

numer preprint

na prawach rękopisu

POLITECHNIKA WROCLAWSKA

Dwuwirnikowa mini siłownia wiatrowa

mgr inż. Marcin Dębowski

PRACA DOKTORSKA

Promotor:

prof. dr hab. inż. Leszek Romański

Wrocław 2015

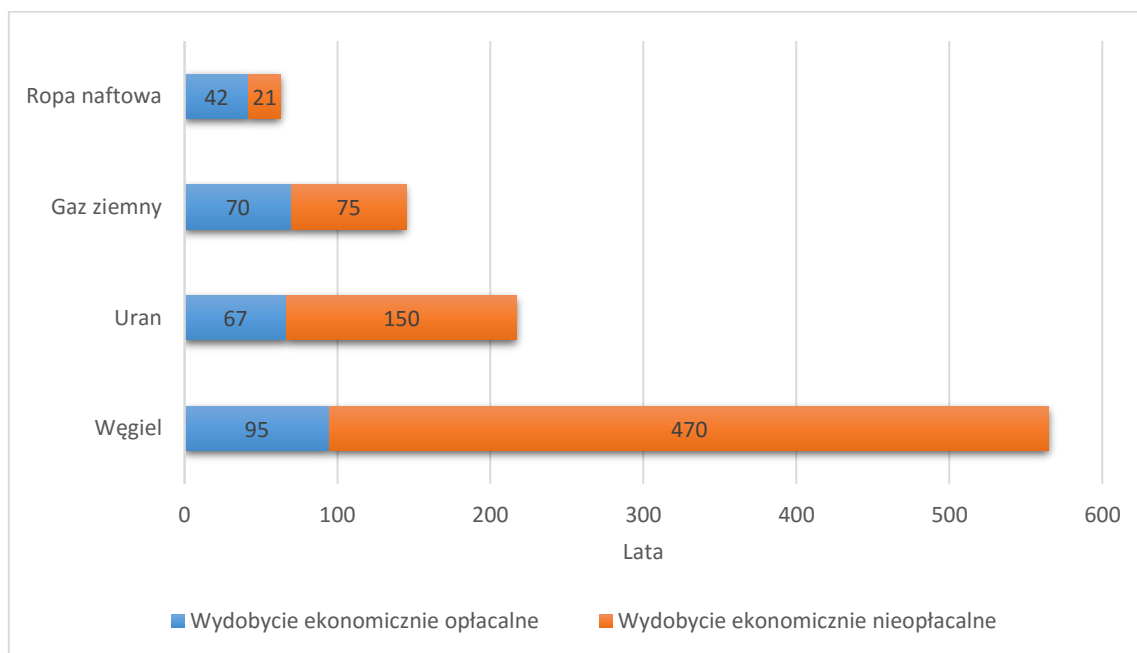
Spis treści

1.	Wstęp.....	4
1.1.	Historia elektrowni wiatrowych.....	7
1.2.	Współczesne konstrukcje elektrowni wiatrowych.....	12
1.2.1.	Rodzaje elektrowni wiatrowych.....	12
1.2.2.	Generatory elektryczne.....	14
1.2.3.	Sposoby regulacji prędkości.....	17
1.3.	Energetyka wiatrowa na świecie.....	19
1.4.	Sztuczne Sieci Neuronowe.....	22
1.4.1.	Zasada działania sztucznych sieci neuronowych.....	23
2.	Cel i zakres pracy.....	27
3.	Warunki i metodyka badań.....	29
3.1.	Przedmiot badań.....	29
3.2.	Stanowisko badawcze.....	32
3.3.	Metodyka badań.....	37
3.3.1.	Regulacja strumienia powietrza w tunelu aerodynamicznym.....	37
3.3.2.	Badania mini elektrowni wiatrowych.....	40
3.3.3.	Sztuczne sieci neuronowe.....	43
3.4.	Analiza błędów pomiarowych.....	45
4.	Wyniki przeprowadzonych badań i analiz.....	47
4.1.	Równomierność rozkładu strugi w tunelu aerodynamicznym.....	47
4.2.	Badanie jednowirnikowej elektrowni wiatrowej.....	57
4.3.	Badanie dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej.....	63
4.3.1.	Analiza statystyczna wyników badań pracy dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej.....	65
4.3.2.	Optymalizacja pracy dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej.....	69
4.3.3.	Podsumowanie badań dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej.....	84

4.4. Porównanie pracy jedno- oraz dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej	86
4.5. Modelowanie matematyczne pracy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej.....	93
4.5.1. Modelowanie pracy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej przy użyciu sztucznych sieci neuronowych	93
4.5.2. Optymalizacja parametrów pracy dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej przy użyciu sztucznej sieci neuronowej	97
4.5.3. Podsumowanie modelowania matematycznego przy użyciu sztucznych sieci neuronowych.....	107
5. Wnioski	109
6. Literatura	111
7. Spis tabel	118
8. Spis rysunków	119

1. Wstęp

Obserwowane w ostatnich dwudziestu latach zwiększone zapotrzebowanie na energię, a w szczególności energię elektryczną, spowodowane jest gwałtownym rozwojem cywilizacyjnym krajów rozwiniętych (Ameryka Północna, Europa, Japonia), a także rozwijających się gospodarczo Chin i Indii. W ciągu ostatnich 10 lat ilość generowanej, a tym samym zużywanej, energii elektrycznej w Chinach wzrosła z 1910,6 TWh do 5361,6 TWh, co skutkuje tym, że kraj ten produkuje 23,2% energii elektrycznej na świecie [BP Statistical Review of World Energy 2014]. Podobnie jak gospodarka chińska, gospodarki większości krajów bazują na energii wytworzonej na bazie źródeł konwencjonalnych (węgiel, ropa, gaz ziemny). Pomimo tego, że dokonuje się nowych odkryć zasobów paliw konwencjonalnych, to jak wynika szacunków wystarczą one na nie więcej niż 100 lat [World Energy Council 2015]. Według raportu opublikowanego przez Niemieckie Ministerstwo Gospodarki i Technologii oraz Środowiska, Ochrony Przyrody i Bezpieczeństwa Jądrowego, wynika, że jednym z pierwszych surowców, którego zabraknie będzie ropa naftowa. Zasoby węgla wystarczą na około 100 lat. Okresy czasowe na jakie wystarczy ropy, gazu ziemnego, uranu oraz węgla zostały przedstawione na rysunku 1. Każdy ze słupków został podzielony na część ekonomicznie opłacalną i nieopłacalną, pod względem wydobycia. Należy tutaj podkreślić, że część zasobów w chwili obecnej traktowanych jako ekonomicznie nieopłacalne, może zostać za kilka lat zakwalifikowana do pierwszej grupy – opłacalne.



rys. 1. Szacowane w latach ilości paliw kopalnych [Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2012]

Surowców płynnych, a szczególnie ropy, za około 50 lat praktycznie nie będzie, gdyż jako źródła nieodnawialne zostaną wyczerpane. Nasuwa się więc pytanie czym zastąpić te klasyczne źródła energii? Teoretycznie odpowiedź jest znana – powinny być to źródła odnawialne, które nigdy się nie wyczerpią.

W ustawie Prawo energetyczne Odnawialne Źródła Energii (OŹE) zdefiniowano jako **„źródła wykorzystujące w procesie przetwarzania energię wiatru, promieniowania słonecznego, geotermalną, fal, prądów i pływów morskich, spadku rzek oraz energię pozyskiwaną z biomasy, biogazu wysypiskowego, a także z biogazu powstałego w procesach odprowadzania lub oczyszczania ścieków albo rozkładu składowanych szczątków roślinnych i zwierzęcych”** [<http://www.pgeeo.pl/energia-odnawialna>]

W obszarze naszego kraju produkcję energii elektrycznej z OŹE obejmują następujące źródła [URE 2014]:

- elektrownie wiatrowe,
- elektrownie wodne,
- elektrownie biogazowe,
- elektrownie biomasowe,
- elektrownie słoneczne.

W wyniku powyższego niezbędne jest poszukiwanie nowych rozwiązań, które pozwolą na zastąpienie dotychczasowo wykorzystywanych źródeł energii.

Wśród OŹE jednym z najbardziej popularnych w Europie są elektrownie wiatrowe. Spowodowane jest to potencjałem tej energii. W skali Światowej szacuje się, że energii wiatru jest 72 TW, co więcej jest ona łatwo dostępna [Flaga 2008, Szlachta i in. 2009]. Znane typy siłowni wiatrowych powoli osiągają swoją doskonałość techniczną i możliwości związane z pozyskiwaniem ilości energii elektrycznej [Betz 1966], którą są w stanie oddać do sieci elektroenergetycznej. Konstrukcje wież osiągają już 120 – 140 m i praktycznie nie powinny być wyższe ze względu na fakt, że każdy dodatkowy metr oznacza niewspółmierny wzrost kosztów inwestycyjnych [Ostrowski 2014]. Według Ostrowskiego optymalna wysokość wieży jest funkcją:

- kosztu wieży na metr wysokości,

- zmiany prędkości wiatru w zależności od wysokości nad ziemią,
- ceny, za jaką właściciel elektrowni będzie sprzedawał energię.

Również stosowane generatory nie osiągną znaczącej poprawy wydajności. Dla dalszego dynamicznego rozwoju branży, związanej z budową elektrowni wiatrowej, nieodzwonne jest stworzenie nowej, innowacyjnej, bardziej wydanej konstrukcji, która będzie się radykalnie różniła od obecnie stosowanych. Wydaje się, że jedną z takich propozycji może być dwuwirnikowa elektrownia wiatrowa, która powinna umożliwić wytyczenie nowego kierunku rozwoju odnawialnych źródeł energii zasilanych energią wiatru. Jak wynika z pracy Pawlaka [Pawlak 2013; Seungmin 2010] nowa konstrukcja może się charakteryzować 3,2-krotnym wzrostem wydajności, w stosunku do klasycznej konstrukcji jednowirnikowej, dla małych prędkości wiatru, natomiast dla dużych prędkości wiatru wydajność rośnie 1,8 razy.

Obiecujący wzrost wydajności choć jednego ze źródeł odnawialnych spowoduje pozytywny wpływ na środowisko naturalne. Światowa Organizacja Zdrowia (World Health Organization) definiuje powietrze zanieczyszczone jako takie, którego skład chemiczny może negatywnie wpłynąć na zdrowie człowieka, zwierzęta oraz inne elementy środowiska (gleba, woda). Ze względu na fakt, że większość energii pozyskiwanej na świecie pochodzi z paliw kopalnych [Europejska Agencja Środowiska 2008], rośnie ilość zanieczyszczonego powietrza. Jest to spowodowane powstawaniem tlenków węgla, dwutlenku siarki, tlenków azotu oraz pyłów, w trakcie spalania najpopularniejszych paliw [Szargut 1973, Kamiński 2014]. Pomimo zastosowania zaawansowanych metod usuwania tych zanieczyszczeń ze spalin, część z nich przedostaje się do atmosfery powodując zanieczyszczenie środowiska naturalnego [Europejska Agencja Środowiska 2008]. Wydaje się, że jedynym skutecznym sposobem zahamowania tego procesu, jest wstrzymanie emisji szkodliwych związków, co jednak wiąże się z zaprzestaniem produkcji energii. Możliwe jest jednak znaczące obniżenie emisji dzięki większemu udziałowi odnawialnych źródeł energii, w światowym rynku energii, które w trakcie pracy nie emitują zanieczyszczeń do środowiska.

Pod wpływem coraz większej degradacji środowiska naturalnego i presji społecznej powstało wiele aktów prawnych mających na celu ograniczyć ten proces. Najbardziej popularnym jest przyjęty w marcu 2007, przez Parlament Europejski i przywódców krajów członkowskich UE, pakiet „3x20%”. Jego podstawowe cele to:

- redukcja emisji gazów cieplarnianych o 20% w stosunku do poziomu z 1990 roku,

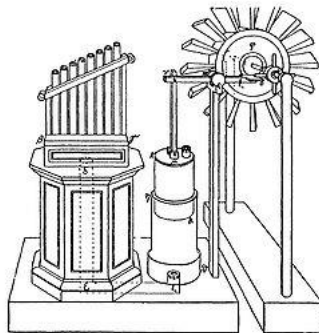
- zmniejszenie zużycia energii o 20% w stosunku do prognoz dla UE na 2020 rok,
- zwiększenie do 20% udziału OZE w całkowitym zużyciu energii w UE, w tym zwiększenie udziału OZE w transporcie do 10%.

Wszystkie założenia pakietu mają zostać wypełnione do 2020 roku, co więcej Komisja Europejska zaproponowała nowy, bardziej ambitny, cel, a mianowicie obniżający emisję gazów cieplarnianych o 40% do roku 2030. Właściwie wszystkie trzy punkty mogą i są realizowane poprzez wprowadzanie odnawialnych źródeł energii.

1.1. Historia elektrowni wiatrowych

Energia wiatru wykorzystywana jest od chwili kiedy służyła ludziom jako źródło napędu dla łodzi. W następnej kolejności służyła do mielenia ziarna, czy też przepompowywania wody.

Wzmianki o chęci wykorzystania darmowej energii pochodzą z XVII wieku przed naszą erą. Wtedy to Babiloński Cesarz Hammurabi planował użyć energii wiatru jako napęd systemu nawadniającego pola. Pierwszą udokumentowaną maszyną napędzana energią wiatru był Wiatrak Herona przedstawiony na rysunku 2 [Drachmann 1961, Lohrmann 1995]. Konstrukctorem jest grecki wynalazca Heron z Alexandii. Konstrukcja powstała w 1 wieku naszej ery i napędzała organy wodne.

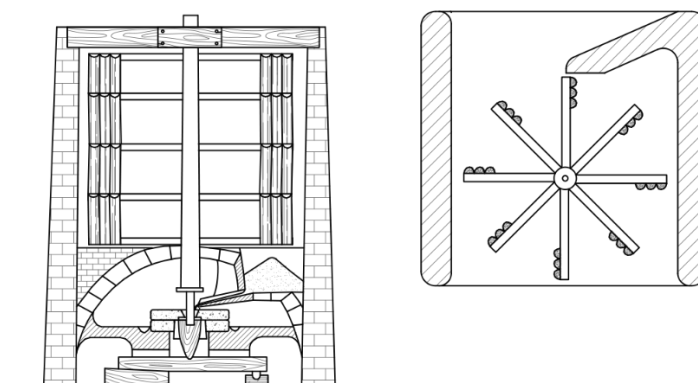


rys. 2. Wiatrak Herona

Szersze wykorzystanie wiatraków przypada na okres średniowiecza. W źródłach historycznych nie ma jednoznacznej odpowiedzi, czy konstruktorami pierwszego wiatraka byli Chińczycy czy Persowie [Obrzut 2007]. Pierwsze praktyczne zastosowanie wiatraków zarejestrowano pomiędzy VII, a IX wiekiem w Sistan, regionie położonym w południowej Azji, we wschodniej części Wyżyny Irańskiej. Ta geograficzno – historyczna kraina znajduje się na terytorium Iranu, Afganistanu i Pakistanu. Były to wiatraki o pionowej osi obrotu. Do długiego

wału napędowego przymocowanych było od 6 do 12 trójkątnych żagli. Maszyna wykorzystywana była do mielenia ziarna, przepompowywania wody oraz w przemyśle cukrowym [Hassan, Hill 1986].

Równolegle do konstrukcji „żaglowej” powstał wiatrak typu perskiego. Jego rozwój również przypada na okres pomiędzy VII, a IX w. Konstrukcja ta również było wiatrakiem o pionowej osi obrotu, jednak w przeciwieństwie do wiatraków z regionu Sistan, celem poprawienia efektywności działania, zastosowano w nich przesłonę (rys. 3) zakrywającą połowę koła wiatrowego [Mehren 1866]. Tak jak poprzednich konstrukcjach, ta również służyła do mielenia ziarna oraz przepompowywania wody.



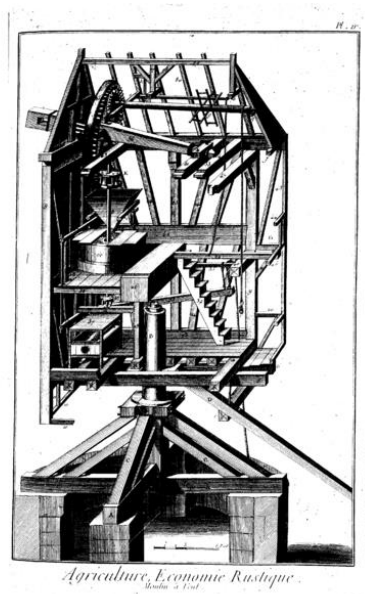
rys. 3. Wiatrak typu perskiego [Mehren 1866]

Dopiero w 1180 roku udokumentowano pierwszy działający wiatrak w Europie w miejscowości Duchy w Normandii [Lubośny 2006]. W przeciwieństwie do regionów azjatyckich, w Europie w czasach średniowiecza popularniejsze były wiatraki o poziomej osi obrotu. Do najpopularniejszych należały:

- wiatrak kozłowy (koźlak),
- Paltrak,
- wiatrak holenderski (holender).

Najstarszym i zarazem najbardziej prymitywnym był koźlak (rys. 4). Ojczyzny tej konstrukcji należy szukać w XII w. w Belgii lub Francji. Najbardziej charakterystycznym elementem, od którego ten typ wiatraka wzięł nazwę, jest tzw. kozioł, czyli drewniana konstrukcja umożliwiająca obrót wiatraka. Pierwsze konstrukcje wykonywane były w całości z drewna. W wyniku udoskonaleń drewniany kozioł został zastąpiony murowanym z cegieł lub kamienia, a w późniejszym okresie z betonu. Cała konstrukcja, dzięki posadowieniu na koźle,

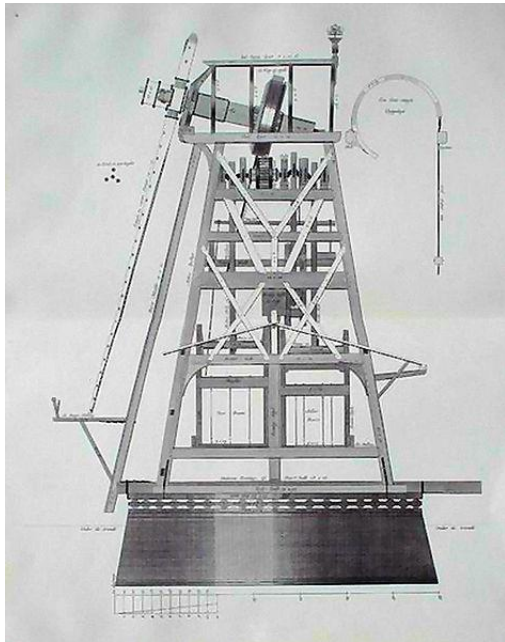
była ruchoma. Umożliwiało to nastawianie jej prostopadle do kierunku wiatru. Czynność tę wykonywano za pomocą dyszla o długości 8 – 9 m. Jako siły napędowej wykorzystywano kołowrót albo konie. Prędkość obrotową koła wiatrowego regulowano poprzez dodawanie albo odejmowanie elementów (tzw. klepek) skrzydeł.



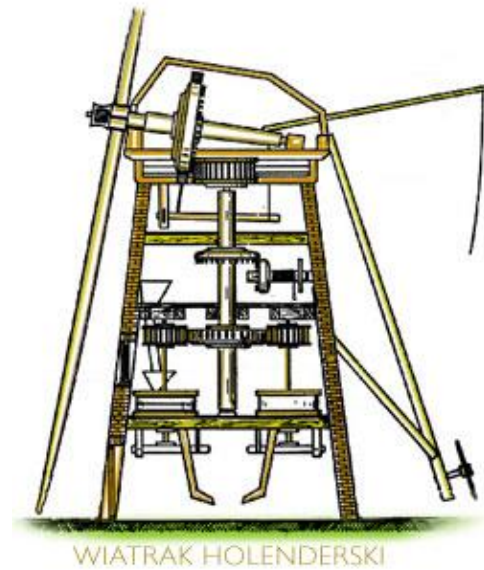
rys. 4. Schemat budowy wewnętrznej koźlaka, rok 1762 [Diderot et d'Alembert 1762]

Paltrak to zbliżona konstrukcja do koźlaka. Identycznie, jak w opisanym powyżej wiatraku, cała konstrukcja jest obrotowa, co umożliwiało ustawienie jej na wiatr. Różnice w konstrukcji są drobne i dotyczą dolnej części wiatraka (rys. 5). W porównaniu do koźlaka, paltrak był konstrukcją zdecydowanie stabilniejszą i bardziej odporną na silny wiatr. Mechanizm obrotowy umieszczony został na całym obwodzie. Dzięki zastosowaniu rolek łatwiejsze było też obracanie całej konstrukcji. W nowszych budowlach wykorzystano nawet „mechanizm wiatrowy” do obracania wiatraka.

Rozwój technologii pozwolił na udoskonalenie konstrukcji, a tym samym stworzenie wiatraka holenderskiego. W przeciwieństwie do dwóch poprzednich, budowla ta posiadała nieruchomy korpus. Częścią ruchomą była tylko wieżyczka z kołem wiatrowym (rys. 6). Dzięki zmniejszeniu masy części ruchomej oraz zastosowanie przekładni, zmiana położenia koła wiatrowego odbywała się przy użyciu korby, co bardzo ułatwiało obsługę. W późniejszych konstrukcjach stosowano drugi mały wiatrak, zamontowany po przeciwległej stronie wieży, służący do samoczynnego nastawiania konstrukcji na wiatr. Pomimo wielu zalet i zaawansowanej, jak na tamte czasy, technologii, wiatrak ten nigdy nie zastąpił najbardziej popularnych w Polsce koźlaków.

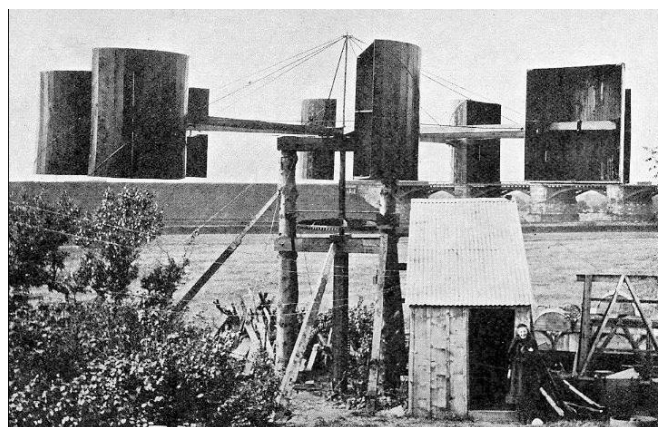


rys. 5. Schemat budowy paltraka [Groot volkomen Moolenboek]



rys. 6. Wiatrak holenderski [http://www.wiatrak.nl]

Pomimo dynamicznego rozwoju elektryczności w XIX wieku, w tym wynalezienie i opatentowanie maszyny trójfazowej przez Nikole Tesle [Šarboh 2006], dynamiczny rozwój wiatraków, wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej, przypada dopiero na końcówkę XX w. Pierwsza elektrownia wiatrowa produkująca prąd została uruchomiona w lipcu 1887 roku. Jej twórcą był James Blyth, profesor Anderson's College w Glasgow [Price 2005]. Konstrukcja (rys. 7) miała 10 metrów wysokości. Łopaty wirnika wykonane były z materiału wykorzystywanego do produkcji żagli. Elektrownia ta połączona była z akumulatorami wymyślonymi przez Camille Alphonse Faure, a energię wykorzystywano do oświetlenia, tym samym czyniąc dom profesora pierwszym na świecie zasilanym prądem elektrycznym wytworzonym przez generator napędzany turbiną wiatrową [Shackleton 2004].



rys. 7. Turbina wiatrowa o pionowej osi obrotu skonstruowana przez James'a Blyth'a [http://www.taplondon.co.uk]

Równolegle, w Stanach Zjednoczonych, a dokładniej w miejscowości Cleveland mieszczącej się w stanie Ohio, Charles F. Brush skonstruował i w 1886 roku uruchomił własną elektrownię wiatrową [Anon 1890]. Była to konstrukcja o poziomej osi obrotu z 144 łopatom. Średnica wirnika wynosiła 17 m, a wysokość 18 m. Moc zainstalowanego generatora wynosiła 12 kW [Encyclopedia of Energy 2007]. Energia wykorzystywana była do ładowania akumulatorów albo do zasilania 100 żarówek, trzech lamp łukowych lub silników w laboratorium Brusha.

Rozwój energetyki wiatrowej w XX wieku można podzielić na dwa okresy:

- 1900 r. – 1973 r. – rywalizacja elektrowni wiatrowych z elektrowniami zasilanymi paliwami kopalnymi,
- 1973 r. – do dzisiaj – okres intensywnego rozwoju konstrukcji i wspierania odnawialnych źródeł energii.

W pierwszym okresie liderem była Dania. Już 1908 roku na terenie kraju pracowały 72 turbiny o mocy od 5 do 25 kW. Największa posiadała czterołopatowy wirnik o średnicy 23 m i posadowiona była na 24 m wieży [Encyclopedia of Energy 2007].

Pierwsza fabryka seryjnie produkująca turbiny wiatrowe powstała w 1927 roku. Założycielami byli bracia Jacobs. Przez pierwsze 13 lat istnienia fabrykę opuściło ponad 30 000 małych turbin wiatrowych, które były wykorzystywane do pracy w systemach wydzielonych, w miejscach gdzie jeszcze nie powstała sieć elektroenergetyczna [Energy Encyclopedia 2007].

Granicę 1 MW mocy znamionowej przekroczone w 1941 roku w Castleton, Vermont, w USA. Dwułopatowa konstrukcja (rys. 8) została zaprojektowana przez Palmera Cassletta Putnama, a wykonawstwem zajęła się firma S. Morgan Smith Company. Średnica wirnika wynosiła około 53 m, wieża miała natomiast około 36 m wysokości. Całość dopełniał trójfazowy generator synchroniczny o mocy 1 250 kW, wytwarzający napięcie 2 400 V o częstotliwości 60 Hz, połączony z siecią elektroenergetyczną [Kiplinger's Personal Finance 1981]. Niestety, ze względu na ograniczenia wynikające z II Wojny Światowej do jej budowy użyto słabej jakości materiałów, co skróciło eksploatację elektrowni do 1 100 godzin. Największą, pod względem generowanej mocy, elektrownią wiatrową pozostała aż do roku 1978.



rys. 8. Pierwsza na świecie elektrownia wiatrowa o mocy powyżej 1 MW [NREL Image Gallery]

Powstały w roku 1973 kryzys naftowy, w wyniku którego gwałtownie wzrosły ceny ropy naftowej i gazu ziemnego, zmusił świat do gwałtownego poszukiwania innych źródeł energii. Głównym powodem tych działań była wojna izraelsko– arabska i nałożenie przez eksporterów arabskich embarga na Stany Zjednoczone [Asmus 2001]. Dwa lata później NASA uzyskała finansowanie programu nastawionego na rozwój turbin wiatrowych. W wyniku badań powstało 13 eksperymentalnych turbin. Program ten doprowadził do powstania wielu technologii wykorzystywanych we współczesnych elektrowniach wiatrowych. Wśród najważniejszych należy wymienić rurową konstrukcję wieży, generator o zmiennej prędkości obrotowej, czy też nowe materiały użyte do produkcji łopat [Viterna, Janetzki 1982].

Największy rozwój energetyki wiatrowej nastąpił w czasie ostatnich 20 lat. Spowodowały to między innymi regulacje prawne, które kraje najbardziej rozwinięte zaczęły wprowadzać w celu ograniczenia degradacji środowiska spowodowanej produkcją energii z paliw kopalnych [Jankowska i in. 2010]. Wzrastała też świadomość ekologiczna społeczeństw, co również wymusiło wprowadzanie i korzystanie z odnawialnych źródeł energii.

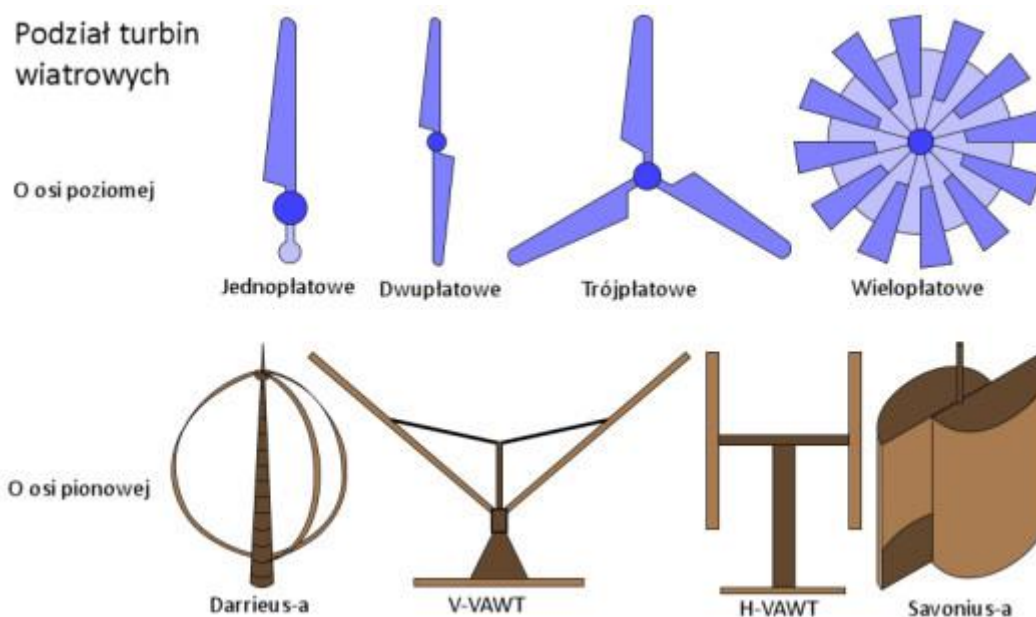
1.2. Współczesne konstrukcje elektrowni wiatrowych

1.2.1. Rodzaje elektrowni wiatrowych

Klasyfikacji turbin wiatrowych można dokonać na wiele sposobów. Jednym z najpopularniejszych, a zarazem najbardziej oczywistym, jest rozróżnienie ich ze względu na konstrukcję wirnika.

Wyróżniamy dwa podstawowe typy konstrukcji (rys. 9):

- HAWT (z ang. Horizontal Axis Wind Turbine – siłownie wiatrowe o poziomej osi obrotu),
- VAWT (z ang. Vertical Axis Wind Turbine – siłownie wiatrowe o pionowej osi obrotu).



rys. 9. Rodzaje turbin wiatrowych [http://www.zielonaenergia.eco.pl]

Oś obrotu należy rozumieć jako oś, wokół której obraca się wirnik. Oś obrotu elektrowni HAWT jest równoległa do powierzchni gruntu i strumienia powietrza. Dalszą klasyfikację można dokonać na podstawie ilości łopat wirnika. Rozróżniamy wirniki jedno-, dwu-, trzy- i wielopłatowe. Najpopularniejsze, ze względu na swoje właściwości aerodynamiczne, są siłownie trójłpatowe [Sathyajith 2006].

W siłowniach VAWT oś obrotu jest prostopadłą do gruntu i strumienia powietrza. Zdecydowaną przewagą tej rodziny turbin jest to, że są niewrażliwe na zmieniający się kierunek wiatru i nie ma potrzeby ustawiania ich „na wiatr” [Werner 1991]. Do chwili obecnej nie znalazły one szerszego zastosowania ze względu na małą sprawność i wydajność energetyczną, pomimo faktu, że w przypadku niektórych konstrukcji występuje zerowy moment startowy [Romański 2013]. Wadą tych konstrukcji jest również to, że podczas pracy oś pionowa jest poddawana zmiennym okresowo naprężeniom skręcającym i zginającym. Siła parcia wiatru,

jak i siła grawitacji kreują efekty żyroskopowe i w wyniku tego oś obrotu nie może przybrać pozycji równowagi dynamicznej [Flaga 2008].

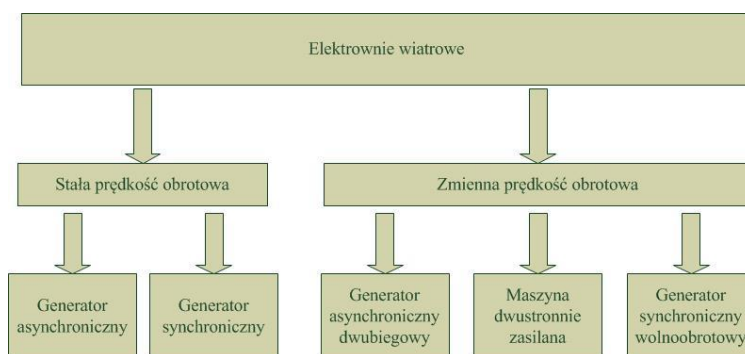
1.2.2. Generatory elektryczne

Generator to jeden z najważniejszych elementów elektrowni wiatrowej. To dzięki jego pracy możliwa jest konwersja energii wiatru na energię elektryczną. Generatory wykorzystywane w elektrowniach wiatrowych, w przeciwieństwie do tych wykorzystywanych w energetyce konwencjonalnej, narażone są na zmiany poziomu mocy. Zjawisko to spowodowane jest zmianami prędkości wiatru. Wśród maszyn elektrycznych używanych w energetyce wiatrowej, znajdują się zarówno maszyny prądu stałego, jak i przemiennego [Akhmatov 2006]. Na chwilę obecną odchodzi się od maszyn prądu stałego, ze względu na mniejszą sprawność [Plamitzer 1982].

Wśród używanych typów generatorów możemy wyróżnić [Cao i in. 2012]:

- generatory prądu stałego,
- generatory asynchroniczne prądu przemiennego,
- generatory synchroniczne prądu przemiennego.

Dodatkowo podziału generatorów można dokonać ze względu na warunki pracy [Lerch 2010]. Przez warunki pracy generatora rozumie się pracę ze stałą lub zmienną prędkością obrotową (rys. 10).



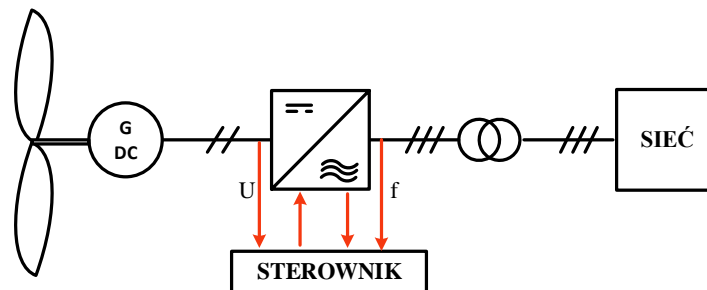
rys. 10. Podział elektrowni wiatrowych ze względu na warunki pracy

1.2.2.1. Generatory prądu stałego

Prądnica prądu stałego składa się z dwóch elementów uzwojeń twornika i wzbudzenia. W uzwojeniu twornika, które nawinięte jest na wirnik, w wyniku wirowania w polu magnetycznym wzbudzenia (stojana) generuje się napięcie stałe [Antal i in. 2001]. Odbiór energii następuje poprzez szczotki grafitowe zamontowane w obudowie stojana oraz

komutator, który znajduje się na osi wirnika. W zależności od konstrukcji wzbudzenie może pochodzić od magnesów trwałych albo elektromagnesu.

Prądnice prądu stałego nie są praktycznie wykorzystywane w energetyce zawodowej, ich aplikacja ogranicza się do małych turbin wiatrowych, w których energia zużywana jest na cele grzewcze (podgrzewanie wody w C.O. lub C.W.U.) [Ma i in. 2009, Suzuki i in. 1982]. Jeżeli prądnica miałaby współpracować z systemem elektroenergetycznym wymagany jest jeszcze inwerter oraz kontroler, które pozwolą na zamianę prądu stałego na prąd przemienny oraz dostosowanie parametrów prądu przemiennego do obowiązujących w sieci [Cao i in. 2012, PN – EN 50160]. Schemat połączonej elektrowni wiatrowej z prądnicą prądu stałego został przedstawiony na rysunku 11.



rys. 11. Schemat turbiny wiatrowej wyposażonej w prądnicę prądu stałego połączoną z siecią

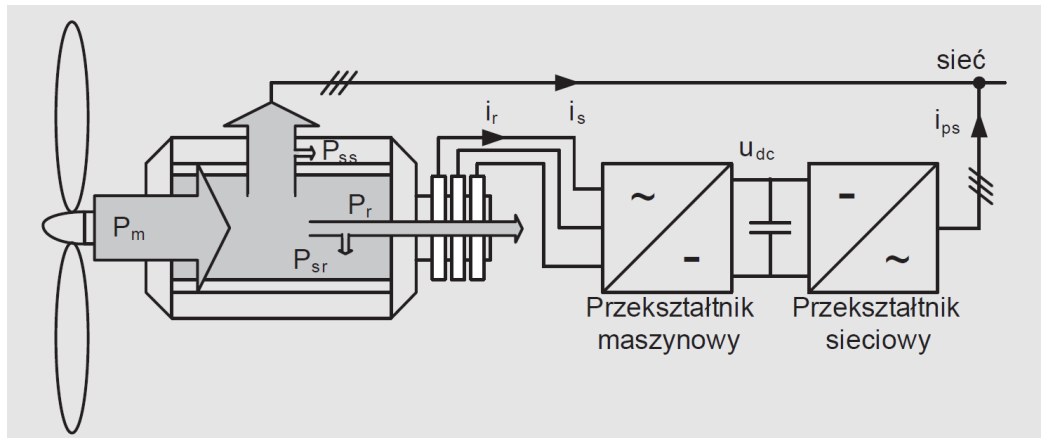
1.2.2.2. Generatory asynchroniczne prądu przemiennego

Generatory asynchroniczne, nazywane też indukcyjnymi, wykorzystywane są do współpracy z turbinami o stałej prędkości obrotowej. Ich konstrukcja jest praktycznie taka sama jak silnika asynchronicznego. Różnica występuje w przepływie mocy. W przypadku pracy silnikowej, dzięki odbieraniu energii z sieci i zasilaniu uzwojeń stojana, wirnik wprowadzany jest w ruch obrotowy. W chwili kiedy maszyna pracuje jako generator, dzięki momentowi przyłożonemu do wału wirnika, możliwe jest odbieranie energii elektrycznej z zacisków maszyny.

Znamionowa prędkość obrotowa generatora zależy od liczby par biegunów maszyny [Plamitzer 1982]. Większość generatorów asynchronicznych wykorzystywanych w turbinach wiatrowych wytwarza napięcia o wartości 690 V [Burton i in. 2001]. Tak niski poziom napięcia wymusza, przy elektrowniach dużej mocy (> 3 MW), zamontowanie transformatora napięcia umiejscowionego bezpośrednio w gondoli.

Najbardziej popularnym układem z maszyną asynchroniczną, wykorzystywaną w elektrowniach wiatrowych, jest maszyna dwustronnie zasilana przedstawiona na rysunku 12

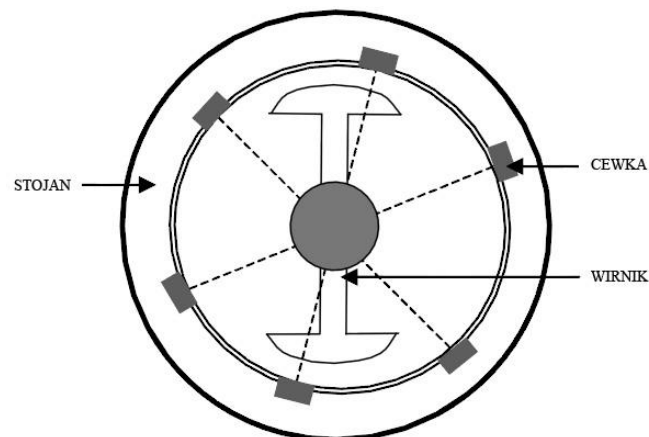
[Lerch 2010]. Układ ten pozwala na sterowanie parametrami generatora tak, aby pracował z różnymi prędkościami obrotowymi [Skwarczyński i in. 2004, Szaflarski 1997].



rys. 12. Schemat elektrowni wiatrowej z maszyną dwustronnie zasilaną [Blecharz 2010]

1.2.2.3. Generatory synchroniczne prądu przemiennego

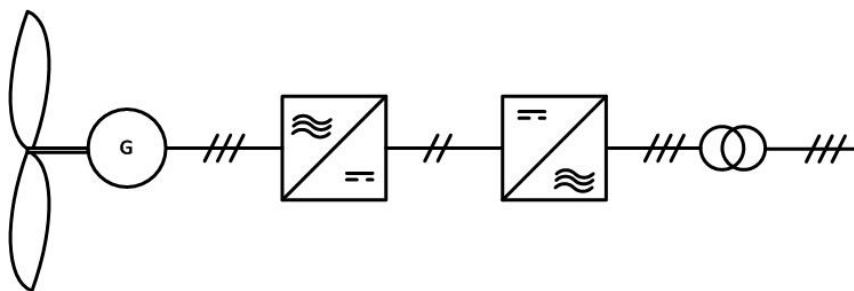
Przekrój poprzeczny generatora synchronicznego przedstawiono na rysunku 13. Stojan zbudowany jest analogicznie jak w przypadku maszyny asynchronicznej. Różnica w budowie występuje w wirniku. Składa się on z magnesów trwałych albo elektromagnesu. Magnesy trwałe są zdecydowanie bardziej kosztowne oraz tracą swoje właściwości z czasem pracy [Kisielewski 2011, Turowski 1982], jednak ze względu na obniżającą się ich cenę oraz brak szczotek, są coraz częściej i chętniej wykorzystywane przez konstruktorów.



rys. 13. Przekrój maszyny synchronicznej

W przypadku generatorów synchronicznych można wyróżnić dwa najczęściej stosowane układy połączeń [Styczyński 2008]:

- bezpośredni,
- poprzez dwa inwertery.

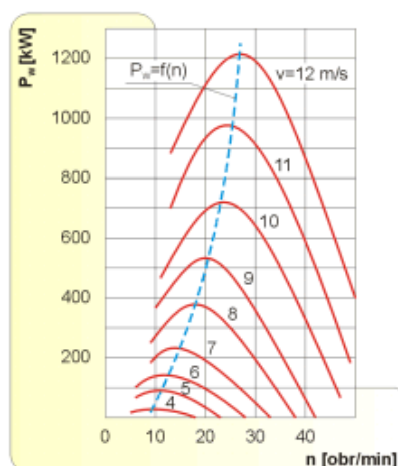


rys. 14. Schemat połączenie elektrowni wiatrowej z generatorem synchronicznym do sieci energetycznej

W przypadku elektrowni wiatrowych współpracujących z siecią elektroenergetyczną w grę wchodzi tylko połączenie poprzez dwa inwertery (rys. 14). Połączenie bezpośrednie, bez przekładni, stosowane jest w mikro i mini elektrowniach wiatrowych w połączeniu z generatorami z magnesami trwałymi. Dodatkowym elementem w takim układzie jest prostownik zmieniający prąd przemienny na stały i umożliwiający ładowanie akumulatorów.

1.2.3. Sposoby regulacji prędkości

Działanie elektrowni wiatrowej można opisać bazując na trzech dziedzinach nauki: aerodynamice, mechanice oraz elektryczności. Dzięki odpowiedniemu wyprofilowaniu łopat wirnika, napływający strumień powietrza powoduje jego ruch. Przekładnia połączona z obracającym się wirnikiem przez wał wolnoobrotowy, zwiększa obroty wału szybkoobrotowego, który napędza generator. Generator zmienia energię mechaniczną na energię elektryczną. W zależności od prędkości wiatru i prędkości obrotowej turbiny, która z kolei zależna jest od obciążenia, generator uzyskuje różną moc. Na rysunku 15 przedstawiono rodzinę charakterystyk reprezentujących krzywe mocy dla różnych prędkości wiatru.



rys. 15. Rodzina charakterystyk prezentujących krzywe mocy dla poszczególnych prędkości wiatru

Aby turbina pracowała z maksymalną mocą w zakresie prędkości wiatru od 4 do 12 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, to prędkość obrotowa generatora powinna być utrzymywana zgodnie z charakterystyką

wykreślona przerywaną linią. W zależności od zastosowanego układu sterowania zostanie to osiągnięte z różną dokładnością. Wśród stosowanych układów sterowania należy wymienić:

- regulację przez ustawienie kąta łopat (pitch controlled),
- regulację pasywną przez przeciąganie (stall controlled),
- regulację aktywną przez przeciąganie (active stall controlled),
- regulację przez ustawienie gondoli w kierunku wiatru (yaw control),
- regulację przez zmianę obciążenia (load control),
- regulację lotkami łopat wirnika (aileron control),
- regulację przez zmianę parametrów generatora.

1.2.3.1. Regulacja przez ustawienie kąta łopat

W chwili obecnej regulacja ta jest stosowana praktycznie w każdej produkowanej elektrowni przemysłowej. Regulacja polega na zmianie kąta zaklinowania łopat w wirniku w czasie pracy elektrowni. Realizowana jest ona przez serwomechanizmy zamontowane w piaście pędnika. Ta regulacja umożliwia dodatkowo ustawienie łopat w ten sposób, aby w trakcie postoju nie generowały siły nośnej, co odciąża układ hamulcowy. W przypadku małych konstrukcji zamiast serwomechanizmów wykorzystywane są układy odśrodkowe.

1.2.3.2. Pasywna regulacja przez przeciąganie

Jest to jedyny sposób regulacji, który nie wymaga żadnych dodatkowych urządzeń, co jest jego niewątpliwą zaletą. Regulacja ta realizowana jest poprzez odpowiednie zaprojektowanie geometrii płata, tak aby od określonej prędkości wiatru struga opływająca łopatę odrywała się od jej części powodując turbulencję. Im większa prędkość wiatru, tym struga odrywa się od większej powierzchni, ograniczając tym samym moment napędowy wirnika. Wadą tego systemu jest powstawanie turbulencji, które powodują drgania.

1.2.3.3. Aktywna regulacja przez przeciąganie

Jest to połączenie dwóch poprzednich sposobów regulacji. Wykorzystywany jest efekt przeciągania oraz mechanizm ustawiający kąty zaklinowania łopat. W chwili kiedy generator przechodzi w stan przeciążenia układ regulacyjny obraca łopaty w odwrotnym kierunku niż w przypadku regulacji „pitch” – wzrasta kąt natarcia łopaty. W przeciwieństwie do regulacji pasywnej możliwa jest praca ze znamionową mocą, przy wysokich prędkościach wiatru.

1.2.3.4. Regulacja przez ustawienie gondoli w kierunku wiatru

Regulacja polega na obracaniu gondoli w kierunku wiatru. Realizowana jest w sposób aktywny albo pasywny – uzależnione jest to od wielkości jednostki. W przypadku małych jednostek do przeprowadzenia obrotu wystarczy statecznik umieszczony w tylnej części gondoli. Wadą takiego rozwiązania jest możliwość ustawienia wirnika tylko prostopadle do kierunku wiatru. W przypadku aktywnej regulacji wykorzystywany jest serwomechanizm umożliwiający ustawienie dowolnego kąta.

1.2.3.5. Regulacja przez zmianę obciążenia

Regulacja polegająca na zmianie obciążenia generatora. Powoduje to wymuszenie na maszynie pracę na innej charakterystyce mechanicznej – bardziej korzystnej do panujących w danej chwili warunków. Metoda ta praktycznie nie jest wykorzystywana w energetyce zawodowej. W przypadku małych jednostek również nie jest popularna, gdyż trudno jest zapewnić automatyczną realizację tej metody.

1.2.3.6. Regulacja lotkami wirnika

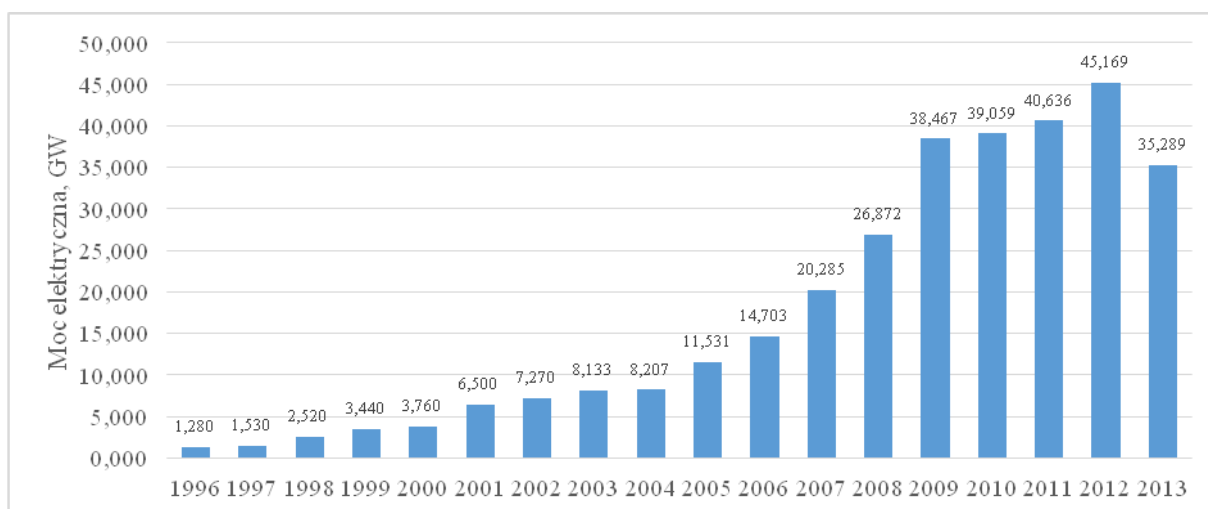
Metoda powszechnie stosowana w lotnictwie. Jest ona związana z początkami turbin wiatrowych. Polega na regulacji lotek znajdujących się na łopatach siłowni, analogicznie jak ma to miejsce w samolocie.

1.2.3.7. Regulacja przez zmianę parametrów generatora

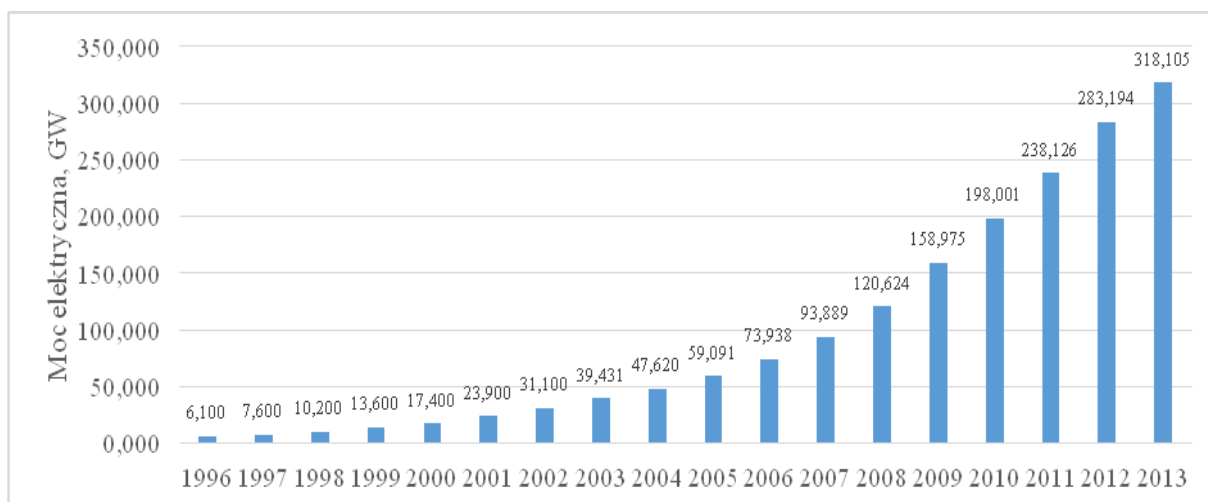
Cała grupa metod polegająca na zmianie parametrów generatora pracującego w elektrowni wiatrowej. Do tej grupy należy między innymi regulacja przez zmianę poślizgu, kaskadę zaworową czy kaskadę nadsynchroniczną. W połączeniu z pozostałymi metodami pozwalają na dokładną regulację mocy wyjściowej. Ta grupa odpowiedzialna jest za utrzymywanie odpowiednich parametrów generowanej energii (poziomu napięcia, częstotliwości, małej wartości THD)[PN – EN 61400-21; PN – EN 50160].

1.3. Energetyka wiatrowa na świecie

Kolejny rok z rzędu energetyka wiatrowa znalazła się na czele pod względem nowo zainstalowanej mocy. Pomimo zauważalnego spadku, w 2013 roku, dalej moc znamionowa nowo przyłączanych jednostek wyniosła ponad 35 GW [Global Wind Energy Council 2014; rys. 16]. Według szacunków Europejskiego Stowarzyszenia Energetyki Wiatrowej (EWEA) w chwili obecnej energetyka wiatrowa jest w stanie zaspokoić około 5% zapotrzebowania Europy na energię elektryczną.



rys. 16. Moc elektrowni wiatrowych na świecie zainstalowana w poszczególnych latach [Global Wind Energy Council 2014]

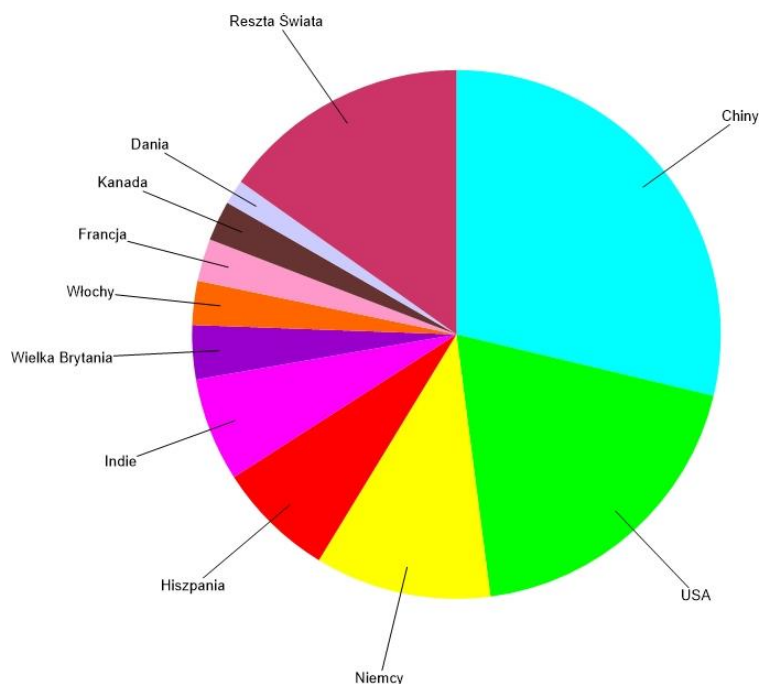


rys. 17. Moc zainstalowanych turbin wiatrowych na świecie w latach 1996 – 2013 [Global Wind Energy Council 2014]

Niezaprzeczalny jest fakt, że z roku na rok przybywa turbin wiatrowych (rys. 17). Należy podkreślić, że nawet kryzys gospodarczy trwający od 2007 [The New York Times 2008] nie spowodował obniżenia tego trendu.

Analizując dane [Global Wind Energy Council 2014], dotyczące podziału pomiędzy krajami mocy zainstalowanej oraz nowo przyłączonych instalacji (rys. 18, Tabela 1, rys. 19, Tabela 2), można wyłonić trzech liderów w energetyce wiatrowej. Zarówno w przypadku nowo powstałych instalacji, jak i sumarycznej zainstalowanej mocy, na pierwszym miejscu znajdują się Chiny. Kraj ten posiada 91,412 GW mocy zainstalowanej pochodzącej od turbin wiatrowych, co daje mu 28,7% udziału w skali świata. Chińczycy przodują również w ilości nowopowstających instalacji. Od początku stycznia do końca grudnia 2013 przyłączyli 19,088 GW mocy elektrycznej do sieci pochodzącej z turbin wiatrowych (rys. 19, Tabela 2).

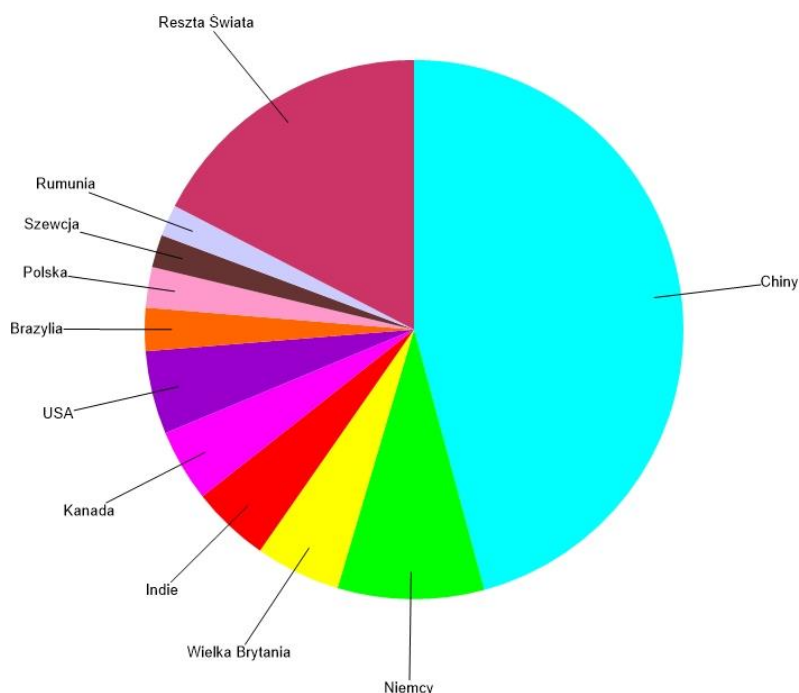
Dwóch pozostałych liderów to USA i Niemcy. Niemcy znajdują się w czołówce światowej jeżeli chodzi o nowopowstałe instalacje (drugie miejsce w 2013 roku), jak i te już istniejące (3 miejsce – sytuacja na grudzień 2013). Warty nadmienia jest, że ilość nowo powstających instalacji w USA nie jest duża, pomimo tego że kraj ten jest na drugim miejscu jeżeli chodzi o moc zainstalowaną (rys. 18, Tabela 1, rys. 19, Tabela 2).



rys. 18. Moce zainstalowanych wiatraków na świecie na koniec 2013 roku [Global Wind Energy Council 2014]

Tabela 1. Moce zainstalowanych wiatraków na świecie na koniec 2013 roku [Global Wind Energy Council 2014]

<i>Kraj</i>	<i>Moc</i>	<i>Udział</i>
	<i>GW</i>	<i>%</i>
Chiny	91,412	28,7
USA	61,091	19,2
Niemcy	34,250	10,8
Hiszpania	22,959	7,2
Indie	20,150	6,3
Wielka Brytania	10,531	3,3
Włochy	8,552	2,7
Francja	8,254	2,6
Kanada	7,803	2,5
Dania	4,772	1,5
Reszta Świata	48,332	15,2
Suma TOP 10	269,773	84,8
Świat	318,105	100



rys. 19. Moc nowopowstałych wiatraków w 2013 roku [Global Wind Energy Council 2014]

Tabela 2. Moc nowopowstałych wiatraków w 2013 roku [Global Wind Energy Council 2014]

<i>Kraj</i>	<i>Moc</i>	<i>Udział</i>
	<i>GW</i>	<i>%</i>
Chiny	16,880	45,6
Niemcy	3,238	9,2
Wielka Brytania	1,883	5,3
Indie	1,729	4,9
Kanada	1,599	4,5
USA	1,840	3,1
Brazylia	0,953	2,7
Polska	0,894	2,5
Szwecja	0,724	2,1
Rumunia	0,695	2
Reszta Świata	6,420	18,1
Suma TOP 10	28,887	82
Świat	35,289	100

Na uwagę zasługuje też fakt, że w 2013 roku Polska trafiła na 8 miejsce w rankingu światowym pod względem ilości nowopowstałych instalacji.

1.4. Sztuczne Sieci Neuronowe

Początki sztucznych sieci neuronowych (SNN) sięgają lat czterdziestych ubiegłego stulecia. Dzięki połączonym działaniom neurofizjologa Warrena McCullocha oraz matematyka Waltera Pittsa powstała pierwsza publikacja dotycząca prawdopodobnej pracy neuronu. Konstruowany jest również pierwszy prosty model SSN na podstawie obwodu elektrycznego

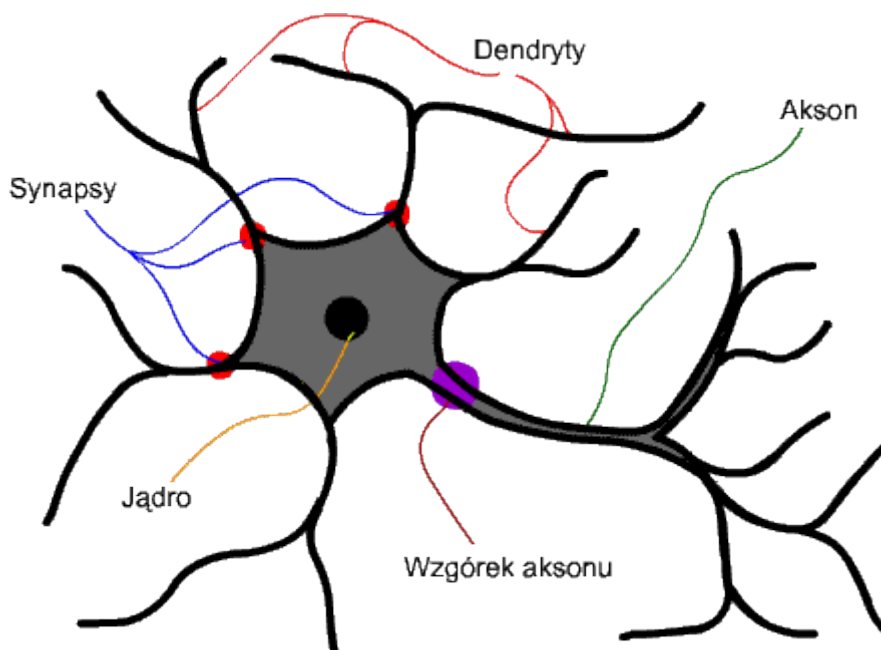
[McCulloch, Pitts 1943]. Następnie już w 1949 roku publikowana jest pierwsza książka „The Organization of Behavior”, w której autor Donald Hebb opisuje możliwość uczenia sieci neuronowej na podstawie plastyczności neuronalnej [Hebb 1949].

Już w 1954 roku SSN zostają zaimplementowane do jednego z pierwszych komputerów Instytutu Technologicznego w Massachusetts [Farley, Clark 1954]. Kolejna próba wykorzystania SSN w technice komputerowej zostaje podjęta i opisana w 1956 przez Rochester, Hollanda, Habita oraz Duda w publikacji pt. „Tests on a cell assembly theory of the action of the brain, using a large digital computer” [Rochester i in. 1954].

Spowolnienie rozwoju SSN następuje w 1969 roku, kiedy pojawia się publikacja określająca możliwości stosowania sieci jednowarstwowych [Minsky, Papert 1969]. Dodatkowym ograniczeniem były ówczesne komputery, które nie radziły sobie z dużymi sieciami. Dopiero w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia udowodniono, że sieci wielowarstwowe nie mają ograniczeń opisanych w 1969 roku. Również rozwój komputerów umożliwił stosowanie tej techniki w coraz szerszym zakresie [Rumelhart, McClelland 1986].

1.4.1. Zasada działania sztucznych sieci neuronowych

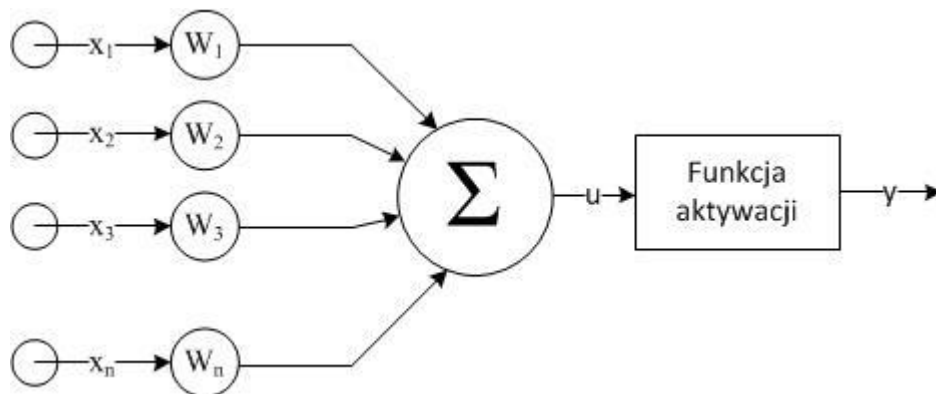
W celu zrozumienia działania sztucznych sieci neuronowych należy najpierw odnieść się do działania neuronu biologicznego, który znajduje się między innymi w ludzkim mózgu [Kasprzyk, Ślot 1995]. Schematyczna budowa neuronu została przedstawiona na rysunku 20.



rys. 20. Budowa neuronu biologicznego [http://www.cs.put.poznan.pl]

Najważniejszym elementem neuronu jest jądro. Stanowi ono centrum obliczeniowe, w którym zachodzą procesy umożliwiające jego poprawną pracę. Procesy te są prowadzone na podstawie sygnałów dostarczanych przez dendryty, czyli wejścia neuronu, których może być kilka, a nawet kilka tysięcy. Dodatkowym elementem dendrytów są synapsy, które są odpowiedzialne za regulowanie mocy sygnału napływającego. Odpowiedź neuronu przekazywana jest do wzdórka aksonu, a następnie dalej przez akson do świata zewnętrznego.

Sztuczna sieć neuronowa oparta jest na mechanizmie działania opisanym powyżej. W przypadku SSN centrum obliczeniowym jest blok sumujący, do którego dostarczane są wszystkie sygnały wejściowe. Dendryty wraz z synapsami są zastąpione przez wejścia oraz wagi, natomiast wzdórek aksonu oraz akson mają swoje odzwierciedlenie w funkcji aktywacji oraz wyjściu z neuronu SSN. Tak jak w przypadku neuronu biologicznego, sztuczny również ma praktycznie nieograniczoną ilość wejść.



rys. 21. Budowa neuronu w sztucznej sieci neuronowej [Cheung, Cannons 2002]

Matematycznie neuron można opisać korzystając z zależności [Hertz i in. 1993; Stefanowski 2006]:

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i\right) \quad (1)$$

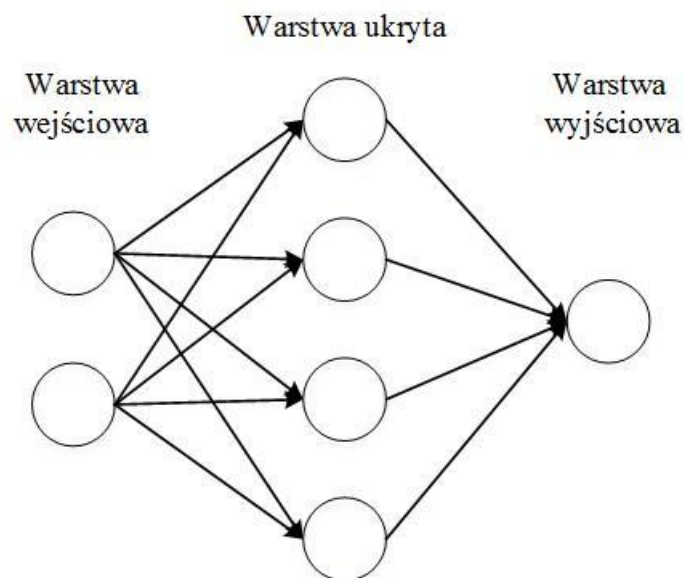
gdzie:

- y to sygnał wyjściowy,
- x_i i-ty sygnał wejściowy,
- w_i i-ta waga sygnału wejściowego.

Funkcja zwracająca wartość sygnału wyjściowego to funkcja aktywacji. W zależności od budowy sieci (założeń przyjętych przy tworzeniu) funkcja może mieć różną postać. Do najczęściej wykorzystywanych należą [Cheung, Cannons 2002]:

- funkcja liniowa,
- obcięta funkcja liniowa,
- funkcja progowa unipolarna,
- funkcja progowa bipolarna,
- sigmoidalna funkcja unipolarna,
- sigmoidalna funkcja bipolarna,
- funkcja Gaussa.

Pojedyncze neurony łączone są w warstwy. W niniejszej pracy zastosowane zostaną jednokierunkowe sieci wielowarstwowe. Na rysunku 22 przedstawiono schemat takiej sieci składającej się z trzech warstw [Krose, Smagt 1996].



rys. 22. Schemat sztucznej sieci neuronowej o 3 warstwach w układzie 2 – 4 – 1

Sieć przedstawiona powyżej jest siecią jednokierunkową, co oznacza, że przepływ danych następuje od wejścia do wyjścia [Arbib 1995]. Omawiane SSN wyposażone są w warstwę wejściową, do której dostarczane są sygnały wejściowe, warstwę ukrytą, która odpowiedzialna jest za przetwarzanie sygnałów oraz warstwę wyjściową, która przekazuje wynik pracy sieci. Każdy z neuronów warstwy wejściowej połączony jest z każdym neuronem warstwy ukrytej oraz każdy neuron warstwy ukrytej połączony jest z neuronami warstwy wyjściowej [Rojas 1996].

Przed przystąpieniem do pracy z siecią neuronową należy przeprowadzić proces uczenia sieci [Gunther, Fritsch 2010]. Učeniem sieci nazywamy dobranie odpowiednich wartości wag,

przy których sieć będzie umiała najlepiej rozwiązać zadanie. Proces uczenia możemy podzielić na dwie grupy [Aleksander, Taylor 1992]:

- nienadzorowane (bez nauczyciela),
- nadzorowane (z nauczycielem).

Proces uczenia nienadzorowanego wykorzystywany jest wtedy gdy nie znamy sygnałów wyjściowych dla zbioru uczącego. Nieodzownym warunkiem funkcjonowania SSN jest aby sygnały wejściowe dały się w dowolny sposób sklasyfikować. Uczenie nadzorowane możliwe jest w sytuacji, kiedy dla zbioru uczącego, dla każdego wektora wejściowego znana jest postać wektora wyjściowego. Proces uczenia determinuje też podział zbioru uczącego na grupy [Albrecht i in. 1993]. W przypadku omawianych SSN podział następuje na trzy grupy:

- zbiór uczący,
- zbiór walidacyjny,
- zbiór testowy.

Proces uczenia wykorzystuje zbiór uczący oraz walidacyjny w trakcie uczenia. Na podstawie zbioru uczącego modyfikowane są wagi sieci, natomiast zbiór walidacyjny służy do bieżącego monitorowania procesu uczeni, a tym samym określenia czy sieć jest już gotowa do pracy. Uczenie SSN zostaje zatrzymane, kiedy sieć nie przekracza określonego, założonego przez użytkownika błędu. Zbiór testowy wykorzystany jest do niezależnego ocenienia wydajności i jakości sieci. Zbiór ten nie bierze udziału w procesie uczenia.

2. Cel i zakres pracy

Podstawowym celem pracy jest analiza pracy działania dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej. W przeciwieństwie do obecnych konstrukcji jednowirnikowych o osi poziomej, nowa ma zostać wyposażona o dodatkowy wirnik, którego kierunek obrotu będzie przeciwny do kierunku wirowania pierwszego. Dzięki odpowiedniemu doborowi łopat oraz kątów zaklinowania, wirnik i stojan generatora będą się obracać w przeciwnych kierunkach. W efekcie bezwzględna prędkość obrotowa generatora, przy tych samych warunkach wiatrowych, będzie większa niż w rozwiązaniach klasycznych, z jednym wirnikiem aerodynamicznym. Rozwiązanie takie prawdopodobnie umożliwi zwiększenie ilości generowanej energii elektrycznej, jak również rozpoczęcie produkcji energii elektrycznej przy niższych prędkościach wiatru. Dodatkowo punkt, od którego elektrownia wiatrowa pracuje ze znamionową mocą, zostanie osiągnięty wcześniej. Jeżeli wszystkie przewidywania okażą się trafne, otworzy to drogę do dalszych badań nad usytuowaniem elektrowni wiatrowych na nowych terenach, które dotychczas nie mogły zostać wykorzystane przez generację wiatrową z powodu niskich średnich prędkości wiatru.

Ponad to celem pracy jest poszerzenie stanu obecnej wiedzy dotyczącej elektrowni wiatrowych. Pozwoli to na wytyczenie nowych ścieżek, którymi powinni podążać projektanci i konstruktorzy urządzeń napędzanych przez wiatr.

Na podstawie przedstawionego przeglądu literatury identyfikowalny staje się cel planowanej dysertacji, jakim jest analiza pracy i utworzenie – na bazie procedur teoretyczno – doświadczalnych modelu matematycznego elektrowni wiatrowej wyposażonej w dwa wirniki.

Aby osiągnąć cel pracy podczas badań zostały zrealizowane następujące cele cząstkowe:

- zbudowanie tunelu aerodynamicznego i ujednoczenie przepływającej przez niego strugi powietrza,
- przeprowadzenie badań porównawczych fabrycznych jednowirnikowych elektrowni wiatrowych,
- zaprojektowanie i zbudowanie prototypu dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej,
- określenie wpływu różnych czynników (prędkości strugi powietrza, kąta zaklinowania łopat w pierwszym wirniku α_1 , kąta zaklinowania łopat w drugim

wirniku α_2 , odległości pomiędzy dwoma wirnikami) na generowaną moc $P = f(v, \alpha_1, \alpha_2, l)$,

- porównanie pracy jedno- oraz dwuwirnikowej mini elektrownie wiatrowej,
- zbudowanie w oparciu o sztuczne sieci neuronowe modelu dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej,
- przeprowadzenie weryfikacji wyników.

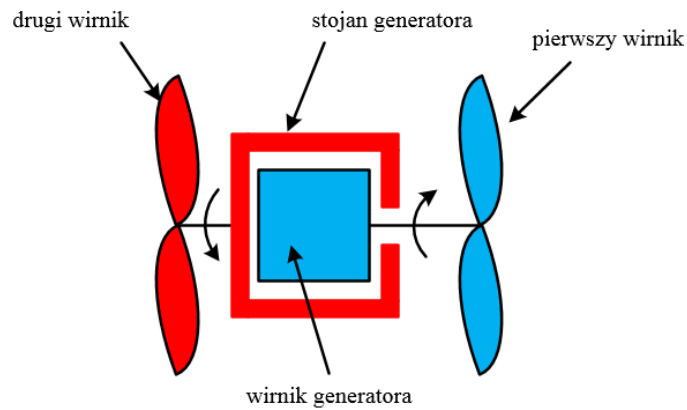
Na podstawie powyższego można sformułować następującą hipotezę:

Elektrownia wiatrowa o konstrukcji dwuwirnikowej może wygenerować większą moc, niż elektrownia wiatrowa, o klasycznej konstrukcji, wyposażona w jeden wirnik.

3. Warunki i metodyka badań

3.1. Przedmiot badań

Przedmiotem badań był prototyp dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej. Schemat ideowy obiektu badań został przedstawiony na rysunku 23.



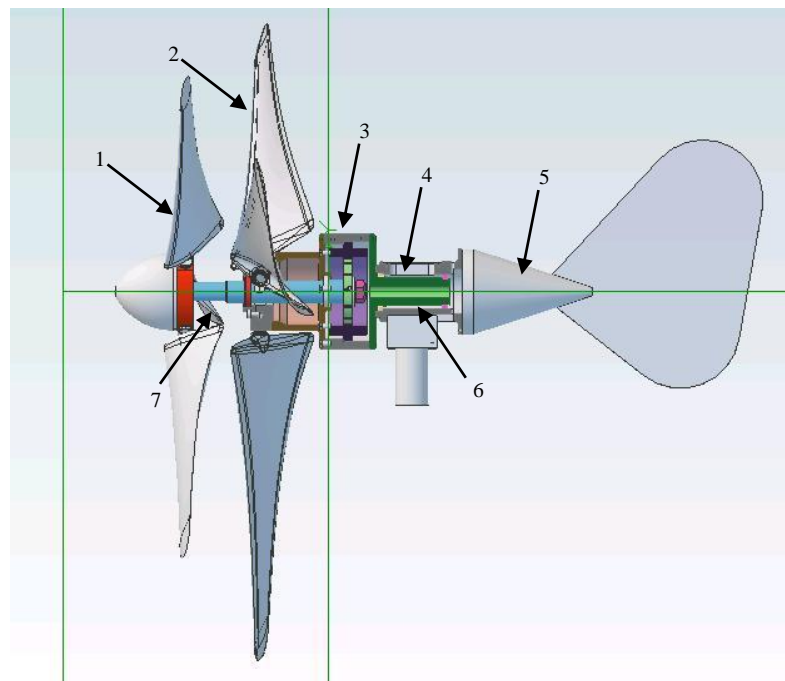
rys. 23. Schemat ideowy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej

Główne elementy tego prototypu to::

- dwa trzyłopatowe wirniki,
- generator synchroniczny z magnesami trwałymi,
- prostownik trójfazowy.

Konstrukcja składała się z dwóch wirników, o jednakowych średnicach wynoszących 0,75 m, (rys. 23 – pierwszy oraz drugi wirnik, rys. 24 element 1 i 2) obracających się w przeciwnych kierunkach, tak jak zostało to zaznaczone na rysunku 23. Regulacja odległości pomiędzy wirnikami realizowana jest poprzez odpowiednie przekładanie jednej z siedmiu tulejek dystansujących (rys. 24 element 7) o szerokości 5 mm każda, przed lub za pierwszy wirnik. W ten sposób możliwe było osiągnięcie 8 różnych odległości wirników. Regulacja odbywała się w zakresie od 105 mm do 140 mm, ze skokiem co 5 mm. Zgodnie z dotychczasowymi badaniami [Tong 2010] odległość pomiędzy wirnikami powinna być jak najmniejsza. Ze względu na zastosowane łopaty minimalna odległość, nie powodująca kolizji, wynosiła 105 mm. Każdy z wirników wyposażony był w jednakowe trzy łopaty, zamontowane symetrycznie. Średnica pierwszego oraz drugiego wirnika była jednakowa i wynosiła 0,75 m. Konwersję energii mechanicznej na elektryczną umożliwia trójfazowy generator synchroniczny o mocy 300 W i napięciu znamionowym 12 V (rys. 24 element 3). Generator posiadał 6 par magnesów rozmieszczonych na wirniku. Na stojan nawinięte było trójfazowe

uzwojenie, z jednej strony połączone w gwiazdę, z drugiej natomiast połączone z pierścieniami ślizgowymi (rys. 24 element 6). Odbiór energii następował poprzez szczotki (rys. 24 element 4), które połączone były z trójfazowym prostownikiem zmieniającym prąd przemienny, wytwarzany przez generator, na prąd stały przekazywany do odbiornika. Prostownik przykręcony był do ostatniego elementu elektrowni (rys. 24 element 5), który kończył się statecznikiem umożliwiającym ustawienie konstrukcji w odpowiedniej pozycji w stosunku do wiatru. Miejsce montażu prostownika wymuszone było dużą ilością ciepła, którą produkował on w trakcie pracy. Element mocujący statecznik wykorzystywany był w tym przypadku również jako radiator prostownika. Prototyp, zamontowany na stanowisku badawczym, obrazuje rysunku 25.

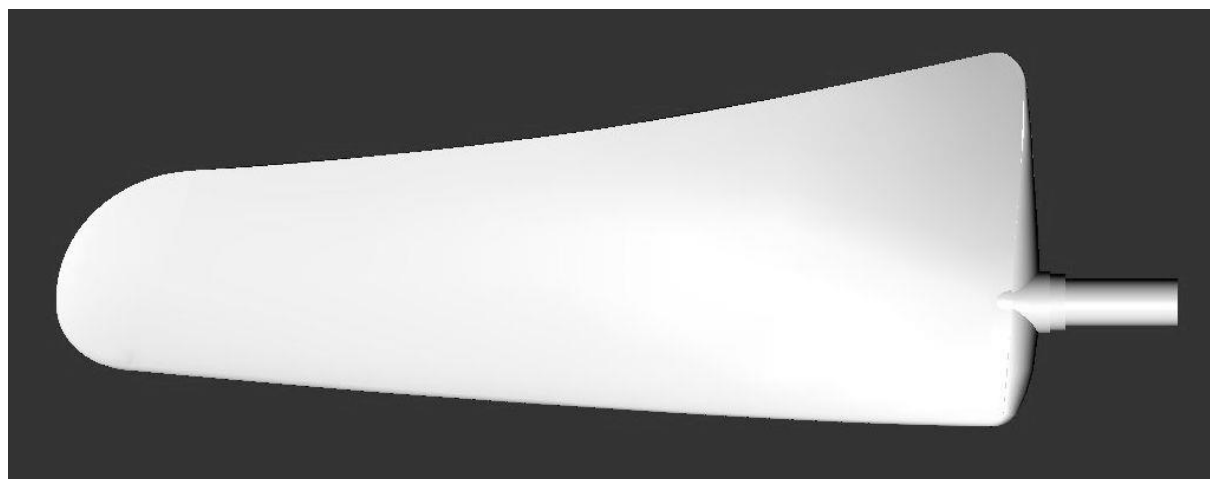


rys. 24. Komputerowa wizualizacja prototypu dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej: 1 – pierwszy wirnik, 2 – drugi wirnik, 3 – generatora elektryczny, 4 – szczotki elektryczne, 5 – tylni korpus wraz z zamocowanym statecznikiem, 6 – pierścienie ślizgowe, 7 – wał wraz z tulejkami dystansującymi.



rys. 25. Dwuwirnikowa mini elektrowni wiatrowa zamontowana w komorze pomiarowej

Prototyp nowej konstrukcji porównywany był z klasyczną konstrukcją jednowirnikową. Wirnik klasycznej konstrukcji również wyposażony został w 3 łopaty rozmieszczone symetrycznie. Średnica wirnika, tak jak w przypadku elektrowni dwuśmigłowej, wynosiła 0,75 m. Profil zastosowanych łopat w przypadku konstrukcji klasycznej był taki sam, jak w przypadku konstrukcji dwuwirnikowej, tj. było to oryginalne połączenie profili NACA 63-415 z NACA 63-210 (rys. 65). Profil został wybrany na podstawie dotychczasowych badań, których wyniki zostały opublikowane w dwóch artykułach w czasopiśmie Inżynieria Rolnicza [Dębowski i in. 2012; Dębowski i in. 2013].



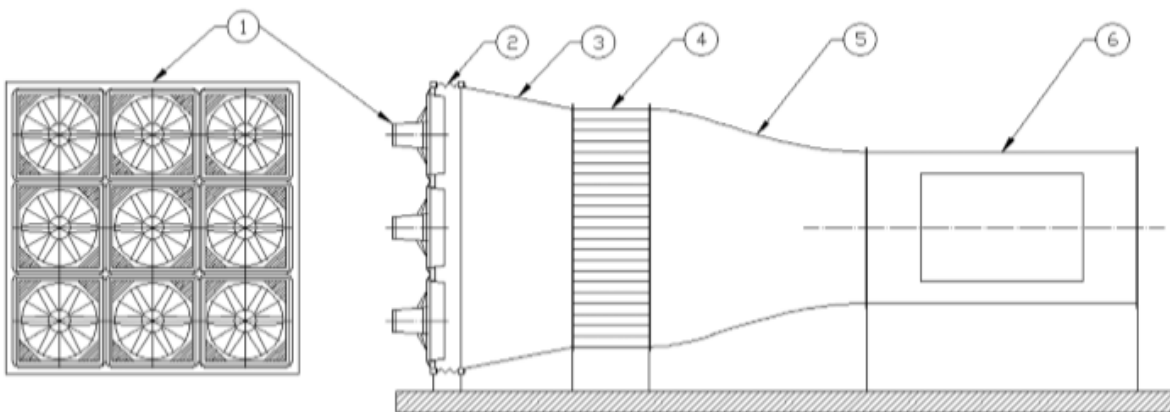
rys. 26. Łopata powstała w wyniku oryginalnego połączenia NACA 63-415 z NACA 63-210

Układ wytwarzania i przemiany energii elektrycznej jest identyczny z układem zastosowanym w konstrukcji dwuwirnikowej, w jego skład wchodzi generator 300 W oraz prostownik trójfazowy. Całość została zamontowana w korpusie.

3.2. Stanowisko badawcze

Podstawowym elementem stanowiska badawczego był tunel aerodynamiczny (rys. 28), który umożliwia symulowanie zjawisk zachodzących w ośrodku gazowym. Tunel w którym prowadzono testowanie mini elektrowni jest konstrukcją otwartą. Jego podstawowe wymiary geometryczne to:

- wlot o przekroju kwadratowym 2,5 x 2,5 m,
- długość całkowita 7 m,
- komora pomiarowa o przekroju kołowym o średnicy 1,4 m.



rys. 27. Schemat tunelu aerodynamicznego o otwartym przepływie powietrza: 1 - stelaż z sekcją wentylatorów, 2 – tłumik drgań, 3 – redukcja symetryczna o przekroju kwadratowym, 4 – ulownica (wyrównanie strumienia), 5 – konfuzor Witoszyńskiego, 6 – komora pomiarowa z otworem rewizyjnym



rys. 28. Tunel aerodynamiczny



rys. 29. Stelaż z sekcją wentylatorów

Tunel wyposażony był w elementy stabilizujące przepływ strugi powietrza:

- ulownicę strumienia z otworami o przekroju kwadratowym – rys. 27 element 4,
- konfuzor Witoszyńskiego – wlot o przekroju kwadratowym zmniejszający się wzdłuż linii przepływu strugi powietrza z wylotem o przekroju kołowym – rys. 27 element 5.

Zastosowanie konfuzora spowodowało zmniejszenie komory pomiarowej (rys. 28) do rury o przekroju 1,4 m, co wpłynęło pozytywnie na wzrost prędkości i stabilizację strugi powietrza.

Obiekt pracował w systemie tłoczącym, tj. przepływ powietrza odbywa się od wentylatorów (rys. 27 element 1, rys. 29) do komory pomiarowej (rys. 27 element 6) i tym samym wylotu. Struga powietrza wytwarzana była przez 9 wentylatorów osiowych. Każdy napędzany był przez trójfazowe silniki elektryczne o mocy jednostkowej 2,2 kW (rys. 29). Zastosowanie takiego układu umożliwiło osiągnięcie prędkości strugi powietrza do $17,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



rys. 30. Szafa sterownicza tunelu aerodynamicznego



rys. 31. Falownik LG iG5A umożliwiający regulację prędkości obrotowej wentylatora

Regulacja prędkości strugi powietrza odbywała się poprzez zmianę prędkości obrotowej wentylatorów, która możliwa była dzięki regulację napięcia i częstotliwości zasilania zgodnie z zależnością:

$$\frac{U}{f} = const \quad (2)$$

Regulacja parametrów pracy przemienników częstotliwości (rys. 30, rys. 31) była możliwa w zakresie od 15 do 50 Hz, z rozdzielczością co 0,01 Hz. Zakres regulacji narzucony był przez ograniczenia mechaniczne i termiczne silników wentylatorów.

Dodatkowo stanowisko było wyposażone w następujące elementy:

- do pomiaru prędkości strugi powietrza – rurkę Prandtla o średnicy 8 mm oraz mikromanometr różnicowy HD2114P.2 połączony z komputerem przenośnym PC.
 - temperatura pracy -5 – 50° C,
 - wilgotność pracy 0 – 90%,
 - rozdzielczość 0,005 mbar – 0,5 Pa,



rys. 32. Mikromanometr różnicowy HD2114P.2 (źródło: <http://www.chlodnictwo.biz>)

- kompaktowy anemometr wiatraczkowy testo 416 do pomiaru prędkości strug powietrza pomiędzy wirnikami elektrowni wiatrowej.
 - zakres pomiarowy $1 - 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 - dokładność $\pm (0,2+2)$.



rys 33. Kompaktowy anemometr wiatraczkowy testo 416

- bocznik do pomiaru natężenia prądu wraz z multimetrem METEX M-4660M (rys. 34)
 - wyświetlacz 4 ½ cyfry,
 - dokładność $\pm 0,05\% + 3$ cyfry,



rys. 34. Bocznik do pomiaru natężenia prądu wraz z miernikiem METEX M-4660M

- multimetr do pomiaru napięcia METEX M-3630D (rys. 35)
 - wyświetlacz 3 ½ cyfry,
 - dokładność $\pm 0,3\% + 1$ cyfra,



rys. 35. Multimetr do pomiaru napięcia

- 5 rezystorów suwakowych (rys. 36) o wartościach rezystancji 2,35 Ω ; 2,35 Ω ; 9 Ω ; 13 Ω ; 100 Ω ; pozwalających w sposób płynny obciążać generator elektryczny elektrowni, w zależności od aktualnej prędkości wiatru.



rys. 36. Rezystory suwakowe o wartościach rezystancji 2,35 Ω ; 2,35 Ω ; 9 Ω ; 13 Ω

3.3. Metodyka badań

Badania laboratoryjne zostały podzielone na dwa etapy. W pierwszym etapie został przebadany tunel aerodynamiczny oraz dokonana została regulacja strumienia powietrza. W drugim etapie przeprowadzone zostały badania jedno- oraz dwuwirnikowej elektrowni wiatrowych.

3.3.1. Regulacja strumienia powietrza w tunelu aerodynamicznym

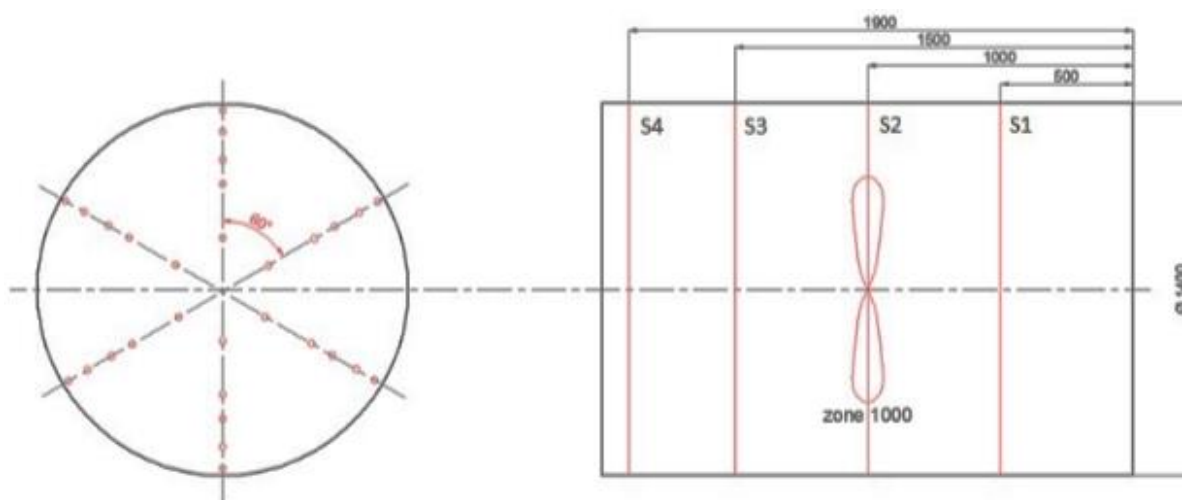
Badanie i regulacja strugi powietrza w tunelu aerodynamicznym odbyło się w dwóch etapach. W pierwszym etapie wyznaczono podstawowe parametry strugi powietrza, tj.:

- ciśnienie,
- prędkość,
- wskaźniki jakościowe:
 - rozkład równomierności prędkości w komorze pomiarowej,
 - wskaźnik intensywności turbulencji.

Drugi etap pozwolił na zapoznanie się z wpływem prędkości obrotowej poszczególnych wentylatorów na rozkład strugi powietrza w komorze pomiarowej tunelu, co pozwoliło na dobranie optymalnych częstotliwości pracy poszczególnych falowników, tak aby wartości wskaźników intensywności turbulencji uległy zmniejszeniu.

Pomiar rozkładu strugi powietrza w tunelu dokonano metodą trawersowania, zgodną z normą PN-ISO 5221 [PN-ISO 5221:1994]. Wyznaczenie położenia poszczególnych punktów pomiarowych zostało dokonane według metody Log – Czebyszewa [PN-ISO 5221:1994].

Kanał, w którym dokonano pomiaru prędkości strugi powietrza, został podzielony na pierścienie koncentryczne, tym samym tworząc strefy pomiarowe. Średnica kanału większa niż 250 mm determinuje podział na 5 pierścieni. Każdy z pierścieni posiada taką samą ilość punktów pomiarowych. Punkty pomiarowe zostały wyznaczone na trzech osiach nachylonych względem siebie o 60° (rys. 37). Badania wykonano w czterech strefach (rys. 37) oddalonych odpowiednio o 500, 1000, 1500 i 1900 mm od początku komory pomiarowej (rys. 27 Element 6).



rys. 37. Rozmieszczenie punktów pomiarowych oraz podział na strefy pomiarowej [Komarnicki i in. 2013]

Prędkość strugi powietrza została wyliczona na podstawie pomiaru różnicy ciśnień przy użyciu rurki Prandtl'a oraz mikromanometru różnicowego HD 2114P.2. Dane zostały zebrane poprzez podłączenie urządzenia pomiarowego do komputera PC. Dane z każdego punktu były zbierane w 10 powtórzeniach, co 1 s.

Zmiana prędkości strugi odbywała się poprzez zmianę prędkości obrotowych poszczególnych wentylatorów. Było to możliwe dzięki zastosowaniu przemienników częstotliwości (falowników) do zasilania silników wentylatorów zamontowanych w tunelu. Badania, ze względu na ograniczenia mechaniczne i cieplne, prowadzone były w zakresie częstotliwości zasilania 15 – 50 Hz, ze zmianą co 5 Hz. W tej części badań wszystkie wentylatory pracowały z jednakową częstotliwością zasilania.

Prędkość strugi powietrza została wyliczona na podstawie równania:

$$V = 1,291 \sqrt{\frac{1013,25}{B} \cdot \frac{T}{293} \cdot \frac{100\,000}{100\,000 + p_s} \cdot p_v} \quad (3)$$

gdzie:

- V - lokalna prędkość strugi powietrza ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
- B - ciśnienie barometryczne (hPa),
- T - temperatura bezwzględna (K),
- p_s - ciśnienie statyczne (Pa),
- p_v - ciśnienie dynamiczne (Pa).

W trakcie pomiarów ciśnienie statyczne p_s nie przekraczało 2 500 Pa, w związku z czym człon $\frac{100\,000}{100\,000 + p_s}$ zostaje pominięty.

Średnia arytmetyczna prędkości strugi powietrza została wyznaczona dla każdego punktu pomiarowego zgodnie z równaniem:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \quad (4)$$

gdzie:

- N - liczba punktów pomiarowych.

Następnie, zgodnie z metodą Gomuła i in. (2006), został wyliczony współczynnik równomierności prędkości, który zdefiniowano jako iloraz bezwzględnej odchyłki prędkości oraz prędkości średniej:

$$V_{jV} = \frac{|V - \bar{V}|_{max}}{\bar{V}} \cdot 100\% \quad (5)$$

gdzie:

- $|V - \bar{V}|_{max}$ - maksymalna bezwzględna odchyłka prędkości strugi.

Wprowadzone pojęcie intensywności turbulencji, zostało zdefiniowane jako iloraz pomiędzy odchyleniem standardowym prędkości oraz średnią prędkości strugi powietrza:

$$I = \frac{V_{SD}}{\bar{V}} \cdot 100\% \quad (6)$$

gdzie:

- V_{SD} - odchylenie standardowe prędkości ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Druga część badań tunelu aerodynamicznego polegała na określeniu wpływu pracy poszczególnych wentylatorów na rozkład prędkości strugi powietrza w komorze pomiarowej.

Wyniki drugiej części badań zostały odniesione do wyników uzyskanych w pierwszej części, gdzie wszystkie 9 wentylatorów pracowało przy jednakowej częstotliwości zasilania.

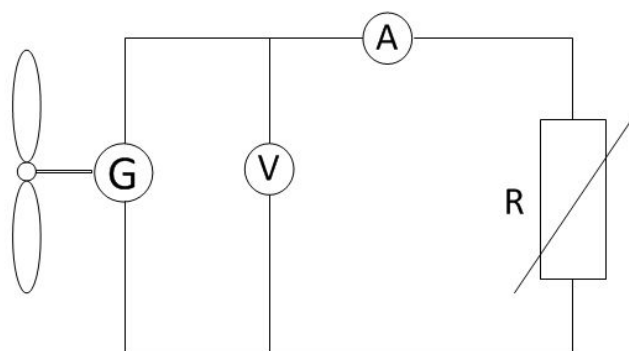
Częstotliwość pracy poszczególnych falowników była dobierana w sposób doświadczalny, a następnie po dokonaniu pomiarów określany był wpływ, na podstawie pierwszego etapu, przeprowadzonej regulacji na wyrównanie prędkości strugi powietrza.

3.3.2. *Badania mini elektrowni wiatrowych*

Na potrzeby badań jedno- oraz dwuwirnikowych mini elektrowni wiatrowych zostało stworzone stanowisko pomiarowe. Składało się ono z:

- tunelu aerodynamicznego,
- multimetrów,
- regulowanych oporników,
- przewodów łączących,
- badanych elektrowni wiatrowych,
- kątomierza umożliwiającego ustawienia kąta zaklinowania łopat w płaszczyźnie wirnika elektrowni wiatrowej,
- przyrządów do pomiaru warunków atmosferycznych.

Tunel aerodynamiczny, znajdujący się w Instytucie Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, umożliwił prowadzenie badań w stabilnych i powtarzalnych warunkach. Układ pomiarowy został zaprojektowany i połączony zgodnie ze schematem na rysunku 38 [Kurdziel 1965].



rys. 38. Schemat układu pomiarowego (G – generator, V – woltomierz, A – amperomierz, R – regulowane oporniki)

Powyższy układ umożliwia pomiar prądu i napięcia stałego, a co za tym idzie wyliczenie mocy generowanej przez elektrownię wiatrową, zgodnie z równaniem:

$$P = U \cdot I \quad (7)$$

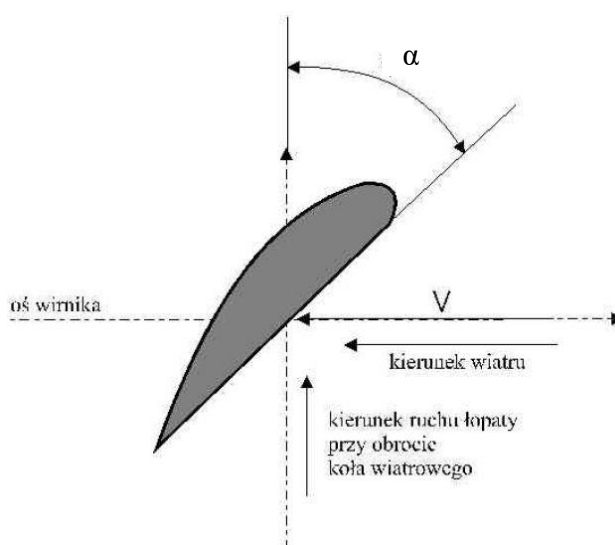
gdzie:

U - napięcie, V,

I - prąd, A.

Pierwszym punktem, przed przystąpieniem do pomiarów elektrycznych, było ustawienie odległości pomiędzy wirnikami. Zgodnie z opisem w podrozdziale „Przedmiot badań”, prototyp umożliwiał regulację odległości pomiędzy wirnikami w zakresie od 105 mm do 140 mm ze skokiem co 5 mm.

Przed przystąpieniem do pomiarów elektrycznych, przy użyciu specjalistycznego kątomierza (rys. 40), ustawiany był kąt α zaklinowania łopat wirnika albo wirników w przypadku elektrowni dwuwirnikowej. Kąt dla danej serii pomiarowej był jednakowy dla wszystkich łopat jednego wirnika. Na rysunku 39 przedstawiono sposób pomiaru kąta α .



rys. 39. Sposób pomiaru kąta α zaklinowania łopat w piaście wirnika



rys. 40. Specjalistyczne kątomierze do ustawienia kąta zaklinowania łopat

Dla elektrowni jednowirnikowej kąt α ustawiany był w granicach $30^\circ - 55^\circ$ co 5° . Dla elektrowni dwuwirnikowej zakres kąta α_1 pierwszego wirnika był identyczny jak w przypadku elektrowni jednowirnikowej ($30^\circ - 55^\circ$), natomiast kąt α_2 drugiego wirnika ustawiany był w zakresie $125^\circ - 150^\circ$, również z interwałem co 5° . Dla elektrowni dwuwirnikowej sprawdzono wszystkie możliwe kombinacje odległości wirników i kątów zaklinowania łopat, tj:

$$C = C_{\alpha_1} \cdot C_{\alpha_2} \cdot C_l = 6 \cdot 6 \cdot 8 = 288 \quad (8)$$

gdzie:

- C_{α_1} - ilość możliwych kombinacji kąta zaklinowania łopat w pierwszym wirniku,
- C_{α_2} - ilość możliwych kombinacji kąta zaklinowania łopat w drugim wirniku,
- C_l - ilość możliwych kombinacji odległości pomiędzy wirnikami.

Pomiary elektrowni wiatrowej odbywały się w zakresie prędkości strugi od $5,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $17,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dla każdej kombinacji ustawień odległości wirników i kątów α łopat dokonywano 3 powtórzenia pomiaru napięcia i prądu, dla ośmiu różnych prędkości strugi powietrza. Wykaz prędkości strugi powietrza, dla których został wykonany pomiar, oraz zakres nastaw falownika przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wykaz nastaw falowników oraz średnich prędkości strugi powietrza

<i>Zakres nastaw falownika, Hz</i>	<i>Średnia prędkość strugi powietrza, m·s⁻¹</i>
15,00 – 15,75	5,85
20,00 – 20,50	7,53
25,00 – 26,00	9,17
30,00 – 31,00	10,82
34,00 – 36,00	12,41
40,00 – 41,10	14,08
45,00 – 46,00	15,82
49,00 – 50,50	17,17

Znamionowe napięcie generatora wynosiło 12 V, dlatego też, gdy zmieniało się ono przy każdym wariacie pomiarowym (nowe ustawienia) sprowadzano jego wartość do zakresu 12 – 12,5V poprzez zmianę obciążenia układu.

Stosowany w testowaniu elektrowni wiatrowych układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 41.



rys. 41. Układ pomiarowy mini elektrowni wiatrowej

3.3.3. *Sztuczne sieci neuronowe*

W pracy przedstawiono model dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej oparty na wielowarstwowej jednokierunkowej sztucznej sieci neuronowej (SSN). Ten typ sieci został wybrany z powodu osiągnięcia najlepszych rezultatów w przypadku modelowania zjawisk tożsamyh do rozpatrywanego [Rojas 1996]. Zastosowana sieć miała trzy warstwy. Pierwszą warstwą była warstwa wejściowa, na którą składały się następujące wejścia:

- średnia prędkość strugi powietrza v ,
- kąt zaklinowania łopat pierwszego wirnika α_1 ,

- kąt zaklinowania łopat drugiego wirnika α_2 ,
- odległości pomiędzy wirnikami 1,

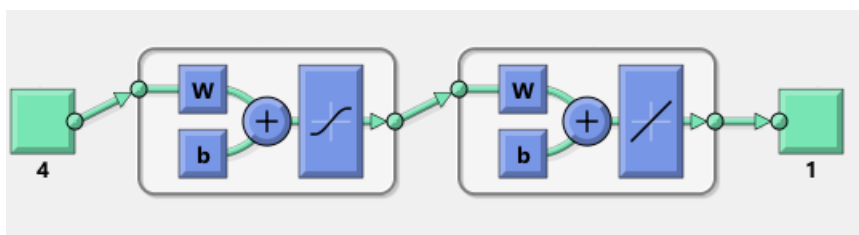
Jedną warstwę ukrytą, której ilość neuronów była zmieniana w zakresie od 4 do 30. Według teorii Kołmogorowa [Osowski 2000] ilość neuronów warstwy ukrytej ma wynosić $2 \cdot N + 1$, gdzie N to wielkość wektora wejściowego, która w rozpatrywanych przypadku wynosiła 4. Wybór ilości neuronów warstwy ukrytej został dokonany w oparciu o wiedzę literaturową, zweryfikowaną eksperymentalnie [Grad 2006; Masters 1996; Tadeusiewicz 1993]. Co więcej nie została złamana zasada, mówiąca że ilość neuronów w warstwie ukrytej nie może spowodować, aby wielkość wektora wag była większa od ilości punktów użytych do uczenia sieci. Optymalna ilość neuronów została określona na podstawie średniego błędu względnego [Bebis, Georgiopoulos 1999; Kavzoglu 1999]. Błąd względny został obliczony zgodnie z równaniem:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|x_i^{ocz} - x_i^{obl}|}{|x_i^{obl}|} \cdot 100\%}{n} \quad (9)$$

gdzie:

- x_i^{obl} - wartość obliczona i-tego elementu zbioru testowego,
- x_i^{ocz} - wartość oczekiwana i-tego elementu zbioru testowego,
- n - liczba elementów zbioru testowego.

Ostatnia warstwa sieci (warstwa wyjściowa) posiada jedno wyjście – generowaną moc P . Na rysunku 42 przedstawiono schemat poglądowy zastosowanej sieci.



rys. 42. Schemat poglądowy jednokierunkowej wielowarstwowej sztucznej sieci neuronowej

Dane z badań laboratoryjnych zostały podzielone na trzy podzbiory:

- zbiór uczący 70% danych,
- zbiór walidacyjny 15% danych,
- zbiór testowy 15% danych.

Zbiór uczący służył do zmiany wag podczas procesu uczenia, zbiór walidacyjny do oceny pracy sieci podczas uczenia, natomiast zbiór testowy do niezależnego określenia pracy sieci. Na podstawie wyników dla zbioru testowego zostały policzony błąd średniokwadratowy oraz średni błąd względy.

Przed przystąpieniem do pracy dane zostały poddane procesowi normalizacji zgodnie z metodą skalowania względem odchylenia od wartości minimalnej zgodnie z równaniem:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (10)$$

gdzie:

- \hat{x}_i - i-ty element zbioru po normalizacji,
- x_i - i-ty element zbioru przed normalizacją,
- x_{min} - minimalna wartość w zbiorze,
- x_{max} - maksymalna wartość w zbiorze.

Proces uczenia sieci został przeprowadzony na podstawie metody Levenberga – Marquarta opierając się o wartość błędu średniokwadratowego.

3.4. Analiza błędów pomiarowych

W pracy dokonano analizy błędów pomiarowych metodą różniczki zupełnej, zgodnie z wytycznymi opublikowanymi przez International Organization for Standardization (ISO) [ISO 1995; Salejda, Poprawski 2009]. Moc generowana przez elektrownię wiatrową jest funkcją dwóch zmiennych. W przypadku elektrowni wiatrowej:

$$P = f(U, I) = U \cdot I \quad (11)$$

gdzie:

- U - napięcie prądu,
- I - natężenie prądu.

Równanie określające błąd bezwzględny mocy generowanej przez mini elektrownię wiatrową ma postać:

$$\Delta P = \left| \frac{\delta P}{\delta U} \right| |\Delta U| + \left| \frac{\delta P}{\delta I} \right| |\Delta I| = |I| |\Delta U| + |U| |\Delta I| \quad (12)$$

Błąd względny został obliczony na podstawie:

$$\delta P = \frac{|\Delta P|}{|P|} \cdot 100\% \quad (13)$$

Powyższe równanie dotyczy zarówno pomiarów elektrowni jedno- jak i dwuwirnikowej. W tabeli 4 zestawiono wyniki obliczeń błędów.

Tabela 4. Obliczone wartości błędów

	ΔP	δP
	W	%
Maksymalny	3,38	34
Minimalny	0,10	1
Średni	1,17	4

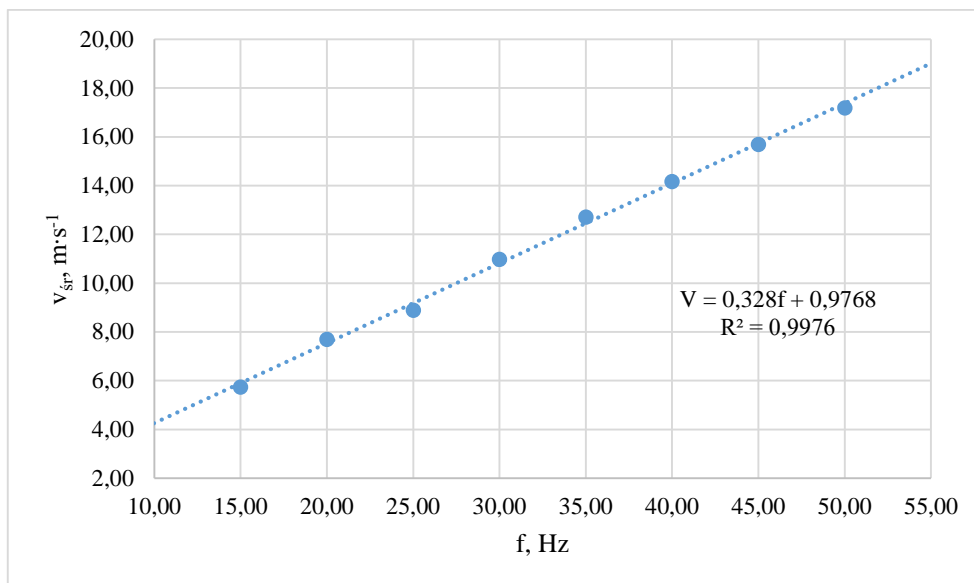
Maksymalny błąd bezwzględny w trakcie pomiarów wynosił 3,38 W, a względny 34%. Należy tutaj zaznaczyć, że było to 29 przypadków (błąd względny powyżej 2W i bezwzględny powyżej 4,5%) na ponad 6 000 punktów pomiarowych. Średnie wartości błędu wynosiły odpowiednio 1,17W dla błędu względnego i 4% dla błędu bezwzględnego.

4. Wyniki przeprowadzonych badań i analiz

W rozdziale przedstawiono wyniki badań i analiz dotyczących jedno- oraz dwuśmigłowej mini elektrowni wiatrowej. Prezentowane rezultaty pracy zostały podzielone zgodnie z tematyką prowadzonych badań. Pierwszy podrozdział dotyczy tunelu aerodynamicznego, w którym prowadzone były badania. Kolejne to wyniki badań elektrowni wiatrowych jedno- i dwuwirnikowych, procedura stworzenia modelu o sztucznej sieci neuronowej oraz weryfikacja modelu w oparciu o dane pomiarowe.

4.1. Równomierność rozkładu strugi w tunelu aerodynamicznym

Zgodnie z przedstawioną wcześniej metodyką (rozdział 3.3.1. Regulacja strumienia powietrza w tunelu aerodynamicznym) w pierwszej kolejności zostały przeprowadzone badania tunelu aerodynamicznego przy wszystkich przemiennikach częstotliwości, zasilających poszczególne wentylatory, ustawionych na jedną częstotliwość. Analizie zostały poddane tylko wyniki znajdujące się w przestrzeni wytyczonej przez koło o średnicy równej 75% średnicy tunelu, co jest zgodne z założeniami do badania otwartych tuneli aerodynamicznych. W skutek powyższego wyniki tyczą się przestrzeni o średnicy 1 metra znajdującej się w strefie, w której zamontowana jest badana turbina, tj. strefie 1000 (rys. 37, strona 38). Na rysunku 43 przedstawiono charakterystykę średnich prędkości strugi powietrza w tunelu, w funkcji nastaw częstotliwości falowników. Zależność została opisana równaniem prostej z wysokim współczynnikiem determinacji, wynoszącym 0,9976, informującym o bardzo dobrym dopasowaniu.



rys. 43. Charakterystyka przedstawiająca zależność średniej prędkości strugi powietrza od nastawionej częstotliwości poszczególnych falowników

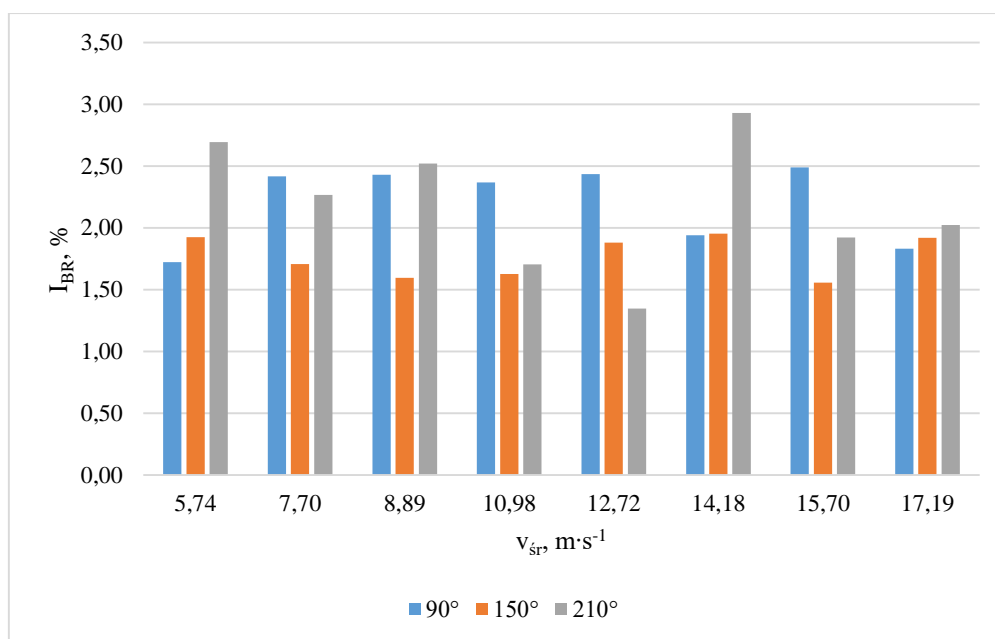
Z powyższej charakterystyki wynika, że minimalna średnia prędkość wynosiła $5,74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, dla wentylatorów pracujących z częstotliwością 15 Hz, natomiast maksymalna $17,19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, dla wentylatorów pracujących z częstotliwością 50 Hz.

Kolejnym krokiem było wyznaczenie jakościowych parametrów tunelu, tj. wskaźników intensywności turbulencji. Zostały one wyznaczone dla każdej osi (rys. 37 strona 38) oraz prędkości strugi powietrza. W tabeli 5 zestawiono wskaźniki intensywności turbulencji przed regulacją I_{BR} (bez regulacji).

Tabela 5. Wskaźniki intensywności turbulencji I_{BR} (bez regulacji) dla poszczególnych osi zależne od prędkości strugi powietrza

v_{sr}	I_{BR}		
	%		
	90°	150°	210°
$5,74$	1,72	1,92	2,69
$7,70$	2,42	1,71	2,27
$8,89$	2,43	1,59	2,52
$10,98$	2,37	1,62	1,70
$12,72$	2,43	1,88	1,35
$14,18$	1,94	1,95	2,93
$15,70$	2,49	1,56	1,92
$17,19$	1,83	1,92	2,02
min	2,49	1,95	2,93
max	1,72	1,56	1,35

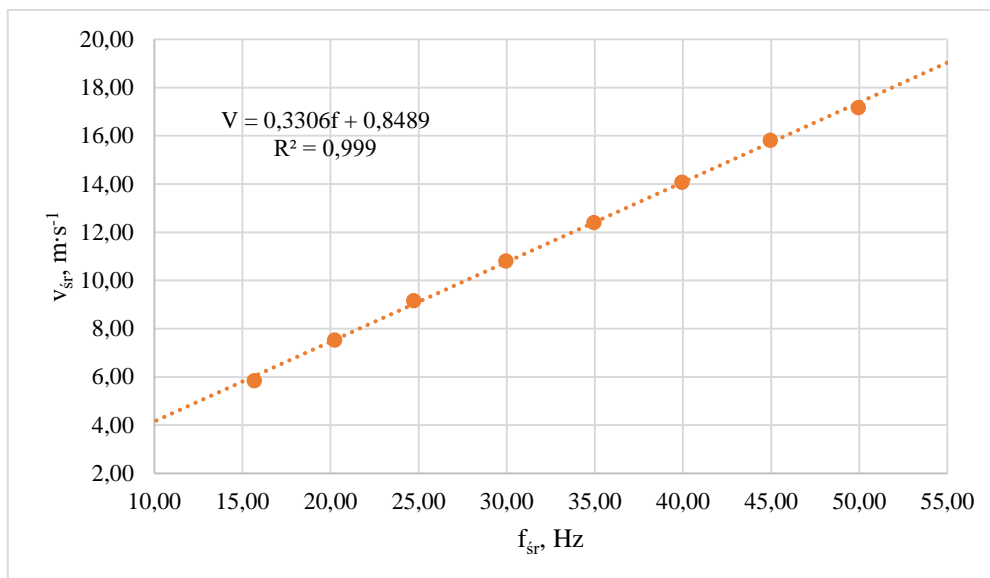
Najniższy wskaźnik intensywności turbulencji dla osi 90° wynosił 1,72% i został osiągnięty przy prędkości 5,74 m·s⁻¹, dla osi 150° wynosił 1,56% i został osiągnięty przy 15,7 m·s⁻¹, natomiast dla osi 210° wynosił 1,35%, został osiągnięty przy 12,72 m·s⁻¹, jednocześnie jest to globalny najniższy wskaźnik intensywności turbulencji. Maksymalne wartości wynosiły odpowiednio 2,49% przy 15,70 m·s⁻¹ dla osi 90°, 1,95% przy 14,18 m·s⁻¹ dla osi 150° oraz 2,93% przy 14,18 m·s⁻¹ dla osi 210°. Najwyższe i najniższe wskaźniki intensywności turbulencji zostały osiągnięte dla osi 210°. Zależności z tabeli 5 zostały przedstawione w formie graficznej na rysunku 44.



rys. 44. Graficzne przedstawienie wskaźników intensywności turbulencji dla poszczególnych osi z uwzględnieniem prędkości strugi powietrza

Należy zauważyć, że oś 150° charakteryzuje się najmniejszym zróżnicowaniem wskaźnika I (minimalna wartość 1,56%, maksymalna 1,95%). Największe zróżnicowanie występuje dla osi 210° (minimalna wartość 1,35%, maksymalna 2,93%).

Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie regulacji prędkości obrotowej wentylatorów. Regulacja została przeprowadzona empirycznie, z określaniem wskaźników intensywności turbulencji po każdej serii pomiarowej. Na rysunku 45 przedstawiono charakterystykę średnich prędkości strugi powietrza w zależności od nastawionych średnich częstotliwości. Zależność została również opisana równaniem prostej o bardzo wysokim współczynniku determinacji, wynoszącym 0,999, które bardzo dobrze odwzorowuje badane zjawisko.



rys. 45. Charakterystyka przedstawiająca zależność średniej prędkości strugi powietrza od średniej częstotliwości falowników

W tabeli 6 zestawiono wyniki wskaźników intensywności turbulencji sprzed regulacji (Tabela 5) oraz wyniki uzyskane po regulacji.

Tabela 6. Zestawienie wskaźników intensywności turbulencji przed (I_{BR}) i po (I_R) regulacji

v_{sr} $m \cdot s^{-1}$	90°			150°			210°		
	I_{BR}	I_R	$I_{BR} - I_R$	I_{BR}	I_R	$I_{BR} - I_R$	I_{BR}	I_R	$I_{BR} - I_R$
	%			%			%		
5,74	1,72	1,63	0,09	1,92	1,53	0,40	2,69	1,27	1,43
7,70	2,42	2,20	0,22	1,71	1,84	-0,13	2,27	1,83	0,44
8,89	2,43	1,40	1,03	1,59	1,50	0,10	2,52	2,11	0,41
10,98	2,37	1,01	1,36	1,62	1,52	0,11	1,70	1,73	-0,03
12,72	2,43	1,15	1,28	1,88	0,90	0,98	1,35	1,61	-0,26
14,18	1,94	1,98	-0,04	1,95	1,64	0,31	2,93	1,81	1,12
15,70	2,49	1,45	1,04	1,56	1,53	0,02	1,92	2,27	-0,35
17,19	1,83	1,58	0,25	1,92	1,72	0,20	2,02	1,65	0,37
min	2,49	2,20	1,36	1,95	1,84	0,98	2,93	2,27	1,43
max	1,72	1,01	-0,04	1,56	0,90	-0,13	1,35	1,27	-0,35

Najniższe wskaźnik intensywności turbulencji po regulacji I_R wynosiły:

- 1,01% przy 10,98 $m \cdot s^{-1}$ dla osi 90° ,
- 0,90% przy 12,72 $m \cdot s^{-1}$ dla osi 150° ,
- 1,27% przy 5,74 $m \cdot s^{-1}$ dla osi 210° .

Maksymalne wartości wynosiły odpowiednio:

- 2,20% przy $7,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla osi 90° ,
- 1,84% przy $7,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla osi 150° ,
- 2,27% przy $15,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla osi 210° .

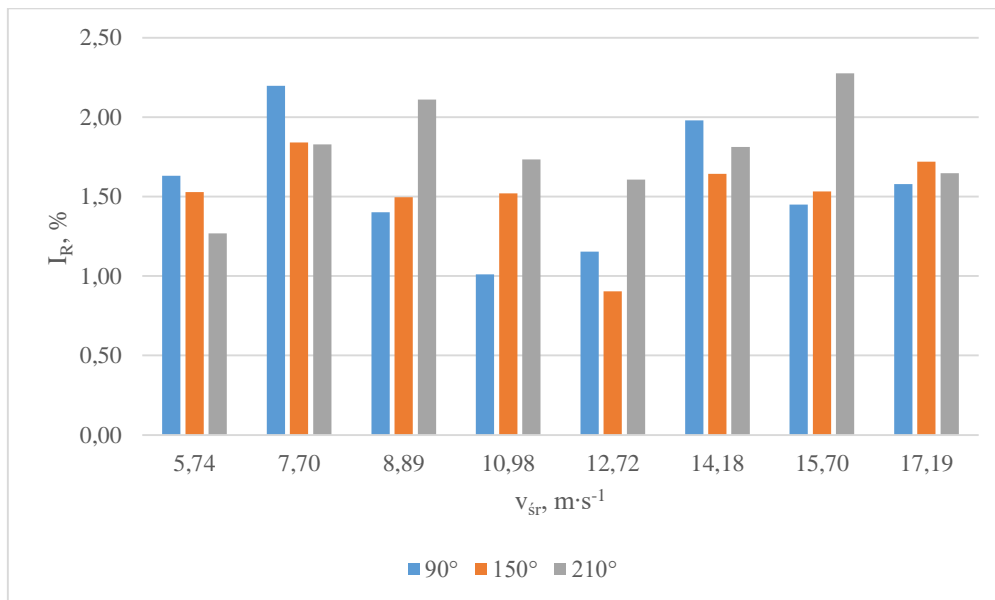
Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że tylko w 5 przypadkach pogorszył się nieznacznie wskaźnik I, miało to miejsce:

- dla osi 90° przy $14,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- dla osi 150° przy $7,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- dla osi 210° przy $10,98 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $12,72 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz $15,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

W pozostałych punktach wskaźnik I uległ znacznej poprawie. Najlepsze wyniki osiągnięto:

- dla osi 90° przy $10,36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, różnica wynosiła 1,36%,
- dla osi 150° przy $12,72 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, różnica wynosiła 0,98%,
- dla osi 210° przy $5,74 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, różnica wynosiła 1,43%.

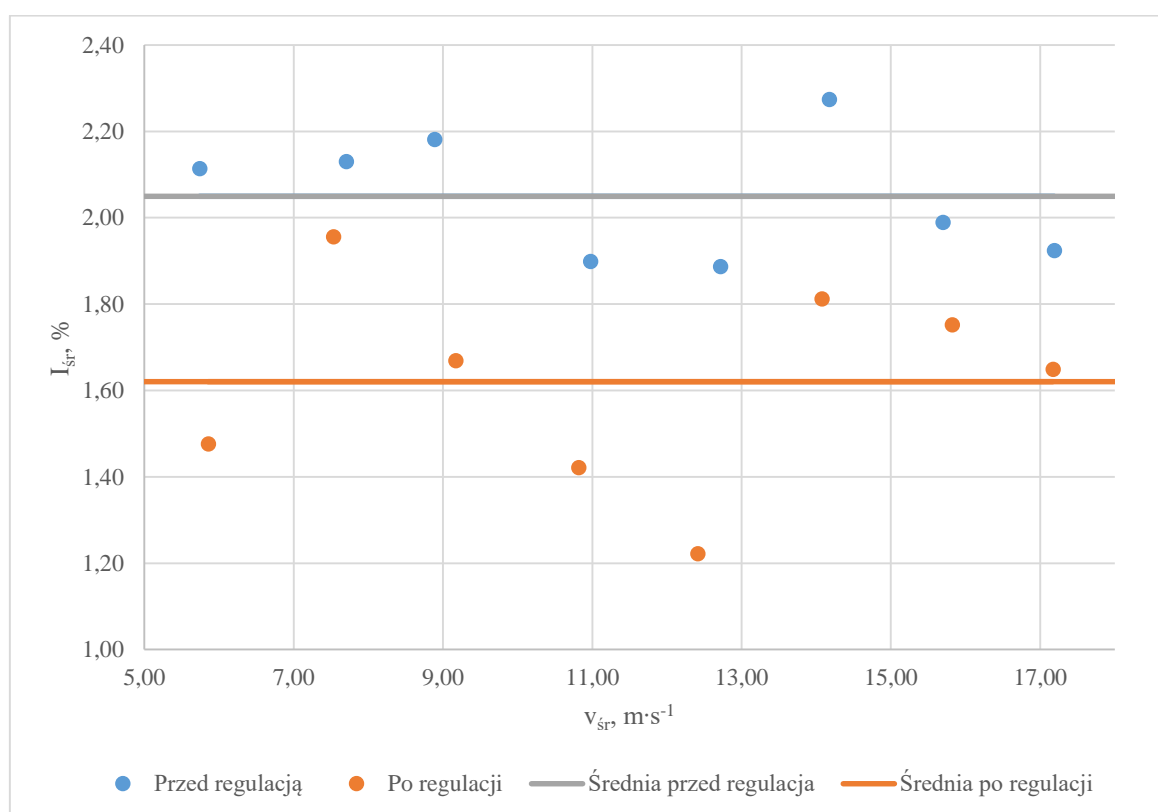
Powyzsze wyniki zostały zestawione na rysunku 46.



rys. 46. Graficzne przedstawienie wskaźników intensywności turbulencji dla poszczególnych osi z uwzględnieniem prędkości strugi powietrza po przeprowadzonej regulacji

Maksymalna wartość wskaźnika intensywności turbulencji osiągnięta przed regulacją uległa zmniejszeniu z 2,93% do 2,27%. Minimalna natomiast z 1,35% przed regulacją do 0,90% po regulacji. Wartości te są akceptowalne z zważywszy na fakt, że w konstrukcjach profesjonalny przyjmuje się maksymalną wartość wskaźnika intensywności turbulencji na poziomie 0,5% [Manshadi 2011].

Na wykresie 47 zobrazowano graficznie średnie wskaźniki intensywności turbulencji przed i po regulacji dla poszczególnych prędkości strugi powietrza. Linie ciągłe przedstawiają średnią wartość wskaźnika intensywności turbulencji przed i po wykonanej regulacji. Wartość średnie została obniżona z 2,05% do 1,62%.



rys. 47. Wskaźniki intensywności turbulencji przed i po regulacji dla poszczególnych średnich prędkości strugi powietrza.

Wyniki badań prędkości strugi powietrza zostały zobrazowane w formie wykresów zgodnie z równaniem:

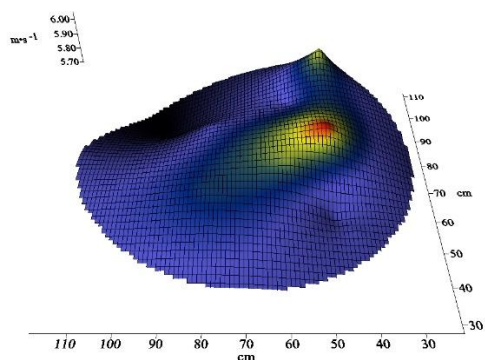
$$v = f(x, y) \quad (14)$$

gdzie:

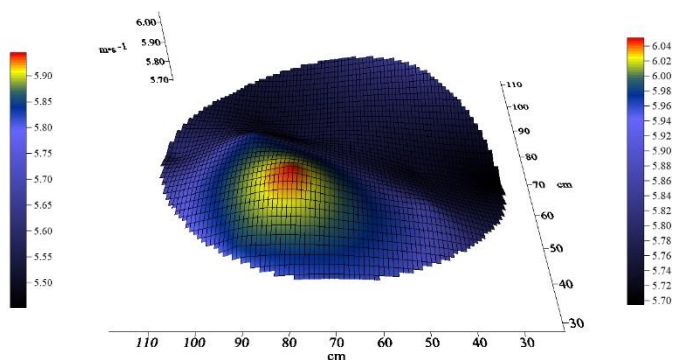
- v - prędkość strugi powietrza w danym punkcie pomiarowym, m·s⁻¹,
- x, y - położenie punktu pomiarowego w badanej strefie, cm.

Przedstawione wykresy odnoszą się do stanu przed i po regulacji dla poszczególnych nastaw przemienników częstotliwości. W przypadku stanu przed regulacją nastawy wszystkich falowników są identyczne. Dla stanu po regulacji każdy falownik zasila silnik wentylatora, z częstotliwością dobraną na podstawie badań empirycznych, jednak oscylujących w około nastaw sprzed regulacji. Każda para wykresów została też krótko scharakteryzowana.

W przypadku wentylatorów pracujących z częstotliwością 15 Hz przed regulacją prędkość strugi powietrza zawierała się w przedziale od $5,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do ponad $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Występowały dwa maksima o wartości ponad $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Po regulacji udało się podnieść dolną wartość zakresu prędkości do wartości $5,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Poprawie uległ również przebieg funkcji, który w chwili obecnej posiada tylko jedno maksimum, osiągające podobną wartość jak przed regulacją. W efekcie maksymalna różnica pomiędzy skrajnymi prędkościami strugi przy nastawie wentylatorów pracujących z częstotliwością 15 Hz nie przekraczała 5%, a wartość wskaźnika intensywności turbulencji zmniejszyła się o 0,64%, co jest jednym z dwóch najlepszych wyników w badaniach.



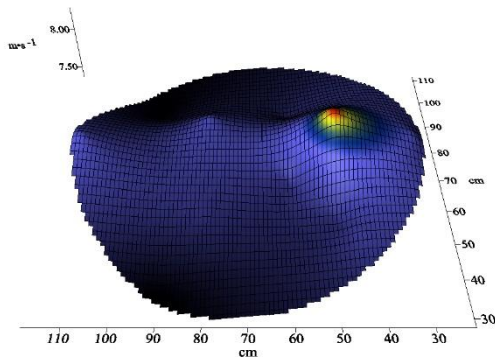
rys. 48. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 15 Hz



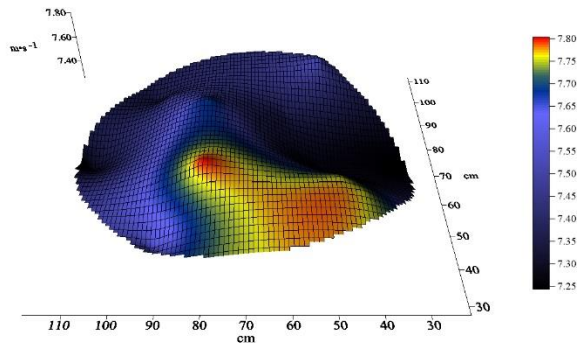
rys. 49. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 15 Hz

Dla częstotliwości 20 Hz przed regulacją prędkość strugi powietrza zawierała się w przedziale od $7,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $8,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Występowało jedno maksimum o wartości $8,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Po regulacji udało się zmniejszyć zakres prędkości w przekroju do przedziału od $7,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $7,80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. W wyniku tych działań różnica względna pomiędzy skrajnymi prędkościami w strudze przed korektą wynosiła 12%, a po już tylko ok. 7%, co w wartościach względnych oznacza spadek różnicy z $0,95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do wartości $0,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pomimo bardzo korzystnej poprawy różnicy skrajnych prędkości strugi powietrza, wskaźnik intensywności turbulencji zmalał tylko

o 0,17%, z wartości 2,13% do 1,96%. Jest to najmniej korzystna poprawa wartości tego wskaźnika w przeprowadzonych badaniach .

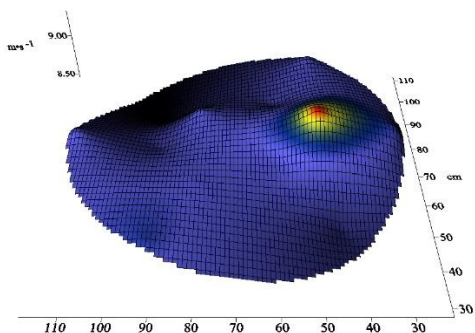


rys. 50. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 20 Hz

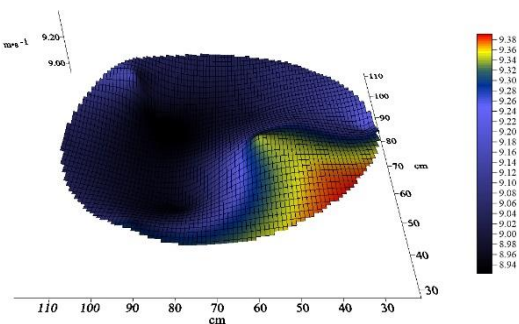


rys. 51. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 20 Hz

Prędkość strugi powietrza przed regulacją zawierała się w przedziale od $8,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $9,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, dla wentylatorów pracujących z częstotliwością 25 Hz. Występowało jedno maksimum o wartości $9,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Po regulacji nastąpiło znaczne zawężenie zakres prędkości w przekroju do przedziału od $8,92 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $9,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Górna granica przedziału po regulacji osiąga wyższą wartość niż przed regulacją, jednak zmniejszeniu uległa różnica pomiędzy wartością minimalną, a maksymalną. Po regulacji nie występuje wyraźne maksimum funkcji, dodatkowo średnia wartość wskaźnika intensywności turbulencji zmalała o 0,51%, z 2,18% do 1,67%.



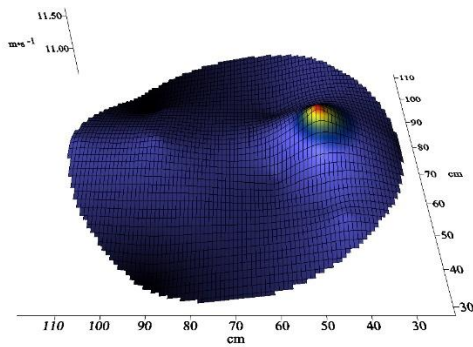
rys. 52. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 25 Hz



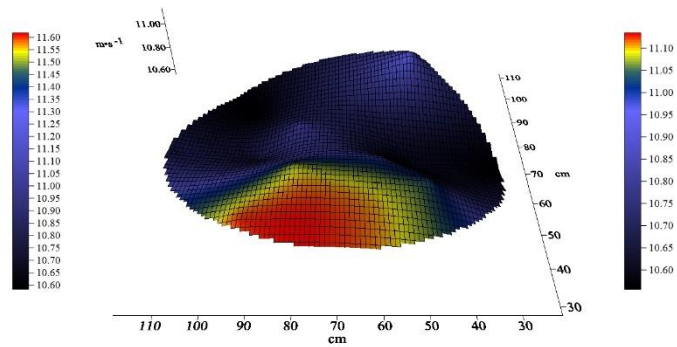
rys. 53. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 25 Hz

Dla częstotliwości 30 Hz przed regulacją prędkość strugi powietrza zawierała się w przedziale od $10,60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $11,60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Występowało jedno maksimum o wartości

11,60 m·s⁻¹. Po regulacji nastąpiło znaczące zawężenie zakres prędkości w przekroju do przedziału od 10,55 m·s⁻¹ do 11,15 m·s⁻¹ oraz obniżenie wartości wskaźnika intensywności turbulencji z 1,90% do 1,42%. Zarówno górna, jak i dolna granica przedziału po regulacji osiąga korzystniejsze wartości niż przed regulacją, co pozwoliło na zmniejszenie różnicy pomiędzy bezwzględną wartością minimalną, a maksymalną z wartości 1,0 m·s⁻¹ do 0,6 m·s⁻¹. Po regulacji nie występuje wyraźne maksimum funkcji.

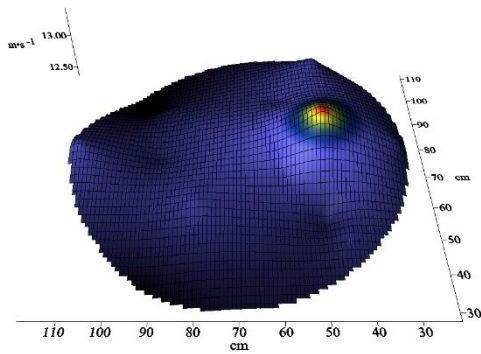


rys. 54. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 30 Hz

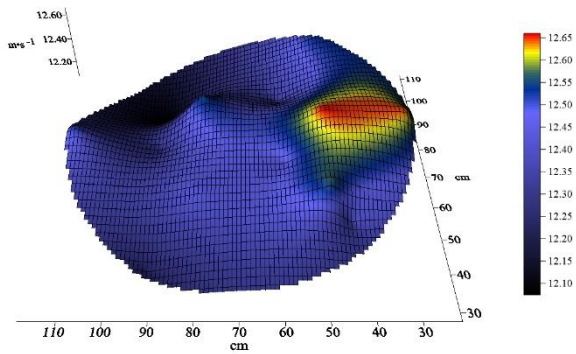


rys. 55. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 30 Hz

Regulacji częstotliwości pracy falowników zasilających wentylatora pozwoliła zmniejszyć przedział prędkości strugi powietrza z przedziału 12,40 m·s⁻¹ do 13,40 m·s⁻¹ do przedziału 12,10 m·s⁻¹ do 12,65 m·s⁻¹. Przed regulacją, kiedy wszystkie wentylatory pracowały z częstotliwością 35 Hz, występowało jedno maksimum o wartości 13,40 m·s⁻¹. Zarówno górna, jak i dolna granica przedziału po regulacji osiąga korzystniejsze wartości niż przed regulacją, co pozwoliło na zmniejszenie różnicy względnej pomiędzy wartością minimalną, a maksymalną z 7,5% do 4,3%, a w wartości bezwzględnej z 1,0 m·s⁻¹ do 0,55 m·s⁻¹. Pozwoliło to też osiągnąć najniższą w badaniach wartość wskaźnika intensywności turbulencji wynoszącą 1,22%, jak również najkorzystniejsze jego obniżenie o 0,66%.

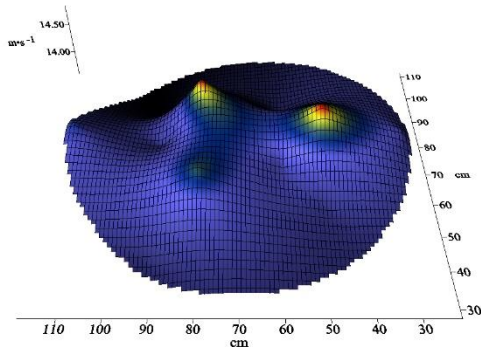


rys. 56. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 35 Hz

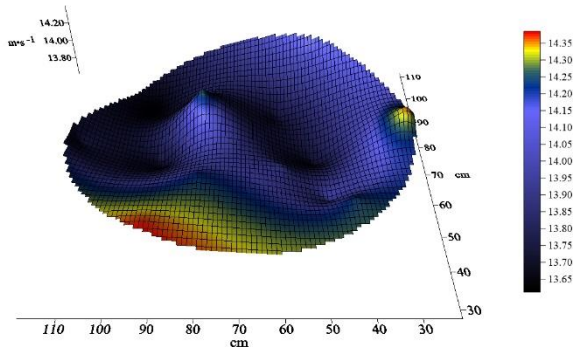


rys. 57. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 35 Hz

Przed regulacją wentylatory pracujące z częstotliwością 40 Hz wymuszały przepływ strugi z prędkością z przedziału od $13,60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $14,80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Występowały dwa maksima funkcji o wartościach około $14,80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Po regulacji nastąpiło zawężenie zakres prędkości w przekroju, szczególnie górnej granicy, do wartości $14,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zarówno górna, jak i dolna granica przedziału po regulacji osiąga korzystniejsze wartości niż przed regulacją, co pozwoliło na zmniejszenie różnicy pomiędzy wartości minimalną, a maksymalną z $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Po regulacji występuje maksimum funkcji o wartości $14,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz obszar, w którym funkcja osiąga wysokie wartości, jednak bez wyraźnego punktu maksymalnego.



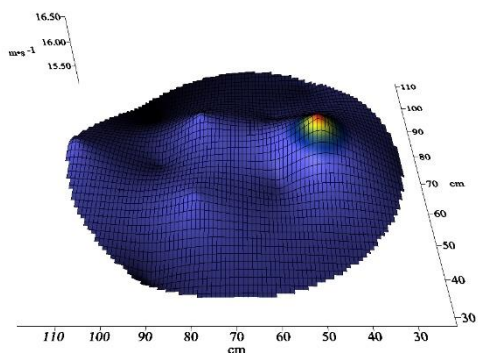
rys. 58. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 40 Hz



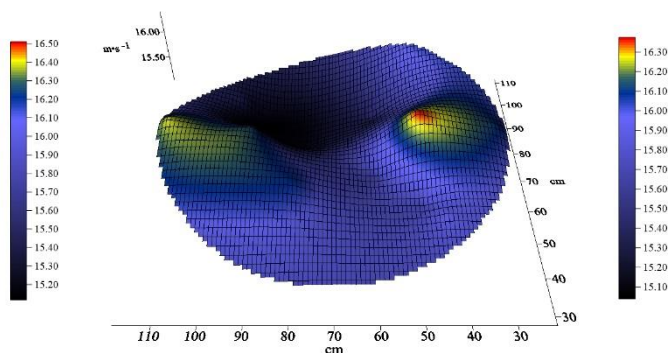
rys. 59. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 40 Hz

Dla częstotliwości 45 Hz przed regulacją prędkość strugi powietrza zawierała się w przedziale od $15,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $16,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Występowało jedno maksimum. Po regulacji zmieniły się nieznacznie wartości zakresu górnego i dolnego (od $15,20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $16,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), lecz bezwzględna różnica pomiędzy granicami pozostała niezmienną. Po regulacji występuje

maksimum funkcji o wartości $16,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Wartość wskaźnika intensywności turbulencji obniżyła się nieznacznie z 1,99% przed regulacją do 1,75% po regulacji.

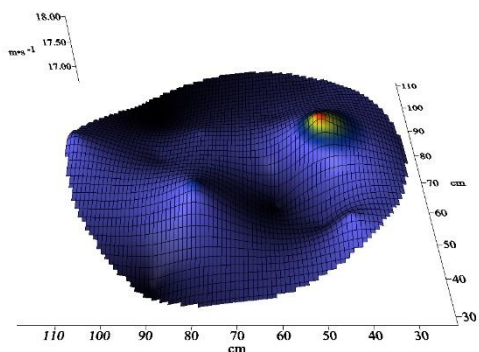


rys. 60. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 45 Hz

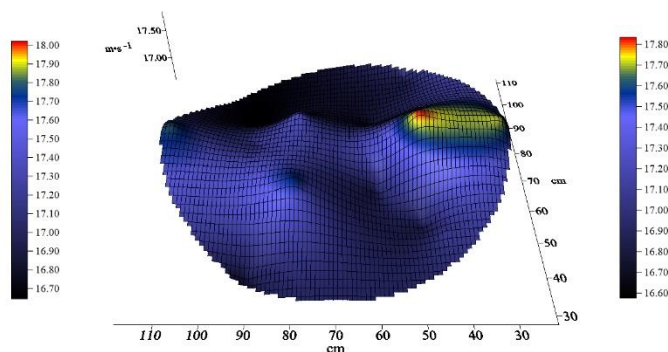


rys. 61. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 45 Hz

Dla wentylatorów pracujących z częstotliwością 50 Hz przed regulacją prędkość strugi powietrza zawierała się w przedziale od $16,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $18,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Występowało jedno maksimum o wartości $18,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Po regulacji nastąpiło małe zawężenie zakres prędkości w przekroju do przedziału od $16,60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $17,80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zarówno górna, jak i dolna granica przedziału po regulacji osiąga korzystniejsze wartości niż przed regulacją, co pozwoliło na zmniejszenie różnicy pomiędzy wartości minimalną, a maksymalną z $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz obniżenie wartości wskaźnika intensywności turbulencji o 0,27%. Po regulacji występuje maksimum funkcji, w tym samym punkcie, co przed regulacją, o wartości $17,80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



rys. 62. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 50 Hz



rys. 63. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 50 Hz

4.2. Badanie jednowirnikowej elektrowni wiatrowej

Laboratoryjne badania elektrowni jednowirnikowej zostały przeprowadzone dla 6 kątów zaklinowania łopaty w zakresie $30^\circ - 55^\circ$, ze skokiem co 5° . W wyniku badań uzyskano

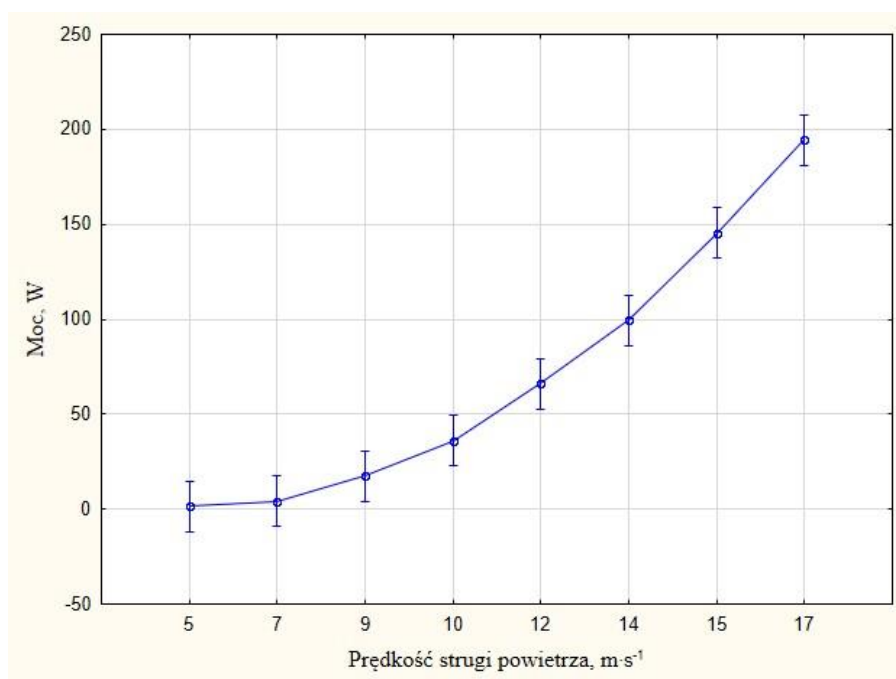
sześć charakterystyk mocy, która została obliczona na podstawie trzech powtórzeń, dla każdego kąta zaklinowania łopat.

W tabeli 7 przedstawiono wyniki wieloczynnikowej analizy wariancji bez interakcji wyników badań jednowirnikowej elektrowni wiatrowej.

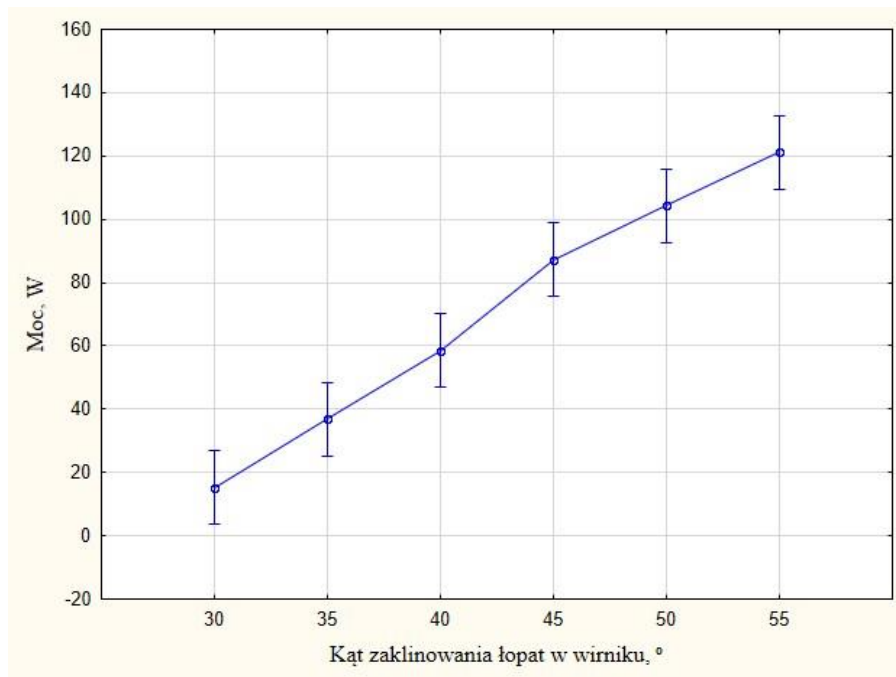
Tabela 7. Wieloczynnikowa analiza wariancji bez interakcji

	<i>SS</i>	<i>Stopnie</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Wyraz wolny	716845	1	716845	875,74	0,00
Prędkość strugi powietrza	629245	7	89892	109,82	0,00
Kąt zaklinowania łopat w wirniku	199767	5	39953	48,81	0,00
Błąd	107231	131	819		

Wyniki z tabeli 7 zostały zobrazowane w formie graficznej na rysunkach 64 i 65.



rys. 64. Interakcja pomiędzy prędkością strugi powietrza ($V, m \cdot s^{-1}$), a mocą generowaną przez jednowirnikową elektrownię wiatrową (P, W)



rys. 65. Interakcja pomiędzy kątem zaklinowania łopat w wirniku (α , °), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W)

Przeprowadzona analiza ANOVA (Tabela 7) daje podstawę do odrzucenia hipotezy zerowej o równości wartości oczekiwanych pomiędzy analizowanymi przypadkami, tym samym można stwierdzić, że wszystkie analizowane czynniki istotnie wpływają na wartość zmiennej zależnej, czyli generowanej mocy. Odrzucenie hipotezy zerowej dokonano na podstawie uzyskanych wartości „p”, które we wszystkich przypadkach były poniżej założonego poziomu istotności (0,05).

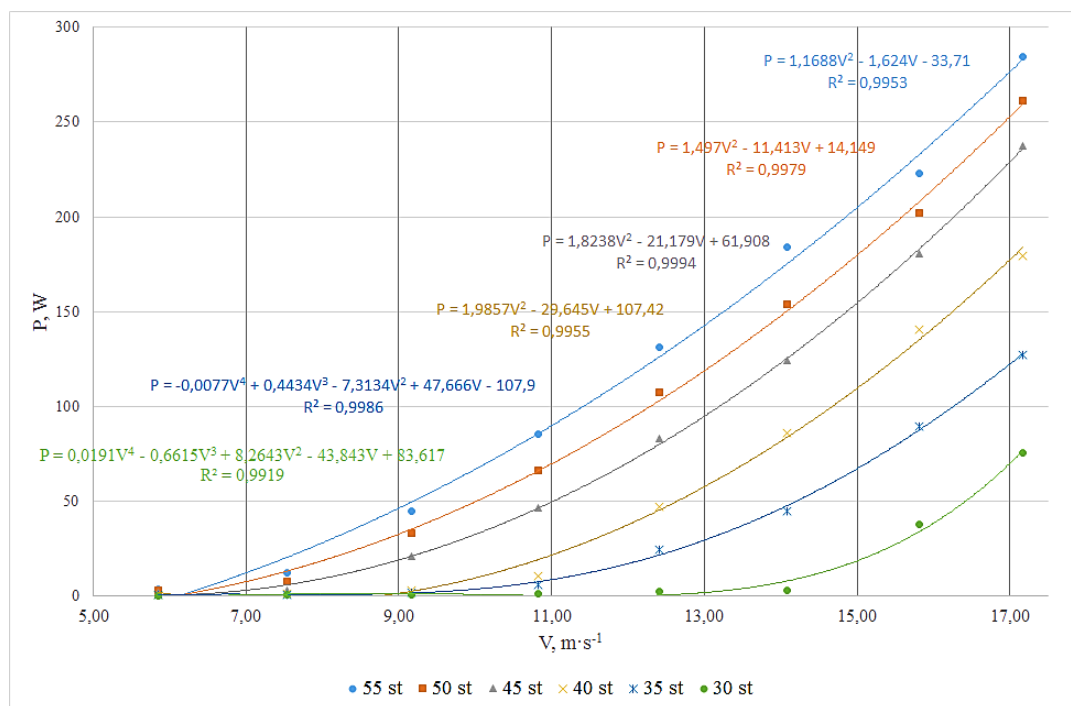
Dodatkowo w tabeli 8 przedstawiono wyniki analizy statycznej dotyczącej współczynników korelacji liniowej Pearsona oraz rang Spearmana.

Tabela 8. Współczynniki Pearson’a oraz rangi Spearman’a określające korelację pomiędzy zmienną zależną i zmiennymi niezależnymi dla elektrowni jednowirnikowej

Zmienna niezależna	Współczynniki Pearson’a	Rangi Spearman’a
v	0,79	0,84
α	0,46	0,52

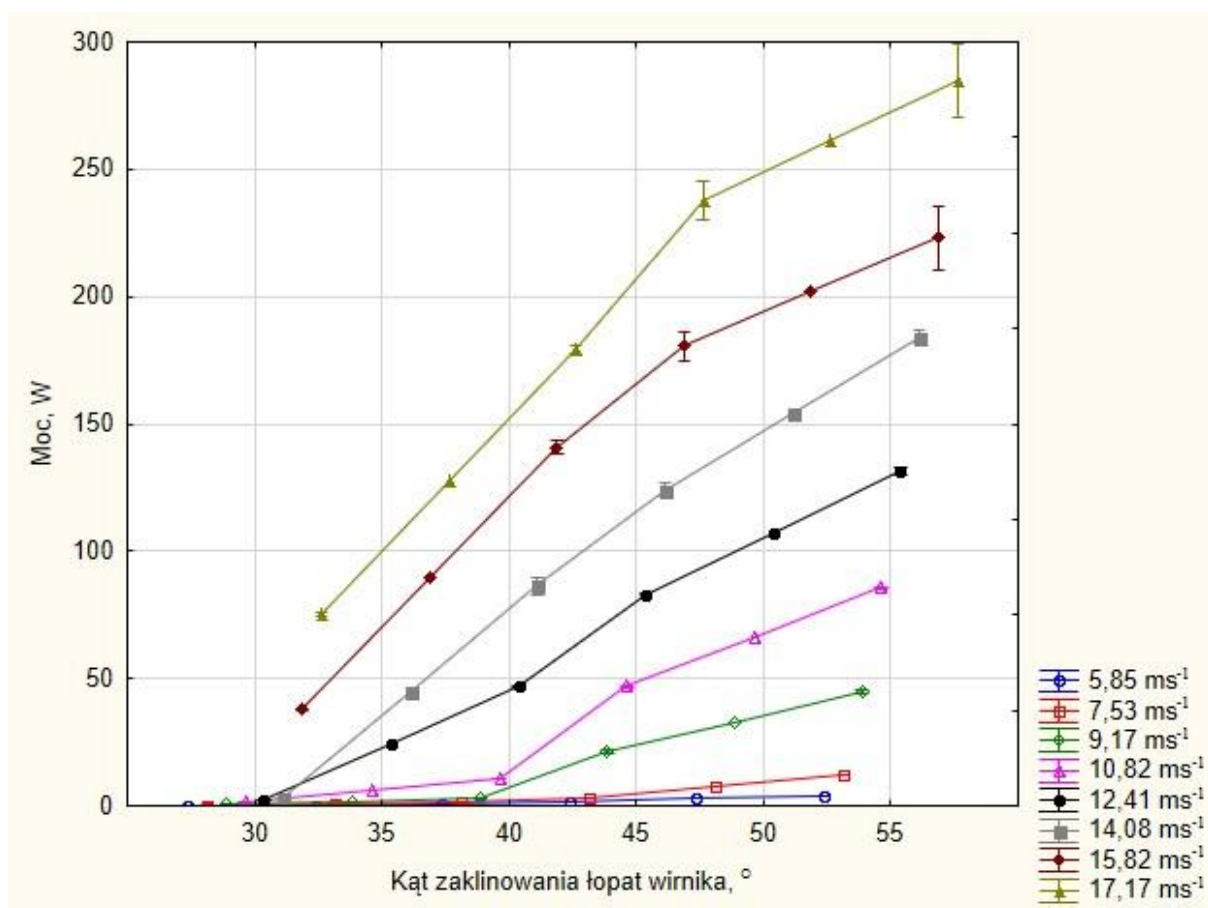
Dodatnia korelacja występuje dla obu zmiennych niezależnych (Tabela 7 oraz Tabela 8). Silniejsza korelacja pomiędzy prędkości strugi powietrza oraz generowaną mocą (rys. 64) jest związana z naturą turbin wiatrowych. Również wskaźniki korelacji pomiędzy kątem zaklinowania łopat oraz generowaną mocą (rys. 65) wskazują znaczący wpływ tego parametru na generowaną moc.

Porównanie wszystkich charakterystyk przedstawiono na rysunku 66. Wykreślone krzywe opisane są równaniami wielomianowymi (głównie kwadratowe) i w każdym przypadku charakteryzują je bardzo wysokie współczynniki determinacji, wynoszące powyżej 0,99.



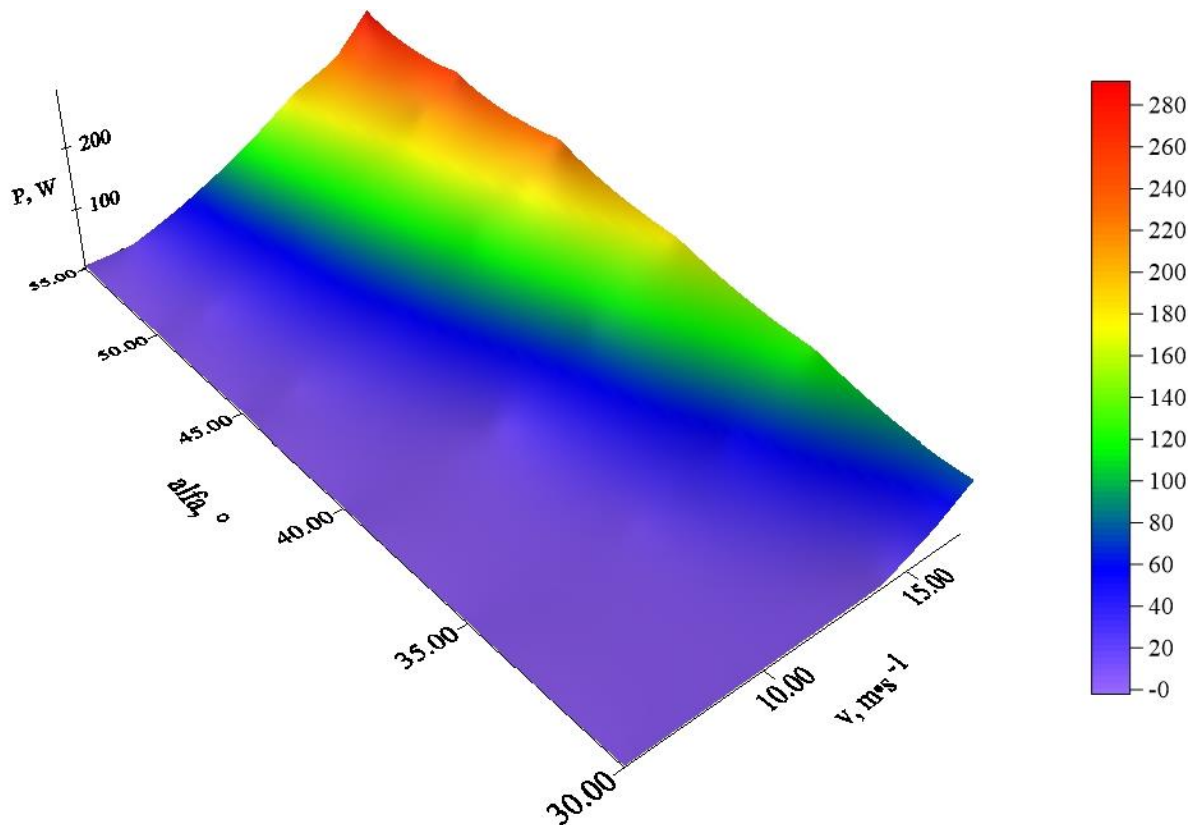
rys. 66. Charakterystyki mocy jednowirnikowej mini elektrowni wiatrowej

W badanym zakresie prędkości strugi powietrza maksymalną moc uzyskano dla kąta zaklinowania 55°, wynosiła ona 284 W i została osiągnięta przy prędkości strugi 17,17 m·s⁻¹. Minimalna moc została osiągnięta dla kąta 30° i wynosiła 0,14 W przy 5,85 m·s⁻¹. Wraz ze zmniejszaniem kąta zaklinowania łopat zmniejszała się powierzchnia łopaty, która jest w stanie odebrać energię wiatru i przekształcić ją w energię mechaniczną [Somers 2005]. W efekcie elektrownia wiatrowa generowała mniejszą moc elektryczną. Zależność ta została zobrazowana na rysunkach 67 i 68. W całym badanym zakresie optymalny kąt zaklinowania wynosił 55°, co został również potwierdzone analizami statystycznymi (Tabela 7, Tabela 8, rys. 65). Dla tego kąta, w każdym badanym punkcie, osiągnięto najwyższą moc (rys. 67 i rys. 68).



rys. 67. Interakcja pomiędzy kątem zaklinowania łopaty w wirniku (α , °) i prędkością strugi powietrza (V , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P , W)

Dodatkowo w trakcie badań laboratoryjnych przebadane zostały kąty większe od 55° , co potwierdziło założenia teoretyczne, że generowana moc powinna ulec zmniejszeniu. W przypadku kątów $30^\circ - 40^\circ$ najprawdopodobniej występuje zjawisko przeciągania [Bianchi i in. 2007; Marzocca 2009], które powoduje znaczne zmniejszenie generowanej mocy. Na rysunku 68 przedstawiono w formie wykresu trójwymiarowego zależność pomiędzy generowaną mocą elektryczną, a kątem zaklinowania łopaty oraz średnią prędkością strugi powietrza.



rys. 68. Zależność generowanej mocy w funkcji kąta zaklinowania łopatek oraz prędkości strugi powietrza

Analizując wyniki należy zwrócić uwagę, że w żadnym przypadku nie została osiągnięta znamionowa moc generatora, która powinna wynosić 300 W. W trakcie badań uzyskana moc maksymalna wynosiła 284 W. Dodatkowo potwierdzają się obliczenia teoretyczne dotyczące łopatek wirnika, sugerujące że maksymalna moc zostanie uzyskana przy kącie zaklinowania wynoszącym 55°.

Na rysunku 69 przedstawiono przebieg współczynnik wykorzystania mocy C_e w zależności od prędkości strug powietrza, który zdefiniowany jest jako:

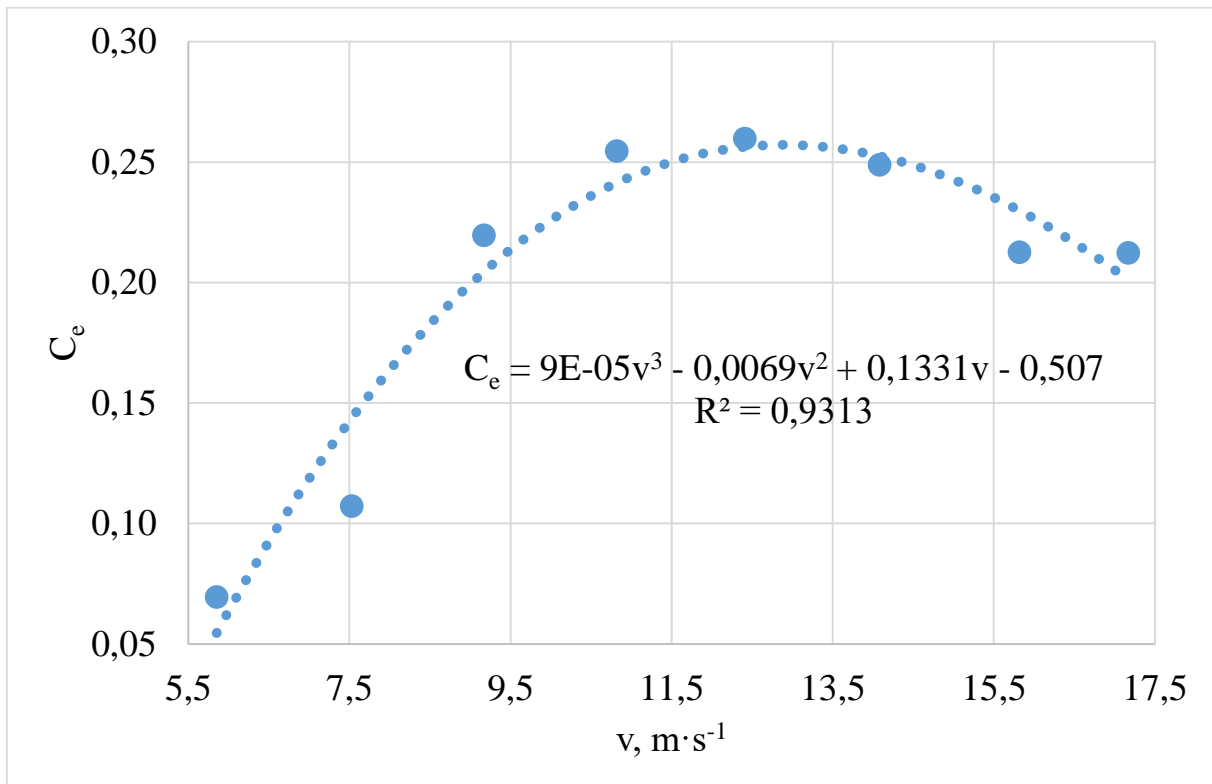
$$C_e = \frac{P_{rzeczywiste}}{P_{wiatru}} = \frac{P_{rzeczywiste}}{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \quad (15)$$

gdzie:

- $P_{rzeczywiste}$ - moc elektryczna zmierzona w trakcie pomiarów, W,
- ρ - gęstość powietrza, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
- A - pole powierzchni zakreślonej przez łopaty wirnika, m^2 ,
- v - prędkość strugi powietrza, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Współczynnik wykorzystania mocy informuje jak dobrze wykorzystana jest energia wiatru. W przeciwieństwie do powszechnie wykorzystywanego współczynnika C_p , który

przedstawia moc silnika wiatrowego, a nie elektrowni wiatrowej, współczynnik C_e uwzględnia straty mechaniczne oraz elektryczne układu, tym samym w bardziej rzeczywisty sposób charakteryzuje elektrownię wiatrową. Maksymalna wartość współczynnika C_e , przy założeniu że straty wynoszą 0%, jest równa maksymalnej wartości współczynnika C_p i według Prawa Betz'a wynosi 59,3% [Betz 1926]. W przypadku badanej konstrukcji wartość C_e osiągnęła 0,26, co należy uznać za dobry wynik w przypadku mini elektrowni wiatrowych.



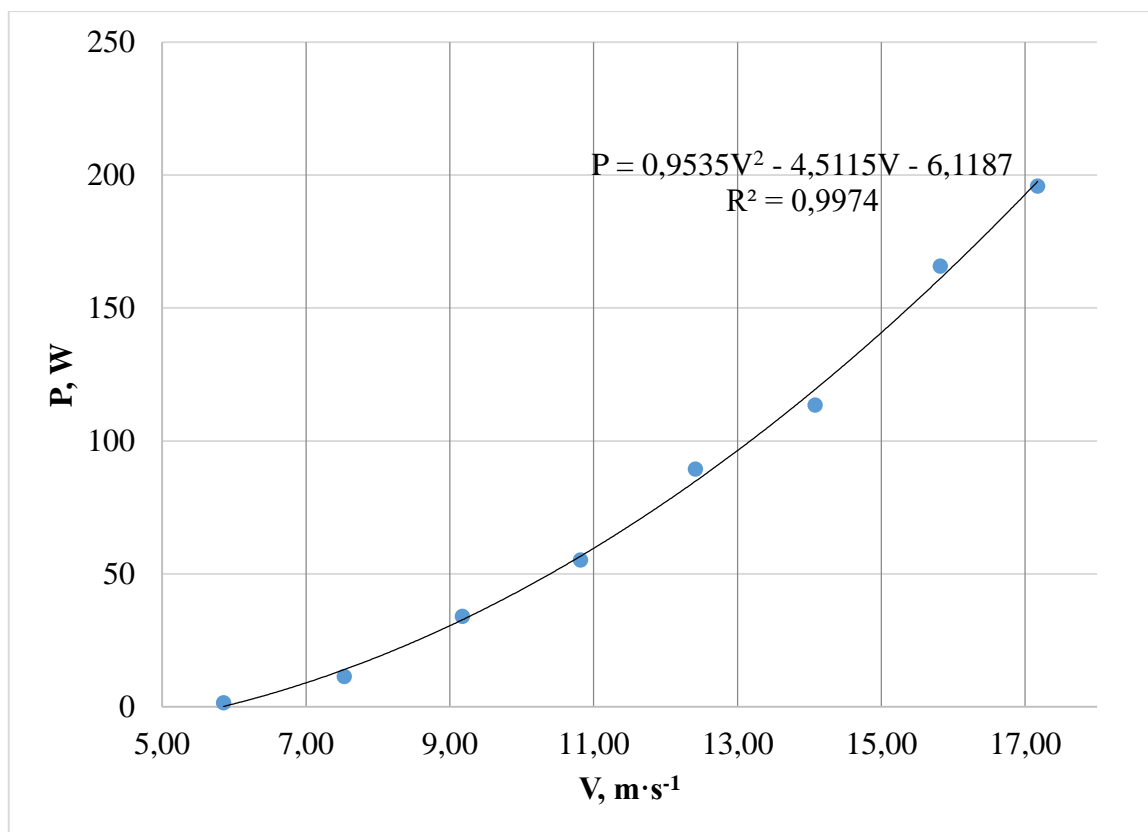
rys. 69. Zależność współczynnika mocy C_p elektrowni wiatrowej w zależności od prędkości strugi powietrza dla elektrowni jednowirnikowej

Założenia początkowe – konstrukcyjne, stanowiące że optymalna prędkość strug powietrza dla zaproponowanej turbiny wynosi $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, znajdują potwierdzenie w powyższym wykresie. Wartość współczynnika C_e jest maksymalna właśnie dla tej prędkości strug powietrza.

4.3. Badanie dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej

Badania wykonano zgodnie z metodyką badań opisaną w punkcie 3.3.2. Badania mini elektrowni wiatrowych. Przeprowadzone zostały w tunelu aerodynamicznym w Instytucie Inżynierii Rolniczej, Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. W trakcie badań uzyskano 288 charakterystyk dla różnych kątów zaklinowania łopat pierwszego oraz drugiego wirnika, różnych odległości, jak i różnych prędkości wiatru. Dokładne wyniki badań zostały zamieszczone w załączniku. Na rysunku 70 przedstawiono przykładową charakterystykę mocy,

uzyskaną dla kąta zaklinowania łopat pierwszego wirnika α_1 wynoszącego 125° , kąta zaklinowania łopat drugiego wirnika α_2 , wynoszącego 50° oraz odległości pomiędzy wirnikami l, wynoszącą 105 mm.

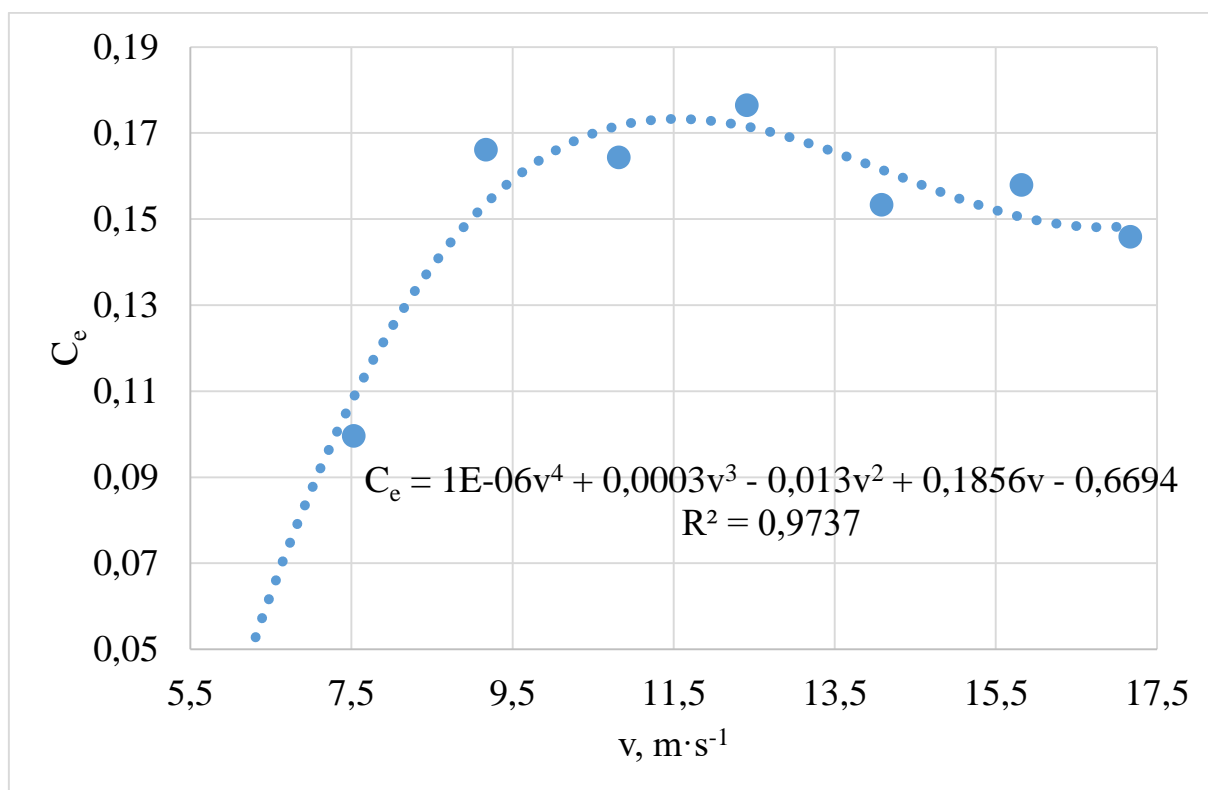


rys. 70. Charakterystyka mocy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej

Do punktów pomiarowych dobrano równanie krzywej o wysokim współczynniku determinacji wynoszącym 0,9974.

Maksymalna wygenerowana moc wynosiła 211 W, została osiągnięta przy $17,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, dla kąta α_1 wynoszącego 125° , α_2 wynoszącego 45° oraz odległości pomiędzy wirnikami wynoszącej 135 mm. Wartość ta jest o 73 W niższa niż w przypadku mocy osiągniętej przez siłownię jednowirnikową. Maksymalna moc dla warunków znamionowych, tj. $12,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wynosiła 92 W została osiągnięta dla kąta α_1 wynoszącego 125° , α_2 wynoszącego 50° oraz odległości pomiędzy wirnikami wynoszącej 140 mm. Jest to o 40 W mniej niż w przypadku konstrukcji jednowirnikowej.

Na rysunku 71 przedstawiono przebieg współczynnik wykorzystania energii wiatru C_e w zależności od prędkości strug powietrza dla elektrowni dwuwirnikowej.



rys. 71. Zależność współczynnika mocy C_p elektrowni wiatrowej w zależności od prędkości strugi powietrza dla elektrowni dwuwirnikowej

Tak jak w przypadku elektrowni jednowirnikowej, elektrownia dwuwirnikowa najwyższą wartość współczynnika wykorzystania mocy osiąga dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Wartości parametru C_e dla konstrukcji dwuwirnikowej są wyższe niż dla jednowirnikowej. Zjawisko to zostało szerzej omówione w rozdziale 4.4. Porównanie pracy jedno- oraz dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej.

4.3.1. Analiza statystyczna wyników badań pracy dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej

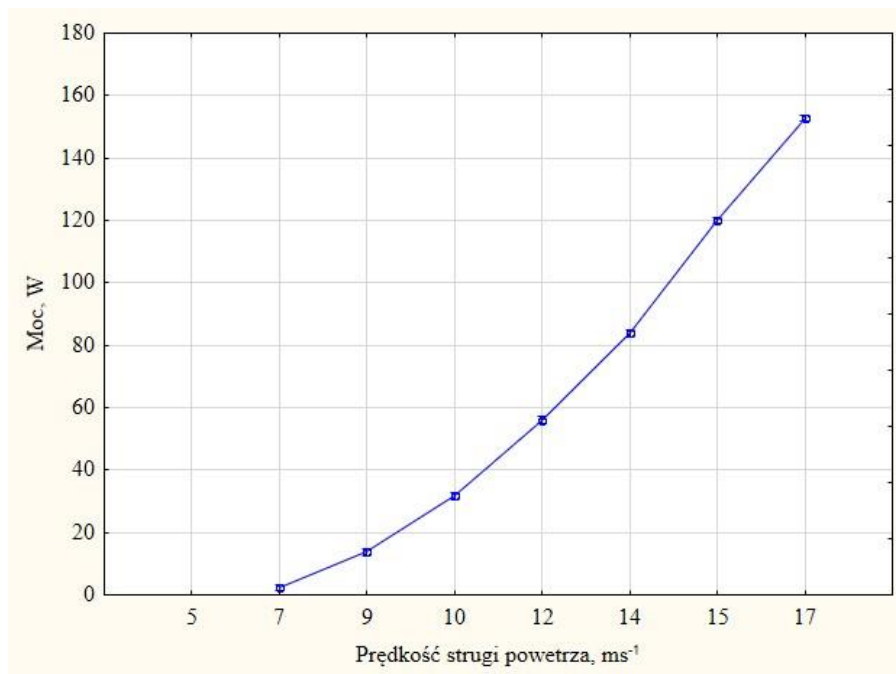
W przeprowadzonym eksperymencie za cel postawiono zbadanie wpływu parametrów pracy dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej na generowaną moc. W rozdziale przedstawiono analizy statystyczne określające wpływ zmiennych niezależnych (prędkości wiatru, kąta zaklinowania łopat pierwszego i drugiego wirnika oraz odległości pomiędzy wirnikami) na zmienną zależną, czyli generowaną moc. Przeprowadzone analizy badają też interakcję pomiędzy czynnikami.

Tabela 9. Wieloczynnikowa analiza wariancji bez interakcji

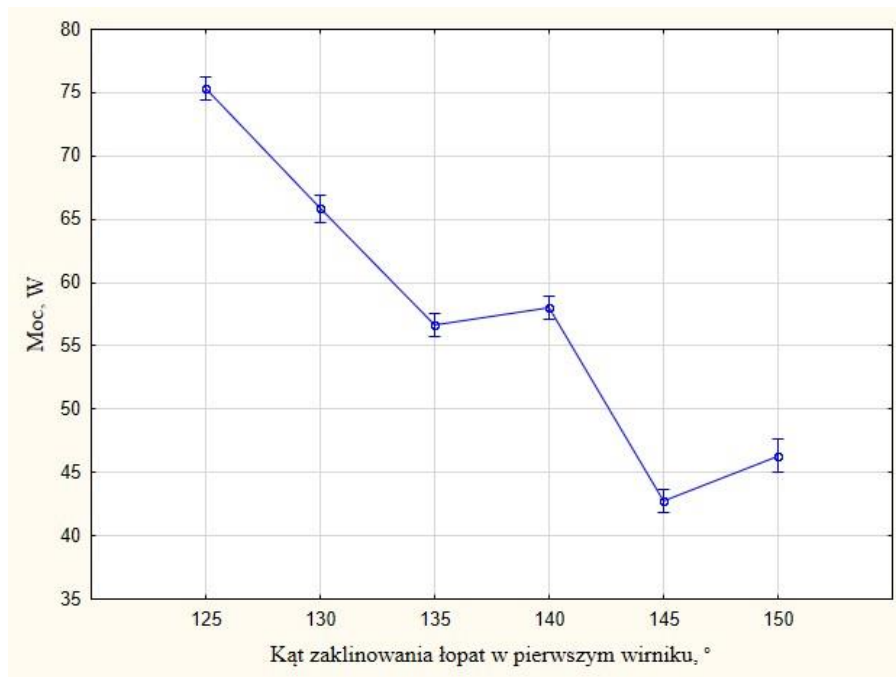
	<i>SS</i>	<i>Stopnie</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Wyraz wolny	17644996	1	17644996	74217,28	0,00
Prędkość strugi powietrza	17159508	7	2451358	10310,75	0,00
Kąt zaklinowania łopat pierwszego wirnika	744772	5	148954	626,52	0,00
Kąt zaklinowania łopat drugiego wirnika	562862	5	112572	473,50	0,00
Odległość pomiędzy wirnikami	26727	7	3818	16,06	0,00
Błąd	1431955	6023	238		

Przeprowadzona analiza ANOVA (Tabela 9) daje podstawę do odrzucenia hipotezy zerowej o równości wartości oczekiwanych pomiędzy analizowanymi przypadkami, tym samym można stwierdzić, że wszystkie analizowane czynniki istotnie wpływają na wartość zmiennej zależnej, czyli generowanej mocy. Odrzucenie hipotezy zerowej dokonano na podstawie uzyskanych wartości „p”, które we wszystkich przypadkach były poniżej założonego poziomu istotności (0,05).

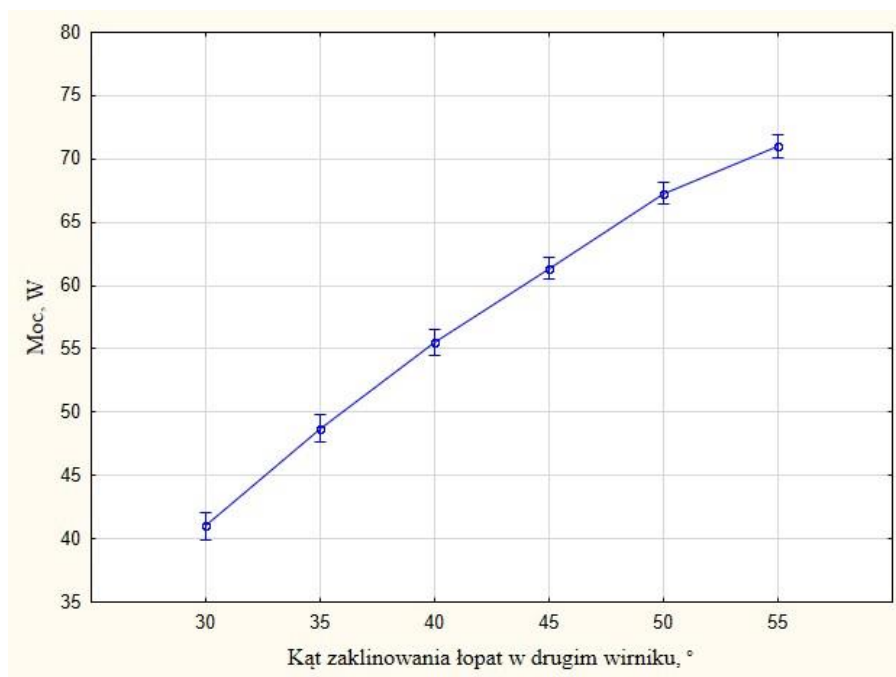
Wyniki z tabeli 9 przedstawiono w formie graficznej na wykresach 72 do 75. Na wykresach dodatkowo zaznaczono 95% przedziały ufności.



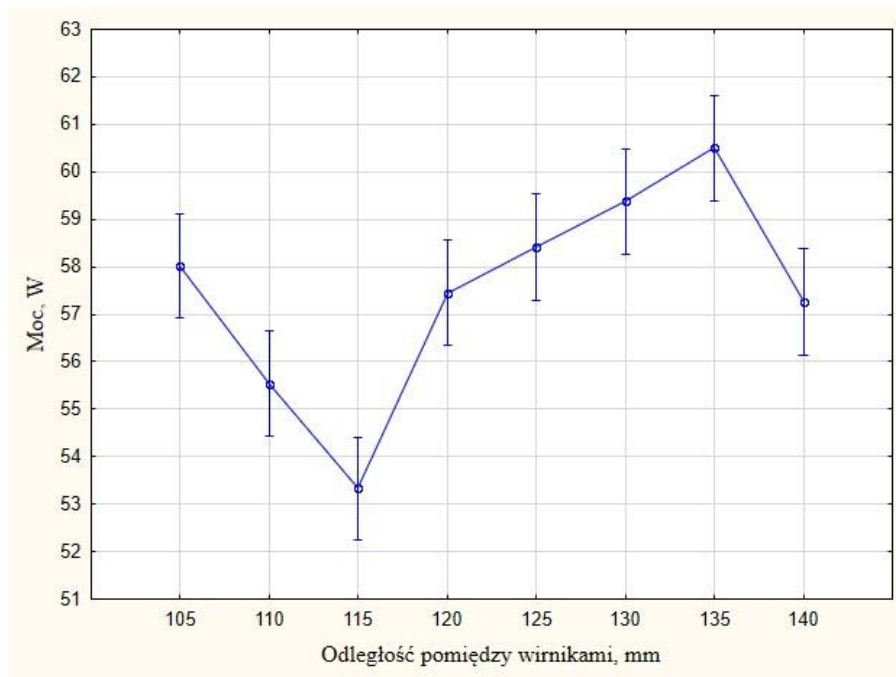
rys. 72. Interakcja pomiędzy prędkością strugi powietrza (V , $m \cdot s^{-1}$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P , W)



rys. 73. Interakcja pomiędzy kątem zaklinowania łopat w pierwszym wirniku (α_1 , °), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W)



rys. 74. Interakcja pomiędzy kątem zaklinowania łopat w drugim wirniku (α_2 , °), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W)

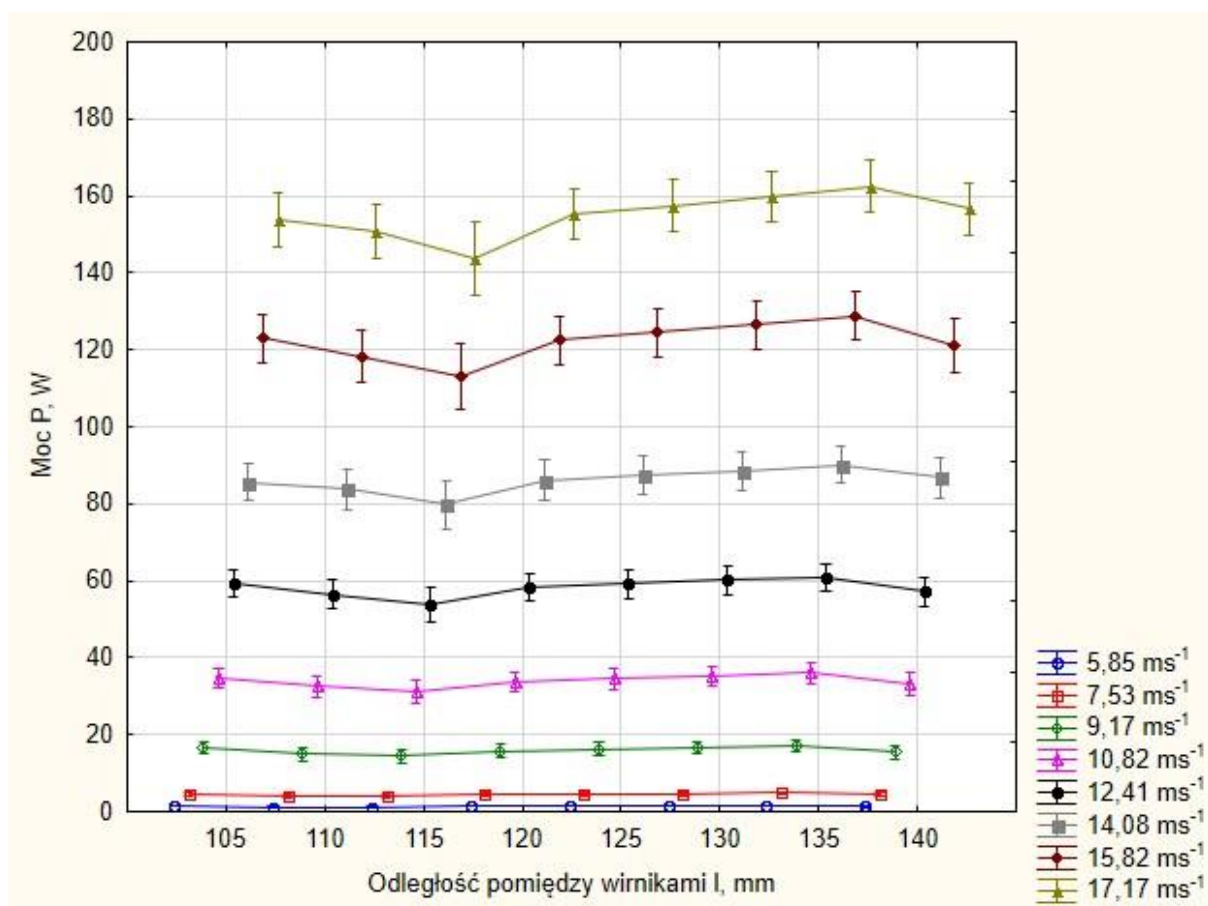


rys. 75. Interakcja pomiędzy odległością wirników (l , mm), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P , W)

Na rysunkach 72, 73, 74 przedziały ufności są wąskie, co również ma odzwierciedlenie w wysokich wartościach sprawdzianu F (Tabela 9). Tylko w przypadku współzależności pomiędzy odległością dwóch wirników, a generowaną mocą, 95% przedziały ufności są bardzo szerokie, co może być przyczyną niskiej wartości sprawdzianu F (Tabela 9).

Moc generowana przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową rosła wraz ze wzrostem prędkości strugi powietrza (rys. 72. Interakcja pomiędzy prędkością strugi powietrza (V , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P , W)), co jest zgodne z naturą tego urządzenia. Również zgodnie z oczekiwaniami, moc maksymalna została osiągnięta dla kąta zaklinowania pierwszego wirnika wynoszącego 125° (rys. 73) i dla kąta zaklinowania drugiego wirnika wynoszącego 55° (rys. 74). Wartości te zostały precyzyjnie określone w rozdziale pt. „Optymalizacja pracy dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej”, na podstawie wykresów obrazujących zależność generowanej mocy od kątów zaklinowania łopat w obydwu wirnikach.

Najwyższa wartość mocy została osiągnięta dla odległości 135 mm, a nie dla najmniejszej możliwej, tak jak zostało to określone w dotychczasowych publikacjach [Tong 2010]. Na rysunku 76 pokazano zależność odległością pomiędzy wirnikami i prędkością strugi powietrza, a mocą generowaną przez dwuwirnikową siłownię wiatrową.



rys. 76. Interakcja pomiędzy odległością wirników (l , mm) i prędkością strugi powietrza (v , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P , W)

Analizując krzywe na rysunku 76 można zauważyć, że spadek generowanej mocy dla odległości 115 mm, który został zauważony na rysunku 75, zaczyna występować od prędkości $12,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. A jest zauważalny od prędkości $15,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Najprawdopodobniej spadek ten powodują zaburzenia przepływu strugi powietrza, które występują przy wyższych prędkościach wiatru. Zauważania wymaga również fakt, że 95% przedziały ufności wrastają wraz ze wzrostem prędkości strugi powietrza, w wyniku czego trudno jest dobrać linię trendu o wysokim współczynniku determinacji.

Przypadek spadku mocy powinien zostać dokładnie przeanalizowany w przyszłości z użyciem oprogramowania CFD, które w przeciwieństwie do rzeczywistej elektrowni, umożliwi płynną zmianę odległości dwóch wirników.

4.3.2. *Optymalizacja pracy dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej*

W niniejszym rozdziale przedstawiono próbę dokonania wyboru optymalnych parametrów pracy dla prototypu dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej. Parametry, które były optymalizowane to:

- kąt zaklinowania łopat w pierwszym wirniku α_1 ,
- kąt zaklinowania łopat w drugim wirniku α_2 ,
- odległość pomiędzy wirnikami l.

Założono sześć wartości parametru α_1 z przedziału $125^\circ - 150^\circ$, ze skokiem co 5° . Analogicznie założono sześć wartości parametru α_2 z przedziału $30^\circ - 55^\circ$, ze skokiem co 5° . Odległość pomiędzy wirnikami była regulowana w zakresie od 105 m do 140 mm, ze skokiem co 5mm.

Przed dokonaniem optymalizacji, w rozdziale pt. „Analiza statystyczna wyników badań pracy dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej” została wykonana analiza statystyczna zależności pomiędzy zmienną zależną (moc P) oraz zmiennymi niezależnymi (średnie prędkości strugi powietrza v, kąt zaklinowania łopat pierwszego wirnika α_1 , kąt zaklinowania łopat drugiego wirnika α_2 , odległości pomiędzy wirnikami l). Dodatkowo w celu potwierdzenia zależności z rozdziału 4.3.1 analizę rozszerzono o wartości współczynników korelacji liniowej Pearsona oraz rang Spearmana. Wyniki zostały przedstawione w tabeli 10.

Tabela 10. Współczynniki Pearson’a oraz rangi Spearman’a określające korelację pomiędzy zmienną zależną i zmiennymi niezależnymi charakteryzującymi pracę elektrowni dwuwirnikowej

<i>Zmienna niezależna</i>	<i>Współczynniki Pearson’a</i>	<i>Rangi Spearman’a</i>
v	0,90	0,95
α_1	-0,16	-0,14
α_2	0,17	0,13
l	0,02	0,02

Na podstawie analizy można stwierdzić, że najsilniejsza korelacja (współczynniki w obu przypadkach $\geq 0,90$) występuje w przypadku prędkości strugi powietrza, co w przypadku elektrowni wiatrowej jest logiczne i potwierdzone wcześniejszymi analizami statystycznymi. Słaba korelacja ujemna występuje w przypadku kąta zaklinowania łopat pierwszego wirnika. Ujemne wartości współczynników sugerują, że zmniejszenie wartości kąta zaklinowania powinno skutkować wzrostem generowanej mocy. Również słaba korelacja, ale dodatnia, występuje w przypadku kąta zaklinowania łopat drugiego wirnika. Dodatnie wartości współczynników opisują wzrost wartości generowanej mocy wraz z wzrostem wartości kąta zaklinowania łopat. Praktyczny brak korelacji, w przypadku obu wskaźników, występuje w odniesieniu do odległości dwóch wirników.

Ze względu na wyniki w tabeli 10 optymalizacja została podzielona na dwa etapy. Pierwszy, ważniejszy ze względu na wyższe współczynniki korelacji, dotyczący kątów zaklinowania łopat oraz drugi – próba określenia optymalnej odległości pomiędzy wirnikami. W pierwszym etapie dokonano wyboru trzech optymalnych kątów zaklinowania obydwu wirników. Drugi etap sprowadzał się do wyboru optymalnej odległości pomiędzy wirnikami dla trzech wytypowanych w pierwszym etapie zestawów kątów.

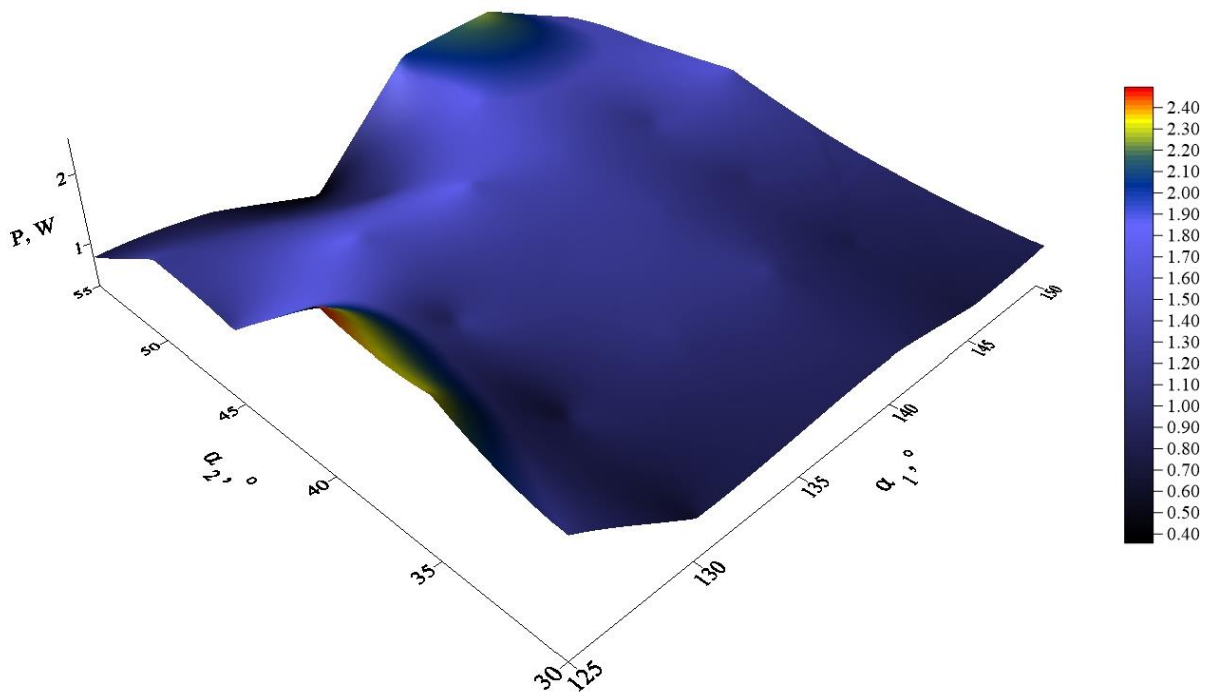
4.3.2.1. Optymalizacja kątów zaklinowania łopat

W celu określenia optymalnego kąta zaklinowania łopat zostały przedstawione w formie graficznej zależności wynikające z funkcji:

$$P = f(\alpha_1; \alpha_2) \quad (16)$$

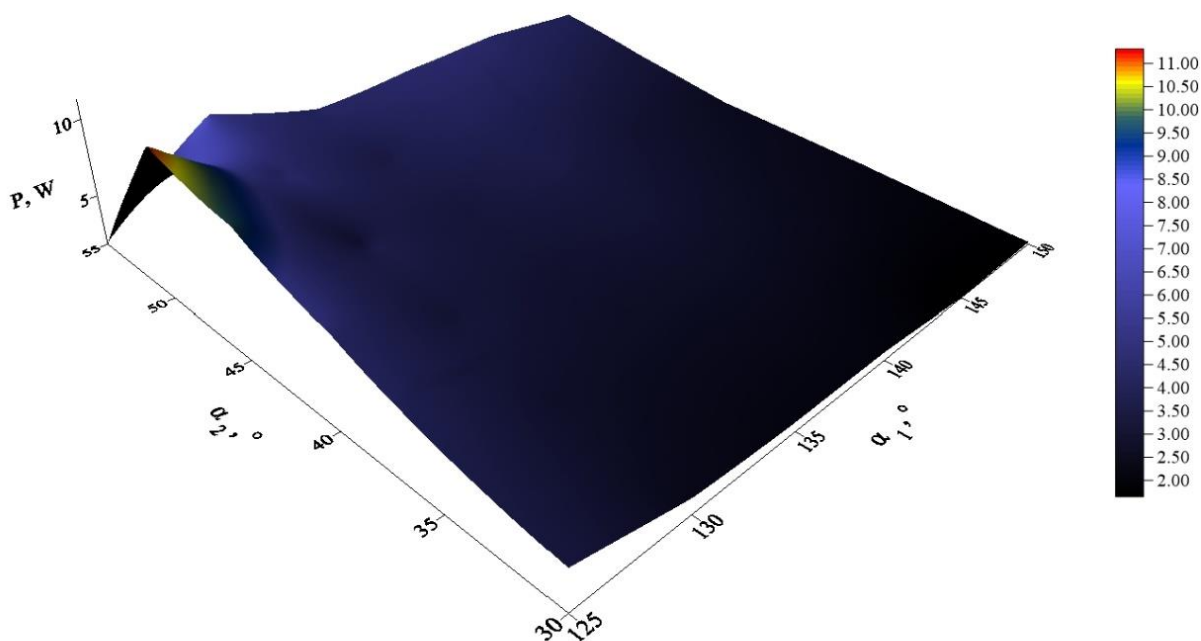
Zależności w formie wykresów zostały utworzone dla każdej prędkości strugi powietrza oddzielnie. Gama kolorystyczna skali została dobrana w taki sposób, aby uwidaczniać maksimum funkcji, które oznaczane jest kolorami z przedziału żółto – czerwonego.

Na rysunku 77 przedstawiono graficzną postać funkcji $P=f(\alpha_1, \alpha_2)$ dla średniej prędkości strugi powietrza wynoszącej $5,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z analizy wykresu wynika, że funkcja swoje maksymalne wartości, dochodzące do $2,40 \text{ W}$, osiąga przy kącie α_1 wynoszącym 125° oraz kącie α_2 wynoszącym 40° . Drugi punkt, w którym zostały również osiągnięte wysokie wartości z przedziału $2,20$ do $2,30 \text{ W}$, wypada dla kąta α_1 wynoszącego 145° oraz kąta α_2 wynoszącego 55° . Najniższe wartości (poniżej $0,50 \text{ W}$) zostały osiągnięte dla kąta α_1 wynoszącego 135° oraz kąta α_2 wynoszącego 55° .



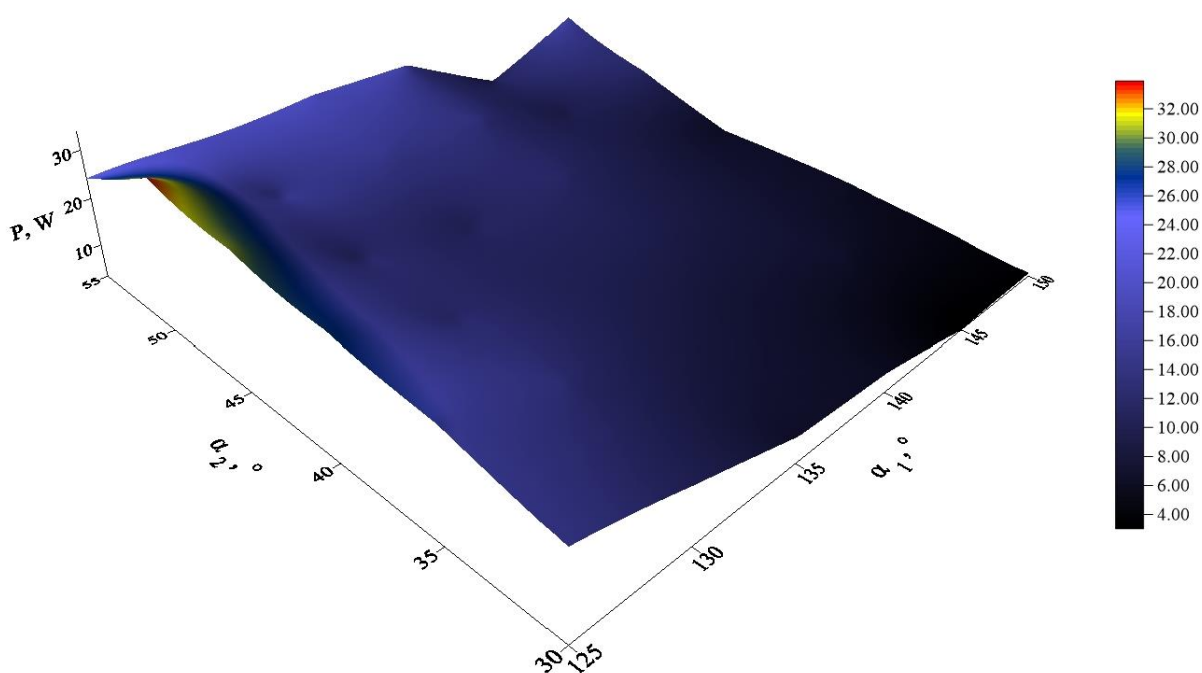
rys. 77. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopatek w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $5,58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Maksymalną wartość, wynoszącą 11 W, przy prędkości strugi powietrza równiej $7,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, została osiągnięta dla kątów α_1 wynoszącego 125° oraz kąta α_2 wynoszącego 50° . Graficzna postać funkcji $P=f(\alpha_1, \alpha_2)$ dla średniej prędkości strugi powietrza wynoszącej $7,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pokazuje że najniższe wartości (poniżej 2,50 W) zostały osiągnięte dla kąta α_1 z przedziału $135^\circ - 150^\circ$ oraz kąta α_2 z przedziału $30^\circ - 40^\circ$. Na generowaną moc duży wpływ ma kąt α_2 . Wraz ze wzrostem wartości tego kąta przyrost mocy nie jest tak łagodny, jak w przypadku kąta α_1 . Gwałtowny spadek generowanej następuje mocy dla wartości 55° najpewniej spowodowany zbyt niską prędkością strugi powietrza dla tej wartości kąta zaklinowania.



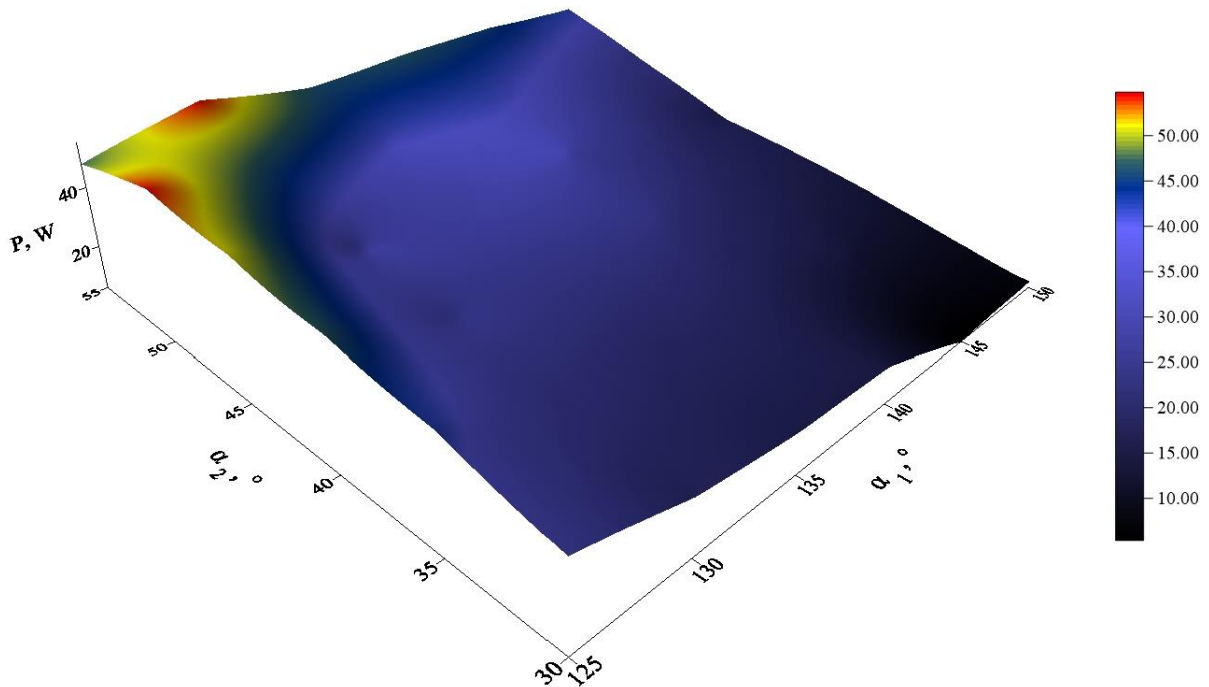
rys. 78. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $7,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Graficzną postać funkcji $P=f(\alpha_1, \alpha_2)$, dla średniej prędkości strugi powietrza wynoszącej $9,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, przedstawiono na rysunku 79. Funkcja osiąga maksymalne wartości, przekraczające $32,00 \text{ W}$, dla kąta zaklinowania łopat α_1 wynoszącego 125° oraz kąta zaklinowania α_2 wynoszącego 50° . Najniższe wartości (poniżej $4,00 \text{ W}$) zostały osiągnięte dla kąta α_1 z przedziału $145^\circ - 150^\circ$ oraz kąta α_2 z przedziału $30^\circ - 35^\circ$. Również niską wartość mocy (poniżej $8,00 \text{ W}$) osiągnięto przy zastosowaniu kątów zaklinowania odpowiednio $\alpha_1 = 145^\circ$ oraz kąta $\alpha_2 = 55^\circ$. Tak jak w przypadku funkcji przedstawionej na rysunku 78 (prędkość strugi powietrza wynosząca $7,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), tutaj również następuje spadek generowanej mocy dla kąta α_2 równego 55° , jednak nie jest to tak gwałtowny proces, jak w poprzednim przypadku.



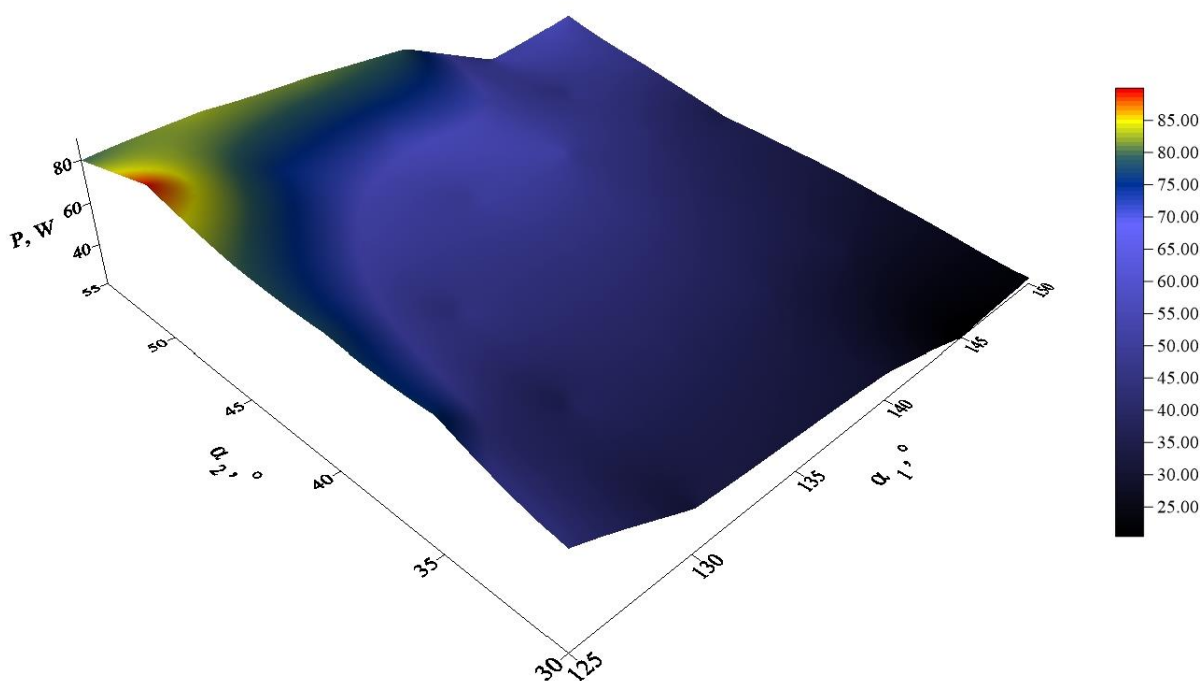
rys. 79. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $9,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Graficzną postać funkcji $P=f(\alpha_1, \alpha_2)$, przy stałej średniej prędkości strugi powietrza wynoszącej $10,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, przedstawiono na rysunku 80. Z analizy przedstawionej zależności wynika, że generowana moc rośnie wraz ze zmniejszaniem wartości kąta α_1 i przy jednoczesnym zwiększaniu kąta α_2 . Wyjątkiem, tak jak w dwóch poprzednich przypadkach (rysunki 78 i 79), jest punkt $\alpha_1 = 125^\circ$ i $\alpha_2 = 55^\circ$, w którym generowana moc spada, jednak nie w tak zauważalny sposób, jak zostało to zaobserwowane wcześniej. Maksymalne wartości, przekraczające 50 W , zostały osiągnięte w dwóch przypadkach. Pierwszy to ten, gdy kąt α_1 osiąga wartość 125° , a α_2 50° . Drugi, to ten w którym kąt α_1 wynosi 130° , a kąt α_2 55° . Najniższe wartości (poniżej $10,00 \text{ W}$) zostały osiągnięte dla kąta α_1 z przedziału $145^\circ - 150^\circ$ oraz kąta α_2 z przedziału $30^\circ - 35^\circ$.



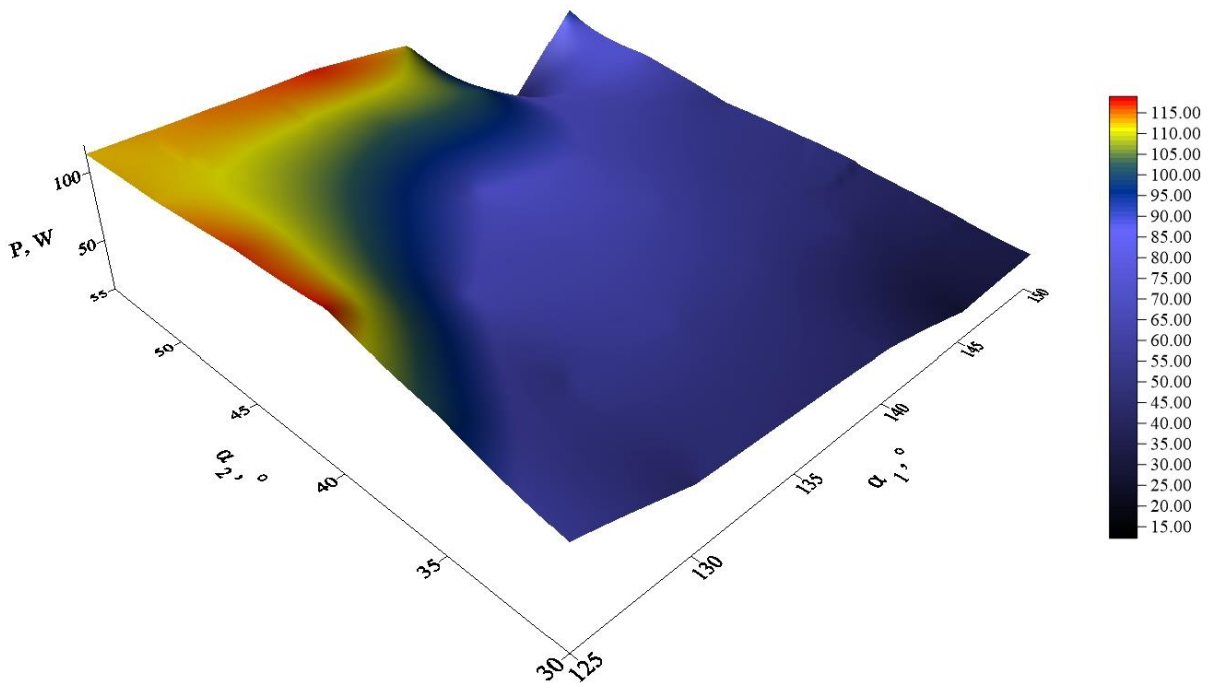
rys. 80. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopatek w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $10,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rysunek 81 obrazuje funkcję $P=f(\alpha_1, \alpha_2)$ dla średniej prędkości strugi powietrza wynoszącej $12,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z analizy wykresu wynika, że funkcja swoje maksymalne wartości, przekraczające $58,00 \text{ W}$, osiąga wtedy gdy kąt α_1 wynosi 125° , a kąt α_2 50° . Wysokie wartości, powyżej 80 W , osiągnięte zostały również dla kątów α_1 z zakresu $125^\circ - 135^\circ$, ale nieco większym kącie zaklinowania α_2 wynoszącym 55° . Najniższe wartości (poniżej $25,00 \text{ W}$) zostały osiągnięte dla kąta α_1 z przedziału $145^\circ - 150^\circ$ oraz kąta α_2 z przedziału $30^\circ - 35^\circ$. Rozkład funkcji generowanej mocy jest zgodny ze spodziewanym, tj. moc rośnie wraz ze spadkiem wartości kąta α_1 i wzrostem wartości kąta α_2 . Tak jak w przypadku funkcji dla prędkości strugi powietrza równej $9,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, widoczny jest spadek wartości generowanej mocy dla punktu, w którym kąt α_1 wynosi 145° , a kąt α_2 55° .



rys. 81. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopatek w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $12,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Funkcję obrazującą przebieg generowanej mocy, dla średniej prędkości strugi powietrza wynoszącej $14,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, w zależności od kątów zaklinowania łopatek w wirnikach przedstawiono na rysunku 82. Analizując wykres można stwierdzić, że funkcja swoje maksymalne wartości, przekraczające $115,00 \text{ W}$, osiąga dla dwóch punktów. Pierwszy powiązany jest z wartością kąta α_1 wynoszącą 125° oraz wartościami kąta α_2 z przedziału $40^\circ - 50^\circ$. Drugi natomiast łączony z wartościami kąta α_1 z przedziału $130^\circ - 140^\circ$ oraz wartością kąta α_2 wynoszącą 55° . Wysokie wartości, powyżej $110,00 \text{ W}$, osiągnięte zostały również dla kąta α_1 wynoszącego 125° , przy kącie α_2 wynoszącym 55° . Wyraźna najniższa wartość (poniżej $15,00 \text{ W}$) została osiągnięta dla kąta α_1 145° oraz kąta α_2 55° , tak jak w przypadku prędkości strugi powietrza wynoszącej $9,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $12,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Trzykrotne powtórzenie wyjątkowo niskiej wartości mocy w tym punkcie jednoznacznie wyklucza ten kąt w procesie optymalizacji.



rys. 82. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopatek w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $14,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Wyniki w formie graficznej, obrazujące zależności generowanej mocy od kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla średniej prędkości strugi powietrza wynoszącej $15,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, zostały przedstawione na rysunku 83. obrazuje funkcję $P=f(\alpha_1, \alpha_2)$. Funkcja swoje maksymalne wartości, przekraczające $165,00 \text{ W}$, osiąga dla dwóch punktów. Pierwszy powiązany jest z wartością kąta α_1 wynoszącą 125° oraz wartością kąta α_2 wynoszącą 50° . Drugi natomiast połączony jest z wartością kąta α_1 wynoszącą 130° oraz wartością kąta α_2 wynoszącą 55° . Wysokie wartości, powyżej 150 W , osiągnięte zostały również dla:

$$\alpha_1 = 125^\circ; \alpha_2 = 55^\circ,$$

$$\alpha_1 = 125^\circ; \alpha_2 = 45^\circ,$$

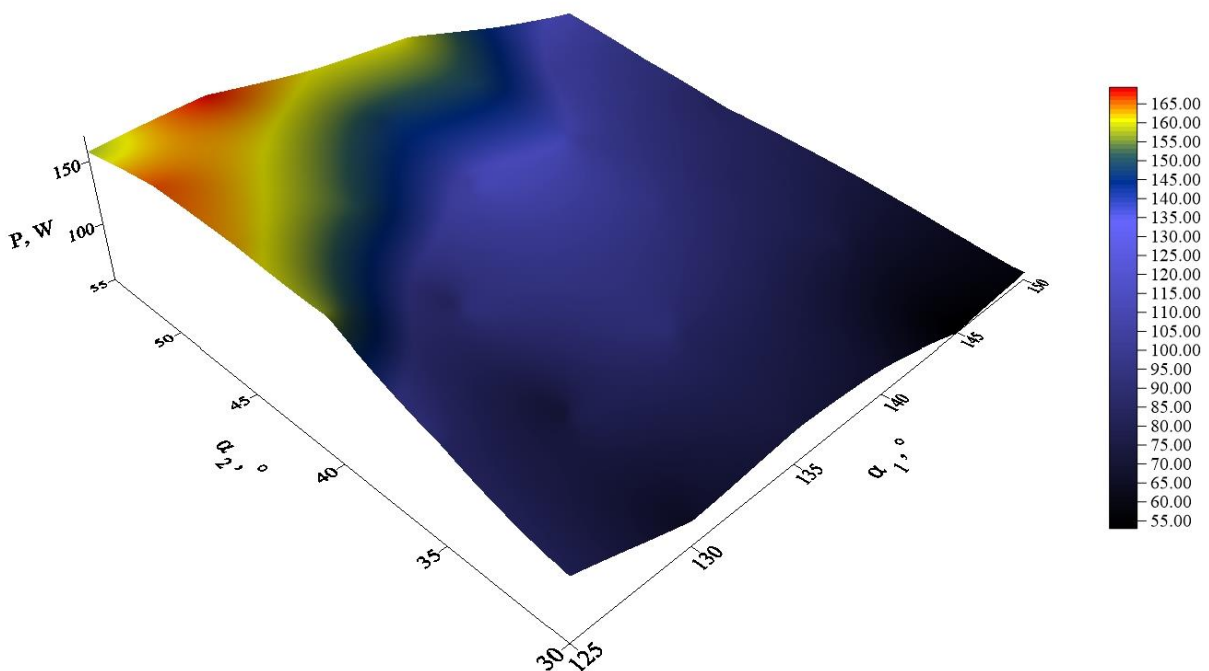
$$\alpha_1 = 125^\circ; \alpha_2 = 40^\circ,$$

$$\alpha_1 = 130^\circ; \alpha_2 = 50^\circ,$$

$$\alpha_1 = 135^\circ; \alpha_2 = 55^\circ,$$

$$\alpha_1 = 140^\circ; \alpha_2 = 55^\circ.$$

Najniższe wartości (poniżej $55,00 \text{ W}$) zostały osiągnięte dla kąta α_1 z przedziału $145^\circ - 150^\circ$ oraz kąta α_2 z przedziału $30^\circ - 35^\circ$.



rys. 83. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $15,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rysunek 84 przedstawia graficzną postać funkcji $P=f(\alpha_1, \alpha_2)$ dla średniej prędkości strugi powietrza wynoszącej $17,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z analizy wykresu wynika, że funkcja swoje maksymalne wartości, przekraczające 200 W, osiąga przy kącie zaklinowania łopaty α_1 wynoszącym 130° oraz kąta α_2 równym 55° . Wysokie wartości, powyżej 150,00 W, osiągnięte zostały również dla:

$$\alpha_1 = 125^\circ; \alpha_2 = 55^\circ,$$

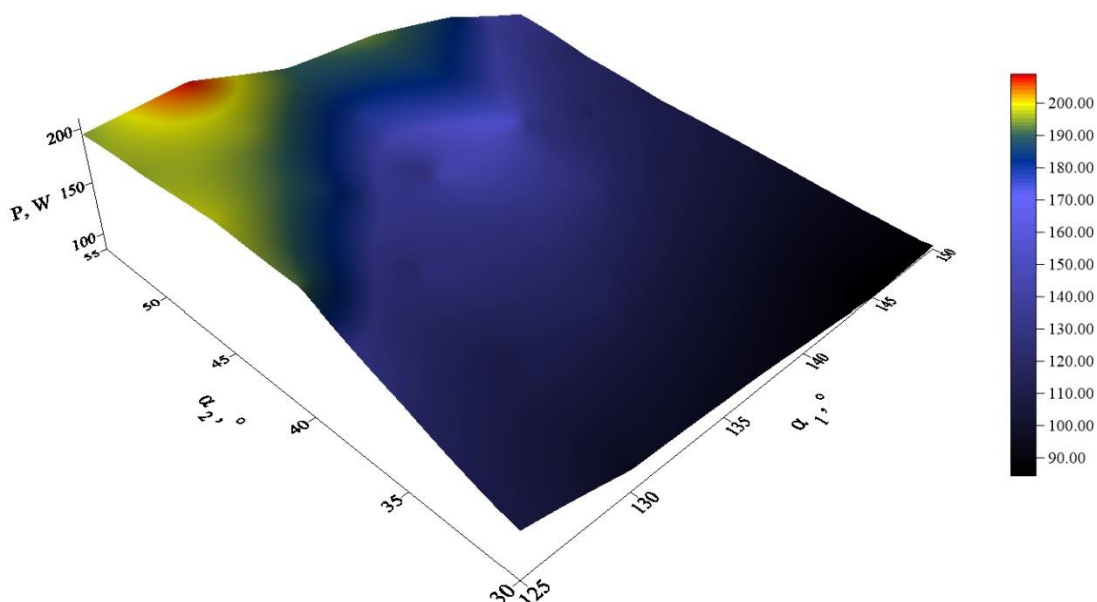
$$\alpha_1 = 125^\circ; \alpha_2 = 50^\circ,$$

$$\alpha_1 = 125^\circ; \alpha_2 = 45^\circ,$$

$$\alpha_1 = 130^\circ; \alpha_2 = 50^\circ,$$

$$\alpha_1 = 135^\circ; \alpha_2 = 55^\circ.$$

Należy odnieść się tutaj do punktu pomiarowego, w którym została zmierzona maksymalna moc w trakcie badań (211 W dla kąta $\alpha_1 = 125^\circ$ oraz $\alpha_2 = 45^\circ$ przy $17,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), gdzie wartość ta została stwierdzona jednorazowo, tj. wartość tak została zmierzona raz na 24 pomiary przeprowadzone dla takich nastaw. Pozostałe pomiary dla $\alpha_1 = 125^\circ$ oraz $\alpha_2 = 45^\circ$ wykazały, że elektrownia generowała niższą moc, stąd też funkcja z rysunku 84 przyjmuje swoje maksimum w innym punkcie. Najniższe wartości (poniżej 55 W) zostały osiągnięte dla kąta α_1 , z przedziału $145^\circ - 150^\circ$ oraz kąta α_2 z przedziału $30^\circ - 35^\circ$.



rys. 84. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopaty w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $17,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

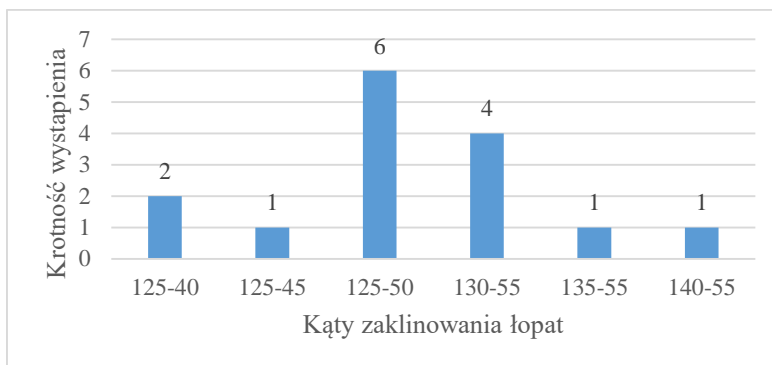
Po przeanalizowaniu postaci graficznych przedstawiających generowaną moc w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach można stwierdzić, że wraz ze wzrostem prędkości strugi powietrza rośnie zakres kątów, zarówno pierwszego jak i drugiego wirnika, dla którego osiągane są wysokie wartości mocy. Z jednej strony jest to zjawisko pozytywne, ponieważ pozwala na nieprecyzyjne ustawienie kątów zaklinowania łopat bez dużej straty w generowanej mocy, jednak z drugiej strony pokazuje, że najprawdopodobniej możliwe jest poprawienie wykorzystanego profilu łopat, co powinno stać się przedmiotem dalszych badań.

W tabeli 11 zestawiono optymalne kąty opisane powyżej dla poszczególnych średnich prędkości strugi powietrza w tunelu aerodynamicznym.

Tabela 11. Zestawienie kątów zaklinowania łopat, dla których osiągnięta została moc maksymalna dla określonej średniej prędkości strugi powietrza

v_{sr}	α_1	α_2
$m \cdot s^{-1}$	°	°
5,85	125	40
7,53	125	50
9,17	125	50
10,82	125	50
10,82	130	55
12,41	125	50
14,08	125	40
14,08	125	45
14,08	125	50
14,08	130	55
14,08	135	55
14,08	140	55
15,82	125	50
15,82	130	55
17,17	130	55

Na rysunku 85 przedstawiono w sposób graficzny dane z tabeli 11.



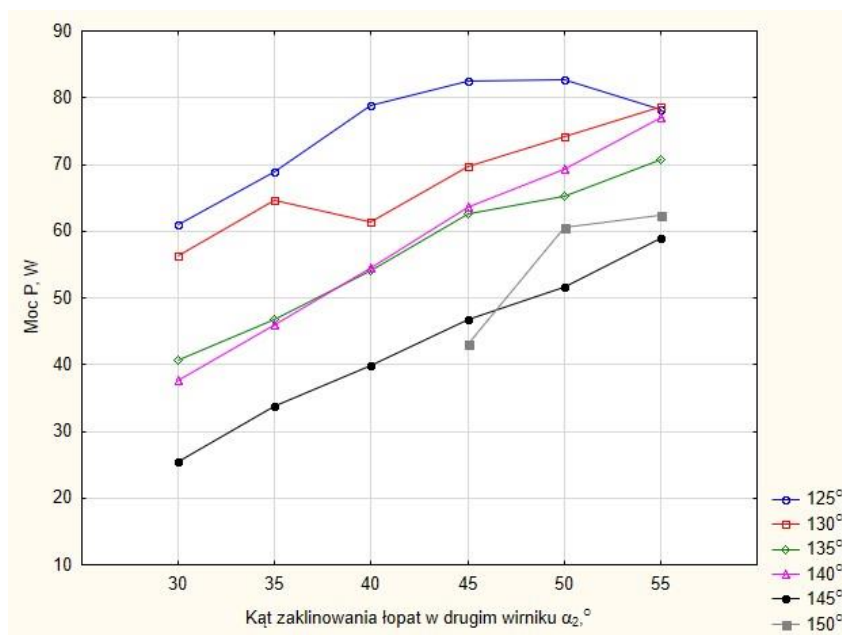
rys. 85. Krotność wystąpienia danego ustawienia kątów zaklinowania łopaty w pierwszym i drugim wirniku dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej przy osiągnięciu mocy maksymalnej dla danej prędkości strugi powietrza

Po przeanalizowaniu danych dotyczących mocy generowanej, przy określonej prędkości wiatru, dla danych kątów zaklinowania łopaty α_1 oraz α_2 optymalną konfiguracją są wartości 125° dla łopat pierwszego wirnika oraz 50° dla łopat drugiego wirnika elektrowni wiatrowej. Dopuszczalne są również konfiguracje:

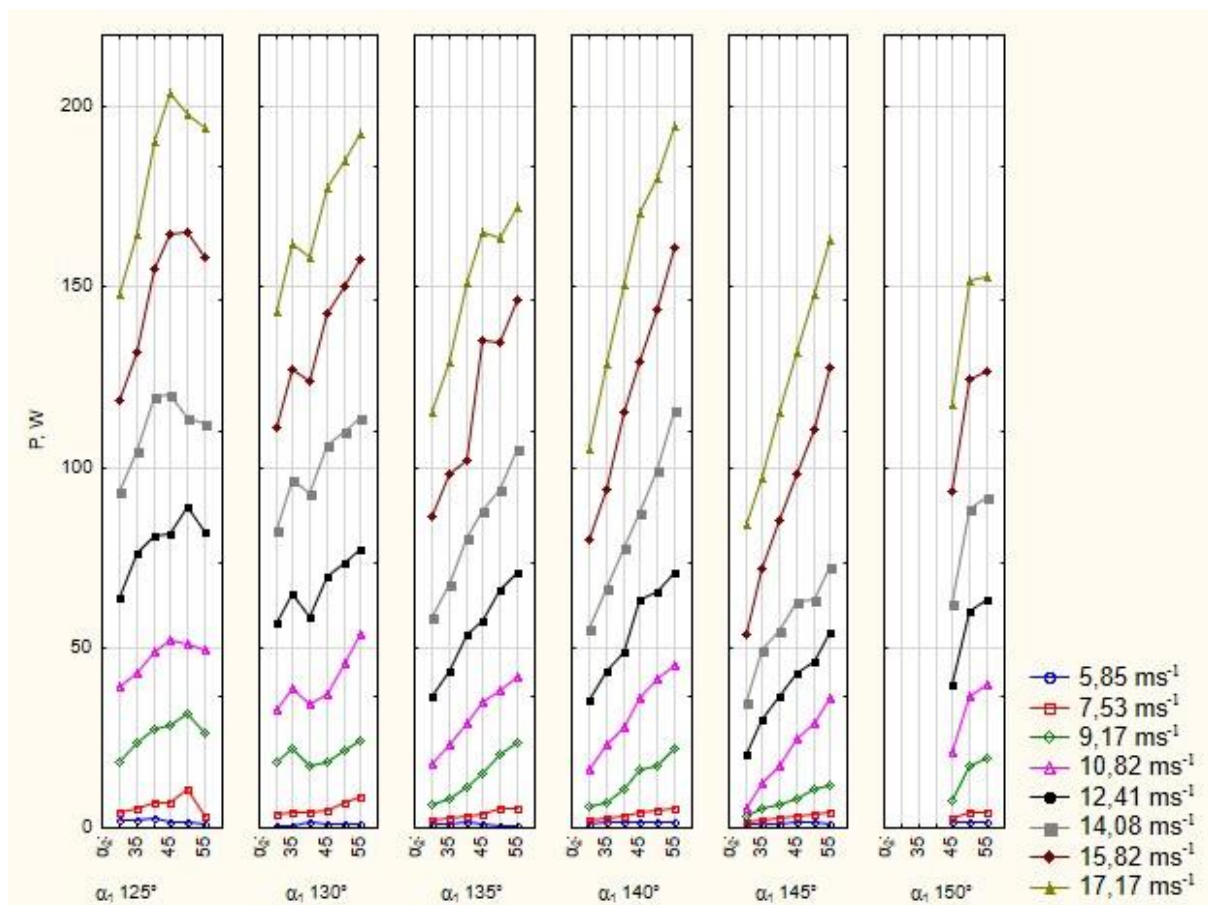
$$\alpha_1 = 130^\circ; \alpha_2 = 55^\circ,$$

$$\alpha_1 = 125^\circ; \alpha_2 = 40^\circ.$$

Wartości optymalnych kątów znajdują potwierdzenie w wykresach sporządzonych na podstawie wyników analiz statystycznych, znajdujących się na rysunkach 86 i 87.



rys. 86. Interakcja pomiędzy kątami zaklinowania łopaty w pierwszym i drugim wirniku ($\alpha_1, ^\circ; \alpha_2, ^\circ$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W)



rys. 87. Interakcja pomiędzy kątami zaklinowania łopatek w pierwszym i drugim wirniku (α_1, α_2 , °) i prędkością strugi powietrza (v , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P , W)

4.3.2.2. Optymalizacja odległości dwóch wirników

Optymalizacja odległości wirników dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej została przeprowadzona dla trzech zestawów kątów zaklinowania łopatek wybranych w trakcie pierwszego etapu:

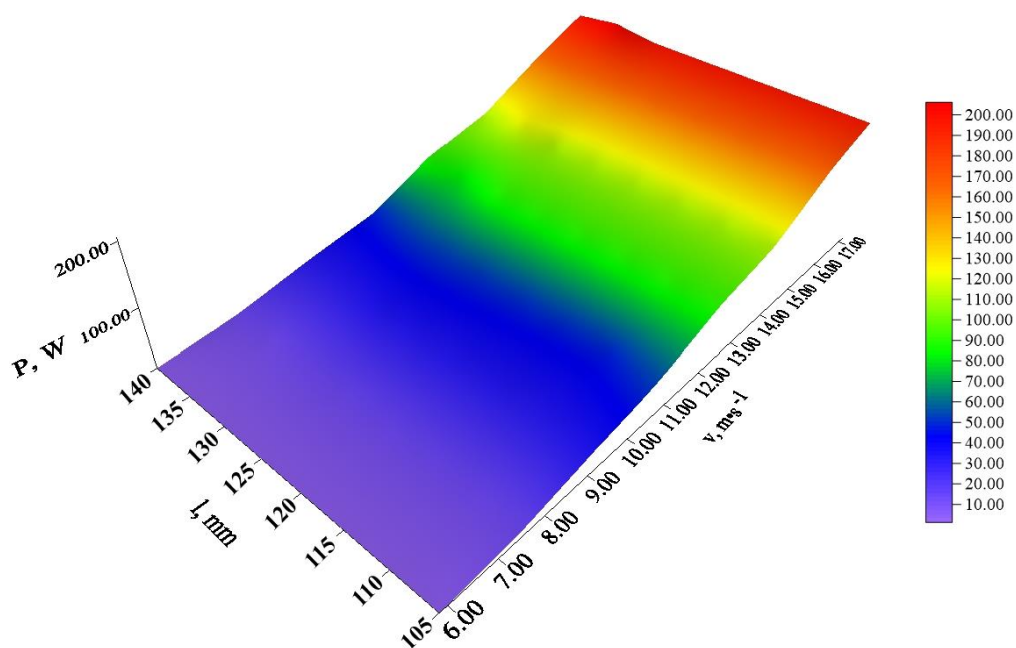
$$\alpha_1 = 125^\circ; \alpha_2 = 50^\circ,$$

$$\alpha_1 = 130^\circ; \alpha_2 = 55^\circ,$$

$$\alpha_1 = 125^\circ; \alpha_2 = 40^\circ.$$

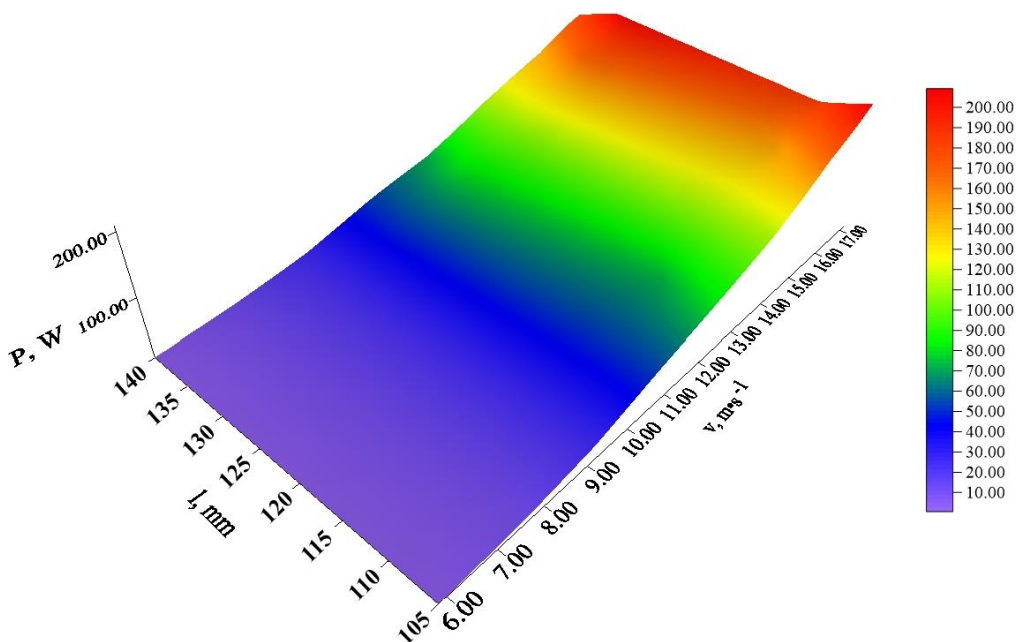
Kąty te zostały wybrane na podstawie analizy graficznych reprezentacji funkcji $P = f(\alpha_1; \alpha_2)$ opisany w rozdziale 4.3.2.1 Optymalizacja kątów zaklinowania łopatek oraz na podstawie wyników analiz statycznych przedstawionych na rysunkach 86 i 87. Dla każdego z powyższych zestawów została wykreślona zależność uzyskanej mocy w funkcji odległości wirników oraz średniej prędkości strugi powietrza $P = f(l; v_{\text{sr}})$.

Na rysunku 88 przedstawiono zależność $P = f(l; v_{sr})$ dla $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 50^\circ$.



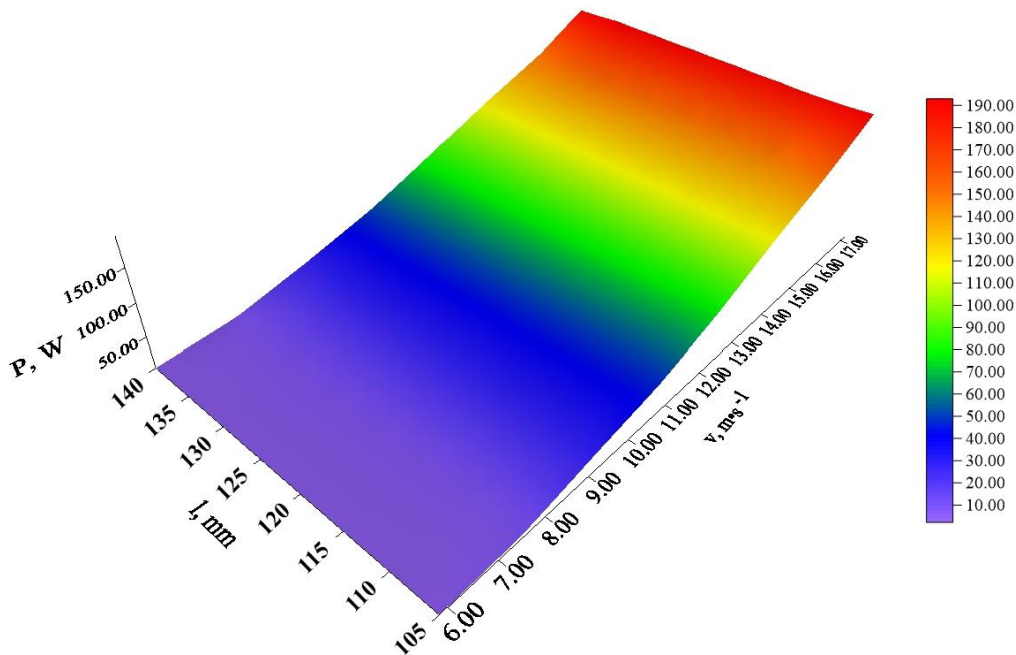
rys. 88. Zależność generowanej mocy od odległości wirników oraz średniej prędkości strugi powietrza dla kątów zaklinowania łopaty $\alpha_1 = 125^\circ$ oraz $\alpha_2 = 50^\circ$

Na rysunku 89 przedstawiono zależność $P = f(l; v_{sr})$ dla $\alpha_1 = 130^\circ$; $\alpha_2 = 55^\circ$.



rys. 89. Zależność generowanej mocy od odległości wirników oraz średniej prędkości strugi powietrza dla kątów zaklinowania łopaty $\alpha_1 = 130^\circ$ oraz $\alpha_2 = 55^\circ$

Na rysunku 90 przedstawiono zależność $P = f(l; v_{sr})$ dla $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 40^\circ$.



rys. 90. Zależność generowanej mocy od odległości wirników oraz średniej prędkości strugi powietrza dla kątów zaklinowania łopaty $\alpha_1 = 125^\circ$ oraz $\alpha_2 = 40^\circ$

Na podstawie powyższych zależności (rys. 88, rys. 89 oraz rys. 90) nie nasuwają się jednoznaczne wnioski dotyczące optymalnej odległości pomiędzy wirnikami elektrowni wiatrowej nowego typu. Dla konfiguracji $\alpha_1 = 130^\circ$ oraz $\alpha_2 = 55^\circ$ i odległości 105 mm zauważalny jest wzrost generowanej mocy w porównaniu z innymi odległościami. Tendencja ta nie jest zauważalna w pozostałych dwóch przypadkach. Jest to jeden punkt, który nie określa żadnego trendu. Brak jednoznacznych wyników analiz statystycznych (Tabela 9 strona 66 oraz Tabela 10 strona 70) również nie pozwala na określenie optymalnej odległości pomiędzy wirnikami. Jako optymalną przyjmuje się najmniejszą możliwą, tj 105 mm, ze względu na uproszczenie konstrukcji elektrowni oraz dotychczasowy stan wiedzy [Tong 2010].

W późniejszych badaniach należałoby wykonać symulację przy użyciu oprogramowania komputerowego (CFD - Computational Fluid Dynamics), wykorzystującego metody numeryczne do modelowania przepływu płynu. Pozwoliłoby to na sprawdzenie szerszego zakresu odległości wirników, bez konieczności budowania rzeczywistych elektrowni wiatrowych. Modelowanie CFD, ze względu na szeroki zakres, nie było przedmiotem tej pracy.

4.3.3. Podsumowanie badań dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej

W efekcie badań laboratoryjnych uzyskano prawie 300 charakterystyk mocy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej. Moc maksymalna (dla $v = 17,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) uzyskana w badaniach konstrukcji dwuwirnikowej wynosiła 211 W i była o 73 W niższa niż w przypadku

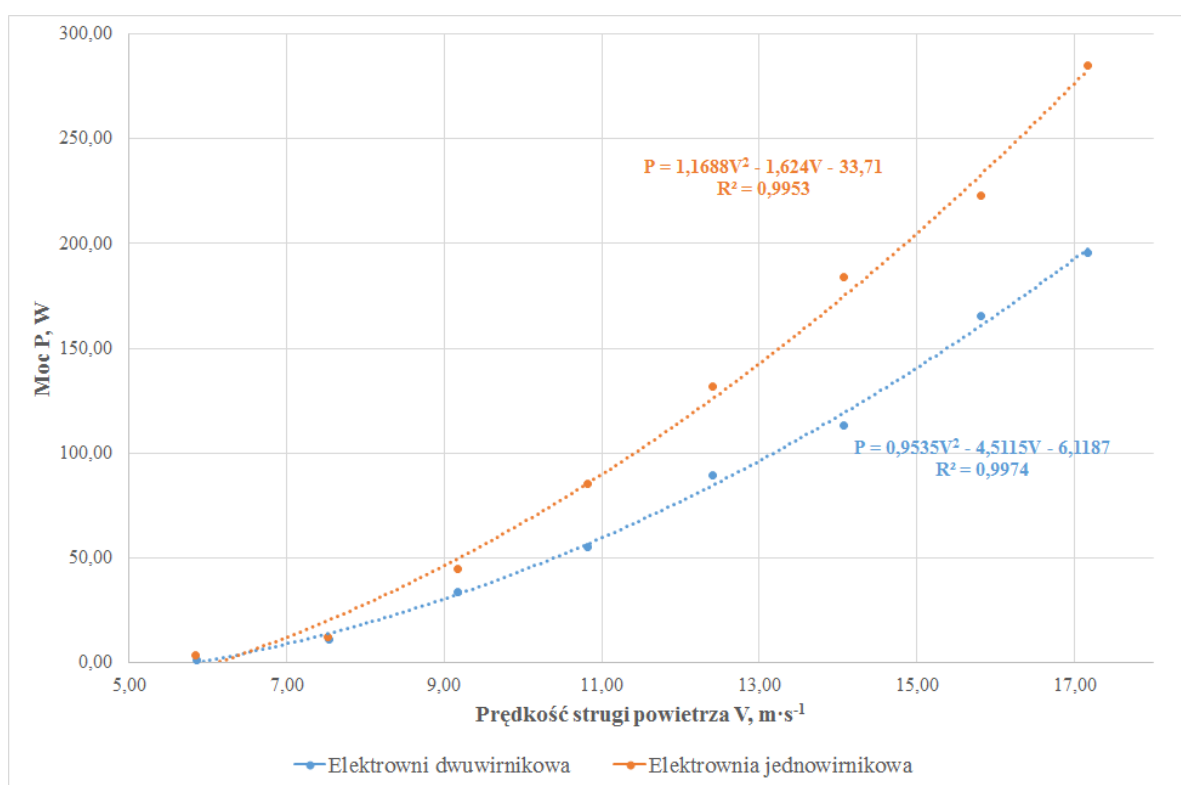
konstrukcji jednowirnikowej. Brak publikacji dotyczących wyników badań elektrowni dwuwirnikowych zmusza do opierania się na materiałach teoretycznych [Pawlak 2013] oraz związanych z aerodynamiką [Coleman 1997]. Zmniejszenie generowanej mocy w całym zakresie pomiarowych najprawdopodobniej związane jest z zaburzeniami przepływu strugi powietrza. Zakłócenia te występują w chwili kiedy struga przechodzi przez pierwszy wirnik. Według Paraschivoiu wirniki powinny znajdować się jak najbliżej siebie, aby zminimalizować te zaburzenia [Paraschivoiu 2002]. W przypadku prototypu minimalna odległość wynosiła 105 mm jednak już przy tej odległości i kątach zaklinowania łopat pierwszego wirnika powyżej 150° obydwie wirniki zderzały się. Podjęto próbę zbudowania prototypu, w którym zakres regulacji odległości wirników był szerszy, tj. 250 – 1000 mm, aby potwierdzić obliczenia wykonane przez Pawlaka stwierdzające, że optymalna odległość dwóch wirników wynosi $2/3$ średnicy [Pawlak 2013]. W przypadku rozpatrywanych średnic odległość ta wynosi 500 mm. Ze względu na drgania, które wystąpiły w trakcie pracy, nie było możliwe dokonanie pomiarów dla prędkości strugi powietrza powyżej $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jednak wyniki wstępnych badań, dla prędkości poniżej $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, nie potwierdzają tej zależności. Analizy statystyczne potwierdzają braku wpływu odległości na generowaną moc (Tabela 10 strona 70). W tym przypadku sugerowane jest wykorzystanie oprogramowanie CFD do przeprowadzania symulacji komputerowej w szerszym zakresie odległości. Z analiz statystycznych uzyskano również słabą korelację pomiędzy kątami zaklinowania łopat i generowaną mocą (Tabela 10 strona 70) w porównaniu do elektrowni jednowirnikowej (Tabela 8 strona 59).

Na podstawie zgromadzonych danych podjęto próbę określenia optymalnych parametrów pracy nowego typu elektrowni wiatrowej. Dwuetapowa optymalizacja, pozwoliła określić w pierwszym etapie, że optymalny kąt zaklinowania łopat w pierwszym wirniku wynosi 125° , natomiast optymalny kąt zaklinowania łopat w drugim wirniku wynosi 50° . Pierwszy kąt potwierdza się z obserwacjami z elektrowni jednowirnikowej oraz widzą literaturą [Jacobs i in. 1935; Marzocca 2009] dotyczącą wykorzystywanych łopat, mówiącą że optymalny kąt wynosi 55° . W przypadku drugiego wirnika z łopatami zamontowanymi pod kątem 55° zaobserwowano zjawisko startowania drugiego wirnika w tym samym kierunku, co pierwszy. Najpewniej jest to spowodowane wytwarzaniem za małej siły nośnej przy kącie zaklinowania 55° i wtedy drugi wirnik jest „ciągnięty” przez wirującą strugę powietrza, która opuszcza wirnik pierwszy. Problem ten nie występuje w przypadku kąta zaklinowania wynoszącego 50° i większej siły nośnej.

Zgodnie z założeniami teoretycznymi znanymi z aerodynamiki [Coleman 1997; Bagai, Leishman 1996] elektrownia dwuwirnikowa powinna charakteryzować się niższą prędkością startową, jednak ze względu na ograniczenia regulacyjne tunelu aerodynamicznego nie udało się określić prędkości startowej nowej konstrukcji.

4.4. Porównanie pracy jedno- oraz dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej

Jednym z celów cząstkowych pracy było porównanie pracy jedno- oraz dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej. Porównanie takie ma na celu określenie, która z konstrukcji przy podobnych warunkach wietrznych generuje większą moc elektryczną. Do porównania przyjęto wyniki osiągnięte dla optymalnych parametrów obu konstrukcji. Dla konstrukcji jednowirnikowej optymalny kąt zaklinowania łopat wynosił 55° . W przypadku elektrowni dwuwirnikowej optymalny kąt dla pierwszego wirnika wynosił 125° , drugiego natomiast 50° . Dla elektrowni dwuwirnikowej, zgodnie z przeprowadzoną optymalizacją w rozdziale 4.3.2.2, przyjęto, że odległość pomiędzy wirnikami powinna wynosić 105 mm. Wynik porównania, w postaci charakterystyk mocy został przedstawiony na rysunku 91.



rys. 91. Charakterystyki mocy jedno- oraz dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej

W badanym zakresie prędkości strugi powietrza siłownia jednowirnikowa okazuje się bardziej wydajna od siłowni dwuwirnikowej. Z porównania generowanej mocy przez obie elektrownie, przy prędkości nominalnej wiatru wynoszącej $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, różnica ta wynosiła 12%.

Wraz ze spadkiem prędkości strugi powietrza wartość różnicy mała. W celu określenia powodu spadku generowanej mocy przez elektrownię dwuwirnikową w stosunku do elektrowni jednowirnikowej dokonano pomiaru prędkości strug powietrza przed pierwszym wirnikiem, pomiędzy wirnikami oraz za drugim wirnikiem, a następnie porównano otrzymane wyniki z pomiarami prędkości strug powietrza przed i za wirnikiem elektrowni jednowirnikowej. Sprawdzone również czy pomiary znajdują potwierdzenie w rozważaniach teoretycznych. W tym celu przyjmie się, że energia kinetyczna strugi powietrza to:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad (17)$$

gdzie:

- \dot{m} - strumień masy przepływającego powietrza,
- v - prędkość strugi powietrza.

Jeżeli wirnik siłowni pobiera energię bez żadnych strat, to energia ta wynosi:

$$\Delta E_k = E_{k0} - E_{k2} \quad (18)$$

gdzie:

- E_{k0} - energia kinetyczna strugi powietrza przed wirnikiem siłowni wiatrowej,
- E_{k1} - energia kinetyczna strugi powietrza za wirnikiem siłowni wiatrowej.

Uwzględniając zależność (17 i podstawiając ja do zależności (18):

$$\Delta E_k = \frac{\dot{m} \cdot v_0^2}{2} - \frac{\dot{m} \cdot v_2^2}{2} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_0^2 - v_2^2) \quad (19)$$

gdzie:

- v_0 - prędkość strug powietrza przed wirnikiem,
- v_2 - prędkość strug powietrza za wirnikiem.

Strumień masy powietrza, która przepływa przez obszar wirnika, wynosi:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v_1 \quad (20)$$

gdzie:

- ρ - gęstość powietrza,
- A - powierzchnia zakreślana przez łopaty wirnika,
- v_1 - prędkość strugi powietrza przepływającego przez powierzchnię wirnika.

Prędkość strug powietrza przepływających przez wirnik nie jest znana, wiadomo jedynie, że jest ona pośrednią wartości pomiędzy prędkościami v_0 oraz v_2 . Przy założeniu, że nie zostanie uwzględniona strata związana ze spiętrzeniem ciśnienia, a tym samym odpływu części powietrza na zewnątrz poza rozpatrywany obszar oraz przyjęciu że zmiana prędkości

wiatru następuje nagle w samym wirniku, można założyć, że prędkość przepływu strug powietrza przez wirnik jest średnią arytmetyczną prędkości strug powietrza przed i za wirnikiem, tj.:

$$v_1 = \frac{v_0 + v_2}{2} \quad (21)$$

Jeżeli zależność (21) zostanie podstawiona do (20), to:

$$\dot{m} = \frac{\rho \cdot A \cdot (v_0 + v_2)}{2} \quad (22)$$

Tym samym energia kinetyczna, czyli zgodnie z II zasadą dynamiki Newtona użyteczna moc niezakłóconego przepływu powietrza – moc silnika wiatrowego, wynosi:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot (v_0 + v_2)}{2} \cdot (v_0^2 - v_2^2) = \frac{\rho \cdot A}{4} \cdot (v_0 + v_2) \cdot (v_0^2 - v_2^2) \quad (23)$$

Powyższe rozważania dotyczą jednowirnikowej elektrowni wiatrowej. W przypadku dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej zależność przedstawiająca moc użyteczną będzie miała postać:

$$\begin{aligned} \Delta E_k &= \Delta E_{kw1} + \Delta E_{kw2} = \\ &= \frac{\rho \cdot A}{4} \cdot (v_0 + v_2) \cdot (v_0^2 - v_2^2) + \frac{\rho \cdot A}{4} \cdot (v_2 + v_4) \cdot (v_2^2 - v_4^2) = \\ &= \frac{\rho \cdot A}{4} [(v_0 + v_2) \cdot (v_0^2 - v_2^2) + (v_2 + v_4) \cdot (v_2^2 - v_4^2)] \end{aligned} \quad (24)$$

gdzie:

- ΔE_{kw1} - energia kinetyczna pierwszego wirnika,
- ΔE_{kw2} - energia kinetyczna drugiego wirnika,
- v_0 - prędkość strug powietrza przed pierwszym wirnikiem,
- v_2 - prędkość strug powietrza pomiędzy wirnikami,
- v_4 - prędkość strug powietrza za drugim wirnikiem.

W tabeli 12 przedstawiono wyniki pomiarów prędkości strug powietrza przed (V_0) i za (V_2) wirnikami jednowirnikowej elektrowni wiatrowej. Dodatkowo obliczono również moc teoretyczną P_t , która tożsama jest z energią kinetyczną – mocą silnika wiatrowego z zależności (24) i porównano ją z mocą rzeczywistą uzyskaną w trakcie pomiarów. W tabeli uwzględniono również moc niezakłóconej strugi powietrza P_{wind} , która obliczana jest zgodnie z zależnościami:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v_0^3 \quad (25)$$

natomiast współczynnik mocy został obliczony zgodnie z:

$$c_p = \frac{P_t}{P_{wind}} \quad (26)$$

gdzie:

P_t - moc silnika wiatrowego obliczona zgodnie z zależnością (24).

Ponadto obliczono wartość parametru ΔP , który zdefiniowano jako:

$$\Delta P = \frac{P_{rz}}{P_t} \cdot 100\% \quad (27)$$

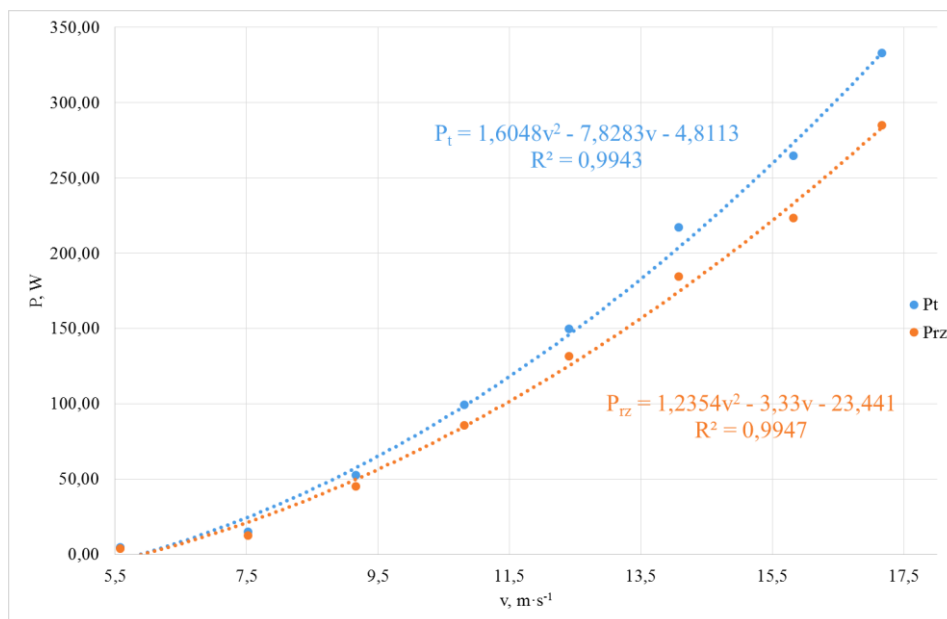
gdzie:

P_{rz} - moc elektrowni wiatrowej zmierzona w trakcie pomiarów laboratoryjnych.

Tabela 12. Wyniki pomiaru prędkości strug powietrza przed i za wirnikiem jednowirnikowej elektrowni wiatrowej

V_0	V_2	P_t	P_{rz}	ΔP	P_{wind}	C_p	C_e
$m \cdot s^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	W	W	%	W	-	-
5,58	5,3	4,39	3,68	84	46,05	0,10	0,08
7,53	7	14,83	12,12	82	113,17	0,13	0,11
9,17	7,8	52,29	44,87	86	204,40	0,26	0,22
10,82	8,9	98,96	85,48	86	335,77	0,29	0,25
12,41	10,2	149,74	131,54	88	506,62	0,30	0,26
14,08	11,6	216,76	184,13	85	739,90	0,29	0,25
15,82	13,5	264,33	223,13	84	1049,50	0,25	0,21
17,17	14,7	332,50	284,77	86	1341,76	0,25	0,21

Porównanie mocy rzeczywistej P_{rz} z teoretyczną – obliczoną P_t przedstawiono w formie graficznej na rysunku 92.



rys. 92. Graficzna reprezentacja obliczonej mocy teoretycznej i mocy rzeczywistej elektrowni jednowirnikowej

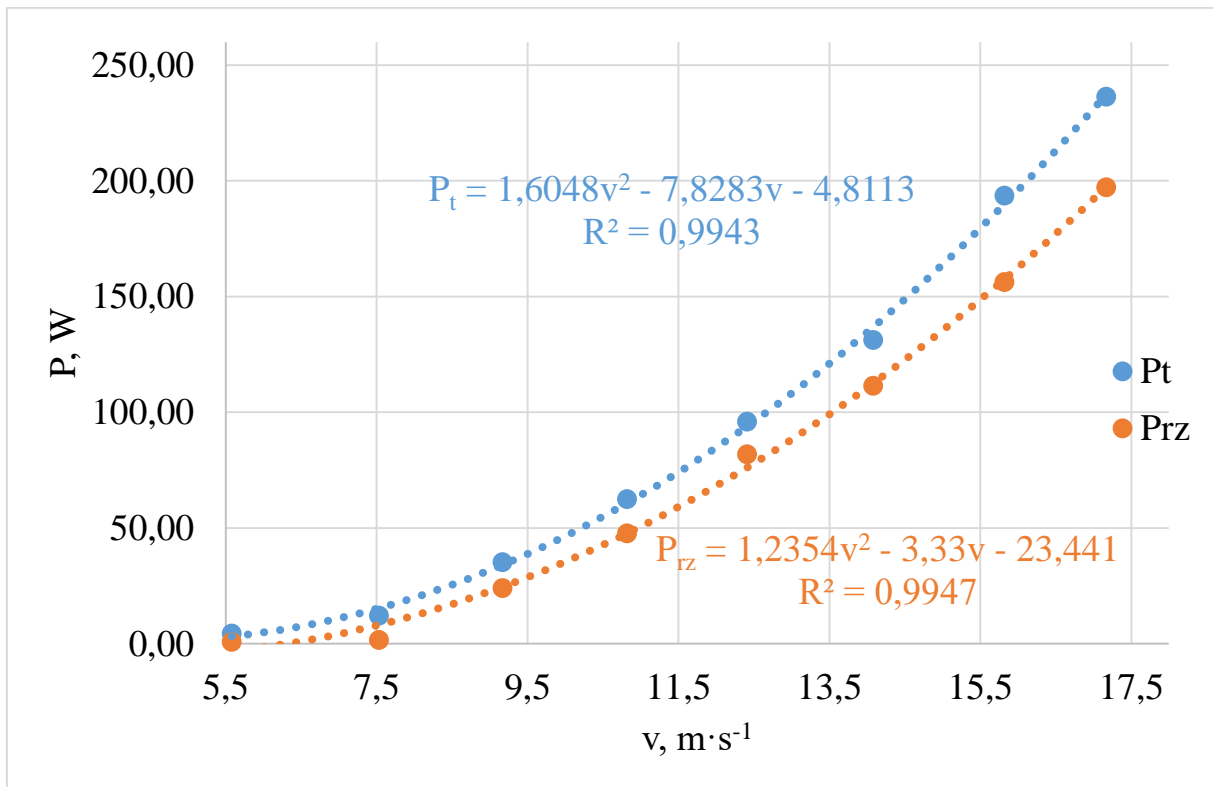
Różnice pomiędzy mocą teoretyczną, a rzeczywistą uzyskaną w trakcie pomiarów, wynikają z nieuwzględnienia strat mechanicznych urządzenia, strat w generatorze (straty rozproszenia, w uzwojeniu stojana, w uzwojeniu wirnika, wentylacyjno – mechanicznych, w żelazie), sprawności układu przetwarzającego prąd stały na prąd przemienny oraz strat związanych z przepływem prądu elektrycznego przez przewody. Wartość parametru ΔP jest zdecydowanie niższa dla prędkości strugi powietrza $5,58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jeżeli odnieść się do parametrów generatora uzyskiwanych przy tej prędkości strugi powietrza, można zauważyć, że napięcie generowane napięcie jest poniżej 12 V, w związku z czym generator nie pracuje w optymalnym dla siebie zakresie obrotów, tym samym straty są większa niż w trakcie optymalnej pracy. Dla pozostałych punktów wartość zmierzona (P_{rz}) względem wartości oczekiwanej (P_t) jest mniejsza o 15 – 20%, stąd wnioskować można, że starty układu zmiany użytecznej energii wiatru na energię mechaniczną wynoszą mniej niż 20%.

W tabeli 13 zaprezentowano wyniki pomiaru prędkości strug powietrza dla dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej. Dodatkowo, tak jak w przypadku elektrowni jednowirnikowej, obliczono moc teoretyczną dla pierwszego P_{t1} i drugiego P_{t2} wirnika, jak również moc całkowitą P_t , którą jest sumą mocy na poszczególnych wirnikach, oraz porównano ją z mocą rzeczywistą uzyskaną w trakcie pomiarów.

Tabela 13. Wyniki pomiaru prędkości strug powietrza przed pierwszym wirnikiem, pomiędzy wirnikami oraz za drugim wirnikiem dla dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej

V_0	V_2	P_{t1}	V_4	P_{t2}	P_t	P_{rz}	ΔP	P_{wind}	C_p	C_e
$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	W	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	W	W	W	%	W	-	-
5,58	5,4	2,88	5,3	1,52	4,39	0,78	18	46,05	0,10	0,02
7,53	7,3	6,70	7,1	5,50	12,20	1,69	14	113,17	0,11	0,01
9,17	8,6	23,86	8,3	11,36	35,21	24,02	68	204,40	0,17	0,12
10,82	10,1	41,76	9,7	20,78	62,55	47,70	76	335,77	0,19	0,14
12,41	11,7	54,70	11,1	41,34	96,04	81,88	85	506,62	0,19	0,16
14,08	13,2	86,80	12,7	44,45	131,25	111,50	85	739,90	0,18	0,15
15,82	14,7	138,27	14,2	55,35	193,62	156,32	81	1049,50	0,18	0,15
17,17	16	170,61	15,5	65,75	236,37	197,21	83	1341,76	0,18	0,15

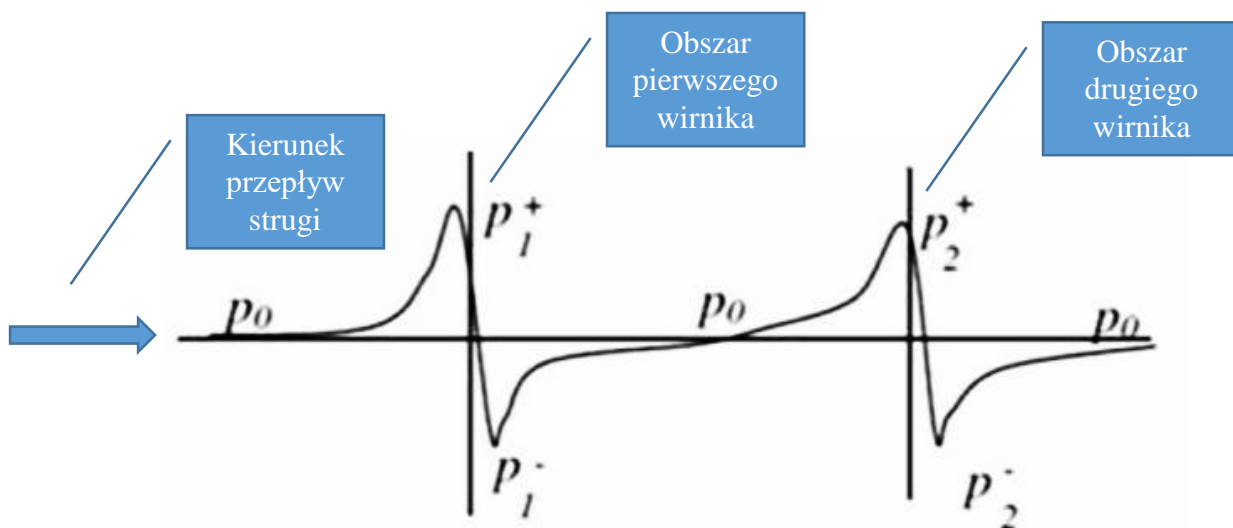
Porównanie mocy rzeczywistej P_{rz} z teoretyczną – obliczoną P_t dla dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej przedstawiono w formie graficznej na rysunku 93.



rys. 93. Graficzna reprezentacja obliczonej mocy teoretycznej i mocy rzeczywistej elektrowni dwuwirnikowej

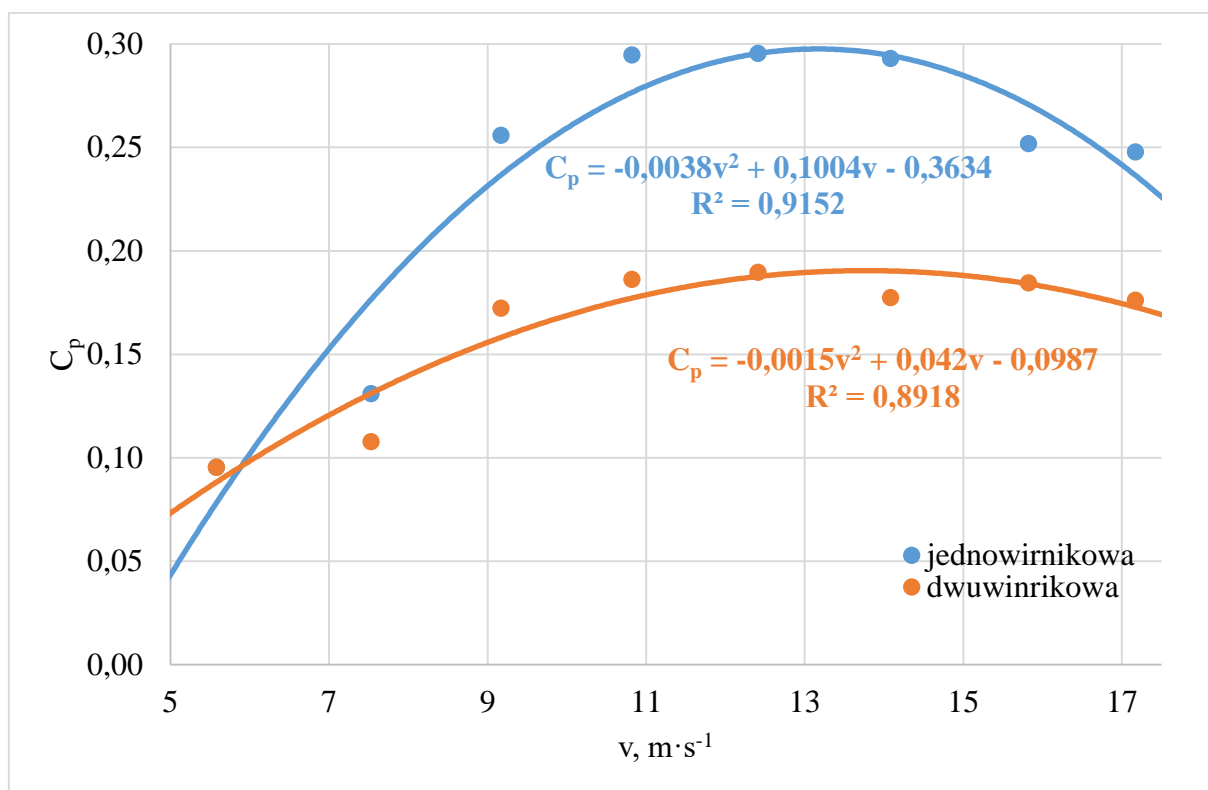
Tak jak w przypadku elektrowni jednowirnikowej różnice pomiędzy mocą teoretyczną, a rzeczywistą uzyskaną w trakcie pomiarów, wynikają z nieuwzględnienia strat opisanych wcześniej. Identyfikacyjnie jak w przypadku siłowni jednowirnikowej wartość parametru ΔP jest niższa dla pierwszych dwóch pomiarów z powodu pracy w nieoptymalnych warunkach.

Porównując parametr ΔP elektrowni jedno- oraz dwuwirnikowej można zauważyć, że przyjmuje one bardzo podobne wartości. Należy podkreślić, że urządzenie pomiarowe charakteryzowało się dokładnością $\pm(0,2+1,5\%) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, w związku z czym różnica pomiędzy wynikami znajduje się w granicy błędu. Warunki pomiarowe (bardzo mała przestrzeń pomiędzy wirnikami oraz minimalizacja zaburzenia przepływających strug powietrza) uniemożliwiły zastosowania innego urządzenia pomiarowego. Z powyższego można wnioskować, że konstrukcja wykonana jest prawidłowo, natomiast czynnikiem negatywnie wpływającym na generowaną moc jest obecność drugiego wirnika. Na rysunku 94 przedstawiono jak powinny kształtować się zmiany ciśnienia w obszarze wirników.



rys. 94. Schemat zmian ciśnienie w dwuwirnikowej turbinie wiatrowej [źródło: Chantharasenawong i in. 2009]

W rzeczywistości skok ciśnienie nie następuje raptownie w przestrzeni wirnika, a w pewnej odległości przed wirnikiem, na skutek zmiany prędkości strug powietrza, następuje zjawisko spiętrzenia ciśnienia. Wyrównanie z ciśnieniem atmosferycznym również następuje dopiero w pewnej odległości [Gumuła i in. 2006, Flaga 2008, Jagodziński 1959]. W rozpatrywanym przypadku, ciśnienie za pierwszym wirnikiem nie zdąży wyrównać się z atmosferycznym, tym samym drugi wirnik pracuje w pogorszonych warunkach. Równocześnie spiętrzenie ciśnienia, które następuje przed drugim wirnikiem ma negatywny wpływ na pracę pierwszego wirnika. Taka sytuacja powoduje negatywny wpływ obydwu wirników na siebie, tym samym zmniejszenie ilości produkowanej energii. Potwierdzenie tej tezy znajduje się na rysunku 95. Wskaźnik C_p , który reprezentuje wykorzystanie energii wiatru przez silnik wiatrowy, jest zdecydowanie wyższy dla jednowirnikowej elektrowni wiatrowej. Obie konstrukcje pracują optymalnie w zakresie prędkości $9 - 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



rys. 95. Przebieg współczynnika mocy w zależności od prędkości strug powietrza

4.5. Modelowanie matematyczne pracy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej

W rozdziale przedstawiono wyniki dotyczące modelowania z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. W pierwszym podrozdziale wybrana została optymalna ilość neuronów w warstwie ukrytej, co pozwoliło na określenie która z badanych SSN najlepiej odzwierciedla analizowane zjawisko. Następnie podjęto próbę powtórnej optymalizacji parametrów pracy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej opierając się na wynikach uzyskanych z SSN.

4.5.1. Modelowanie pracy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej przy użyciu sztucznych sieci neuronowych

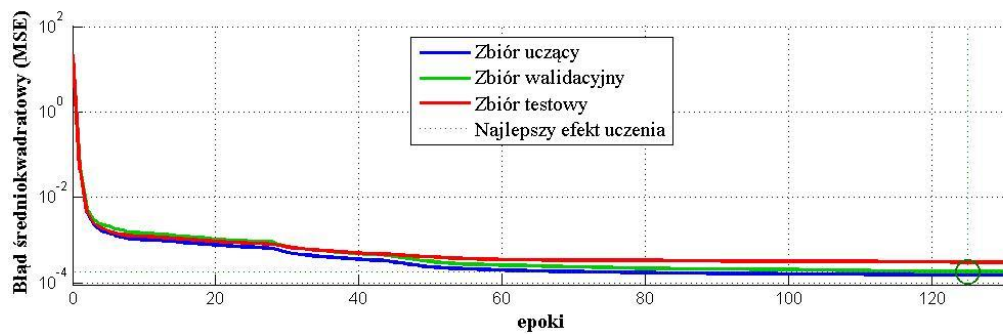
W tabeli 14 przedstawiono wyniki uczenia sieci, posortowane według współczynnika wydajności sieci. Współczynnik wydajności sieci, który liczony jest na podstawie błędu średniokwadratowego, został wykorzystany do wybrania sieci o najlepszych parametrach.

Tabela 14. Parametry jakościowe sieci, osiągnięte po procesie uczenia, na zbiorze testowym

<i>l.p.</i>	<i>Liczba neuronów w warstwie ukrytej</i>	<i>Wydajność sieci</i>	<i>Współczynnik determinacji R^2</i>	<i>Błąd względny</i>
1	27	0,00044	0,9946	0,1803
2	23	0,00051	0,9927	0,2259
3	28	0,00058	0,9899	0,7608

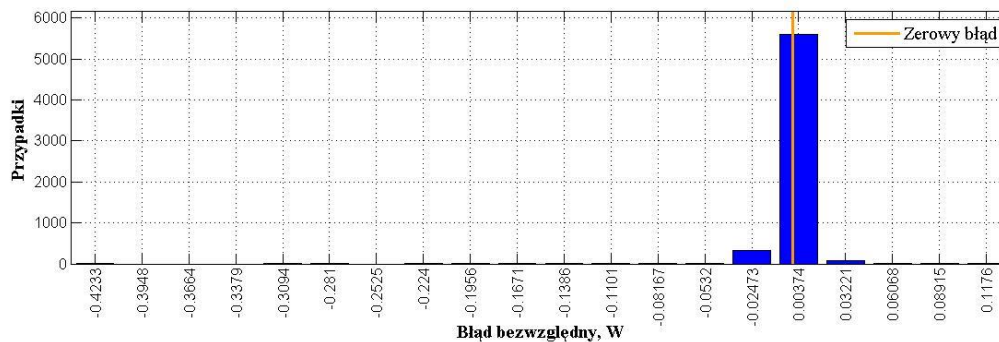
<i>l.p.</i>	<i>Liczba neuronów w warstwie ukrytej</i>	<i>Wydajność sieci</i>	<i>Współczynnik determinacji R^2</i>	<i>Błąd względny</i>
4	15	0,00060	0,9918	0,2112
5	19	0,00072	0,9904	0,2300
6	13	0,00096	0,9877	0,2106
7	22	0,00099	0,9873	0,7598
8	30	0,00104	0,9850	0,2403
9	29	0,00111	0,9843	1,0809
10	25	0,00147	0,9768	0,2888
11	20	0,00148	0,9782	0,3315
12	21	0,00200	0,9684	0,9330
13	14	0,00201	0,9678	0,5478
14	18	0,00202	0,9690	0,2966
15	9	0,00209	0,9633	0,3819
16	16	0,00215	0,9731	0,5871
17	12	0,00230	0,9702	0,3622
18	17	0,00236	0,9642	0,3591
19	24	0,00236	0,9614	0,2417
20	26	0,00250	0,9687	0,2086
21	10	0,00259	0,9643	0,1944
22	11	0,00259	0,9643	0,3752
23	7	0,00268	0,9623	0,2847
24	8	0,00279	0,9636	0,2068
25	5	0,00290	0,9599	0,2642
26	6	0,00291	0,9570	0,2570
27	4	0,00296	0,9612	0,3098

Dla wybranych SSN współczynnik wydajności sieci liczony na podstawie błędu średniokwadratowego wahał się w zakresie od 0,00044 (sieć o 27 neuronach w warstwie ukrytej) do 0,00296 (sieć o 4 neuronach w warstwie ukrytej). Błąd względny wahał się od 0,1803% (sieć o 27 neuronach w warstwie ukrytej) do 1,0809% (sieć o 29 neuronach w warstwie ukrytej). Najlepsza okazała się sieć o 27 neuronach w warstwie ukrytej. Jednocześnie ta sieć wykazała się bardzo wysokim współczynnikiem determinacji R^2 , wynoszącym 0,9979, wskazującym na bardzo dobre dopasowanie modelu do punktów pomiarowych. Na rysunku 96 przedstawiono przebieg procesu uczenia.



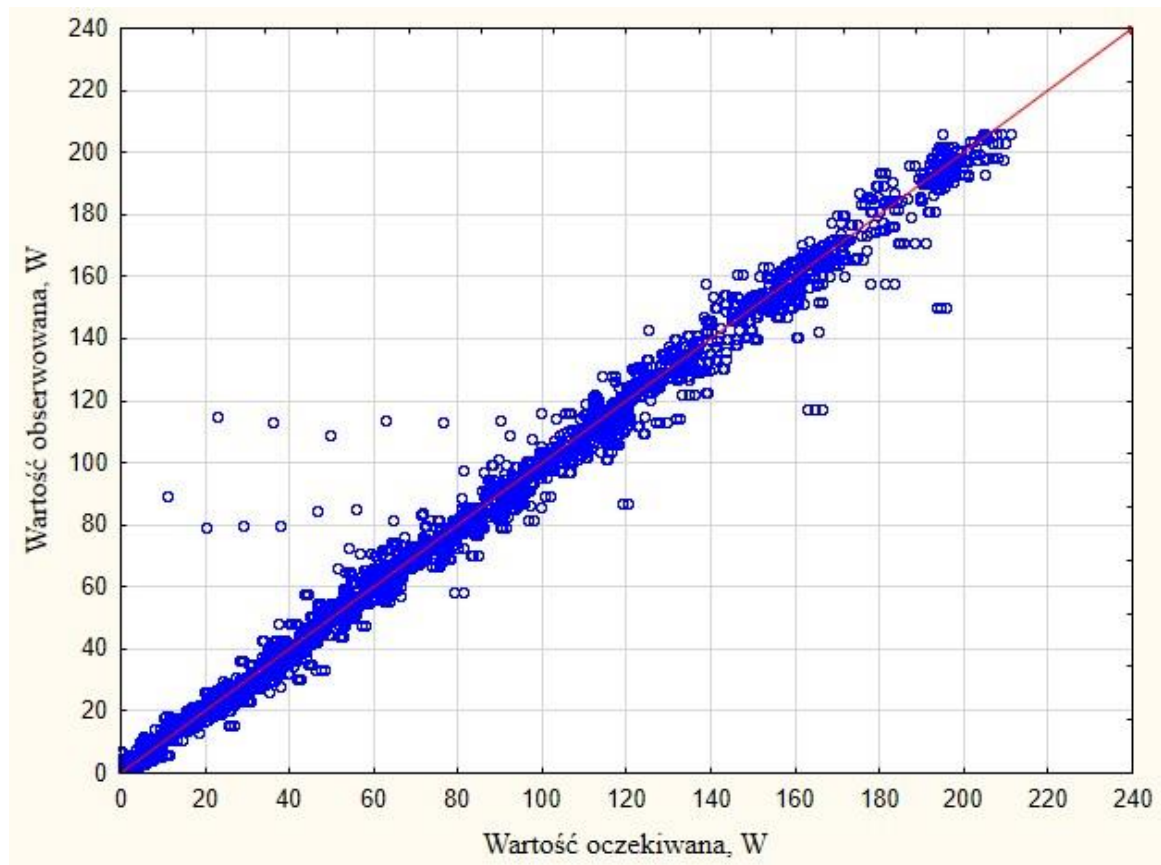
rys. 96. Przebieg procesu uczenia sieci posiadającej 27 neurony w warstwie ukrytej

Najlepszy efekt uczenia został osiągnięty w 125 epoce. Nie występuje również zjawisko nadmiernego dopasowania sieci, które objawia się ciągłym wzrostem błędu na zbiorze testowym, przy jednoczesnym malejącym błędzie na zbiorze uczącym. rys. 97 przedstawia histogram ze słupkami błędu bezwzględnego.



rys. 97. Histogram przedstawiający błąd bezwzględny popełniany przez sieć z 27 neuronami w warstwie ukrytej

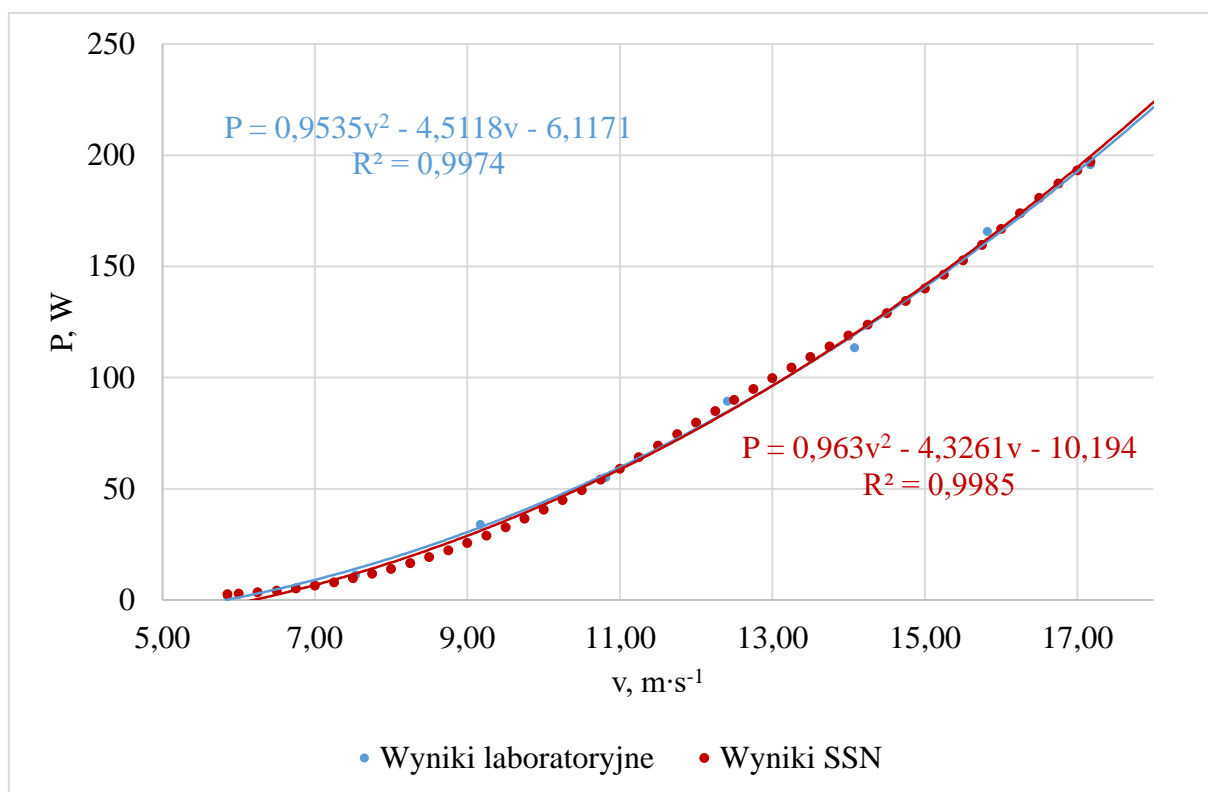
Rysunek 98 przedstawia zależność pomiędzy wartościami obserwowanymi z eksperymentu oraz wartościami oczekiwanymi uzyskanymi z SSN. Dobre dopasowanie występuje w całym zakresie, co jest potwierdzone wysokim współczynnikiem determinacji R^2 (Tabela 14). Na rysunku 98 można zaobserwować pewną liczbę zmiennych odstających, których liczba nie jest duża. Takie wartości są nieuniknione – wynikają ze zmiennych warunków eksperymentu i można je pominąć w trakcie analizy.



rys. 98. Współzależność wartości obserwowanej w funkcji wartości oczekiwanej dla SSN o 27 neuronach w warstwie ukrytej

Na rysunku 99 przedstawiono porównanie wyników laboratoryjnych oraz wyników uzyskanych z SSN. Parametry dla której wykreślono charakterystyki to:

- kąt zaklinowania łopat pierwszego wirnika - 125° ,
- kąt zaklinowania łopat pierwszego wirnika - 50° ,
- odległość pomiędzy wirnikami - 105 mm.



rys. 99. Porównanie charakterystyk wykreślonych na podstawie badań laboratoryjnych oraz wyników uzyskanych z SSN

Na podstawie powyższych symulacji komputerowych można stwierdzić, że SNN z 27 neuronami w warstwie ukrytej najlepiej odwzorowuje pracę dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej. Sieć ta zostanie wykorzystana do próby powtórnego wyznaczenia optymalnych parametrów pracy dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej.

4.5.2. *Optimalizacja parametrów pracy dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej przy użyciu sztucznej sieci neuronowej*

W rozdziale pt. „Optimalizacja pracy dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej” została podjęta próba wyznaczenia optymalnych parametrów pracy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej. Zgodnie z przeprowadzonymi analizami statystycznymi (Tabela 10) znaczący wpływ na pracę dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej mają kąty zaklinowania łopat w wirnikach. Ze względu na ograniczoną ilość danych pomiarowych dotyczących kątów (6 kątów zaklinowania w przypadku pierwszego wirnika oraz 6 kątów zaklinowania łopat w przypadku drugiego wirnika) optymalizacja była niedoskonała. Dlatego w tym rozdziale zostanie podjęta próba powtórnego optymalizacji, ale w oparciu o dane uzyskane na podstawie wyników pracy SSN. Została wybrana sieć o najkorzystniejszych współczynnikach, tj. o 27 neuronach w

warstwie ukrytej. Do sieci dostarczono 8 paczek danych, które składały się z następujących rekordów:

- prędkość strugi powietrza,
- kąt zaklinowania łopatek pierwszego wirnika,
- kąt zaklinowania łopatek drugiego wirnika,
- odległość pomiędzy wirnikami.

Prędkość strugi powietrza była stała dla każdej paczki danych. Prędkości dla których przygotowano dane to:

- $5,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- $7,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- $9,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- $10,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- $12,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- $14,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- $15,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- $17,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Kąty zaklinowania łopatek w każdej paczce przyjmowały następujące wartości:

- kąt zaklinowania łopatek pierwszego wirnika $125^\circ - 150^\circ$, co 1° ,
- kąt zaklinowania łopatek drugiego wirnika $30^\circ - 55^\circ$, co 1° .

Odległość dla wszystkich danych była stałą wynosiła 105 mm, co jest zgodne z informacjami zawartymi w literaturze [Tong 2010].

Optymalizacja, tak jak poprzednio, została wykonana na podstawie wykresu funkcji

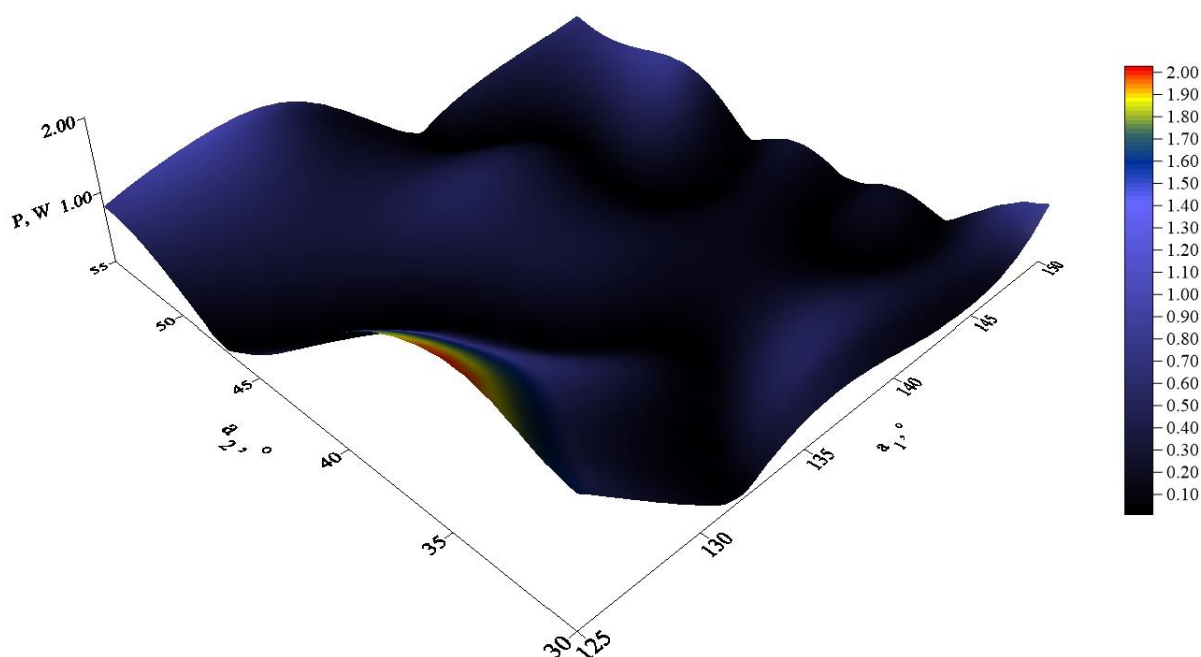
$$P = f(\alpha_1; \alpha_2) \quad (28)$$

gdzie:

- α_1 to kąt zaklinowania łopatek pierwszego wirnika,
- α_2 to kąt zaklinowania łopatek drugiego wirnika.

Również w tym przypadku gamę kolorystyczną wykresu dobrano w taki sposób, aby uwidaczniała wartości maksymalne.

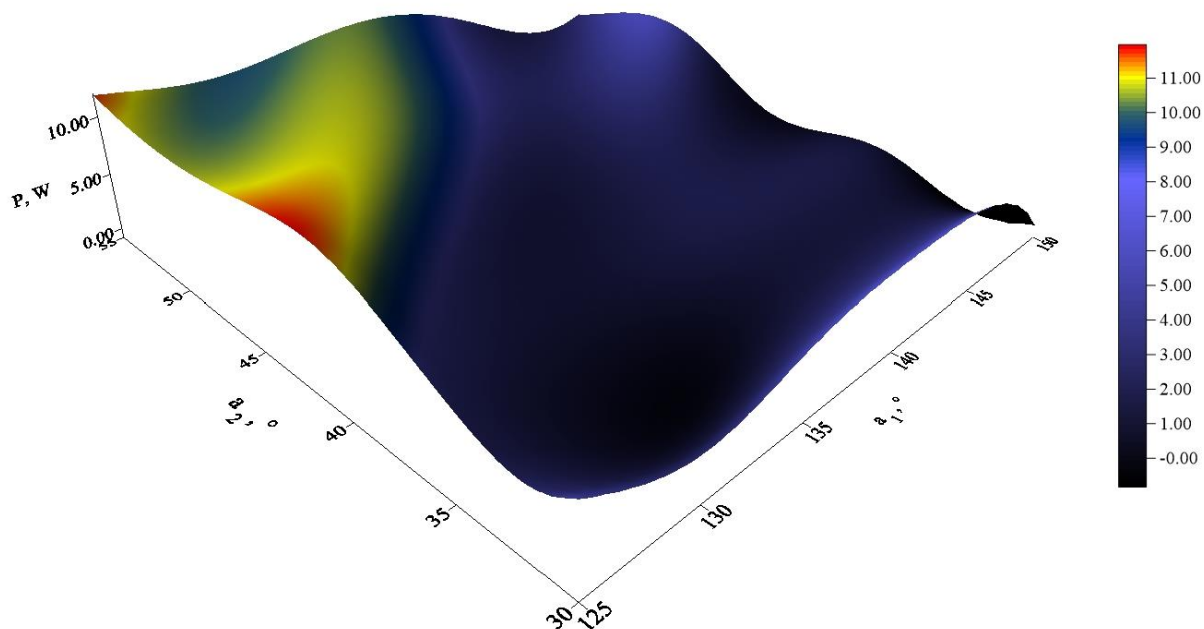
Na rysunku 100 przedstawiono charakterystykę dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $5,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tak jak w przypadku poprzedniej optymalizacji najlepsze kąty to $\alpha_1 = 125^\circ$, przy kątach α_2 z zakresu $30^\circ - 40^\circ$. Maksymalna wartość moc wynosząca $2,03 \text{ W}$ została osiągnięta przy ustawieniach: $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 35^\circ$. W badaniach laboratoryjnych maksymalna wartość mocy wynosiła $2,40 \text{ W}$, osiągnięto je dla kątów $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 40^\circ$. Przebieg funkcji $P=f(\alpha_1, \alpha_2)$ dla danych uzyskanych w laboratorium (rys. 77) jest nieprzewidywalny, tj. brak jest jednoznacznej zależności określającej jakiś trend, co również ma odzwierciedlenie w wynikach uzyskanych na podstawie pracy SSN.



rys. 100. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopatek w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $5,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN

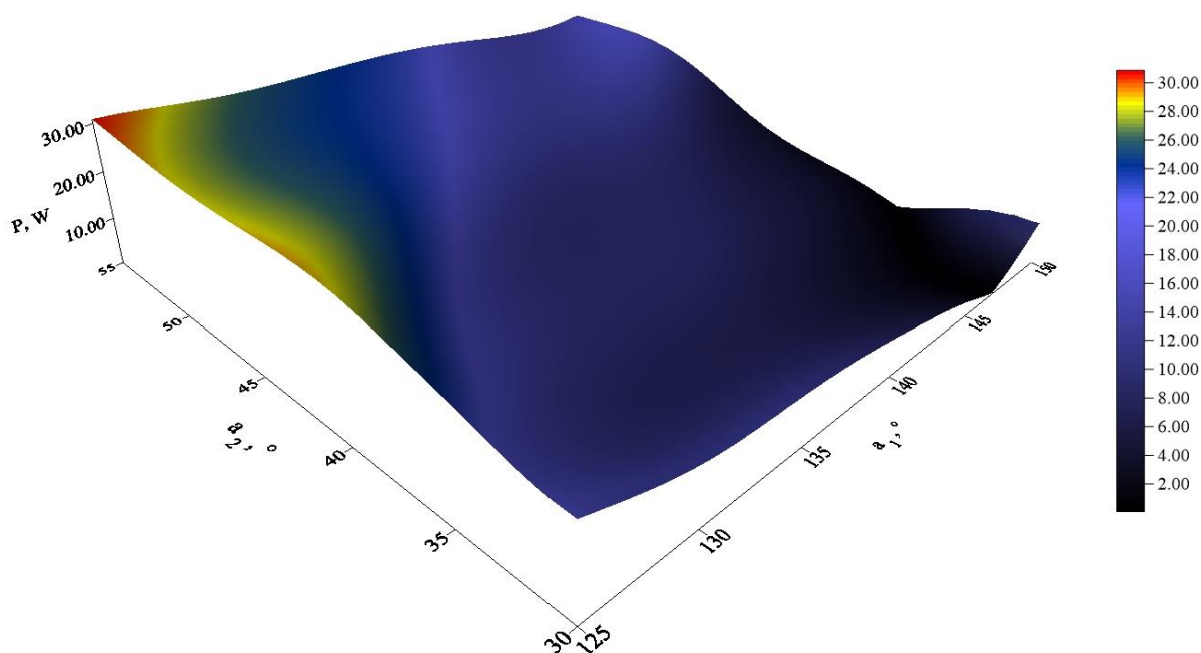
Rysunek 101 przedstawia charakterystykę dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $7,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Według optymalizacji dokonanej na podstawie badań laboratoryjnych optymalne ustawienie wynosiło $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 50^\circ$. Wyniki symulacji sugerują ustawienie kąta zaklinowania pierwszego wirnika w zakresie $125^\circ - 135^\circ$, natomiast drugiego wirnika $40^\circ - 55^\circ$. Maksymalną moc osiągnięto dla $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 42^\circ$, wynosiła ona $11,97 \text{ W}$. Dla ustawień $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 50^\circ$ moc według symulacji wynosiła $10,61 \text{ W}$, natomiast w badaniach laboratoryjnych osiągnęła wartość $11,33 \text{ W}$. W porównaniu do poprzedniego przebiegu generowanej mocy dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $5,58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (rys. 100), analizowany

przebieg jest bardziej przewidywalny, tzn. że można określić trend uzależniający wartość generowanej mocy od kątów zaklinowania łopatek wirników.



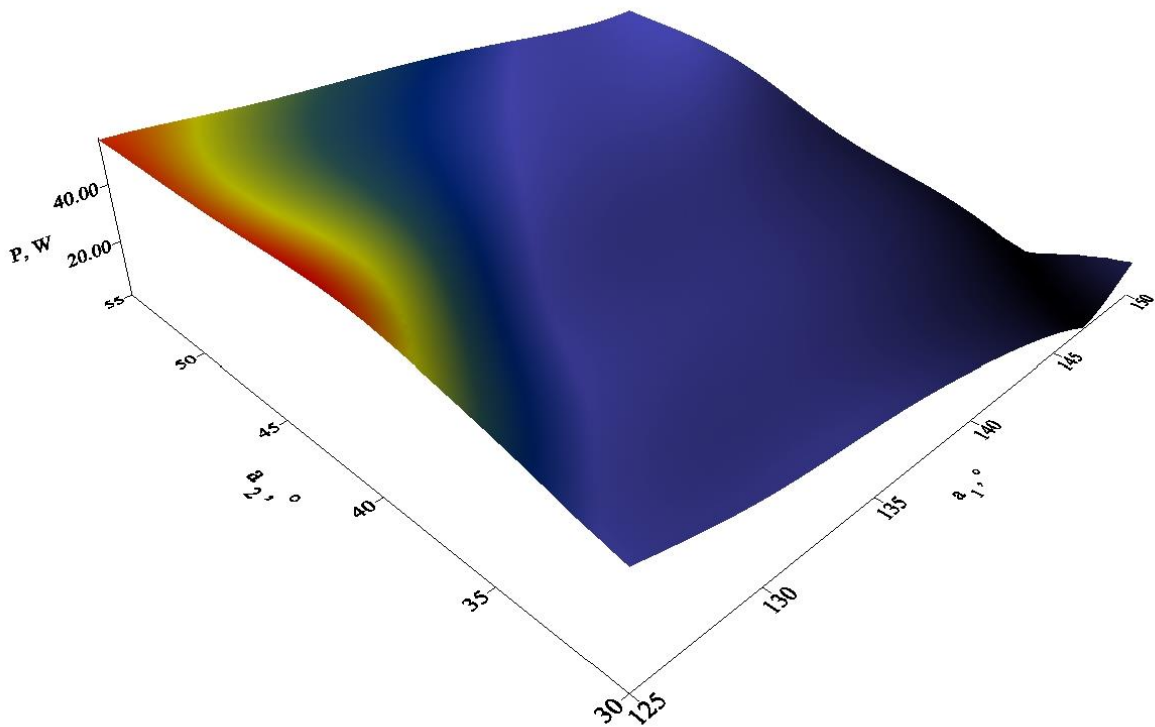
rys. 101. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopatek w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $7,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN

Wyniki, uzyskane na podstawie symulacji wykonanych za pomocą SSN, przedstawiające wartości generowanej mocy w zależności od kątów zaklinowania łopat w pierwszym i drugim wirniku dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $9,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ przedstawiono na rysunku 102. Według optymalizacji dokonanej na podstawie badań laboratoryjnych optymalne ustawienie wynosiło $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 50^\circ$. Maksymalna wartość mocy podczas badań laboratoryjnych, dla tej prędkości wiatru, to $34,05 \text{ W}$. Wyniki symulacji sugerują ustawienie kąta zaklinowania pierwszego wirnika w zakresie $125^\circ - 127^\circ$, natomiast drugiego wirnika w zakresie $39^\circ - 55^\circ$. Maksymalną moc osiągnięto dla $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 55^\circ$ i wynosiła ona $30,87 \text{ W}$. W porównaniu do dwóch poprzednich przypadków, dla prędkości strugi powietrza $5,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i $7,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (rysunki 100 i 101), przebieg funkcji jest zdecydowanie łagodniejszy i tak jak w przypadku większości wyników badań laboratoryjnych można stwierdzić, że generowana moc rośnie wraz ze zmniejszaniem się wartości kąta zaklinowania łopat w pierwszym wirniku α_1 i jednoczesnym zwiększaniem się wartości kąta zaklinowania łopat w drugim wirniku α_2 .



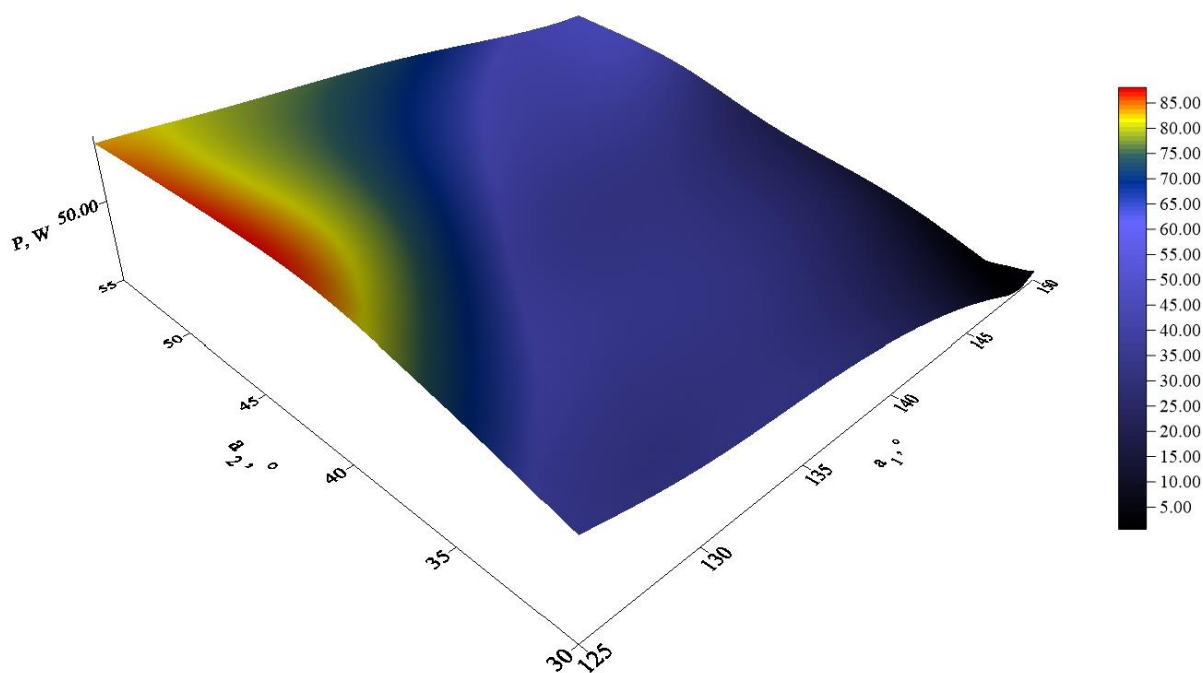
rys. 102. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $9,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN

Na rysunku 103 przedstawiono charakterystykę dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $10,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Według optymalizacji dokonanej na podstawie badań laboratoryjnych optymalne ustawienie wynosiło $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 50^\circ$. Maksymalna wartość mocy podczas badań laboratoryjnych, dla tej prędkości wiatru, to $55,88 \text{ W}$. Wyniki symulacji sugerują ustawienie kąta zaklinowania pierwszego wirnika w zakresie $125^\circ - 127^\circ$, natomiast drugiego wirnika w zakresie $50^\circ - 55^\circ$, w celu uzyskania najwyższych wartości generowanej mocy. Maksymalną moc osiągnięto dla $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 43^\circ$; wynosiła $55,83 \text{ W}$. Na przebiegu funkcji widać, że dla prędkości strugi powietrza wynoszących $10,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, największy wpływ na generowaną moc ma kąt zaklinowania pierwszego wirnika α_1 . Zwiększenie wartości tego kąta o kilka stopni spowoduje już widoczne obniżenie wartości generowanej mocy. Kąt zaklinowania łopat w drugim wirniku α_2 może zostać ustawiony w zakresie $40 - 55^\circ$, a generowana moc nie ulegnie dużej zmianie.



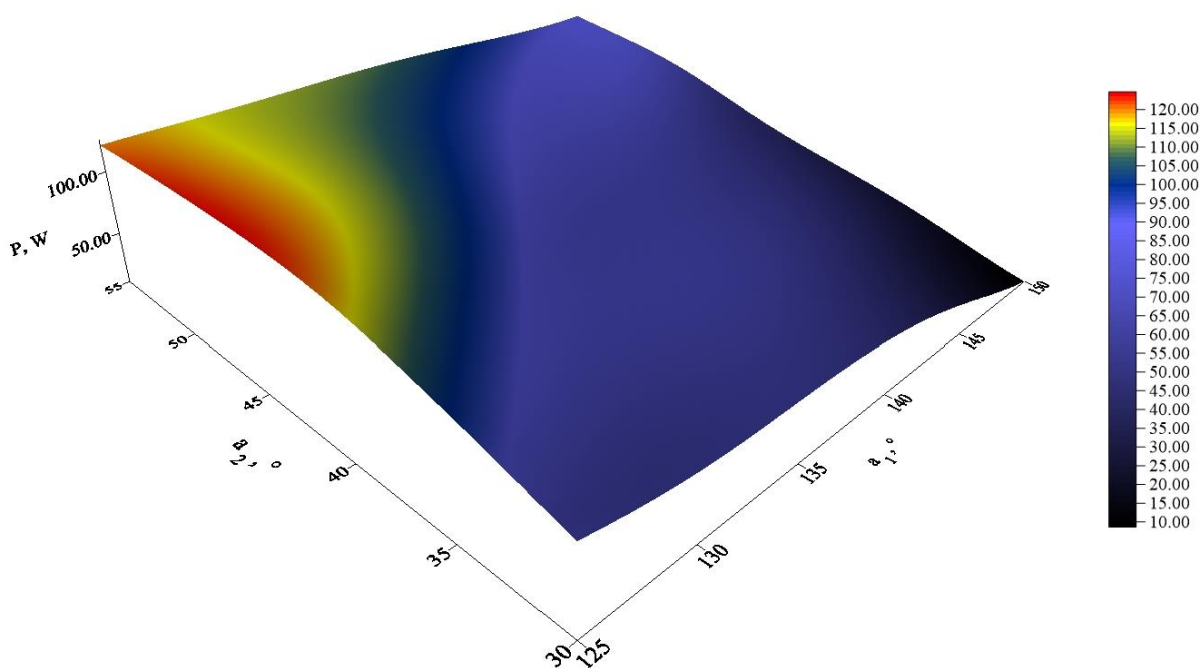
rys. 103. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $10,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN

Charakterystyka dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $12,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ została przedstawiona na rysunku 104. Według optymalizacji dokonanej na podstawie badań laboratoryjnych optymalne ustawienie wynosiło $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 50^\circ$. Maksymalna wartość mocy podczas badań laboratoryjnych, dla tej prędkości wiatru, to $91,61 \text{ W}$. Wyniki symulacji sugerują ustawienie kąta zaklinowania pierwszego wirnika w zakresie $125^\circ - 128^\circ$, natomiast drugiego wirnika w zakresie $38^\circ - 55^\circ$. Maksymalną moc osiągnięto dla $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 44^\circ$; wynosiła $88,09 \text{ W}$. Tak jak w poprzednim przypadku (rys. 103) większy wpływ na wartość generowanej mocy ma kąt zaklinowania pierwszego wirnika.



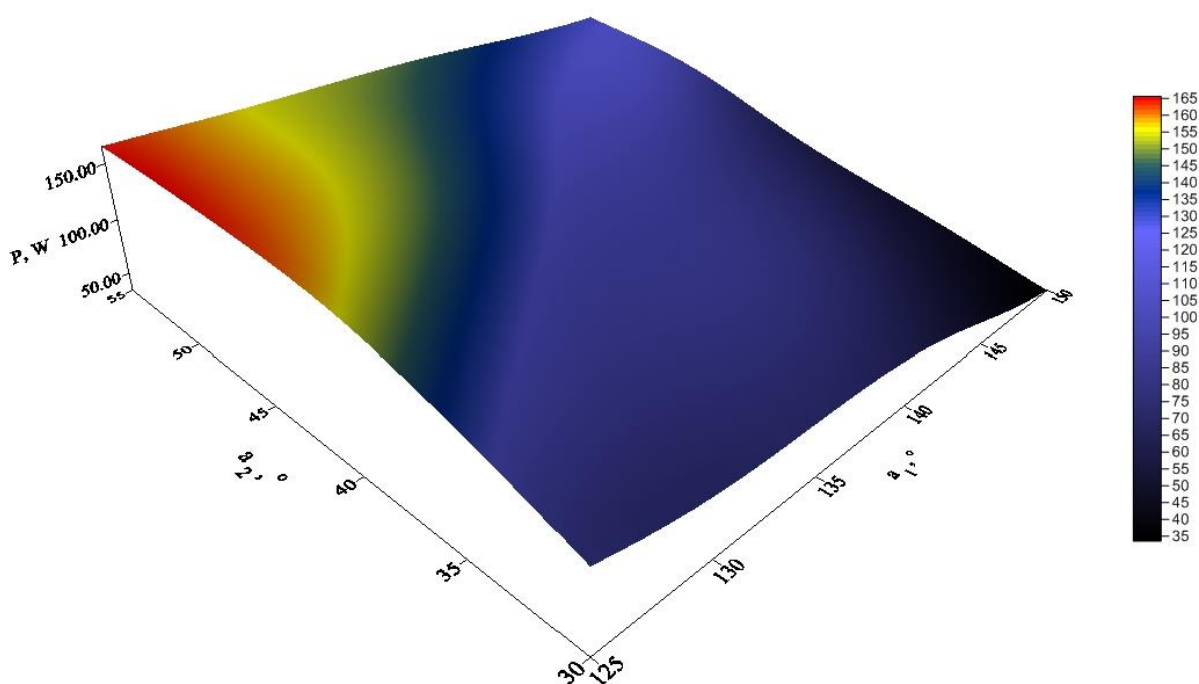
rys. 104. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopatek w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $12,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN

Wartości generowanej mocy, uzyskane w wyniku pracy sztucznych sieci neuronowych dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $14,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ przedstawiono na rysunku 105. Optymalizacja wykonana na podstawie badań laboratoryjnych pozwoliła określić optymalne kąty zaklinowania łopatek w pierwszym i drugim wirniku, które wynosiły odpowiednio $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 45^\circ$. Maksymalna wartość mocy podczas badań laboratoryjnych, dla tej prędkości wiatru, to $125,68 \text{ W}$. Wyniki symulacji sugerują ustawienie kąta zaklinowania pierwszego wirnika w zakresie $125^\circ - 130^\circ$, natomiast drugiego wirnika w zakresie $40^\circ - 55^\circ$. Maksymalną moc osiągnięto przez model dla $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 46^\circ$ wynosiła $124,78 \text{ W}$. Analogicznie, jak w poprzednich przypadkach, większe znaczenie ma kąt zaklinowania łopatek w pierwszym wirniku, jednak w coraz mniejszym stopniu. Należy to tłumaczyć coraz większą ilością energii, którą niesie ze sobą struga powietrza. Jednocześnie ilość energii odbierana przez pierwszy wirnik nie rośnie proporcjonalnie do jej ilości. Tym samym większa porcja energii dociera do drugiego wirnika i może zostać przez niego efektywniej wykorzystana.



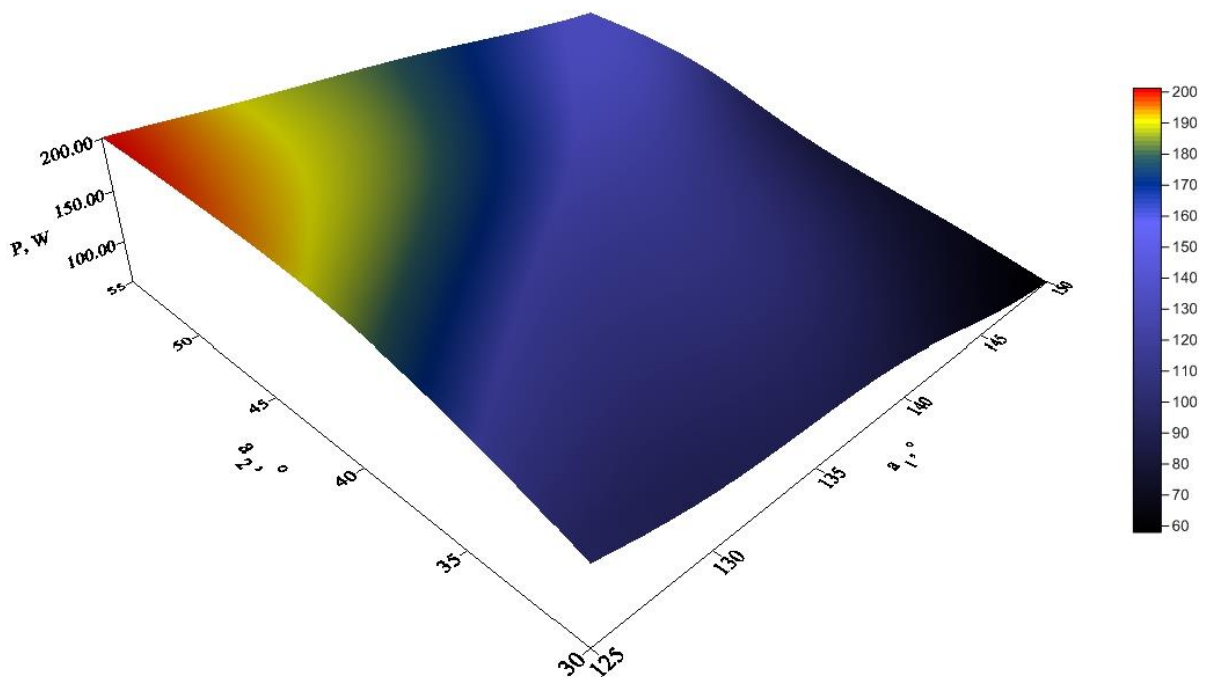
rys. 105. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopatek w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $14,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN

Rysunek 106 przedstawia charakterystykę mocy dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $15,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Według optymalizacji dokonanej na podstawie badań laboratoryjnych optymalne ustawienie wynosiło $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 50^\circ$. Maksymalna wartość mocy podczas badań laboratoryjnych, dla tej prędkości wiatru, to $171,55 \text{ W}$. Wyniki symulacji sugerują ustawienie kąta zaklinowania pierwszego wirnika w zakresie $125^\circ - 128^\circ$, natomiast drugiego wirnika w zakresie $43^\circ - 55^\circ$. Maksymalną moc osiągnięto dla $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 52^\circ$; wynosiła $165,63 \text{ W}$. Dla tej prędkości strugi powietrza wpływ na generowaną moc ma kąty zaklinowania łopat w pierwszym oraz drugim wirniku. Zjawisko to zostało wyjaśnione przy omawianiu wirników w poprzednim akapicie.



rys. 106. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $15,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN

Na rysunku 107 przedstawiono charakterystykę dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $17,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Według optymalizacji dokonanej na podstawie badań laboratoryjnych optymalne ustawienie wynosiło $\alpha_1 = 130^\circ$; $\alpha_2 = 55^\circ$. Maksymalna wartość mocy podczas badań laboratoryjnych, dla tej prędkości wiatru, to $209,24 \text{ W}$. Wyniki symulacji sugerują ustawienie kąta zaklinowania pierwszego wirnika w zakresie $125^\circ - 131^\circ$, natomiast drugiego wirnika w zakresie $44^\circ - 55^\circ$. Maksymalną moc osiągnięto dla $\alpha_1 = 125^\circ$; $\alpha_2 = 55^\circ$; wynosiła $201,26 \text{ W}$. Widoczny jest jednoznaczny trend, według którego wartość generowanej mocy rośnie wraz ze zmniejszaniem wartości kąta α_1 , przy jednoczesnym zwiększaniu wartości kąta α_2 .



rys. 107. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $17,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN

W tabeli 15 zestawiono wyniki optymalizacji przeprowadzonej na bazie wyników laboratoryjnych oraz wyników uzyskanych z SSN. Uwzględniono w niej tylko kąty przy których uzyskano maksymalną moc dla danej prędkości strugi powietrza.

Tabela 15. Wyniki optymalizacji parametrów dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej

$v_{\text{śr}}$	<i>Wyniki laboratoryjne</i>		<i>Wyniki SSN</i>	
	α_1	α_2	α_1	α_2
$m \cdot s^{-1}$	o	o	o	o
5,85	125	40	125	35
7,53	125	50	125	42
9,17	125	50	125	55
10,82	125	50	125	43
12,41	125	50	125	44
14,08	125	45	125	46
15,82	125	50	125	52
17,17	130	55	125	55

W przypadku kąta zaklinowania łopat pierwszego wirnika, zarówno w przypadku badań laboratoryjnych, jak również symulacji wykonanych przy użyciu sztucznych sieci neuronowych, optymalny kąt wynosił 125° . Wartość optymalnego kąta zaklinowania łopat drugiego wirnika w badaniach laboratoryjnych mieści się w przedziale $40^\circ - 55^\circ$, w przypadku symulacji komputerowej w przedziale $35^\circ - 55^\circ$. Z przeprowadzonych dodatkowych badań laboratoryjnych zakres ten został uściślony i mieści się w przedziale $48^\circ - 52^\circ$.

4.5.3. Podsumowanie modelowania matematycznego przy użyciu sztucznych sieci neuronowych

Badania symulacyjne opierały się na przyuczeniu 27 SSN, o różnej ilości neuronów w warstwie ukrytej, do odwzorowania pracy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej. Na podstawie wydajności, opartej na wynikach uzyskanych ze zbioru testowego, sieć o 27 neuronach w warstwie ukrytej została wybrana jako najlepsza. Zgodnie z teorią Kołmogorowa [Osowski 2000] optymalna ilość neuronów w warstwie ukrytej w rozpatrywanym przypadku powinna wynosić 9. SSN z 9 neuronami w warstwie ukrytej została sklasyfikowana dopiero na 15 pozycji pod względem współczynnika wydajności. Należy jednak pamiętać, że w przypadku każdorazowego uczenia SSN uzyskuje się podobne, ale nie identyczne rezultaty.

Uczeniu zostały poddane również sieci powyżej 30 neuronów w warstwie ukrytej, jednak zauważono zjawisko przeuczenia sieci [Tetko i in 1995], w wyniku którego sieć bardzo wiernie odwzorowywała wyniki danych laboratoryjnych, jednak w przypadku innych danych z zakresu pracy zafałszowywała wyniki. Zgodnie z zasadą brzytwy Ockhama [Heinzmann 1999] zrezygnowano z prezentacji tych wyników.

Z użyciem SSN o 27 neuronach w warstwie ukrytej została przeprowadzona powtórna optymalizacja parametrów pracy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej. Zgodnie z wynikami analiz statystycznych, dotyczącymi się współczynników korelacji (Tabela 10 strona 70), zrezygnowano z przeprowadzenia optymalizacji dwustopniowej. Optymalizacji zostały poddane tylko kąty zaklinowania łopat w pierwszym oraz drugim wirniku. Na podstawie wyników z tabeli 15 można określić optymalny kąt zaklinowania łopat w pierwszym wirniku, który we wszystkich przypadkach wynosił 125° , co potwierdzają przeprowadzone obliczenia dotycząca łopat, wyniki optymalizacji opartej na badaniach laboratoryjnych z rozdziału „Optymalizacja kątów zaklinowania łopat” oraz wiedza zawarta w literaturze [Jacobs i in. 1935; Marzocca 2009].

Z optymalizacji przeprowadzonej na podstawie badań laboratoryjnych wynika, że optymalny kąt zaklinowania łopat drugiego wirnika wynosi 50° . Dzięki symulacją wykonanym z użyciem SSN wartość ta została rozszerzona do przedziału $48^\circ - 52^\circ$. Niższą wartość tego kąta względem optymalnej wartości wyliczeniowej (55°) należy tłumaczyć generowaniem zbyt małej siły nośnej przy niskich prędkościach wiatru (poniżej $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Większe wartości mocy generowane przy wyższych prędkościach (powyżej $8 - 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) wiatru przy kącie zaklinowania łopat 55° , nie rekompensują strat przy niższych (poniżej $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) prędkościach strugi powietrza dla tego kąta.

5. Wnioski

1. Hipoteza pracy, mówiąca że: „*elektrownia wiatrowa o konstrukcji dwuwirnikowej może wygenerować większą moc, niż elektrownia wiatrowa, o klasycznej konstrukcji, wyposażona w jeden wirnik*” nie została potwierdzona.
2. W wyniku testowania i czynności korekcyjnych, zbudowanego na potrzeby badań tunelu aerodynamicznego, uzyskano precyzyjną zależność ($R^2 = 0,999$) prędkości strugi powietrza przepływającej przez tunel od częstotliwości falowników sterujących wentylatorami. Postać równania jest następująco: $v=0,330 \cdot f+0,8489$. Wskaźnik intensywności turbulencji, w całym zakresie badawczym kształtował się na poziomie 0,9 – 2,2%, co w stosunku do wartości 0,5% uzyskiwanej w drogich profesjonalnych tunelach, jest wartości akceptowalną.
3. Przeprowadzona analiza ANOVA daje podstawę do odrzucenia hipotezy zerowej o równości wartości oczekiwanych pomiędzy analizowanymi przypadkami, tym samym można stwierdzić, że wszystkie analizowane czynniki, takie jak: prędkość strugi powietrza, kąty zaklinowania łopat w pierwszym i drugim wirniku; odległość pomiędzy wirnikami, istotnie wpływają na wartość zmiennej zależnej (generowanej mocy). Powyższe stwierdzenie dotyczy zarówno siłowni jedno- jak i dwuwirnikowej.
4. Optymalny kąt zaklinowania łopat, o oryginalnym profilu NACA 63 – 415 przechodzącym w NACA 63 – 210, w przypadku mini elektrowni jednowirnikowej wynosił 55° . Moc uzyskana dla tego kąta, dla prędkości nominalnej strugi powietrza $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wynosiła 131 W, natomiast moc maksymalną wynosiła 284 W i została osiągnięta przy prędkości strugi powietrza $17,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
5. Optymalne kąty zaklinowania łopat w wirnikach dla mini elektrowni dwuwirnikowej wynosiły 125° dla pierwszego wirnika oraz 50° dla drugiego wirnika.
6. Nie udało się jednoznacznie określić optymalnej odległości pomiędzy wirnikami w mini elektrowni dwuwirnikowej. Jako optymalną przyjęto możliwe najmniejszą wynikającą z rozwiązania konstrukcyjnego urządzenia i wynoszącą 105 mm.
7. Sformułowany model pracy mini elektrowni wiatrowej, zbudowany w oparciu o sztuczne sieci neuronowe przy zastosowaniu 27 neuronów w warstwie ukrytej, charakteryzował się współczynnikiem determinacji R^2 wynoszącym 0,9946.

8. Optymalizacja parametrów pracy mini elektrowni, na podstawie SSN, potwierdziła wyniki uzyskane na podstawie testów laboratoryjnych.

6. Literatura

1. Akhmatov V. *Induction generators for wind power. Vorg Inc 2006.*
2. Albrecht R. F., Reeves C.R., Steele N.C. *Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms.* Springer-Verlag. Vienn 1993.
3. Aleksander I., Taylor J. *Artificial Neural Networks 2.* Elsevier Science Publishers, Amsterdam 1992.
4. Anon, Mr. *Brush's Windmill Dynamo*, Scientific American, vol 63 numer 25, 1890.
5. Antal L., Janta T., Zieliński P. *Maszyny elektryczne. Ćwiczenia laboratoryjne.* Wrocław: Oficyna Wydaw. PWroc. 2001.
6. Arbib M. *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks.* MIT Press. Cambridge 1995.
7. Asmus P. *Reaping the wind: how mechanical wizards, visionaries, and profiteers helped shape our energy future.* Island Press 2001.
8. Bagai A., Leishman J.G. *Free-Wake Analysis of Tandem, Tilt-Rotor and Coaxial Rotor Configurations.* University of Maryland. AHS International 1996.
9. Bebis G., Georgiopoulos M. *Feed-forward neural networks: why network size is so important.* s. 27-31 IEEE Potentials 1999.
10. Betz A. *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen.* Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1926; Ökobuch Verlag, Staufen 1994.
11. Betz A. *Introduction to the Theory of Flow Machines.* Oxford: Pergamon Press 1966.
12. Bianchi F.D., Battista H., Mantz R.J. *Wind Turbine Control Systems.* Springer 2007.
13. Blecharz K. *Sterowanie maszyną dwustronnie zasilaną, pracującą jako generator w elektrowni wiatrowej przy zapadach napięcia.* Acta Energetica 1/2010 s. 5-15.
14. BP Statistical Review of World Energy. *Statistical Review of World Energy 2014.* Londyn 2014.
15. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Erste Monitoring (BMU) – Bericht "Energie der Zukunft"*. Berlin 2012

16. Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E. *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, Ltd 2001.
17. Chantharasenawong C., Suwantragul B., Ruangwiset A. *Axial Momentum Theory for Turbines with Co-axial Counter Rotating Rotors*. The Commemorative International Conference on the Occasion of the 4th Cycle Celebration of KMUTT. Bangkok 2009.
18. Cao W., Xie Y., Tan Z. *Wind Turbine Generator Technologies*, Intech Europe 2012
19. Cheung V., Cannons K. *An Introduction to Neural Networks*. Materiały do wykładu. Manitoba 2002.
20. Coleman C.P. *A Survey of Theoretical and Experimental Coaxial Rotor Aerodynamic Research*. NASA Technical Paper 3675. California 1997.
21. Coleman C.P. *A Survey of Theoretical and Experimental Coaxial Rotor Aerodynamic Research*. National Aeronautics and Space Administration. California 1997.
22. Dębowski M., Romański L., Bieniek J. *Analiza pracy różnych profili łopat pędnika siłowni wiatrowej*. Inżynieria Rolnicza. Nr 2 (137). s. 29-34. Kraków 2012
23. Dębowski M., Romański L., Komarnicki P., Bieniek J. *Analiza wpływu wybranych profili łopat wirnika na generowaną moc przez mini siłownię wiatrową*. Inżynieria Rolnicza. Nr 3 (145). s. 25-33. Kraków 2013
24. Dietrich Lohrmann, *Von der östlichen zur westlichen Windmühle*, Archiv für Kulturgeschichte, Vol. 77, Issue 1, 1995.
25. Drachmann A.G. *Heron's Windmill*, Centaurus, 1961.
26. Encyclopedia of Energy, *History of Wind Energy in Cutler J. Cleveland*, Vol.6, Elsevier 2007.
27. Energy Encyclopedia, *History of Wind Energy*. vol. 6.
28. Europejska Agencja Środowiska (EEA). *Air pollution from electricity – generating large combustion plants*, Kopenhaga 2008.
29. Farley B.G., Clark W.A. *Simulation of Self-Organizing Systems by Digital Computer*. IRE Transactions on Information Theory 4 (4): 76–84. 1954

30. Flaga A. *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*. Wydawnictwo „Arkady”, Warszawa 2008.
31. Global Wind Energy Council. *Global Wind Report Annual Market Update 2013*. Bruksela 2014.
32. Główny Urząd Statystyczny (GUS). *Energia ze źródeł odnawialnych w 2010r. Informacje i opracowanie statystyczne*. Warszawa 2011
33. Grad L. *Przykład optymalizacji struktury sztucznej sieci neuronowej metodą algorytmów genetycznych*. Biuletyn Instytutu Automatyki i Robotyki Nr 23, Warszawa 2006.
34. Gumuła S., Knap, T., Strzelczyk, P., Szczerba Z. *Energetyka wiatrowa*. Wyd. AGH, ISBN 83-89388-79-0, Kraków 2006.
35. Gunther F., Fritsch S. *Neuralnet: Training of Neural Networks*. The R Journal Vol. 2/1 June 2010.
36. Hassan A., Hill D. R. *Islamic Technology: An illustrated history*, Cambridge University Press 1986.
37. Hebb D. *The Organization of Behavior*. Wiley & Sons New York 1949.
38. Hebb, D. O. *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*. Wiley and Sons. New York 1949.
39. Heinzmann R. *Filozofia średniowieczna*. Kęty: Antyk, 1999.
40. Hertz J., Krogh A., Palmer R.G. *Wstęp do teorii obliczeń neuronowych*. WNT Warszawa 1993.
41. International Organization for Standardization (ISO). *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Genewa 1995.
42. Jacobs E.N., Ward K.E., Pinkerton R.M. *The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel*. NACA Report No. 460. 1935.
43. Jankowska A., Siczek A., Jasińska D. *Korzyści z budowania elektrowni wiatrowych oraz opłacalność tego przedsięwzięcia*. Gazeta „Czysta Energia” 2010

44. Kamiński S. *Podstawowe zanieczyszczenia powietrza*. <http://Ekoportal.gov.pl>; dostęp 18.09.2014r.
45. Kasprzyk T., Ślot K. *Sieci neuronowe komórkowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa-Łódź 1995.
46. Kavzoglu T. *Determining Optimum Structure for Artificial Neural Networks*. Materiały konferencji: 25th Annual Technical Conference and Exhibition of the Remote Sensing. Soci 1999.
47. Kiplinger's Personal Finance. *A Pioneer is Vindicated*, Washington 1981.
48. Kisielewski P., Antal M., Gierak D., Zalas P. *Zastosowanie magnesów trwałych w silnikach elektrycznych dużej mocy*. Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe. BOBRME Komel, nr 92 2011.
49. Komarnicki P., Romański L., Bieniek J., Dębowski M., Pałka K. *Wpływ regulacji pracy wentylatorów na równomierność rozkładu strumienia powietrza w tunelu aerodynamicznym*. Inżynieria Rolnicza. Nr 2 (143) 2003. s. 155-165.
50. Krose B., Smagt P. *An Instruction to Neural Networks*. Amsterdam 1996.
51. Kurdziel R. *Podstawy Elektrotechniki*. WNT Warszawa 1965.
52. Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F. *Elektrownie*. Warszawa, WNT 1997.
53. Lerch T. *Stany dynamiczne elektrowni wiatrowej z maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną*. Akademia Górniczo – Hutnicza Im. Stanisława Staszica 2010.
54. Lubośny Z. *Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*. WNT Warszawa 2006.
55. Ma H., Chen L., Ju P., Liu H., Jiang N., Wang C. *Feasibility research on DC generator based wind power generation system*. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN) 2009.
56. Manshadi M.D. *Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research*. InTech Rijeka 2011.
57. Marzocca P. *The NACA airfoil series*. Clarkson University 2009.
58. Masters T. *Sieci neuronowe w praktyce*. WNT Warszawa 1996.

59. McCulloch W., Pitts S. *A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity*. Bulletin of Mathematical Biophysics 5 (4): 115–133. 1943
60. Mehren A.F. *Nukh-bat-al-Dahr*, St Peterburg 1866
61. Minsky M., Papert S. *An Introduction to Computational Geometry*. MIT Press Cambridge 1969. ISBN 0-262-63022-2.
62. Obrzut 2007 <http://proekologia.pl/content.php?article.512.1>
63. Osowski S. *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2000.
64. Ostrowski D. *Konstrukcja wieży*. <http://www.elektrownie-tanio.net/wieza.html>; dostęp 17.09.2014r.
65. Paraschivoiu I. *Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept*. Ecole Polytechnique de Montreal. Montreal 2002
66. Pawlak A. *Analiza pracy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej*. Rozprawa doktorska. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu. Wrocław 2013
67. Plamitzer A.M. *Maszyny elektryczne*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne Warszawa 1982.
68. PN – EN 50160. *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*.
69. PN – EN 61400-21. *Turbozespoły wiatrowe: Pomiar i ocena jakości energii*.
70. PN – ISO 5221:1994 *Rozprowadzanie i rozdział powietrza – Metody pomiaru przepływu strumienia powietrza w przewodzie*.
71. Price T. J., Blyth J. *Britain's First Modern Wind Power Engineer*. Wind Engineering 29, 2005.
72. Rochester N. Holland J.H., Habit L.H., Duda W.L. *Tests on a cell assembly theory of the action of the brain, using a large digital computer*. IRE Transactions on Information Theory 2 (3): 80–93. 1956
73. Rojas R. *Neural Networks. A systematic Introduction*. Springer-Verlag. Berlin 1996.
74. Romański L. *Odnawialne źródła energii*. Oficyna Wydawnicza ATUT. Wrocław 2013.

75. Rumelhart D.E., McClelland J. *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. MIT Press Cambridge 1986.
76. Salejda W., Poprawski R. *Podstawy analizy niepewności pomiarowych w studenckim laboratorium podstaw fizyki*. Politechnika Wrocławska, Wrocław 2009
77. Šarboh S. *Nikola Tesla's Patents*. Sixth International Symposium Nikola Tesla 18–20.10.2006. Belgrad 2006.
78. Sathyajith M. *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer 2006.
79. Seungmin L., Hogeon K., Soogab L. *Analysis of aerodynamic characteristics on a counter-rotating wind turbine*. Current Applied Physics Volume 10, Issue 2, Supplement, s. S339–S342. March 2010.
80. Shackleton J. *World First for Scotland Gives Engineering Student a History Lesson*. The Robert Gordon University 2004.
81. Skwarczyński J., Dziadecki A., Zarudzki J., Lerch T., Skotniczny J., Grzegorski J. *Maszyna indukcyjna dwustronnie zasilana jako generator elektryczny siłowni wiatrowej*. Przegląd Elektrotechniczny 2004.
82. Somers D. M. *The S830, S831, and S832 Airfoils*. National Renewable Energy Laboratory. Pennsylvania 2005
83. Stefanowski J. *Sztuczne sieci neuronowe*. Materiały do wykładu. Poznań 2006
84. Styczyński Z.A. *Renewable Energy Sources. Renewables – State of the Art*. Materiały do wykładu Wrocław 2008.
85. Suzuki T., Okitsu H., Kawahito T. *Characteristics of a small wind-power system with dc generator*. IEE Proceedings Electric Power Applications B 1982.
86. Szaflarski A. *Dwustronnie zasilana maszyna w warunkach pracy synchronicznej*. Politechnika Poznańska Rozprawy, Poznań 1997.
87. Szargut J. *Teoria procesów cieplnych*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa 1973.

88. Szlachta J. i inni. *Niekonwencjonalne źródła energii*. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Wrocław 2009.
89. Tadeusiewicz R. *Sieci neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza RM. Warszawa 1993.
90. Tetko I.V., Livingstone D.J., Luik A.I. *Neural network studies. 1. Comparison of Overfitting and Overtraining*. J. Chem. Inf. Comput. Sci. 1995,.
91. The New York Times. *Hard Truths About the Bailout*. The New York Times 2008-09-19. [dostęp 2014-04-28].
92. Tong W. *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. WIT Press Southampton 2010
93. Turowski J. *Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych*. WNT Warszawa 1982.
94. Urząd Regulacji Energetyki (URE): <http://www.ure.gov.pl/uremapoze/mapa.html>,
dostęp 04.03.2014r.
95. Viterna L.A. and Janetzke D.C. *Theoretical and Experimental power From Large Horizontal-Axis Wind Turbines*. NASA TM-82944, 1982.
96. Węgliński J. *Energia odnawialna stan i perspektywy. Polskie sieci elektroenergetyczne*. Warszawa 2010.
97. Werner B. *Winenergie*. Verlag Technik GmbH Berlin 1991.
98. World Energy Council. 2015 *World Energy Issues Monitor*. London 2015.

7. Spis tabel

Tabela 1. Moce zainstalowanych wiatraków na świecie na koniec 2013 roku [Global Wind Energy Council 2014]	21
Tabela 2. Moc nowopowstałych wiatraków w 2013 roku [Global Wind Energy Council 2014]	22
Tabela 3. Wykaz nastaw falowników oraz średnich prędkości strugi powietrza.....	43
Tabela 4. Obliczone wartości błędów	46
Tabela 5. Wskaźniki intensywności turbulencji I_{BR} (bez regulacji) dla poszczególnych osi zależne od prędkości strugi powietrza	48
Tabela 6. Zestawienie wskaźników intensywności turbulencji przed (I_{BR}) i po (I_R) regulacji	50
Tabela 7. Wieloczynnikowa analiza wariancji bez interakcji	58
Tabela 8. Współczynniki Pearson'a oraz rangi Spearman'a określające korelację pomiędzy zmienną zależną i zmiennymi niezależnymi dla elektrowni jednowirnikowej.....	59
Tabela 9. Wieloczynnikowa analiza wariancji bez interakcji	66
Tabela 10. Współczynniki Pearson'a oraz rangi Spearman'a określające korelację pomiędzy zmienną zależną i zmiennymi niezależnymi charakteryzującymi pracę elektrowni dwuwirnikowej.....	70
Tabela 11. Zestawienie kątów zaklinowania łopat, dla których osiągnięta została moc maksymalna dla określonej średniej prędkości strugi powietrza	80
Tabela 12. Wyniki pomiaru prędkości strug powietrza przed i za wirnikiem jednowirnikowej elektrowni wiatrowej.....	89
Tabela 13. Wyniki pomiaru prędkości strug powietrza przed pierwszym wirnikiem, pomiędzy wirnikami oraz za drugim wirnikiem dla dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej.....	90
Tabela 14. Parametry jakościowe sieci, osiągnięte po procesie uczenia, na zbiorze testowym	93
Tabela 15. Wyniki optymalizacji parametrów dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej	107

8. Spis rysunków

rys. 1. Szacowane w latach ilości paliw kopalnych [Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2012].....	4
rys. 2. Wiatrak Herona	7
rys. 3. Wiatrak typu perskiego [Mehren 1866]	8
rys. 4. Schemat budowy wewnętrznej koźlaka, rok 1762 [Diderot et d'Alembert 1762].....	9
rys. 5. Schemat budowy paltraka [Groot volkomen Moolenboek]	10
rys. 6. Wiatrak holenderski [http://www.wiatrak.nl]	10
rys. 7. Turbina wiatrowa o pionowej osi obrotu skonstruowana przez James'a Blyth'a [http://www.taplondon.co.uk]	10
rys. 8. Pierwsza na świecie elektrownia wiatrowa o mocy powyżej 1 MW [NREL Image Gallery].....	12
rys. 9. Rodzaje turbin wiatrowych [http://www.zielonaenergia.eco.pl].....	13
rys. 10. Podział elektrowni wiatrowych ze względu na warunki pracy	14
rys. 11. Schemat turbiny wiatrowej wyposażonej w prądnice prądu stałego połączonej z siecią	15
rys. 12. Schemat elektrowni wiatrowej z maszyną dwustronnie zasilaną [Blecharz 2010].....	16
rys. 13. Przekrój maszyny synchronicznej	16
rys. 14. Schemat połączenie elektrowni wiatrowej z generatorem synchronicznym do sieci energetycznej.....	17
rys. 15. Rodzina charakterystyk prezentujących krzywe mocy dla poszczególnych prędkości wiatru.....	17
rys. 16. Moc elektrowni wiatrowych na świecie zainstalowana w poszczególnych latach [Global Wind Energy Council 2014]	20
rys. 17. Moc zainstalowanych turbin wiatrowych na świecie w latach 1996 – 2013 [Global Wind Energy Council 2014]	20
rys. 18. Moce zainstalowanych wiatraków na świecie na koniec 2013 roku [Global Wind Energy Council 2014].....	21
rys. 19. Moc nowopowstałych wiatraków w 2013 roku [Global Wind Energy Council 2014].....	22
rys. 20. Budowa neuronu biologicznego [http://www.cs.put.poznan.pl]	23
rys. 21. Budowa neuronu w sztucznej sieci neuronowej [Cheung, Cannons 2002].....	24
rys. 22. Schemat sztucznej sieci neuronowej o 3 warstwach w układzie 2 – 4 – 1.....	25

rys. 23. Schemat ideowy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej	29
rys. 24. Komputerowa wizualizacja prototypu dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej: 1 – pierwszy wirnik, 2 – drugi wirnik, 3 – generatora elektryczny, 4 – szczotki elektryczne, 5 – tylni korpus wraz z zamocowanym statecznikiem, 6 – pierścienie ślizgowe, 7 – wał wraz z tulejkami dystansującymi.....	30
rys. 25. Dwuwirnikowa mini elektrowni wiatrowa zamontowana w komorze pomiarowej....	31
rys. 26. Łopata powstała w wyniku oryginalnego połączenia NACA 63-415 z NACA 63-210	31
rys. 27. Schemat tunelu aerodynamicznego o otwartym przepływie powietrza: 1- stelaż z sekcją wentylatorów, 2 – tłumik drgań, 3 – redukcja symetryczna o przekroju kwadratowym, 4 – ulownica (wyrównanie strumienia), 5 – konfuzor Witoszyńskiego, 6 – komora pomiarowa z otworem rewizyjnym.....	32
rys. 28. Tunel aerodynamiczny	33
rys. 29. Stelaż z sekcją wentylatorów	33
rys. 30. Szafa sterownicza tunelu aerodynamicznego.....	34
rys. 31. Falownik LG iG5A umożliwiający regulację prędkości obrotowej wentylatora.....	34
rys. 32. Mikromanometr różnicowy HD2114P.2 (źródło: http://www.chlodnictwo.biz).....	35
rys. 33. Kompaktowy anemometr wiatraczkowy testo 416	35
rys. 34. Bocznik do pomiaru natężenia prądu wraz z miernikiem METEX M-4660M.....	36
rys. 35. Multimetr do pomiaru napięcia	36
rys. 36. Rezystory suwakowe o wartościach rezystancji 2,35 Ω ; 2,35 Ω ; 9 Ω ; 13 Ω	37
rys. 37. Rozmieszczenie punktów pomiarowych oraz podział na strefy pomiarowej [Komarnicki i in. 2013].....	38
rys. 38. Schemat układu pomiarowego (G – generator, V – woltomierz, A – amperomierz, R – regulowane oporniki)	40
rys. 39. Sposób pomiaru kąta α zaklinowania łopat w piaście wirnika.....	41
rys. 40. Specjalistyczne kątomierze do ustawienia kąta zaklinowania łopat	42
rys. 41. Układ pomiarowy mini elektrowni wiatrowej.....	43
rys. 42. Schemat poglądowy jednokierunkowej wielkowieściowej sztucznej sieci neuronowej	44
rys. 43. Charakterystyka przedstawiająca zależność średniej prędkości strugi powietrza od nastawionej częstotliwości poszczególnych falowników	48

rys. 44. Graficzne przedstawienie wskaźników intensywności turbulencji dla poszczególnych osi z uwzględnieniem prędkości strugi powietrza.....	49
rys. 45. Charakterystyka przedstawiająca zależność średniej prędkości strugi powietrza od średniej częstotliwości falowników	50
rys. 46. Graficzne przedstawienie wskaźników intensywności turbulencji dla poszczególnych osi z uwzględnieniem prędkości strugi powietrza po przeprowadzonej regulacji	51
rys. 47. Wskaźniki intensywności turbulencji przed i po regulacji dla poszczególnych średnich prędkości strugi powietrza.....	52
rys. 48. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 15 Hz.....	53
rys. 49. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 15 Hz	53
rys. 50. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 20 Hz.....	54
rys. 51. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 20 Hz	54
rys. 52. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 25 Hz.....	54
rys. 53. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 25 Hz	54
rys. 54. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 30 Hz.....	55
rys. 55. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 30 Hz	55
rys. 56. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 35 Hz.....	56
rys. 57. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 35 Hz	56
rys. 58. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 40 Hz.....	56
rys. 59. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 40 Hz	56

rys. 60. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 45 Hz.....	57
rys. 61. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 45 Hz.....	57
rys. 62. Rozkład prędkości strugi powietrza przed regulacją. Praca wentylatorów z częstotliwością 50 Hz.....	57
rys. 63. Rozkład prędkości strugi powietrza po regulacji. Praca wentylatorów z częstotliwością 50 Hz.....	57
rys. 64. Interakcja pomiędzy prędkością strugi powietrza ($V, m \cdot s^{-1}$), a mocą generowaną przez jednowirnikową elektrownię wiatrową (P, W)	58
rys. 65. Interakcja pomiędzy kątem zaklinowania łopat w wirniku ($\alpha, ^\circ$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W).....	59
rys. 66. Charakterystyki mocy jednowirnikowej mini elektrowni wiatrowej.....	60
rys. 67. Interakcja pomiędzy kątem zaklinowania łopat w wirniku ($\alpha, ^\circ$) i prędkością strugi powietrza ($V, m \cdot s^{-1}$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W).....	61
rys. 68. Zależność generowanej mocy w funkcji kąta zaklinowania łopat oraz prędkości strugi powietrza	62
rys. 69. Zależność współczynnika mocy C_p elektrowni wiatrowej w zależności od prędkości strugi powietrza dla elektrowni jednowirnikowej.....	63
rys. 70. Charakterystyka mocy dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej.....	64
rys. 71. Zależność współczynnika mocy C_p elektrowni wiatrowej w zależności od prędkości strugi powietrza dla elektrowni dwuwirnikowej.....	65
rys. 72. Interakcja pomiędzy prędkością strugi powietrza ($V, m \cdot s^{-1}$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W)	66
rys. 73. Interakcja pomiędzy kątem zaklinowania łopat w pierwszym wirniku ($\alpha_1, ^\circ$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W)	67
rys. 74. Interakcja pomiędzy kątem zaklinowania łopat w drugim wirniku ($\alpha_2, ^\circ$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W)	67
rys. 75. Interakcja pomiędzy odległością wirników (l, mm), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W)	68
rys. 76. Interakcja pomiędzy odległością wirników (l, mm) i prędkością strugi powietrza ($v, m \cdot s^{-1}$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W)	69

rys. 77. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $5,58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	72
rys. 78. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $7,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	73
rys. 79. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $9,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	74
rys. 80. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $10,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	75
rys. 81. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $12,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	76
rys. 82. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $14,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	77
rys. 83. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $15,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	78
rys. 84. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $17,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	79
rys. 85. Krotność wystąpienia danego ustawienia kątów zaklinowania łopat w pierwszym i drugim wirniku dwuwirnikowej elektrowni wiatrowej przy osiągnięciu mocy maksymalnej dla danej prędkości strugi powietrza.....	81
rys. 86. Interakcja pomiędzy kątami zaklinowania łopat w pierwszym i drugim wirniku($\alpha_1, ^\circ$; $\alpha_2, ^\circ$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W).....	81
rys. 87. Interakcja pomiędzy kątami zaklinowania łopat w pierwszym i drugim wirniku($\alpha_1, ^\circ$; $\alpha_2, ^\circ$) i prędkością strugi powietrza ($v, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), a mocą generowaną przez dwuwirnikową mini elektrownię wiatrową (P, W)	82
rys. 88. Zależność generowanej mocy od odległości wirników oraz średniej prędkości strugi powietrza dla kątów zaklinowania łopat $\alpha_1 = 125^\circ$ oraz $\alpha_2 = 50^\circ$	83
rys. 89. Zależność generowanej mocy od odległości wirników oraz średniej prędkości strugi powietrza dla kątów zaklinowania łopat $\alpha_1 = 130^\circ$ oraz $\alpha_2 = 55^\circ$	83
rys. 90. Zależność generowanej mocy od odległości wirników oraz średniej prędkości strugi powietrza dla kątów zaklinowania łopat $\alpha_1 = 125^\circ$ oraz $\alpha_2 = 40^\circ$	84
rys. 91. Charakterystyki mocy jedno- oraz dwuwirnikowej mini elektrowni wiatrowej.....	86
rys. 92. Graficzna reprezentacja obliczonej mocy teoretycznej i mocy rzeczywistej elektrowni jednowirnikowej.....	89

rys. 93. Graficzna reprezentacja obliczonej mocy teoretycznej i mocy rzeczywistej elektrowni dwuwirnikowej.....	91
rys. 94. Schemat zmian ciśnienie w dwuwirnikowej turbinie wiatrowej [źródło: Chantharasenawong i in. 2009].....	92
rys. 95. Przebieg współczynnika mocy w zależności od prędkości strug powietrza	93
rys. 96. Przebieg procesu uczenia sieci posiadającej 27 neurony w warstwie ukrytej	95
rys. 97. Histogram przedstawiający błąd bezwzględny popełniany przez sieć z 27 neuronami w warstwie ukrytej	95
rys. 98. Współzależność wartości obserwowanej w funkcji wartości oczekiwanej dla SSN o 27 neuronach w warstwie ukrytej.....	96
rys. 99. Porównanie charakterystyk wykreślonych na podstawie badań laboratoryjnych oraz wyników uzyskanych z SSN	97
rys. 100. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $5,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN	99
rys. 101. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $7,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN	100
rys. 102. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $9,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN	101
rys. 103. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $10,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN	102
rys. 104. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $12,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN	103
rys. 105. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $14,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN	104
rys. 106. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $15,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN	105

rys. 107. Charakterystyka mocy w funkcji kątów zaklinowania łopat w poszczególnych wirnikach dla prędkości strugi powietrza wynoszącej $17,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wykonana na podstawie danych z SSN 106