

OPTYMALNE PROJEKTOWANIE KOMPOZYTOWYCH ŁOPAT ELEKTROWNI WIATROWEJ

Eugeniusz ŚWITOŃSKI*, Mariola JURECZKO*, Arkadiusz MEŻYK*

* Katedra Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska ul. Konarskiego 18 A, 44-100 Gliwice

eugeniusz.switonski@polsl.pl, Mariola.Jureczko@polsl.pl

Streszczenie: Wymagania stawiane elektrowniom wiatrowym, tj. generowanie dużej mocy, wytrzymałość zmęczeniowa, czy niskie koszty materiałowe oraz produkcji, związane są z parametrami mającymi zarówno wartości ciągłe (jak np. grubość dźwigarów czy żeber), jak i dyskretne (np. liczba żeber usztywniających oraz ich rozmieszczenie wzdłuż rozpiętości łopaty). Dlatego też proces optymalizacyjny poprzedzający proces projektowania elektrowni wiatrowych jest przykładem procesu złożonego, wymagającego rozpatrywania wielu kryteriów jednocześnie. A zatem jest to proces związany z zagadnieniem optymalizacji wielokryterialnej, którego nie można rozwiązać stosując klasyczne metody optymalizacji.

1. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH ŁOPAT

Jednym z zasadniczych kryteriów, jakie powinna spełniać elektrownia wiatrowa, jest wytwarzanie przez nią możliwie jak największej mocy przy jak najmniejszych kosztach jej produkcji. Ponieważ wartość mocy wyjściowej elektrowni wiatrowej wzrasta trzykrotnie w stosunku do długości łopaty, dlatego produkowanie lekkich i coraz dłuższych łopat jest opłacalne, a ich odpowiedni dobór jest bardzo ważny (Hansen, 2002; Jureczko i Meżyk, 2003). Poza tym koszt produkcji łopat stanowi jedynie około 10 % całkowitego kosztu elektrowni wiatrowej, toteż wydatki na innowacje w konstrukcjach łopat, metodach ich wytwarzania oraz stosowanych materiałach są stosunkowo małym udziałem w całkowitych kosztach produkcji. Lżejsza i lepsza konstrukcyjnie łopata pozwala zmniejszyć wymagania stawiane piastom i wieżom, zmniejszając tym samym koszty produkcji i eksploatacji całej elektrowni.

W procesie projektowania łopat elektrowni wiatrowych duży nacisk kładzie się na zmniejszenie ich masy, co z kolei przyczynia się do zmniejszenia obciążeń masowych i bezwładnościowych łopaty. Podczas gdy średnica koła wiatrowego, a więc powierzchnia „zamiatania” wiatru, wzrasta proporcjonalnie do kwadratu długości łopaty, to jej masa, według reguły opartej na doświadczeniu, powinna wzrastać trzykrotnie. W praktyce jednak zależność ta została złagodzona poprzez zmiany postaci konstrukcyjnej łopat oraz rozwój metod ich wytwarzania, optymalizujących właściwości strukturalne laminatów, z których łopaty są wytwarzane.

Jednym ze sposobów zredukowania masy łopaty elektrowni wiatrowej jest zmiana jej postaci konstrukcyjnej. Goeij i inni (1999) w swej pracy przedstawiają różne koncepcje projektowania wnętrza łopaty, uwzględniające m.in. zmęczenie kompozytów obciążonych pozaosiowo w stosunku do kątów orientacji włókien. W publikacji tej znajdują się również opisy konstrukcji łopat, technik ich wytwarzania oraz materiałów, z jakich są wykonywane.

Innym sposobem zmniejszenia masy łopaty elektrowni wiatrowej, przy jednoczesnym zwiększeniu ich sztywności i trwałości, jest modyfikacja materiałów stosowanych na elementy konstrukcyjne łopat, tj. dźwigary, żebra i poszycie. I tak np. modyfikacje kompozytu, z którego wytwarzane jest poszycie, mogą polegać na zwiększeniu grubości i gęstości warstwy balsy, zwiększeniu udziału warstw zbrojeniowych, czy zmianie orientacji bądź rodzaju włókien. Kompozyty stosowane na dźwigary można modyfikować w podobny sposób.

2. MODEL NUMERYCZNY ŁOPATY ELEKTROWNI WIATROWEJ

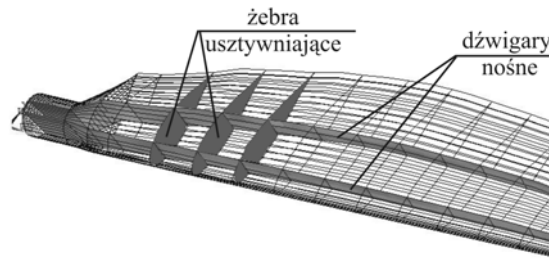
W celu opracowania modelu numerycznego łopaty elektrowni wiatrowej o cechach geometrycznych wyznaczonych na podstawie zmodyfikowanej metody Blade Element Method stworzono w języku APDL wsadowy plik parametryczny do programu Ansys®. W modelu tym wyselekcjonowano trzy grupy elementów: powłokę, dźwigary nośne i żebra usztywniające.

Wyselekcjonowanie elementów w modelu numerycznym łopaty umożliwiło zadanie im różnych grubości i danych materiałowych oraz zdefiniowanie różnych typów elementów. Poza tym możliwe było wyznaczanie naprężeń, odkształceń oraz masy poszczególnych elementów.

Wykonany model numeryczny łopaty składa się z 12343 elementów i z 10874 węzłów. Jako elementy skończone przyjęto powłokę 8-węzłową, która posiada 6 stopni swobody, co umożliwiło zamodelowanie kompozytu. Definiując kształt zastosowanego elementu skończonego zadaje się średnią lub dowolną grubość poszczególnych warstw materiałowych w każdym węźle, kąt ukierunkowania własności materiałowych poszczególnych warstw oraz właściwości ortotropowe materiałów z jakich wykonane są poszczególne warstwy. Na rys.1 przedstawiono częściowy widok struktury zewnętrznej modelu MES łopaty elektrowni wiatrowej. Natomiast na rys.2 przedstawiono jej strukturę wewnętrzną.



Rys. 1. Model strukturalny powłoki łopaty



Rys. 2. Model strukturalny łopaty z zaznaczeniem wyselekcjonowanych elementów

3. DOBÓR MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

W obliczeniach optymalizacyjnych przyjęto, iż łopata posiada konstrukcję samonośną opartą na szklanych tkaninach modułowych o wyraźnie ukierunkowanych właściwościach mechanicznych.

W modelu numerycznym łopaty wyselekcjonowano trzy elementy, dla których przyjęto różne właściwości materiałowe. Założono, iż żebra oraz dźwigary wykonane są z laminatu o n warstwach kompozytu włóknistego szkło – żywica epoksydowa, o ortotropowych właściwościach mechanicznych, przy czym poszczególne warstwy zorientowane są $\pm 45^\circ$. Do obliczeń przyjęto dane materiałowe zaczerpnięte z artykułu autorstwa Tita i innych (2001). Ponieważ grubości zarówno żeber jak i dźwigarów są w procesie optymalizacji zmiennymi projektowymi, to liczba warstw kompozytu uzależniona jest od wyznaczonych wartości zmiennych projektowych, i może wynosić od 10 do 28 warstw.

Natomiast dobierając materiał na poszycie, stworzono laminat składający się z 7 warstw różnych kompozytów: żelkot, laminat włókien szklanych rozmieszczonych przypadkowo w osnowie z żywicy epoksydowej, laminat włókien szklanych rozmieszczonych trójosiowo CDB340 w osnowie z żywicy epoksydowej, balsa, laminat włókien szklanych rozmieszczonych trójosiowo CDB340 w osnowie z żywicy epoksydowej, balsa, laminat włókien szklanych rozmieszczonych trójosiowo CDB340 w osnowie z żywicy epoksydowej. Do obliczeń przyjęto dane materiałowe zaczerpnięte z publikacji Griffina (2002).

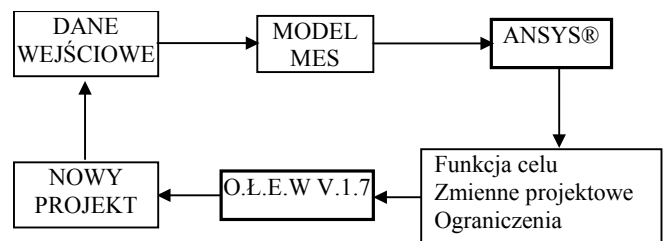
Grubości warstw z żelkotu i laminatu włókien szklanych rozmieszczonych przypadkowo w osnowie z żywicy epoksydowej przyjęto na podstawie posiadanych danych produkcyjnych. Natomiast grubości warstw balsy wynosiły odpowiednio 0.75% oraz 1.5% ciężkości w wyselekcjonowanym segmencie aerodynamicznym.

Grubość warstwy włókien A260 rozmieszczonych trójosiowo przyjęto jako 2% wartości zależności wysokości łopaty do jej szerokości. Dzięki tym założeniom grubość poszycia zmienia się proporcjonalnie wzdłuż rozpiętości łopaty, tj. poszycie jest najgrubsze przy nasadzie łopaty, (gdzie występują największe obciążenia) a najcieńsze przy jej końcówce. Odpowiada to rzeczywistym rozwiązaniom konstrukcyjnym.

Grubość warstwy laminatu CDB340 dobrano na podstawie obliczeń numerycznych.

4. OPRACOWANIE PAKIETU PROGRAMÓW KOMPUTEROWYCH DO OPTYMALNEGO PROJEKTOWANIA ŁOPAT

Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy opracowanego algorytmu obliczeń numerycznych, którego zadaniem jest wspomaganie procesu projektowania łopatek elektrowni wiatrowych. Algorytm ten zastosowano do wielokryterialnej optymalizacji dyskretno-ciągłej dla zagadnienia minimalizacji amplitud drgań. Programy komputerowe, w których zaimplementowano poszczególne etapy powyższego algorytmu, przygotowano w różnych środowiskach programowania komputerowego.



Rys. 3. Schemat blokowy obliczeń numerycznych

Ważnym aspektem efektywności prowadzonych badań było opracowanie odpowiedniego sposobu wymiany

danych i wzajemnej współpracy pomiędzy komercyjnym oprogramowaniem ANSYS® oraz oprogramowaniem autorskim.

Moduł z zaimplementowanym procesem optymalizacyjnym, z wykorzystaniem algorytmu genetycznego, (po jego modyfikacjach mających na celu dostosowanie go do zagadnienia optymalizacji dyskretno – ciągłej) napisano w środowisku Delphi, poprzez stworzenie autorskiego programu O.Ł.E.W. v.1.7. Program ten współpracuje z programem Ansys®, w którym tworzony jest model numeryczny łopaty, o cechach geometrycznych wyznaczonych na podstawie procesu optymalizacyjnego, w celu wyznaczenia własności wytrzymałościowych i modalnych łopaty. Aby współpraca ta odbywała się szybko, bez dodatkowych utrudnień, tj. bez konieczności każdorazowego tworzenia modelu numerycznego łopaty za pomocą GUI w programie Ansys®, stworzono w języku APDL wsadowy plik parametryczny. W pliku tym zapisano cechy geometryczne łopaty jak zmienne parametryczne. Stworzenie tego pliku znacznie uprościło proces optymalizacyjny, jednocześnie znacznie skracając czas obliczeń.

5. SFORMUŁOWANIE ZADANIA OPTIMALIZACJI

Zasadniczym celem procesu optymalizacyjno – konstrukcyjnego łopat elektrowni wiatrowych, ze względu na zjawiska dynamiczne jakie towarzyszą eksploatacji elektrowni, jest zapewnienie odpowiednich charakterystyk dynamicznych układu, co szeroko zostało omówione w monografii Mężyka i Jureczko (2006). Charakterystyki dynamiczne układu określane są m.in. poprzez częstotści własne oraz widmowe funkcje przejścia, gdzie częstotści nietumionych drgań własnych wyznacza się z zależności:

$$\det(\mathbf{K} - \mathbf{M}\omega^2) = 0, \tag{1}$$

a widmową funkcję przejścia z zależności:

$$\mathbf{H}(j\omega) = (-\mathbf{M}\omega^2 + \mathbf{C}j\omega + \mathbf{K})^{-1} \tag{2}$$

gdzie: \mathbf{M} – macierz bezwładności, \mathbf{K} – macierz sztywności, \mathbf{C} – macierz tłumienia, ω – częstotść drgań własnych.

Z powyższych wzorów wynika, że przy pominięciu tłumienia, na własności dynamiczne układu wpływa postać i wartości elementów macierzy sztywności \mathbf{K} i macierzy bezwładności \mathbf{M} . Biorąc to pod uwagę, kryterium optymalizacyjne należałoby sformułować w postaci funkcji pozwalającej na modyfikacje tych macierzy.

Macierz sztywności można modyfikować wykorzystując, np. zależność na ugięcie statyczne:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{x} \Rightarrow \mathbf{x} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{F} \tag{3}$$

gdzie: \mathbf{F} – macierz kolumnowa sił uogólnionych, \mathbf{x} – macierz kolumnowa przemieszczeń uogólnionych.

A zatem problem optymalizacji można sformułować jako minimalizację przemieszczenia końcówki łopaty w jej kierunku poprzecznym. Modyfikując macierz sztywności jednocześnie modyfikuje się macierz bezwładności.

Wariantem klasycznym, bardzo często stosowanym przy optymalizacji cech konstrukcyjnych układów inżynierskich, jest minimalizacja masy układu.

Osobne rozpatrywanie powyższych kryteriów może prowadzić do sprzecznych rozwiązań, tzn. polepszenie wartości jednego z kryteriów może spowodować pogorszenie wartości drugiego. Przyjmując zatem jako kryterium optymalizacji jednoczesną minimalizację przemieszczenia końcówki łopaty oraz minimalizację całkowitej masy łopaty, zostaną spełnione wszystkie wcześniej wymienione wymagania stawiane łopatom elektrowni wiatrowej.

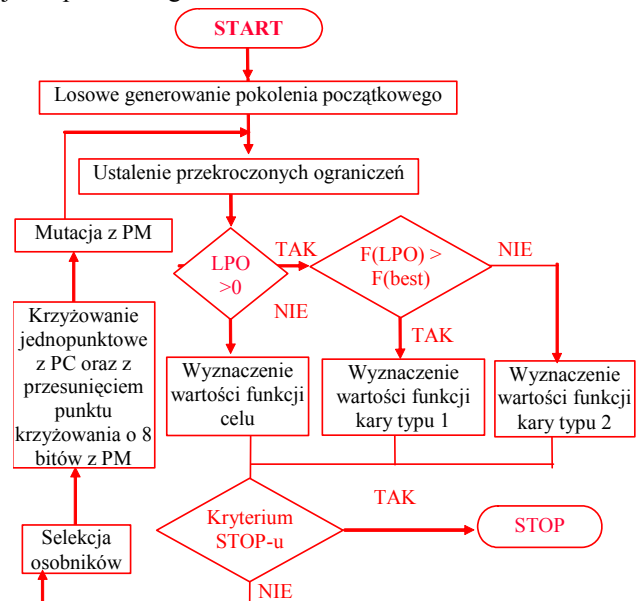
W celu wskazania najbardziej efektywnego podejścia do przedstawionego problemu optymalnego projektowania łopat, przeprowadzono trzy warianty obliczeń:

- Wariant I – wybranie kryterium minimalizacji masy łopaty jako funkcji celu i wyrażenie pozostałych kryteriów w formie ograniczeń;
- Wariant II – wybranie kryterium minimalizacji przemieszczenia końcówki łopaty jako funkcji celu i wyrażenie pozostałych kryteriów w formie ograniczeń;
- Wariant III – utworzenie funkcji celu, będącej sumą ważoną wartości dwóch najważniejszych kryteriów, tj. minimalizacji masy i przemieszczenia końcówki łopaty i wyrażenie pozostałych kryteriów w formie ograniczeń.

W procesie optymalizacyjnym jako zmienne decyzyjne rozpatrywano: grubość żeber (oznaczoną symbolem t_{sr}), grubość dźwigarów (oznaczoną t_{sw}), liczbę żeber usztywniających (oznaczoną n_{sr}) i ich rozmieszczenie wzdłuż rozpiętości łopaty.

6. MODYFIKACJA PROSTEGO ALGORYTMU GENETYCZNEGO

Ze względu na występowanie w rozpatrywanym zadaniu optymalizacyjnym zmiennych o charakterze zarówno ciągłym, jak i dyskretnym, prosty algorytm genetyczny musiał zostać zmodyfikowany w celu przystosowania go do rozwiązywanego, postawionego problemu optymalizacyjnego. Modyfikacja ta dotyczyła przede wszystkim operacji równomiernego krzyżowania jednopunktowego.



Rys. 4. Schemat blokowy zasady działania zmodyfikowanego algorytmu genetycznego

LITERATURA

7. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

W Tab. 1 przedstawiono porównanie własności mechanicznych i modalnych łopaty elektrowni wiatrowej o cechach konstrukcyjnych pozyskanych z literatury (przed optymalizacją) oraz uzyskanych w wyniku przeprowadzonego procesu optymalizacyjnego dla wybranych wariantów optymalizacyjnych.

Tab. 1. Porównanie własności mechanicznych i modalnych łopaty przed i po optymalizacji

Funkcja celu		Model teoretyczny	Wariant I	Wariant II	Wariant III
Zmienne projektowe	t _{sr}	0.06	0.02	0.0956	0.0960
	t _{sw}	0.06	0.0331	0.0966	0.0702
	n _{sr}	27	4	17	14
Masa łopaty [kg]		1119.3	831.786	1487.2	1240.7
Max naprężenie [MPa]		227	322	164	204
Max odkształcenie [%]		0.4842	0.5876	0.3376	0.4438
Przemieszczenie końcówki łopaty [m]		6.244	5.987	4.401	5.493

8. WNIOSKI

Na podstawie wyników przedstawionych m.in. w Jureczko M. (2006) oraz przeprowadzonych dla wszystkich trzech wariantów optymalizacyjnych obliczeń numerycznych symulacji numerycznych drganiowych sygnałów przemieszczeń wybranych punktów łopaty z wykorzystaniem modeli zredukowanych sformułowano następujące wnioski szczegółowe:

- zastosowanie minimalizacji masy jako kryterium optymalizacji doprowadziło do nieznacznego zmniejszenia wartości amplitud drgań łopaty przy jednoczesnej redukcji jej masy;
- zastosowanie minimalizacji przemieszczenia końcówki łopaty jako kryterium optymalizacji doprowadziło do znacznego zredukowania wartości amplitud drgań jednak przy jednoczesnym zwiększeniu jej masy;
- zastosowanie w procesie minimalizacji wagowej funkcji celu (rozważane rozwiązanie paretooptymalne) doprowadziło do zmniejszenia wartości amplitud drgań własnych łopaty przy jednoczesnym jedynie nieznacznym wzroście jej masy.

A zatem rozważane rozwiązanie paretooptymalne to rozwiązanie stanowiące kompromis pomiędzy koniecznością zapewnienia odpowiedniej sztywności łopaty a dążeniem do projektowania łopat o jak najmniejszej masie.

Podsumowując przeprowadzone badania optymalizacyjne można stwierdzić, że zastosowanie algorytmów genetycznych umożliwiło efektywne kształtowanie charakterystyk dynamicznych łopaty elektrowni wiatrowej, powodując znaczne zmniejszenie amplitud jej drgań.

1. **Goeij W. C., Tooren M. J. L., Beukers A.** (1999), Implementation of bending torsion coupling in the design of a wind turbine rotor – blade. *Applied Energy*, Vol. 63, p. 191 – 207.
2. **Griffin D. A.** (2002), *Blade system design studies. Volume I: Composite technologies for large wind turbine blades.* SAND2002-1879, Unlimited Release.
3. **Hansen Martin O. L.** (2002), *Aerodynamics of wind turbines*, Published by James & James.
4. **Jones R. M.** (1999), *Mechanics of composite materials*, 2nd edition, Taylor & Francis, Inc.
5. **Jureczko M.** (2006), *Optymalizacja wielokryterialna łopat wirnika elektrowni wiatrowej ze względu na minimalizację drgań*, Rozprawa doktorska, Gliwice 2006.
6. **Jureczko M., Mężyk A.** (2003), Dobór cech geometrycznych łopaty elektrowni wiatrowej o profilu typu Clark Y. *Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej*, 20/2003, 197 – 203.
7. **Mężyk A., Jureczko M.** (2006), *Monograph Multidisciplinary optimization of the wind turbine blade with respect to minimize vibrations*, Publishers of the Silesian University of Technology, Gliwice 2006.
8. **Tita V., Carvalho J., Lirani J.** (2001), A procedure to estimate the dynamic behavior of fiber reinforced composite beams submitted to flexural vibration, *Journal of Mat. Res.* Vol. 4, no 4, 191- 207, São Carlos.

OPTIMAL DESIGN OF THE COMPOSITE WIND TURBINE BLADE

Abstract: The optimal design of the wind turbine blade involves many requirements, for example generating the large output, assurance stability of the blade structure or assurance low material costs and production. These requirements are connected with parameters of continuous nature and discrete nature. During constructional process of the wind turbine blade we have to consider many aspects, what is the reason of complexity of the problem of choice of optimal design features of the blade. This problem requires use of the multicriteria optimization methods.