys. 3. *Wykres przedstawiający prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia w czasie życia produktu*





Rys. 4. *Widok interfejsu ANSYS Sherlock*

Optymalizacja połączeń ogniw w baterii elektrycznego motocykla LEM Photon

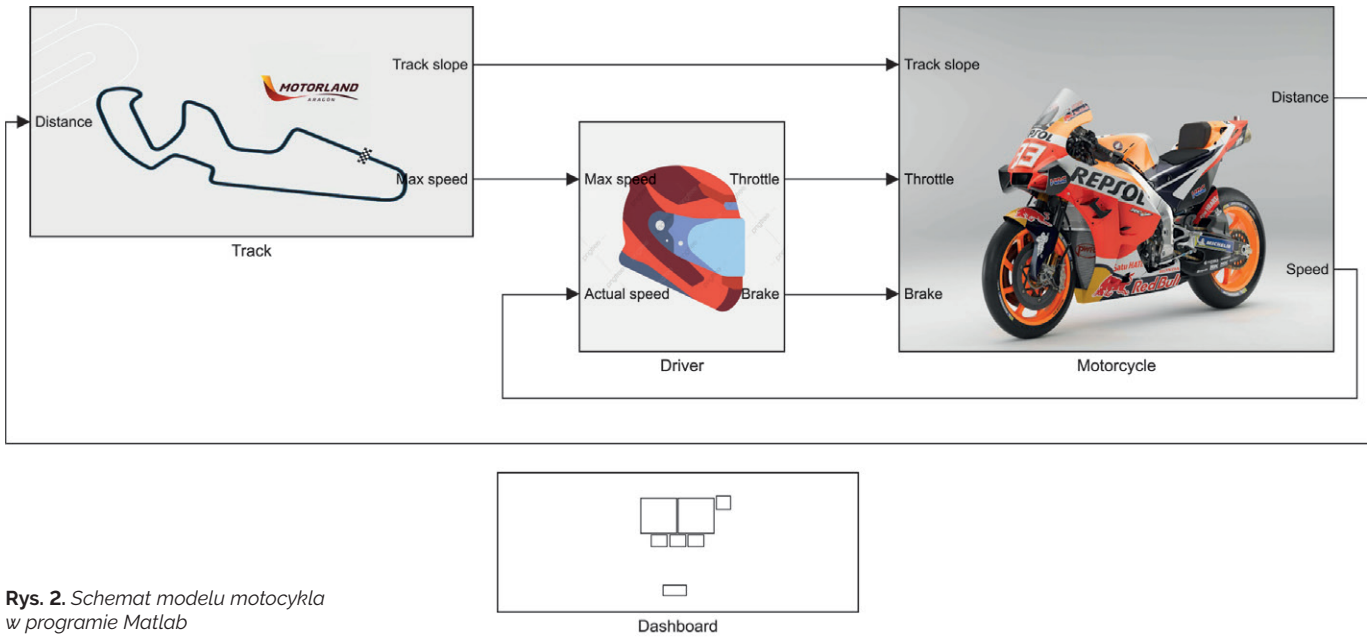
Andrzej Tatarczuk • Politechnika Wrocławska KN PiRM
an.tatarczuk@gmail.com
Piotr Sobieraj • Politechnika Wrocławska KN PiRM
sobierajpiotr1@gmail.com

Rozwój elektromobilności pociąga za sobą coraz większe zainteresowanie wydajnymi i niezawodnymi napędami elektrycznymi zasilanymi przez akumulatory. Wykorzystanie silników z magnesami trwałymi pozwala zwiększyć m.in. stosunek mocy do masy oraz sprawność. Falowniki ze sterowaniem wektorowym umożliwiają precyzyjne kierowanie pracą silników z zachowaniem wysokiej sprawności. Całość powinna być zasilona z baterii o jak największej gęstości energii, wydajności prądowej dopasowanej do reszty elementów, a przede wszystkim niskiej rezystancji wewnętrznej. W artykule przedstawiono sposób wykorzystania oprogramowania ANSYS Maxwell do porównania właściwości różnych konstrukcji połączeń baterii. Pomiar lokalnych gęstości prądu i strat mocy pozwolił na wybór najlepszego wariantu.

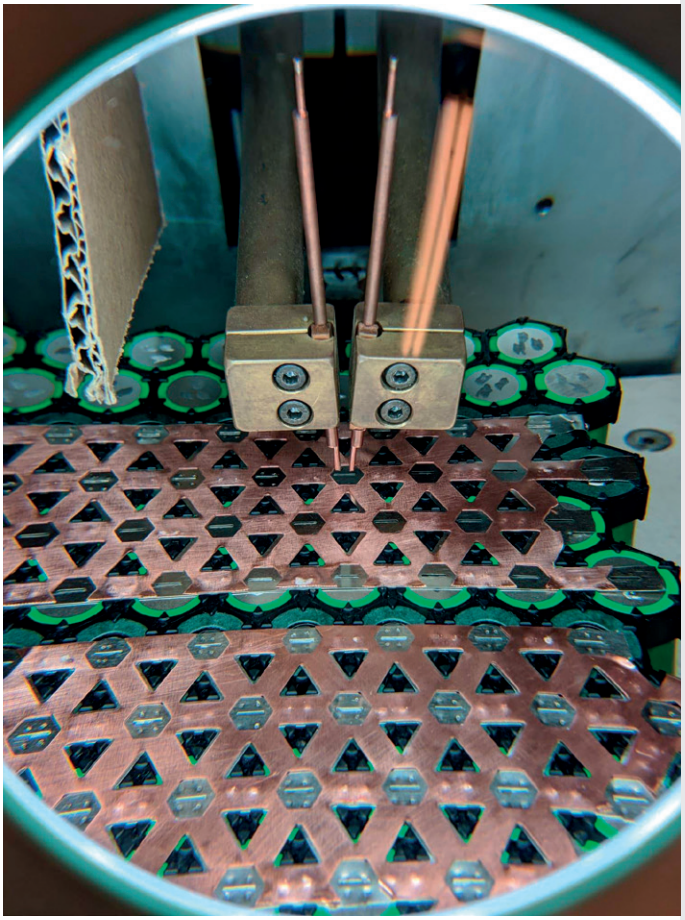
Rys. 1. *Model komputerowy motocykla*

Duża gęstość energii pozwala na zminimalizowanie masy i rozmiarów baterii z zachowaniem wymaganej pojemności. Odpowiednia wydajność prądowa polega na dopasowaniu prądu znamionowego baterii do mocy napędu z uwzględnieniem strat. Niska rezystancja wewnętrzna minimalizuje straty energii związane z przepływem prądu przez tę rezystancję (jeżeli w baterii wydziela się zbyt dużo ciepła i może dojść do przekroczenia dopuszczalnej temperatury któregokolwiek jej elementu, należy ograniczyć prąd znamionowy lub poprawić warunki chłodzenia, co wiąże się ze zmianami konstrukcyjnymi i dodatkowymi kosztami) i zmniejsza spadek napięcia na zaciskach źródła zasilania, co skutkuje zwiększeniem możliwej do uzyskania mocy maksymalnej.

Bateria motocykla Photon – projektowanego przez koło naukowe LEM Wrocław na zawody Moto Student 2020 (rys. 1) – została wykonana z cylindrycznych ogniw litowo-jonowych. Zapewniają one wysoką gęstość energii i wydajność prądową. Konfiguracja baterii – czyli liczba ogniw połączonych równolegle w jednej sekcji oraz liczba sekcji połączonych szeregowo – została tak dopasowana, aby uzyskać napięcie wymagane przez silnik



Rys. 2. *Schemat modelu motocykla w programie Matlab*



Rys. 3. *Pakiet ogniw w trakcie zgrzewania*

i falownik (zmiana liczby sekcji w szeregu), a także pojemność wystarczającą do przejechania wymaganego dystansu i wydajność prądową (liczba ogniw równolegle w jednej sekcji). Rezystancja wewnętrzna baterii w tej konfiguracji zależy od rodzaju połączeń pomiędzy ogniwami oraz od rezystancji wewnętrznej pojedynczego ogniwa. Jest ona jego cechą charakterystyczną, związaną m.in. ze stopniem rozładowania i temperaturą – ważne jest jej utrzymanie wewnątrz baterii na odpowiednim poziomie, co wymaga znajomości strat energii, które są źródłem ciepła.

W celu oszacowania ilości potrzebnej energii i warunków chłodzenia, doboru modelu ogniw i konfiguracji baterii wykonano model motocykla w programie Matlab (rys. 2) z możliwością symulowania przejazdu po torze, na którym mają się odbyć zawody Moto Student. Aby taki model był wiarygodny, potrzebne były dane dotyczące m.in. prognozowanych parametrów baterii.

Rozważane koncepcje

Kluczową kwestią przy projektowaniu baterii jest sposób połączenia ogniw. Koło naukowe LEM Wrocław posiada zgrzewarkę oporową i dlatego ogniwa są zgrzewane tą metodą (rys. 3).

Ponieważ ogniwa są pokryte warstwą niklu, materiałem zgrzewanym z nimi nie może być miedź, powszechnie stosowana do przewodzenia prądu, ale właśnie nikiel (połączenie ogniw bezpośrednio z miedzią mogłoby zostać wykonane z użyciem zgrzewarki ultradźwiękowej). Rezystywność niklu wynosi $69{,}9 \times 10^{-9}$ Ωm. Jest to zdecydowanie dużo w porównaniu z $16{,}8 \times 10^{-9}$ Ωm dla miedzi, ale w wielu przypadkach wystarczy, jeśli wziąć pod uwagę możliwość zgrzewania pakietu ogniw łatwo dostępną pojedynczą, specjalnie dopasowaną do holderów blachą niklową.

Jeżeli prognozowana rezystancja wewnętrzna baterii, w której ogniwa są połączone samym niklem, przyjmuje nieakceptowalnie dużą wartość, należy do łączenia ogniw wykorzystać konektory zawierające również miedź. Pozwala to znacznie zwiększyć przewodność połączeń między ogniwami, ale wiąże się ze znacznym skomplikowaniem konstrukcji i zwiększeniem masy baterii. Aby znaleźć złoty środek między przewodnością, masą i sposobem wykonania, przydatne okazuje się porównanie numerycznych modeli konektorów w programie ANSYS Maxwell.

W artykule opisano wyniki symulacji przeprowadzonych na trzech różnych modelach konektorów – w ten sposób wybrano wariant najlepiej odpowiadający wymaganiom. Na podstawie obliczeń i symulacji z wykorzystaniem programów OptimumLap, Matlab i Excel przyjęto ciągłą wartość skuteczną prądu baterii na poziomie 230 A, co przy zastosowaniu 23 ogniw w sekcji daje 10 A prądu z każdego ogniwa. Aby jakościowo porównać poszczególne rodzaje połączeń, dla każdego typu przygotowano model konektora łączącego szeregowo dwie sekcje po 23 ogniwa rozmieszczone w holderach (które przypominają kształtem plaster miodu, co pozwala na gęste upakowanie ogniw i zapewnia dużą wytrzymałość mechaniczną), z których każde jest – zgodnie z założeniami wstępnymi – źródłem prądu o wartości 10 A. W modelach tych porównano straty Joule'a, lokalne gęstości prądu występujące w konektorach i wyznaczone rezystancje dróg przepływu prądu na pojedynczym konektorze.

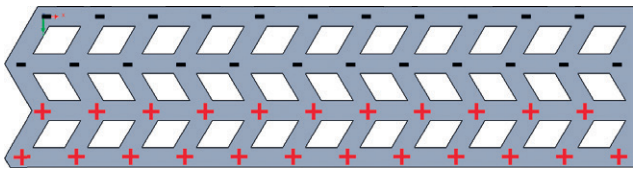
Taśmy niklowe

Jak wspomniano, najprostszą metodą połączenia ogniw jest wykorzystanie dopasowanej do kształtu holderów, wyciętej laserowo taśmy niklowej. Do ogniw może zostać zgrzana taśma o maksymalnej grubości 0,2 mm. Na rys. 4 przedstawiono model takiej taśmy z rozmieszczonymi 23 punktami dopływu prądu o wartości 10 A w dwóch dolnych rzędach i 23 punktami odpływu (tzw. *sink*) prądu w dwóch górnych rzędach.

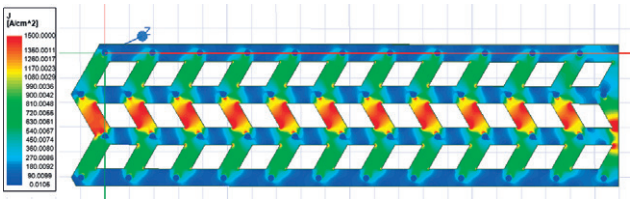
W takiej taśmie – jak widać na rys. 5 – występuje bardzo nierównomierny rozkład gęstości prądu. Jest to dosyć niekorzystne, ponieważ moc strat rośnie w danym miejscu razem z kwadratem gęstości prądu i – aby ją utrzymać na dopuszczalnym poziomie – należy redukować prąd znamionowy, mimo że część konektora pozostaje prawie nieobciążona. Straty mocy w takiej taśmie niklowej dla danego obciążenia wyniosły 5,18 W, a maksymalna gęstość prądu 15 A/mm^2.

Blacha miedziana z niklowymi insertami

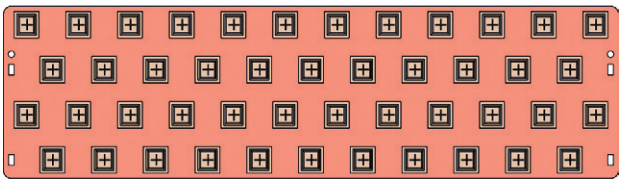
Inną rozważaną metodą połączenia ogniw był arkusz miedzianej blachy o grubości 1,5 mm z wyciętymi laserowo kwadratowymi otworami, w które wlutowano prostokątne niklowe „koszyki", zgrzewane następnie z ogniwami (rys. 6). Zaletą tej metody jest zastosowanie miedzi do przewodzenia prądu i zwiększenie równomierności jego przepływu (co widać na rys. 7), jednak wykonanie takiego konektora wymaga dużego nakładu pracy – każdy niklowy element trzeba przylutować do blachy.



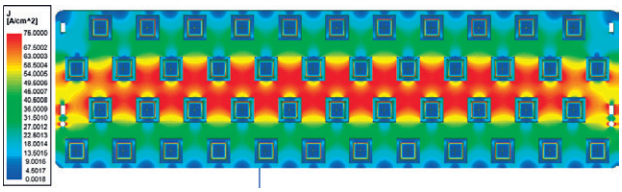
Rys. 4. *Model taśmy niklowej z zaznaczonymi miejscami zgrzewania ogniw i ich znakami*



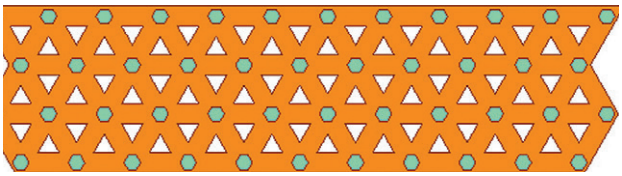
Rys. 5. *Rozkład gęstości prądu w taśmie niklowej*



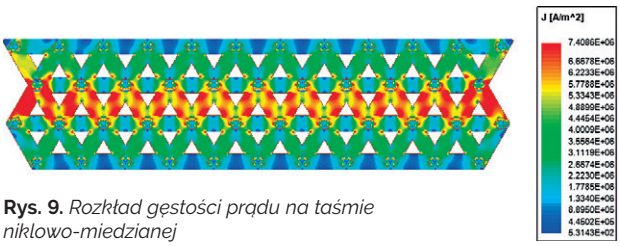
Rys. 6. *Model blachy miedzianej z niklowymi insertami*



Rys. 7. *Rozkład gęstości prądu na połączeniu ogniw z blachy miedzianej*



Rys. 8. *Model połączonych ze sobą taśm miedzianej i niklowej*



Rys. 9. *Rozkład gęstości prądu na taśmie niklowo-miedzianej*

Aby było możliwe połączenie niklowych insertów z blachą miedzianą, blacha musi mieć dosyć znaczną grubość – minimum 1,5 mm, w przeciwnym razie inserty mogą zostać zgniecione po zaizolowaniu baterii i umieszczeniu w obudowie. Taka ilość materiału znacznie zwiększa masę baterii, jednak jest to rekompensowane przez niską przewodność – maksymalna gęstość prądu w takim modelu wyniosła 0,75 A/mm^2, a straty mocy w całym konektorze – jedynie około 0,15 W.

Taśmy niklowe połączone z taśmami miedzianymi

Kompromisem pomiędzy przewodnością i masą wydaje się zaproponowane przez firmę ProEbikes połączenie wyciętej laserowo taśmy miedzianej o grubości 0,2 mm z opisaną już taśmą niklową (model – rys. 8, element – rys. 10).

Intuicja podpowiada, że największa gęstość prądu w konektorze dwa razy grubszym od samej taśmy niklowej powinna być dwa razy mniejsza, czyli wynosić około 7,5 A/mm^2 – i tak właśnie jest (rys. 9). Jednak warstwa miedzi o konduktywności ponad cztery razy większej niż nikiel pozwala na znaczne ograniczenie strat mocy. W jednym konektorze wydzielają się straty na poziomie 0,91 W (czyli ponad pięć razy mniej niż w przypadku samej taśmy niklowej).

Wnioski

Dane zebrane podczas symulacji w programie ANSYS Maxwell z wykorzystaniem modelu w Simulinku posłużyły do wyłonienia najlepszej metody łączenia ogniw. Do budowy baterii (rys. 11) użyto taśm niklowo-miedzianych, które zapewniły najkorzystniejszy stosunek mocy i strat w baterii do jej masy. Możliwość porównania efektów różnych rozwiązań konstrukcyjnych w programie ANSYS Maxwell dostarczonym przez firmę MESco znacznie się przyczyniła do udoskonalenia projektu baterii.

LITERATURA

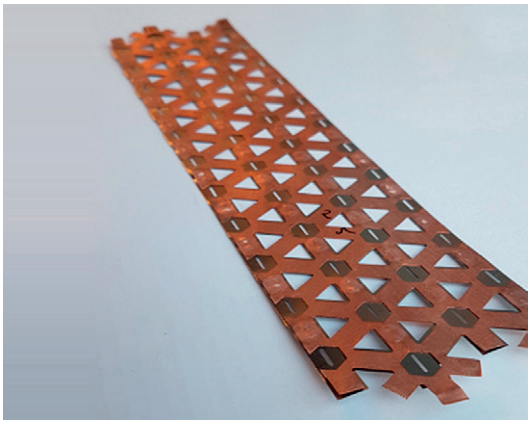
[1] Gillespie T.D. "*Fundamentals of Vehicle Dynamics*". International Series of Monographs on Physics. SAE International (1992). ISBN: 9781560911999.

[2] Grunditz E.A. "*Design and Assessment of Battery Electric Vehicle Powertrain, with Respect to Performance, Energy Consumption and Electric Motor Thermal Capability*". Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology (2016), http:// www.chalmers.se/SiteCollectionDocuments/ Energi\%20och\%20milj\%C3\%B6/Elteknik/EmmaGrunditz_PhDthesis_lowrez.pdf.

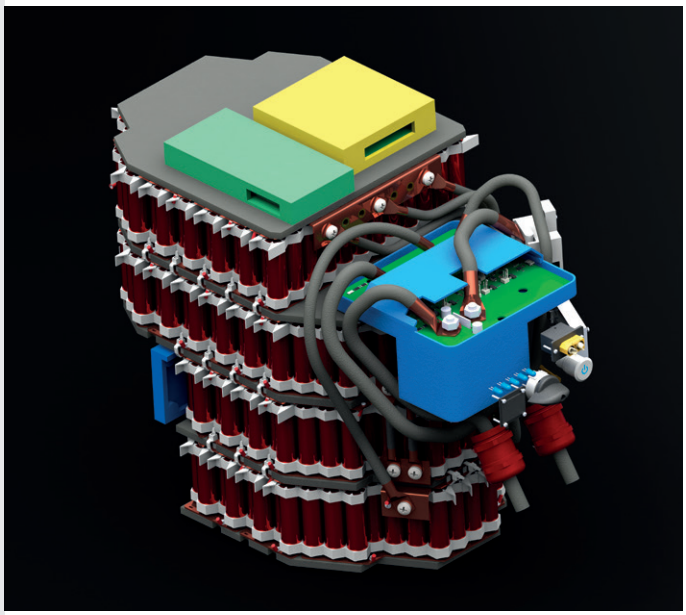
[3] Jackey R., Saginaw M., Sanghvi P., Gazzarri J. et al. "Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An example using a lithium iron phosphate cell". *SAE Technical Paper*. 2013–01–1547 (2013), https://doi.org/10.4271/2013–01–1547, https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/battery-model-parameter-estimation-using-a-layered-technique-an-example-using-a-lithium-iron-phosphate-cell.html

[4] Politechnika Krakowska. „*Opór właściwy metali*", http://if.pk.edu.pl/tabele/OpWlMet.htm.

[5] Merrow H. "*Design and Analysis of a Battery Pack Enclosure for Formula SAE*". Massachusetts Institute of Technology (2017), https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/112555.



Rys. 10. *Wykonana na potrzeby skonstruowania baterii taśma niklowo-miedziana*



Rys. 11. *Model 3D pakietu ogniw w baterii wraz z elektroniką*

janar

INTEGRATOR AUTOMATYKI
W POJAZDACH SPECJALNYCH

CAN-open
J1939
NMEA 2000
ISO-bus

DIAGNOSTYKA

PROGRAMOWANIE

DORADZTWO

PROJEKTOWANIE

STEROWANIE I KONTROLA

WIZUALIZACJA

SZKOLENIA

JANAR jest inżynieryjną firmą dostarczającą rozwiązania systemów automatyki i sterowania w pojazdach specjalnych.
Naszą największą wartością jest to, że nie jesteśmy tylko firmą, ale grupą pasjonatów techniki, informatyki i automatyki.
Nie boimy się wyzwań, a każdy projekt to dla nas możliwość poszerzenia naszej pasji i zdobycia nowego doświadczenia.
Praca naszego zespołu wsparta jest przez system zarządzania jakością ISO 9001:2015 nadzorowany przez UDT-CERT, a projekty tworzone są zgodnie z normą PN_EN_ISO_13849.
Standardy na jakich pracujemy oraz posiadane uprawnienia UD-04-36-P/1-09 dają gwarancję bezpiecznej oraz innowacyjnej pracy maszyn i pojazdów.
Zapraszamy do kontaktu!

JANAR Sp. z o.o.
Stróża 70 B
98-332 Rząśnia
Tel. +48 44 63 11 155

janar@janar.pro
www.janar.biz.pl

rok założenia 2000

Ansys
CERTIFIED ELITE CHANNEL PARTNER

hp

Wydawca: MESCO Sp. z o.o.
al. Legionów 4, 41-902 Bytom
tel. +48 (32) 768 36 36
pl. 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

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.