



DZIEŃ MECHANIKA 2026



Konkurs na Najlepszą Pracę Dyplomową na Wydziale Mechanicznym UMG

Streszczenia prac konkursowych

Opracowanie technologii wytwarzania gondoli modelu turbiny wiatrowej wraz z przekładnią metodą FDM

Tematem pracy inżynierskiej było opracowanie technologii wytwarzania gondoli modelu turbiny wiatrowej wraz z przekładnią metodą FDM (ang. Fused Deposition Modeling). Przedmiotem opracowania był nie tylko projekt przestrzenny, ale przede wszystkim kompletny proces inżynierski: od analizy budowy układu napędowego i przygotowania dokumentacji, przez dobór materiału oraz parametrów druku 3D, po wykonanie detali, kontrolę ich jakości i montaż funkcjonalnego modelu demonstracyjnego.

Rosnące znaczenie energetyki wiatrowej stwarza zapotrzebowanie na rozwiązania ułatwiające projektowanie, prezentowanie i weryfikowanie konstrukcji maszyn. Szczególnie istotna jest możliwość odtworzenia w skali modelowej elementów konstrukcyjnych i mechanizmów turbiny wiatrowej. Ich budowa bywa trudna do przedstawienia wyłącznie za pomocą rysunków technicznych. Technologia FDM pozwala na stosunkowo szybkie i niedroge wytwarzanie elementów o złożonych kształtach, bez konieczności stosowania specjalistycznych narzędzi i urządzeń wykorzystywanych w tradycyjnych metodach produkcji. Należy jednak pamiętać, że warstwowy sposób wytwarzania elementów metodą FDM wiąże się z pewnymi ograniczeniami. Dlatego istotne znaczenie ma odpowiedni dobór parametrów druku, które wpływają na dokładność wymiarową, jakość powierzchni oraz wytrzymałość wydrukowanych części.

Głównym celem pracy było opracowanie technologii wytwarzania elementów gondoli modelu turbiny wiatrowej z przekładnią, a następnie zbudowanie i sprawdzenie działania kompletnego zespołu. Założono, że wykonany model powinien odwzorowywać wybrane mechanizmy stosowane w turbinach wiatrowych. Ważne było również zapewnienie możliwości montażu elementów znormalizowanych oraz prawidłowego działania części ruchomych. Istotnym aspektem pracy było także uzyskanie odpowiedniej dokładności wymiarowej i jakości wykonania poszczególnych elementów.

W części teoretycznej scharakteryzowano budowę i zasadę działania turbin wiatrowych oraz porównano konstrukcje gondoli z przekładnią oraz bezprzekładniowe. Omówiono rolę przekładni, która odpowiada za przenoszenie napędu z wirnika do generatora turbiny wiatrowej. Następnie przeanalizowano metody wytwarzania przyrostowego i materiały

stosowane w druku 3D. Szczególną uwagę poświęcono technologii FDM, którą wykorzystano do wykonania modelu turbiny wiatrowej. Omówiono również wpływ parametrów druku, takich jak wysokość warstwy, gęstość wypełnienia, temperatura, prędkość druku oraz orientacja wydruku, na jakość i właściwości otrzymanych elementów.

Część projektową zrealizowano w programie Autodesk Inventor. Opracowano modele CAD elementów konstrukcyjnych gondoli, przekładni oraz części współpracujących, uwzględniając ich późniejszy montaż. Już na etapie modelowania dostosowano geometrię detali do ograniczeń technologii FDM. Szczęólnego znaczenia nabrało zaprojektowanie gniazd łożysk, otworów pod elementy złączne, powierzchni styku oraz miejsc osadzenia części obrotowych. W modelu przewidziano współpracę części drukowanych z elementami znormalizowanymi, w tym łożyskami, śrubami i pierścieniami osadczymi.

Do wykonania detali wybrano filament PET-G, który zapewnia korzystne właściwości użytkowe w zastosowaniach prototypowych, w tym dobrą adhezję międzywarstwową i odporność na uszkodzenia mechaniczne. Proces wytwarzania przeprowadzono na drukarce Original Prusa XL 5T. Na podstawie przeglądu literatury oraz możliwości urządzenia przyjęto wysokość warstwy 0,2 mm i wypełnienie kratowe na poziomie 25%. Temperaturę dyszy ustalono na 235°C, a stołu roboczego na 80°C. Prędkość drukowania obrysów wynosiła 170 mm/s, a wypełnienia 200 mm/s.

Przygotowanie procesu obejmowało dobór orientacji części na stole roboczym oraz ograniczenie liczby struktur podporowych przy zachowaniu wymaganej geometrii. Dla potrzeb dokumentowania procesu opracowano kartę technologiczną, kartę instrukcyjną oraz kartę kontroli jakości. Drukowane detale podzielono na trzy grupy: elementy osiowo symetryczne, koła zębate oraz obudowy i korpusy. Podział ten umożliwił uporządkowanie procesu wykonawczego i wskazanie charakterystycznych wymagań dla poszczególnych typów geometrii.

Jednym z najważniejszych zagadnień technologicznych okazało się zapewnienie prawidłowego pasowania. Po wykonaniu pierwszych wydruków testowych zaobserwowano wpływ skurczu PET-G na współpracę elementów, szczególnie w połączeniach wciskowych. Na podstawie prób montażowych wprowadzono w modelach CAD korekty wybranych wymiarów o $\pm 0,1$ mm, zależnie od rodzaju pasowania. Dzięki temu uzyskano wymagane luzy montażowe i ograniczono konieczność dodatkowej obróbki części po wydrukowaniu.

W ramach realizacji pracy wytworzono łącznie 34 elementy metodą FDM. Do ich produkcji zastosowano te same podstawowe parametry technologiczne, co sprzyjało powtarzalności procesu. Podczas drukowania uwzględniono różnice w kształtach i wymiarach

poszczególnych części. Wybrane fragmenty wymagały zastosowania podpór, które usunięto po zakończeniu druku. Podczas drukowania elementów przekładni planetarnej doszło do chwilowej przerwy w dostawie prądu, która spowodowała zatrzymanie drukarki. Konieczność ponownego wykonania wydruków pokazała praktyczne znaczenie niezawodności zasilania i nadzoru nad długotrwałymi procesami przyrostowymi.

Ważnym etapem pracy była kontrola jakości wydrukowanych elementów. Obejmowała ona ocenę wizualną, weryfikację pomiarową oraz bezkontaktowy pomiar chropowatości wybranych powierzchni. W ocenie wizualnej nie stwierdzono widocznych pęknięć, rozwarstwień ani istotnych efektów powierzchniowych. Kontrolę wymiarów wykonano suwmiarką Mitutoyo 530-104 o działce elementarnej 0,05 mm, porównując otrzymane wyniki z dokumentacją techniczną. Sprawdzone wymiary były zgodne z przyjętymi założeniami projektowymi.

Chropowatość powierzchni określono przy użyciu laserowego mikroskopu konfokalnego OLYMPUS LEXT OLS4100. Badaniami objęto dwa reprezentatywne detale: drzwi gondoli oraz statecznik kierunkowy. Wartość średniej arytmetycznej chropowatości profilu R_a wyniosła odpowiednio 14,39 μm oraz 14,24 μm . Oba wyniki spełniły przyjęte w dokumentacji wymaganie $R_a \leq 20 \mu\text{m}$. Uzyskane mapy topografii i profile powierzchni pozwoliły dodatkowo ocenić stan powierzchni badanych elementów oraz nierówności powstałe podczas drukowania metodą FDM.

Przeprowadzona kontrola jakości wykazała, że zastosowane parametry druku pozwoliły uzyskać elementy spełniające przyjęte wymagania. Wykonane pomiary potwierdziły odpowiednią dokładność wymiarową oraz jakość powierzchni badanych części. Miało to duże znaczenie podczas późniejszego montażu modelu turbiny wiatrowej. Odpowiednie pasowanie poszczególnych elementów umożliwiło prawidłowe osadzenie łożysk, zamontowanie wału oraz połączenie części gondoli. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie kolejnego etapu pracy, którym był montaż kompletnej konstrukcji. Uzyskane wyniki potwierdziły również, że technologia FDM może być wykorzystywana do wytwarzania elementów przeznaczonych do budowy modeli demonstracyjnych o złożonej konstrukcji.

Montaż modelu przeprowadzono etapowo, rozpoczynając od wykonania i złożenia elementów przekładni stożkowej w przedniej części gondoli. Na etapie projektowania dobrano łożyska, uwzględniając ich wymiary, rodzaj występujących obciążeń oraz sposób montażu. W przekładni stożkowej zastosowano trzy łożyska kulkowe 6202 2RS, które umożliwiły swobodny obrót elementów. Przy ich doborze uwzględniono występowanie obciążeń promieniowych i osiowych. Zastosowano również pierścienie dystansowe, aby zapobiec

przesuwaniu się elementów podczas pracy. Następnie w segmentach gondoli osadzono dwa łożyska kulkowe 6805 2RS. Ich zadaniem było zapewnienie odpowiedniego podparcia i prowadzenia wału głównego oraz ograniczenie jego ugięć i drgań podczas pracy. Osadzenie łożysk wykonano z wykorzystaniem prasy ręcznej, zwracając uwagę na współosiowość i prawidłowe pasowanie. Do połączenia elementów konstrukcyjnych zastosowano śruby oraz, w wybranych miejscach, klej epoksydowy. Wykorzystano również pierścień osadczy, który zabezpieczał wał przed przesuwaniem się wzdłuż jego osi.

Osobno zmontowano i wstępnie zweryfikowano przekładnię planetarną. Płynność jej obrotu i poprawność zazębiania kół sprawdzono przy użyciu silnika elektrycznego N20 DC 3V. W dalszym etapie wał główny połączono z przekładnią oraz silnikiem prądu stałego 25GA-370 6V 100 RPM. Zastosowano także diodę LED imitującą lampę ostrzegawczą turbiny wiatrowej. Po zamknięciu obudowy wykonano końcowe próby działania, obejmujące kontrolę płynności pracy przekładni, obrotu wału i stabilności całej konstrukcji.

Podsumowanie

Uzyskano kompletny, zmontowany model gondoli turbiny wiatrowej z przekładnią, w którym poprawnie współpracują elementy wykonane metodą FDM i standardowe komponenty mechaniczne. Przeprowadzone próby wskazały, że poszczególne elementy zostały prawidłowo dopasowane, a zastosowane mechanizmy działały zgodnie z założeniami. Wykonany model może być wykorzystywany do celów demonstracyjnych i edukacyjnych, ponieważ umożliwia przedstawienie budowy oraz zasady działania wybranych mechanizmów turbiny wiatrowej. Szczególnie wartościowym rezultatem pracy jest praktyczne wykazanie, że prawidłowy dobór parametrów druku, kontrola jakości i świadome projektowanie pasowań muszą być traktowane jako powiązane etapy jednego procesu technologicznego.

Podsumowując, zrealizowana praca połączyła projektowanie CAD, technologię wytwarzania przyrostowego, przygotowanie dokumentacji i montaż układów mechanicznych. Osiągnięto zamierzony cel wykonania funkcjonalnego modelu, a zastosowana metoda FDM okazała się odpowiednia do prototypowania części o złożonej geometrii. Jednocześnie doświadczenia związane z korektą wymiarów i przerwaniem wydruku wskazują na rzeczywiste ograniczenia procesu. Opracowany model może służyć do przedstawienia budowy i zasad działania wybranych mechanizmów turbiny wiatrowej oraz jako punkt wyjścia do dalszych prac projektowych.