

## CEL PROJEKTU

Modelowanie komputerowe jest obecnie najbardziej efektywnym narzędziem analizy złożonych problemów nauki i techniki. Podstawową zaletą tego podejścia jest duża dokładność uzyskiwanych wyników oraz możliwość dynamicznej zmiany parametrów fizycznych modelu lub warunków jego pracy, bez konieczności powtórnego konstruowania wirtualnej reprezentacji analizowanego zjawiska lub obiektu. Typowymi przykładami praktycznego zastosowania modelowania matematycznego są problemy komputerowo wspieranego projektowania złożonych systemów inżynierskich, takich jak konstrukcje nośne w budownictwie i inżynierii materiałowej, płyty nośne w aerodynamice i inżynierii lotniczej, czy układy komunikacji bezprzewodowej w elektromagnetyzmie i inżynierii mikrofalowej.

Precyzyjne modelowanie zjawisk fizycznych jest możliwe za pomocą skomplikowanego opisu matematycznego, którego rozwiązanie dostępne jest jedynie na drodze numerycznej. Z tego względu stosowanie dokładnych modeli symulacyjnych, reprezentujących rzeczywiste systemy inżynierskie, wymaga ogromnych nakładów obliczeniowych, niejednokrotnie przekraczających możliwości sprzętowe standardowych komputerów osobistych. Przykładowo, pojedyncza symulacja trójwymiarowego modelu skrzydła samolotu wymaga od kilkudziesięciu do kilkuset gigabajtów pamięci RAM i trwa aż kilkadziesiąt godzin. Z kolei analityczna reprezentacja złożonych systemów fizycznych jest zaledwie przybliżeniem rzeczywistości — najczęściej obciążonym dużym błędem — i z tego względu nie nadaje się do praktycznego wykorzystania w rozwiązywaniu realistycznych problemów nauki i techniki.

Nadmierny koszt obliczeniowy związany z dokładnymi symulacjami komputerowymi jest zatem fundamentalną przeszkodą uniemożliwiającą skuteczną automatyzację procesu projektowego, realizowaną w oparciu o konwencjonalne algorytmy optymalizacji numerycznej. Rozwiązaniem zadania optymalizacyjnego jest taki zbiór wartości parametrów projektowych, dla których odpowiedź systemu inżynierskiego — opisana zgodnie z wymaganiami projektowymi funkcją celu — osiąga ekstremum. W przypadku zagadnień zdefiniowanych poprzez jedno kryterium projektowe przyjmuje się, że typowy proces optymalizacji wymaga od kilkuset (w przypadku relatywnie prostych problemów o niewielkiej liczbie zmiennych decyzyjnych) do tysięcy odwołań do funkcji celu (dla skomplikowanych problemów oraz wielowymiarowych przestrzeni poszukiwań). Warto podkreślić, że realistyczne zadania inżynierskie wymagają najczęściej jednoczesnego uwzględnienia więcej niż jednego kryterium projektowego, przy czym kryteria te zazwyczaj wzajemnie się wykluczają. Do znalezienia zbioru rozwiązań tego typu problemów stosuje się tradycyjnie populacyjne algorytmy optymalizacyjne (np. ewolucyjne, roju, itp.), dla których wymagana liczba ewaluacji modelu komputerowego zwiększona jest w porównaniu do optymalizacji jednokryterialnej przynajmniej o rząd wielkości. Zakładając czas analizy dokładnego modelu symulacyjnego równy dziesięciu godzinom oraz liczbę dziesięciu tysięcy jego ewaluacji, estymowany czas procesu bazującego na konwencjonalnych algorytmach optymalizacji wielokryterialnej przekracza dziesięć lat. Wynika z tego, że konwencjonalne metody modelowania komputerowego i optymalizacji numerycznej, wykorzystujące realistyczne wymagania projektowe oraz dokładne modele symulacyjne, są niewystarczające z punktu widzenia automatyzacji procesu projektowego złożonych obliczeniowo problemów inżynierskich.

Proponowane badania mają na celu usunięcie powyższych trudności poprzez opracowanie nowatorskich technik modelowania i optymalizacji dla potrzeb interdyscyplinarnych problemów projektowania obiektów o dużym stopniu złożoności. W tym celu zostanie wykorzystana koncepcja optymalizacji opartej na skorygowanych modelach zastępczych (ang. surrogate-based optimization, SBO), w której przedmiotem procesu numerycznego jest — zamiast dokładnego modelu symulacyjnego — jego obliczeniowo tania reprezentacja, podlegająca iteracyjnej korekcji na podstawie danych pochodzących z modelu dokładnego. Do głównych zadań proponowanego projektu należy zaliczyć opracowanie systematycznej metodologii tworzenia tanich obliczeniowo modeli zastępczych —zarówno uproszczonych

modeli fizycznych otrzymanych np. poprzez rzadką dyskretyzację dokładnego modelu fizycznego, jak i modeli łączonych, czyli skorygowanych modeli behawioralnych zbudowanych w oparciu o dane pochodzące z uproszczonych modeli fizycznych — oraz wydajnych technik modelowania i algorytmów optymalizacyjnych dla potrzeb realistycznych problemów inżynierskich o dużej skali złożoności. Przewiduje się, że realizacja postawionych celów przyczyni się istotnie do rozwoju dziedzin nauki i techniki wykorzystujących symulacyjne metody projektowania, a w szczególności stanowić będzie istotny wkład w rozwój metod optymalizacji i modelowania komputerowego bazujących na skorygowanych modelach zastępczych.

## **OPIS REALIZOWANYCH BADAŃ PODSTAWOWYCH**

Celem proponowanych badań naukowych jest opracowanie wydajnych metod modelowania i optymalizacji do zastosowania w procedurach automatycznego projektowania obiektów o dużej skali złożoności, dla których dokładne modele symulacyjne są bardzo kosztowne obliczeniowo.

Pierwszym etapem projektu jest opracowanie uniwersalnych i wydajnych algorytmów optymalizacyjnych, dedykowanych złożonym obliczeniowo problemom numerycznym. Zaproponowane rozwiązania oparte będą na koncepcji optymalizacji pośredniej bazującej na skorygowanych modelach zastępczych. W przeciwieństwie do znanych technik SBO, opracowane algorytmy będą posiadały: zagwarantowaną zbieżność, małą złożoność numeryczną, odporność na niedokładności stosowanego modelu zastępczego, oraz niewielką liczbę parametrów kontrolnych. Kryterium zakończenia algorytmu będzie uwzględniało kompromis pomiędzy wydajnością procesu numerycznego a dokładnością wyników końcowych. Mała liczba parametrów kontrolnych opracowanych algorytmów umożliwi ich efektywną obsługę przez użytkowników posiadających niewielkie doświadczenie w dziedzinie optymalizacji numerycznej.

Drugi etap realizowanych badań dotyczy opracowania wydajnych metod i algorytmów konstruowania skorygowanych modeli zastępczych dla potrzeb technologii SBO. Fundamentalnym składnikiem każdego procesu SBO jest model zastępczy, czyli obliczeniowo tania reprezentacja dokładnego modelu symulacyjnego projektowanego obiektu, przy czym wydajność procedury optymalizacji zależy zarówno od jego dokładności, jak i złożoności numerycznej. Proponowane metody budowania modeli zastępczych będą uwzględniać te dwa aspekty, a ponadto będą zawierać mechanizmy weryfikacji jakości konstruowanych modeli oraz predykcji działania algorytmu SBO. Na tym etapie zostanie położony nacisk przede wszystkim na uproszczone modele fizyczne, zbudowane przy wykorzystaniu informacji na temat analizowanej struktury (np. na podstawie symulacji modelu o rzadkiej siatce dyskretyzacji). Korekcja modeli zostanie zrealizowana poprzez dostępne techniki odwzorowania przestrzeni lub ich kombinacje.

Trzecim etapem projektu jest opracowanie technik i algorytmów SBO wykorzystujących łączone modele zastępcze. Działanie znanych technik optymalizacji pośredniej oparte jest na modelach zastępczych danego rodzaju, tj. na modelach fizycznych lub aproksymacyjnych (behawioralnych). Podstawowym problemem tego podejścia są ograniczenia charakterystyczne dla konkretnych klas modeli zastępczych. Na przykład modele symulacyjne o rzadkiej siatce dyskretyzacji cechuje stosunkowo długi czas symulacji. Tej wady pozbawione są modele aproksymacyjne, lecz koszt pozyskania próbek trenujących niezbędnych do zbudowania takiego modelu może przekroczyć dostępny budżet numeryczny, szczególnie dla wielowymiarowych przypadków projektowych. Z tego względu ważnym celem projektu jest opracowanie systematycznych procedur tworzenia łączonych modeli zastępczych, w szczególności modeli aproksymacyjnych zbudowanych z próbek pochodzących z symulacji uproszczonego modelu fizycznego, poddanych następnie korekcji przez wykorzystanie niewielkiej liczby danych symulacyjnych modelu dokładnego. Ostatnim etapem jest implementacja i walidacja opracowanych technik modelowania i

optymalizacji.

### **POWODY PODJĘCIA DANEJ TEMATYKI BADAWCZEJ**

Przegląd bieżącej literatury przedmiotu wskazuje na istotne ograniczenia obecnie obowiązujących paradygmatów w rozwiązywaniu złożonych obliczeniowo problemów nauki i techniki. W szczególności brakuje współcześnie wydajnych narzędzi modelowania i automatycznego projektowania realistycznych systemów inżynierskich, które zapewniłyby wysoką precyzję wyników przy relatywnie niskim koszcie obliczeniowym procesu projektowania. Do najważniejszych otwartych problemów metodologicznych należy zaliczyć:

1. Rozpowszechnione techniki optymalizacji bezpośredniej są całkowicie nieprzydatne w rozwiązywaniu skomplikowanych problemów nauki i techniki. Wynika to z niedokładności analitycznej reprezentacji złożonych systemów inżynierskich oraz wygórowanego kosztu numerycznego związanego z ewaluacją ich dokładnych modeli symulacyjnych.
2. Opracowane dotychczas algorytmy optymalizacyjne inspirowane naturą (genetyczne, roju, mrówkowe) wymagają zbyt wielu odwołań do funkcji celu (potrzeba dziesiątek tysięcy ewaluacji do znalezienia zbioru rozwiązań optymalnych), by mogły być skutecznie wykorzystane w połączeniu z symulacyjnymi modelami komputerowymi (niezależnie od gęstości siatki dyskretyzacji modelowanego obiektu).
3. Obecne na rynku specjalistyczne pakiety oprogramowania komputerowego wspierającego proces projektowania, dzięki którym możliwa jest jego automatyzacja na szeroką skalę, wyposażone są jedynie w podstawowe algorytmy optymalizacji bezpośredniej (najczęściej gradientowe). Wynika to z licznych, dotychczas nierozwiązanych, problemów dotyczących algorytmów optymalizacji pośredniej, takich jak brak gwarancji zbieżności, wrażliwość na dokładność wykorzystywanego modelu zastępczego, czy duża liczba parametrów kontrolnych procesu numerycznego.

Należy podkreślić, iż rozwiązanie powyższych problemów badawczych ma szansę doprowadzić do gwałtownego rozwoju wielu gałęzi nauki i techniki, gdzie metody komputerowego modelowania i optymalizacji mają zasadnicze znaczenie. Do przykładowych dziedzin należy zaliczyć aero- i hydrodynamikę (optymalizacja kształtu skrzydła samolotu, czy kadłuba statku), czy też oceanografię (kalibracja wybranych modeli oceany i klimatu).