

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15-18 października 2024

Symulacja zjawisk aerosprężystych dla trzepoczącego skrzydła

Karol Foltyński², Witold Stankiewicz¹, Tomasz Krakowski¹

¹Institut Mechaniki Stosowanej, Politechnika Poznańska

²Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika Poznańska

email: witold.stankiewicz@put.poznan.pl

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono wyniki symulacji zjawisk aerosprężystych występujących podczas trzepotania skrzydeł drona wzorowanego na budowie owadów. Model numeryczny skrzydła oraz konfigurację przepływu wzorowano na eksperymencie przeprowadzonym w ESPCI Paris. Niestacjonarne obliczenia przepływu płynu (CFD) oraz odkształceń konstrukcji (MES) prowadzone były w środowisku Ansys, z wykorzystaniem niezależnych solverów, sprzężonych za pośrednictwem modułu System Coupling. W trakcie symulacji zbadano wpływ częstotliwości trzepotania skrzydeł oraz ich sztywności (wynikającej z grubości błony stanowiącej powierzchnię nośną skrzydła) na generowane siły aerodynamiczne. Uzyskane wyniki wskazują na dużą zależność wartości generowanej siły ciągu od wielkości deformacji skrzydła, co odpowiada wynikom wspomnianego wcześniej badania.

SŁOWA KLUCZOWE: CFD, MES, aerosprężystość, trzepotanie skrzydeł, dron

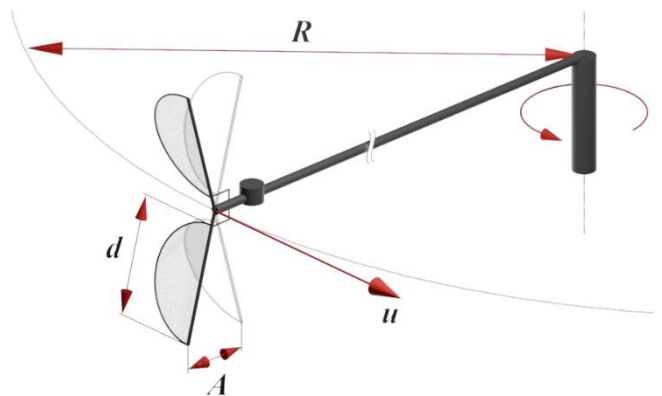
1. Wprowadzenie

Lekkie, bezzałogowe statki powietrzne mogą znaleźć zastosowania cywilne i militarne jako mobilne systemy zbierające informacje w trudno dostępnych i niebezpiecznych miejscach. W tym kontekście duże znaczenie ma możliwa miniaturyzacja takich pojazdów, często do wymiarów nieprzekraczających kilku-kilkunastu centymetrów i wagi rzędu kilkunastu gramów [2]. Przy tej skali obiektów, rozwiązania typowe dla tradycyjnych samolotów czy wielowirnikowców mogą okazać się nieskuteczne. Inspiracja przyrodą prowadzi do modeli bionicznych, wzorowanych na owadach - w których przypadkach generowanie sił nośnej i ciągu odbywa się równocześnie, w wyniku trzepotania skrzydeł. Przykładami takich obiektów mogą być ważący 20 mg dron OVMI o rozpiętości skrzydeł około 22 mm, rozwijany przez zespół S. Grondela z instytutu IEMN z Valenciennes i Lille we Francji i wykorzystujący drgania rezonansowe do zwiększenia amplitudy trzepotania skrzydeł [3], ważący 60 mg dron o rozpiętości skrzydeł 3 cm, opracowany przez R.J. Wooda z Uniwersytetu Harvarda [4] oraz model o rozpiętości skrzydeł wynoszącej około 150 mm, badany eksperymentalnie przez B. Thirie i R. Godoy-Dianę z ESPCI Paris [1]. Ostatnie z wymienionych badań odtworzono w niniejszej pracy w środowisku wirtualnym.

2. Obiekt badawczy

Eksperymentalne stanowisko do badań składało się z pary elastycznych skrzydeł, umieszczonych na końcu pręta o długości $R = 0,5 \text{ m}$. Skrzydła składały się z membran w postaci półokręgów o średnicy $d = 60 \text{ mm}$ (o grubościach od 0.15 mm do 0.4 mm w zależności od konfiguracji), zamocowanych na krawędzi natarcia, na której wymuszano ruch oscylacyjny o amplitudzie $\varphi_0 = 60^\circ$, co odpowiadało ruchowi skrajnego punktu krawędzi natarcia w zakresie $A = 75 \text{ mm}$. Układ skrzydeł

napędzany był za pomocą zamocowanego na pręcie silnika elektrycznego, który poprzez przekładnię zębatą i układ cięgieł wprawiał w ruch krawędzie natarcia. Poprzez trzepoczący ruch, skrzydło generowało siłę ciągu, która powodowała ruch obrotowy całego układu. Stanowisko doświadczalne zostało przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Model drona z eksperymentu [1], stanowiący podstawę analizowanej konfiguracji

Do analizy wykorzystano (zakładając symetrię całego układu) pojedyncze skrzydło, poruszające się ruchem oscylacyjnym wokół punktu mocowania według wzoru:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

gdzie częstotliwość f przyjmowała wartości z zakresu 10 - 30 Hz.

Warto zauważyć, że częstotliwości trzepotania za każdym razem były mniejsze od pierwszej częstości drgań własnych skrzydła, wynoszącej 70 - 167 Hz w zależności od grubości przyjętej membrany.

3. Metodyka badań

Analiza zjawisk aerosprężystych występujących podczas trzepotania skrzydeł prowadzona była z wykorzystaniem dwóch niezależnych solverów, dla których wygenerowane były niezależne siatki obliczeniowe. Ansys Fluent służył do wyznaczania pól prędkości i ciśnienia w przepływie, w szczególności na brzegu domeny obliczeniowej (powłoco skrzydła). W związku z małymi liczbami Reynoldsa występującymi dla badanych konfiguracji, rozwiązywane w tym celu były zmodyfikowane równania Naviera-Stokesa, uwzględniające ruch siatki przepływowej wynikający z deformacji struktury. Podejście takie nazywa się Arbitralnym Lagranżowsko-Eulerowskim (ALE) [5], co prowadzi do równań postaci:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho(u - u_{grid}) \otimes u) + \nabla p - \nabla \cdot \tau = 0 \quad (2)$$

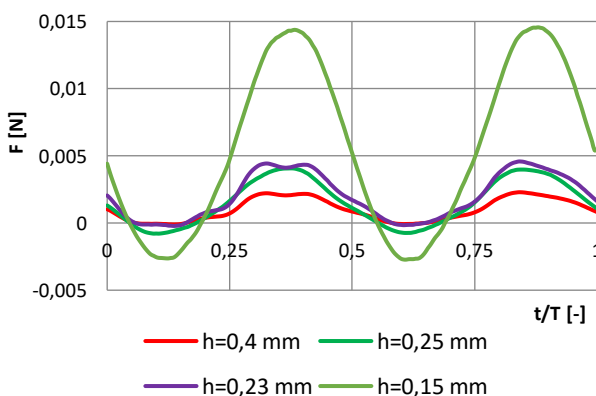
gdzie u oznacza prędkość płynu, ρ i p – odpowiednio, jego gęstość i ciśnienie, u_{grid} – prędkość siatki a τ – tensor naprężeń. Szczegóły dotyczące uwzględnienia ruchu siatki w oprogramowaniu Ansys opisane są dokładniej w pracy [6].

Wyznaczane przez solver CFD ciśnienia na powierzchni skrzydła przekazywane są (z wykorzystaniem interpolacji) do programu MES wyznaczającego odkształcenie struktury. Następnie, przemieszczenia te służą do deformacji siatki przepływowej (z użyciem np. analogii sprężynowej [7]) i wyznaczenia prędkości u_{grid} . Po uzyskaniu zbieżności (wymagającej wykonania kilku iteracji) następuje przejście do kolejnego kroku czasowego i powtórzenie całego cyklu.

4. Wyniki symulacji

W trakcie badań wyznaczono siłę ciągu generowaną przez skrzydła, dla różnych wartości dwóch parametrów.

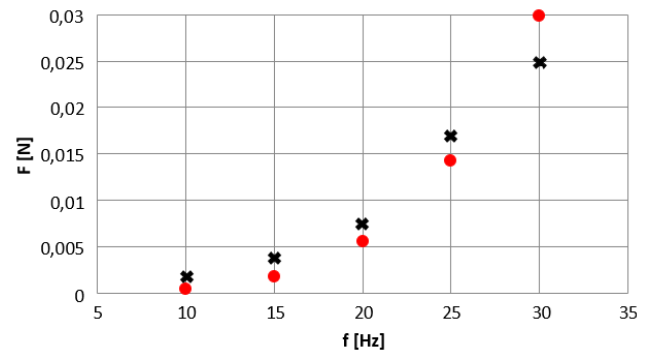
W pierwszym przypadku zmieniana była grubość membrany, przy stałej częstotliwości trzepotania, wynoszącej $f = 20$ Hz. Wyniki tego badania przedstawiono na rys. 2. Największe siły zaobserwowano dla skrzydła o najcieńszej membranie ($h = 0.15$ mm), które równocześnie ulegało największym odkształceniom podczas trzepotania. Wzrost grubości membrany skutkował usztywnieniem skrzydła i spadkiem generowanej siły nośnej.



Rys. 2. Siła ciągu uzyskana w czasie jednego okresu dla skrzydeł o różnej grubości membrany

Drugie badanie dotyczyło skrzydła o najmniejszej grubości membrany, przy częstotliwościach trzepotania z zakresu od 10 do 30 Hz. W tym przypadku uśredniona w czasie siła ciągu była największa dla najwyższych

częstotliwości trzepotania, co przedstawiono na rys. 3. Uzyskane wyniki odpowiadają wartościom otrzymanym w eksperymencie Thirii i Godoya-Diany [1].



Rys. 3. Uśredniona siła ciągu uzyskana w czasie jednego okresu dla różnych częstotliwości trzepotania. Czerwonymi kółkami oznaczono wartości numeryczne, czarnymi krzyżykami – aproksymowane wartości z eksperymentu [1]

5. Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono symulacje numeryczne zjawisk aerosprężystych występujących podczas przepływu powietrza wokół trzepoczących skrzydeł. Uzyskane wyniki cechują się dużą zgodnością z wynikami literaturowymi pochodzącymi z eksperymentu i wskazują na zależność generowanej siły ciągu od sztywności skrzydła i częstotliwości trzepotania.

Przeprowadzone symulacje FSI pozwoliły odtworzyć zjawiska występujące w naturze, zatem symulacje tego typu mogą zostać wykorzystane przy projektowaniu nanodronów trzepoczących skrzydłami (FWNAV). W przeciwieństwie do eksperymentów oraz metod analitycznych, umożliwiają one nie tylko wyznaczenie sił aerodynamicznych ale również swobodny wgląd w zjawiska zachodzące podczas przepływu wokół skrzydła.

Praca została wykonana w ramach projektu nr 0612/SBAD/3628, finansowanego z subwencji badawczej MNiSW.

Literatura

- [1] Thiria B., & Godoy-Diana R., *How wing compliance drives the efficiency of self-propelled flapping flyers*, Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, Vol. 82, No. 1, pp. 015303, 2010.
- [2] Hylton T., Martin C., Tun R., Castelli V., *The DARPA Nano Air Vehicle Program*, 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2012.
- [3] Faux D., Thomas O., Cattan E., Grondel S., *Two modes resonant combined motion for insect wings kinematics reproduction and lift generation*, Europhysics Letters, Vol. 121, No. 6, 66001, 2018.
- [4] Wood R.J., *Liftoff of a 60mg flapping-wing MAV*, 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1889-1894, 2007.
- [5] Roszak R., Posadzy P., Stankiewicz W., Morzyński, M., *Fluid-structure interaction for large scale complex geometry and non-linear properties of structure*. Archives of Mechanics, Vol. 61, No. 1, pp. 3-27, 2009.
- [6] Chimakurthi S.K., Reuss S., Tooley M. et al., *ANSYS Workbench System Coupling: a state-of-the-art computational framework for analyzing multiphysics problems*, Engineering with Computers, Vol. 34, pp. 385-411, 2018.
- [7] Kotecki K., Hausa H., Nowak M., Stankiewicz W., Roszak R., Morzyński M., *Deformation of curvilinear meshes for aeroelastic analysis*, IDIHOM: Industrialization of High-Order Methods-A Top-Down Approach, pp. 125-131, Springer, 2015.