Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej

mgr inż. Krzysztof Doerffer

Badania i rozwój prototypów innowacyjnej elektrowni wiatrowej

Promotor:
dr hab. inż. Andrzej Tomporowski, prof. nadzw. UTP

Promotor pomocniczy:
dr inż. Robert Kasner

Bydgoszcz, czerwiec 2019

Składam serdeczne podziękowania Promotorowi,
Panu dr. hab. inż. Andrzejowi Tomporowskiemu, prof. nadzw. UTP
za opiekę naukową i wsparcie procesu twórczego.

Dziękuję Promotorowi pomocniczemu,
Panu dr. inż. Robertowi Kasnerowi
za cenne wskazówki merytoryczne.

Podziękowania kieruję także do
Pana Prof. dr. hab. inż. Józefa Flizikowskiego
za inspirujące pracę wskazówki.

Dziękuję Rodzicom i Żonie
za wsparcie i wyrozumiałość.

Szczególne podziękowania
za pomoc w przeprowadzeniu i analizie badań składam
mgr. inż. Andrzejowi Reiterowi oraz
dr. inż. Januszowi Teledze.

Spis treści

NOMENKLATURA **7**

1. WSTĘP **9**

1.1. CHARAKTERYSTYKA ENERGETYKI WIATROWEJ 9
1.2. TURBINA PROSUMENCKA 16
1.3. PARAMETRY WIATRU 18

2. ANALIZA STANU WIEDZY I TECHNIKI **23**

2.1. PODZIAŁ KONSTRUKCJI TURBIN 23
2.2. BEZPIECZEŃSTWO UŻYTKOWANIA WIATRAKÓW 27
2.3. KONSTRUKCJA SAVONIUSA - MODYFIKACJE 28
2.4. PRAWO I LIMIT BETZA 30

3. CEL I PROBLEM BADAWCZY PRACY **34**

3.1. CEL PRACY 34
3.2. PROBLEM BADAWCZY 35

4. METODYKA BADAŃ **37**

4.1. KONCEPCJA TURBINY 37
4.1.1. Dwa rozwiązania podjęte w pracy 37
4.1.2. Wyznaczenie proporcji turbiny 43
4.2. BADANIA POLOWE 45
4.2.1. Małe laboratorium polowe IMP PAN 45
4.2.2. Laboratorium wiatrowe CTO 46
4.3. BADANIA LABORATORYJNE 47
4.3.1. Wirniki- eksploatacyjne cechy konstrukcyjne 47
4.3.2. Badania generatorów 52
4.4. ZAGADNIENIA KONSTRUKCYJNO-WYTWÓRCZE 57
4.4.1. Przeniesienie napędu, ułożyskowanie 57
4.4.2. Mechanizm śledzenia kierunku wiatru 59
4.4.3. Konstrukcje kierownic 61
4.4.4. Konstrukcje wsporcze 62
4.5. DOSTOSOWANIE MOCY TURBINY 64
4.5.1. Konstrukcje modułowe turbin 64
4.5.2. Multiplikacja ilości turbin 65

5. WYNIKI BADAŃ **67**

5.1. KONCEPCJA TURBINY 67
5.2. BADANIA POLOWE 73
5.2.1. Badania polowe w IMP PAN 73

5.2.2. Badania laboratoryjne w CTO 79
5.3. BADANIA LABORATORYJNE 84
5.3.1. Badania wirników turbin wiatrowych 84
5.3.2. Generatory 92
5.4. ZAGADNIENIA KONSTRUKCYJNO-WYTWÓRCZE 97
5.5. DOSTOSOWANIE MOCY TURBINY 101
6. WNIOSKI 105
7. PERSPEKTYWY APLIKACYJNO-ROZWOJOWE 111
LITERATURA 112
SPIS TABEL 117
SPIS RYSUNKÓW 118
STRESZCZENIE 122
ABSTRACT 123
ANEKS I 124
ANEKS II 126

NOMENKLATURA

TSR [-]	(tip speed ratio) stosunek prędkości obwodowej na zewnętrznej krawędzi wirnika do prędkości wiatru TSR=$\frac{V_{łopaty}}{V_{wiatru}}$
λ [-]	współczynnik prędkości obwodowej wirnika λ=TSR
V [m/s]	prędkość
V_u [m/s]	prędkość na wlocie
V_t [m/s]	prędkość na turbinie
V_d [m/s]	prędkość na wylocie
M [Nm]	moment na wale wirnika
P [W]	moc generowana przez wirnik
ω [1/s]	prędkość kątowa (radiany/s)
R [m]	promień wirnika
P [W]	moc generowana przez wirnik
A [m²]	powierzchnia
A_u [m²]	powierzchnia strugi na wlocie
A_t [m²]	powierzchnia struga na turbinie
A_d [m²]	powierzchnia na wylocie
p_s [Pa]	ciśnienie statyczne
p_{dyn} [Pa]	ciśnienie dynamiczne
p_0 [Pa]	ciśnienie otoczenia (spiętrzenia)
P_1 [Pa]	ciśnienie przed turbiną
P_2 [Pa]	ciśnienie za turbiną
P_∞ [Pa]	ciśnienie otoczenia
P [kg/m³]	gęstość powietrza
$\dot{m}$ [kg/s]	strumień masy
F [N]	siła
x [m]	przesunięcie
t [s]	czas
E_k [Nm]	energia kinetyczna
η [-]	sprawność turbiny
U [V]	napięcie elektryczne
I [A]	natężenie prądu elektrycznego
n [1/s]	prędkość obrotowa (obroty/s)
rpm [1/min]	obroty na minutę
OZE	odnawialne źródła energii
PSE	Polskie Sieci Energetyczne
NIK	Najwyższa Izba Kontroli
KSE	Krajowy System Elektroenergetyczny
CTO	Centrum Techniki Okrętowej
IMP PAN	Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk
LMEW	Laboratorium Małych Elektrowni Wiatrowych

1. WSTĘP

1.1. CHARAKTERYSTYKA ENERGETYKI WIATROWEJ

Analizując turbiny wiatrowe warto spojrzeć całościowo na ich wykorzystanie w kontekście energetyki. Tendencji na całym świecie nie da się określić jednoznacznie jednak warto przyjrzeć się zagadnieniu w granicach Polski a także Unii Europejskiej (UE).

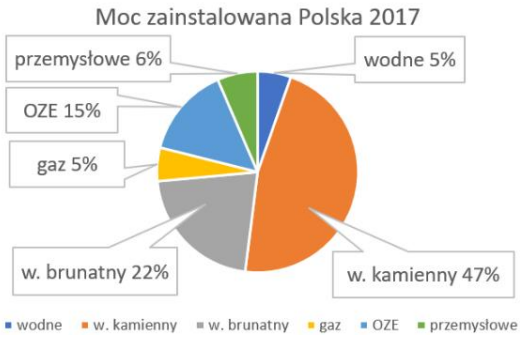
Jak wiadomo w pakiecie klimatyczno-energetycznym dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy z 23 kwietnia 2009 roku (2009/28/WE) nakłada na kraje członkowskie wymóg ograniczenia wytwarzania dwutlenku węgla i wyznacza cel zwiększenia udziału energii wytwarzanej ze źródeł odnawialnych do 20% w 2020 roku oraz docelowo do 40% w 2030roku [1].

Struktura mocy zainstalowanej w Polsce odległa jest od wskaźników wymaganych przez UE w związku z czym w najbliższych latach konieczne jest wprowadzenie znacznych zmian w energetyce. Na przestrzeni ostatnich lat nie daje się zaobserwować znaczących zmian a przynajmniej nie są one wystarczające w kontekście zwiększenia ilości energii z odnawialnych źródeł energii.

W tabeli 1.1 przedstawiono wartości mocy zainstalowanej w Polsce w latach 2015-2017 [2], a wykres kołowy (Rys. 1.1) obrazuje proporcje przedstawione w tabeli 1.1.

Tabela 1.1 Moc zainstalowana [MW] w Polsce w latach 2015-2017r.

typ elektrowni	rok		
	2015	2016	2017
wodne	2290	2292	2328
w. kamienny	19266	19083	20247
w. brunatny	9290	9332	9352
gaz	1472	1610	2341
OZE	5384	5706	6341
przemysłowe	2821	2828	2813

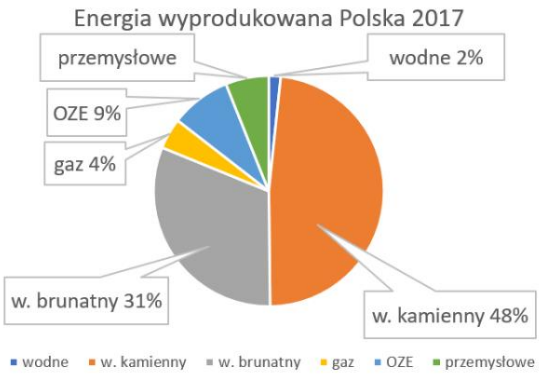


Rys. 1.1 Moc zainstalowana w Polsce w 2017r. [3]

Moc zainstalowana jest wartością, która nie niesie wystarczającej informacji o produkcji prądu elektrycznego. Widoczne jest to szczególnie przy analizie wartości wyprodukowanej energii (Tabela 1.2, Rys. 1,2). Rzeczą naturalną jest, iż największą różnicę obserwuje się w źródłach odnawialnej energii (OZE) gdzie praca w optymalnych warunkach możliwa jest jedynie w ograniczonym przedziale czasu.

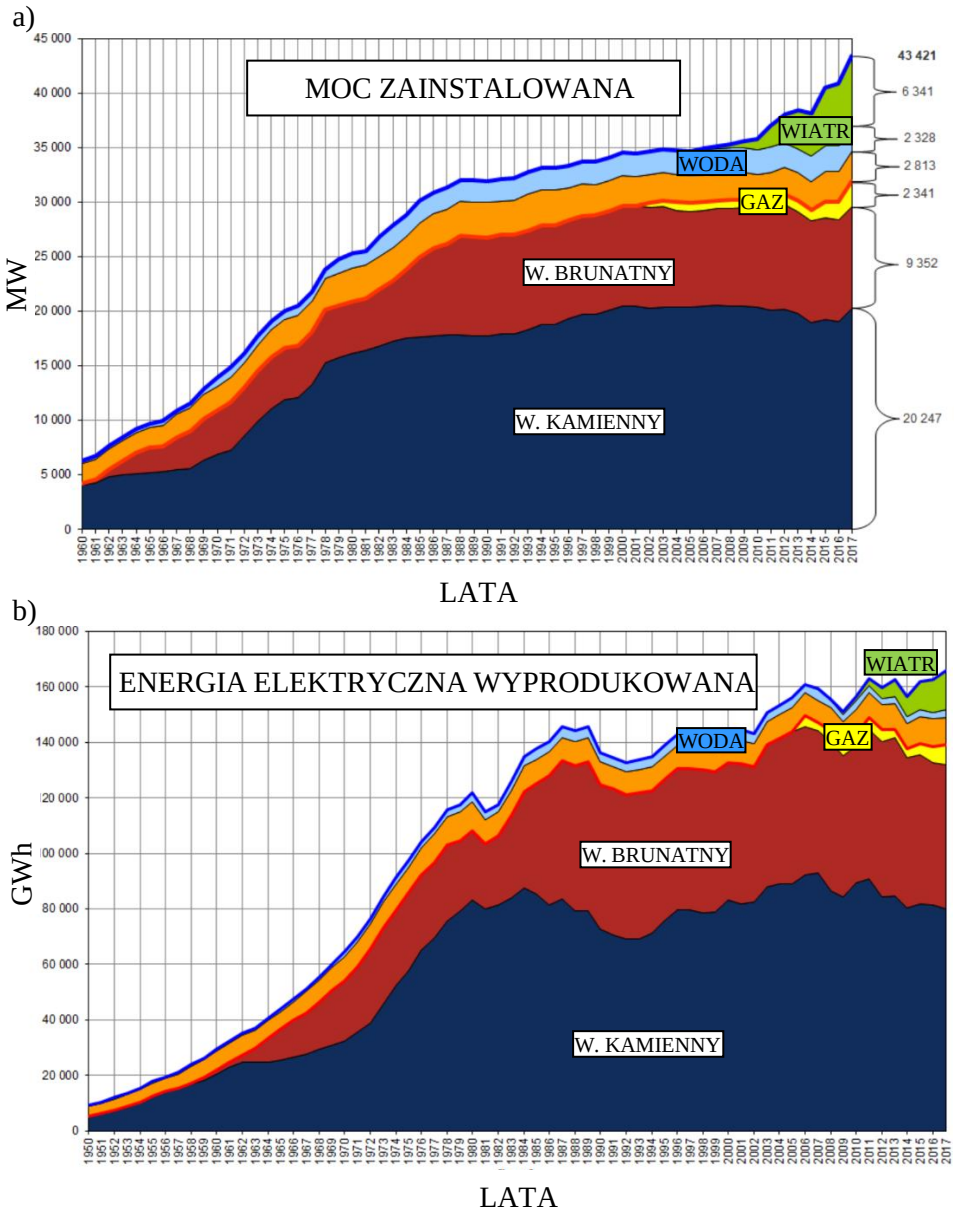
Tabela 1.2 Energia elektryczna wyprodukowana [GWh] w Polsce w 2017r.

typ elektrowni	rok		
	2015	2016	2017
wodne	2261	2399	2767
w. kamienny	81883	81348	79868
w. brunatny	53564	51204	51983
gaz	4193	5776	7172
OZE	10114	11769	14005
przemysłowe	9757	10130	10057



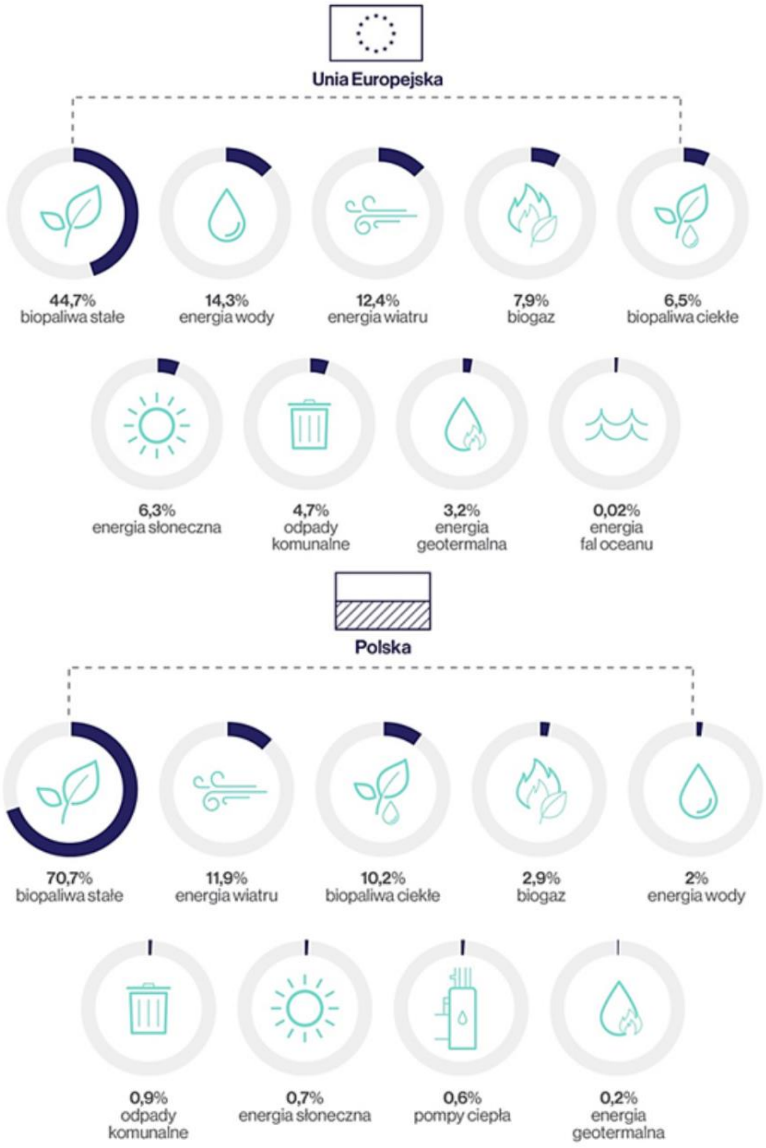
Rys. 1.2 Energia elektryczna wyprodukowana w Polsce 2017r[3].

Warto zwrócić uwagę na wzrost mocy zainstalowanej i wyprodukowanej energii elektrycznej w rozbiciu na poszczególne źródła w perspektywie wieloletniej, co przedstawiają wykresy na rysunku 1.3. Materiały te wskazują na stabilizację produkcji mocy ze źródeł tradycyjnych na przestrzeni wielu lat.



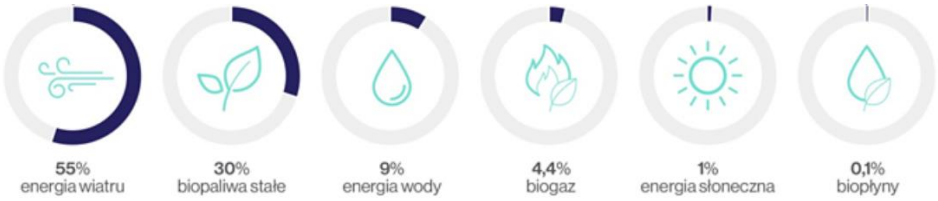
Rys. 1.3 Struktura produkcji energii elektrycznej w Polsce w latach 1960-2017
a) moc zainstalowana b) wyprodukowana energia elektryczna [2]

Jak wynika z raportu Najwyższej Izby Kontroli (NIK) [3] procentowy rozkład pozyskanej energii pierwotnej, uzyskanej bezpośrednio z zasobów naturalnych w UE i Polsce znacząco się różnią (Rys. 1.4).



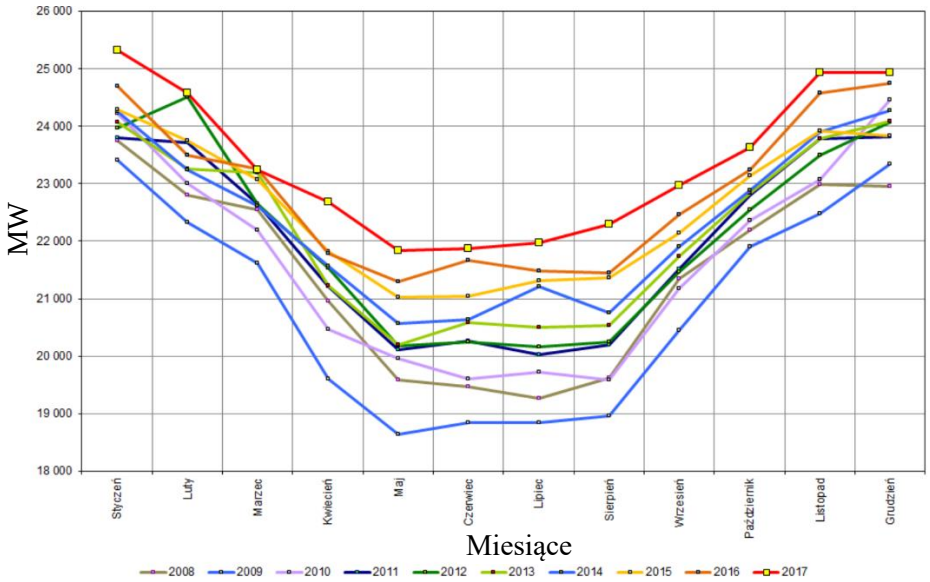
Rys. 1.4 Struktura pozyskania energii pierwotnej ze źródeł odnawialnych w 2016 r [3].

Energia pierwotna ma rozkład odmienny od energii elektrycznej z odnawialnych nośników energii (Rys. 1.5). Zauważalny jest dominujący udział energetyki wiatrowej, co przy konieczności znacznego zwiększenia produkcji energii elektrycznej ze źródeł OZE wskazuje na konieczność głębszej analizy tego źródła.



Rys. 1.5 Produkcja energii elektrycznej w Polsce z odnawialnych nośników energii w 2016 r [3].

Z analizy literaturowej wynika, że nie wystarczy dostosować się do obecnie panujących warunków energetycznych. Należy ocenić, w jakim kierunku zapotrzebowanie na energię elektryczną będzie się rozwijać. Raport PSE [4] (Rys. 1.6) pokazuje jak ewoluowało to zjawisko na przestrzeni ostatnich lat w rozkładzie miesięcznym. Zmiana ta jest widoczna w zakresie ilościowym jak i w całorocznej strukturze zapotrzebowania energetycznego. Z przedstawionego wykresu widać jak zmniejsza się różnica w zapotrzebowaniu na energię elektryczną między zimą a latem.

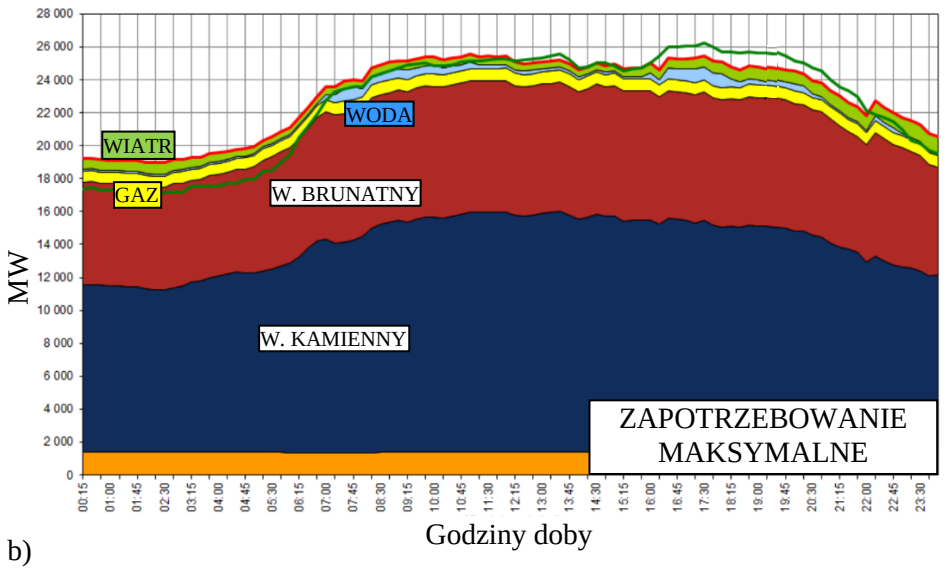


Rys. 1.6 Średnie miesięczne krajowe zapotrzebowanie na moc w dobowych szczytach obciążenia w dni robocze w latach 2008-2017 [4]

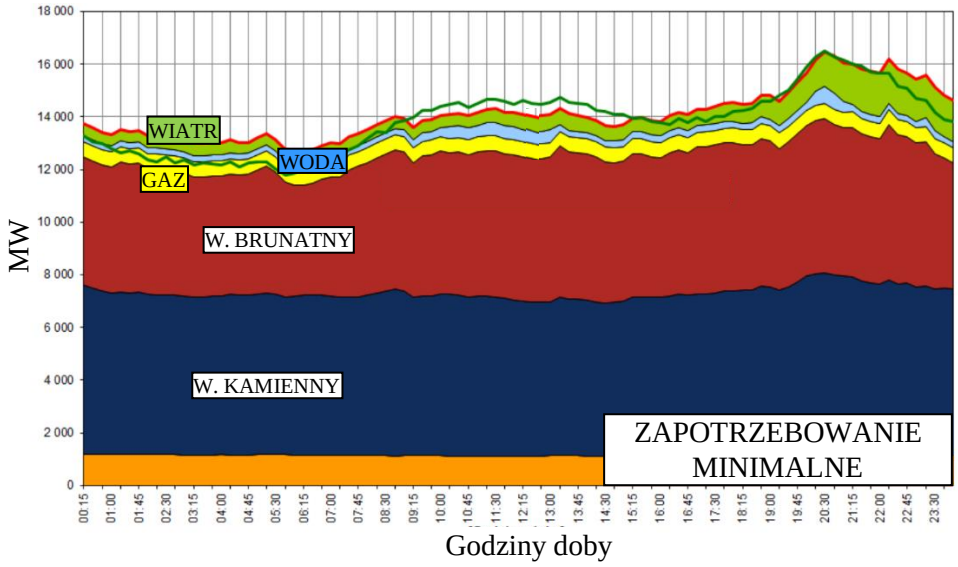
Kolejnym problemem dotyczącym zagadnień energetycznych w odniesieniu do źródeł OZE jest zapotrzebowanie mocy (minimalne i maksymalne) (Rys. 1.8). Przedstawione tu wykresy z KSE [3] z 2017 roku wskazują wartość

zapotrzebowania mocy (Rys. 1.8), oraz źródła, z których pokryte było zapotrzebowanie na moc w krytycznych momentach (Rys. 1.7).

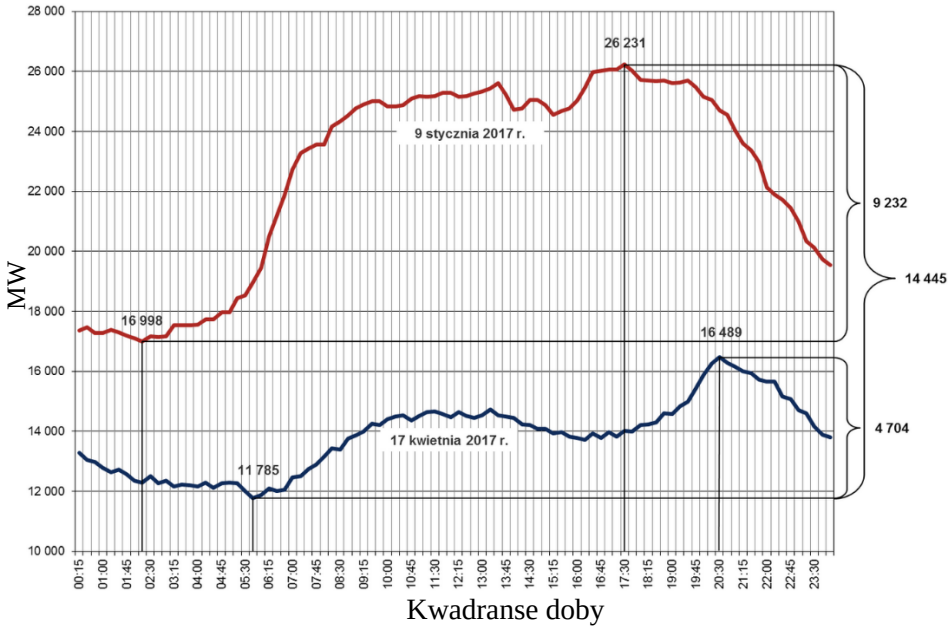
a)



b)



Rys. 1.7 Pokrycie zapotrzebowania na moc a) maksymalną i b) minimalną w rozbiciu na źródła 2017 r [4].



Rys. 1.8 Przebieg zapotrzebowania (minimalnego i maksymalnego) na moc w roku 2017 [4]

Z przedstawionych danych (Rys. 1.7) widać, że w przypadku dnia z maksymalnym i minimalnym zapotrzebowaniem na moc w czasie piku mocy, OZE pokrywają niewiele z zapotrzebowania na moc i zwiększają produkcję w okresie następującym po maksymalnym zapotrzebowaniu. Tak, więc ich działanie w tych dniach wręcz utrudniało próby ustabilizowania mocy w warunkach kryzysu energetycznego.

Te wszystkie informacje można podsumować stwierdzeniem, że konieczne będzie w krótkim czasie podjęcie w pełni kompleksowych działań dotyczących zarządzania produkcją energii oraz udoskonaleniem samej produkcji ze źródeł OZE. W 2030 roku przy produkcji 40% energii elektrycznej z OZE uzupełnieniem systemów energetycznych muszą być magazyny energii lub szybko reagujące zaplecze elektrowni tradycyjnych.

Osiągnięcie wymaganych wskaźników bez zastosowania turbin wiatrowych wydaje się być niewykonalne. Jednak, nawet z ich wykorzystaniem nie będzie to proste zadanie. Aby w tak krótkim czasie osiągnąć cele redukcji emisji dwutlenku węgla i zminimalizowania strat związanych z przesyłem energii warto położyć nacisk na model energetyki rozproszonej opartej na mikro turbinach wiatrowych w zastosowaniu przydomowym.

1.2. TURBINA PROSUMENCKA

Zasoby energii odnawialnej zgodnie z ich naturą stanowią rozproszony potencjał. W związku z tym należy wykorzystywać je lokalnie, korzystając z energii dostępnej w najbliższym otoczeniu. Dzięki temu energia dociera bezpośrednio do odbiorcy, minimalizując straty przesyłu. Jedynie brak dostępności zasobów energii tłumaczyć może koncentrację pozyskiwania energii odnawialnej.

Podczas konferencji „World Small Wind Conference" organizowanej przez World Wind Energy Association w Monachium w 2017 roku, przedstawiono raport [5] zawierający ogólnoświatowe statystyki dotyczące małych elektrowni wiatrowych. Statystyki obejmują dane do końca 2015 roku. W 2015 roku całkowita liczba zainstalowanych turbin wiatrowych na świecie sięgała ponad 990 000 sztuk, co oznacza przyrost o 5%. Rok 2014 zakończył się wynikiem zainstalowanych 945 000 sztuk turbin z przyrostem rzędu 8,3%. Wartości dotyczące mocy zainstalowanej kształtują się jednak odmiennie. Szacowana moc jest na poziomie 945 MW w 2015 przy odpowiadającym temu 830 MW w 2014. Rozkład mocy pomiędzy czterema głównymi krajami wygląda następująco: Chiny 44%, USA 25%, Wielka Brytania 15% oraz Włochy 6,3%.

Globalnie, średnia moc małych turbin wiatrowych wzrasta. W 2010 wynosiła, 0,66kW, w 2011-0,77kW, w 2012-0,84kW, w 2013 -0,85kW, w 2014-0,87kW a w 2015 0,96kW. Z raportu wynika, że zwiększa się zainteresowanie systemami on-grid (systemy podłączone do energetycznej sieci dystrybucyjnej) i stopniowym zmniejszeniem zapotrzebowania na zespoły odizolowane (wyspowe). Trend ten uwidacznia się po analizie rozkładu wartości średnich w rozbiciu na kraje. W Wielkiej Brytanii średnia wynosi 5,1 kW, w USA-1,4 kW a w Chinach z 0,56kW. W Chinach istnieje duże zapotrzebowanie na instalacje odizolowane ze względu na znaczne obszary kraju, całkowicie pozbawione sieci energetycznej.

Zgodnie z raportem AWEA U.S. [6] 91% turbin wiatrowych w USA było w systemie off-grid (systemy niepodłączone do energetycznej sieci dystrybucyjnej) lub akumulatorowym. Ten sam raport zwraca uwagę na spadek ilości instalacji średniego i dużego rozmiaru. O wzroście znaczenia małych turbin wiatrowych świadczy także raport EERE [7] przedstawiający tematykę turbin pod kątem handlowo-produkcyjnym, dla rynku Amerykańskiego produkowane jest 60% i na export 40% turbin. Największa Amerykańska firma produkująca turbiny wiatrowe o mocach 0,4-3,0kW wytwarza 15000 sztuk rocznie, sprzedając je do 120 krajów.

Lista producentów elektrowni wiatrowych jest olbrzymia, a mimo to koszt instalacji jest nadal bardzo wysoki. Konstrukcja turbin zazwyczaj przewidziana jest na wiatr rzędu 12-14m/s, natomiast wiatry takie występują w Polsce niezmiernie rzadko. Kluczowym aspektem jest zachowanie maksymalnego

bezpieczeństwa ze względu na lokalizacje często w bezpośrednim sąsiedztwie gospodarstw domowych.

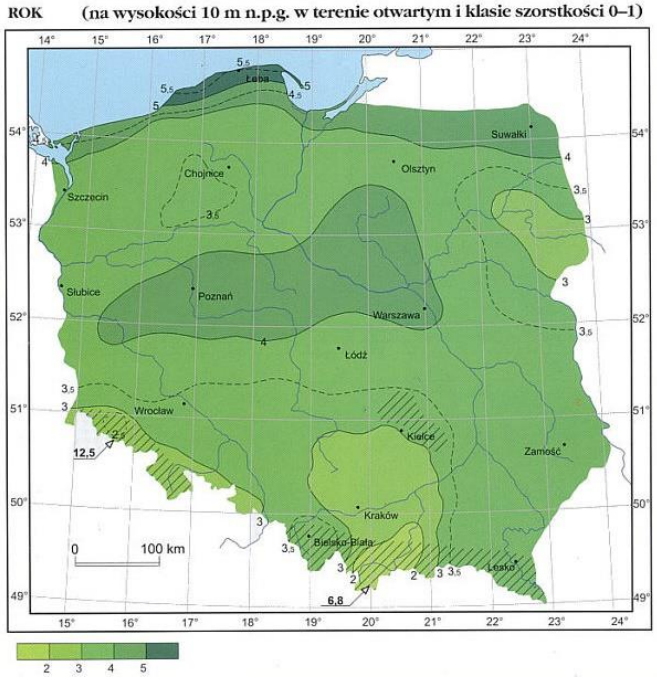
Odpowiedzią na zaistniałe światowe zapotrzebowanie na małe przydomowe elektrownie wiatrowe są zaproponowane w pracy nowe rozwiązania turbin wiatrowych, oba typy rozwiązań zastrzeżone zostały patentami [8, 9].

W roku 2015 uchwalono ustawę o odnawialnych źródłach energii Dz.U. 2015 poz. 478. Według ustawy o OZE „prosument" to odbiorca końcowy dokonujący zakupu energii elektrycznej na podstawie umowy kompleksowej, jednocześnie wytwarzający energię elektryczną wyłącznie z odnawialnych źródeł energii w mikroinstalacji, w celu wykorzystania na potrzeby własne.

1.3. PARAMETRY WIATRU

W dyskusji na temat turbin wiatrowych niezbędne jest uporządkowanie dostępnej wiedzy literaturowej, celem uzyskania wniosków umożliwiających ocenę jakościową podanych informacji i zjawisk występujących w trakcie eksploatacji. Ten stan rzeczy pozwoli zrozumieć jak łatwo można manipulować danymi parametrycznymi przy sprzedaży turbin wiatrowych.

Przedstawiona poniżej mapa [10] (Rys. 1.9) ukazuje średnioroczną prędkość wiatru w terenie otwartym. Informacja ta wydaje się wystarczająca dla wstępnej oceny warunków wietrznych dla turbiny wiatrowej. Jednak nie jest ona tożsama ze średniorocznym rozkładem mocy niesionej przez wiatr, co przedstawione zostanie w dalszym etapie pracy.



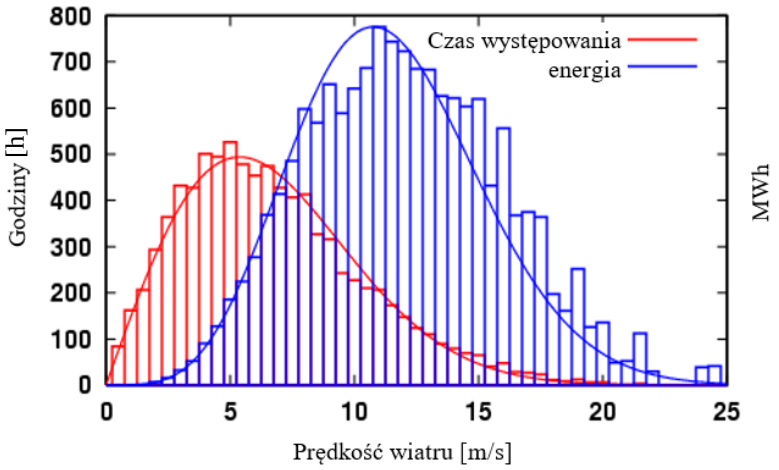
Rys. 1.9 Mapa średniorocznej prędkości wiatru na terenie Polski [10]

$$P = \frac{1}{2}\rho A V^3 \tag{1.3.1}$$

Moc niesiona przez wiatr opisana jest wzorem (1.3.1) moc zależna od gęstości powietrza (ρ), powierzchni (A) rozpatrywanego strumienia wiatru oraz sześcianu prędkości (V^3).

Na rysunku 1.10 czerwonym kolorem oznaczono rozkład roczny prędkości wiatru w stosunku do ilości godzin w jakich występował. Niebieskim kolorem przedstawiono, jaka moc zawarta była w tym czasie w wietrze. Analiza graficzna

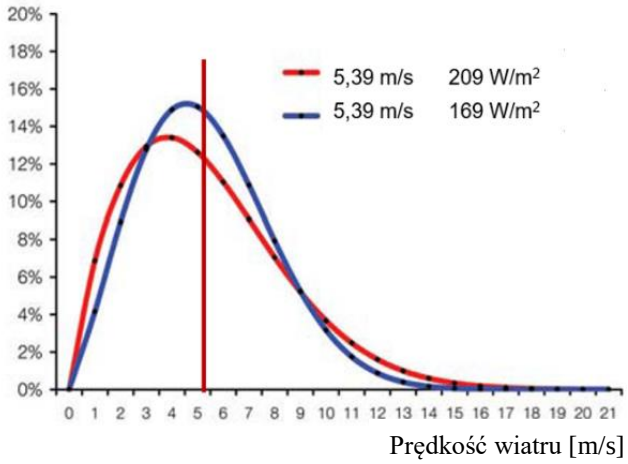
pozwala na oszacowanie, jak mało energii można uzyskać przy wietrze poniżej 3 m/s, mimo znacznej ilości godzin jego występowania. Ze względu jednak na czas występowania nie można założyć, że jest to wartość zaniedbywalna i zaniechać wytwarzania prądu elektrycznego w takich warunkach. Dodatkowo wiele turbin, zgodnie z zaleceniami producentów należy zatrzymać dla wiatrów o prędkości poniżej 20 m/s. Straty wynikające z powodu zatrzymania wiatraka przy silnym wietrze mogą być znaczące.



Rys. 1.10 Prędkość wiatru i niesiona w nim moc

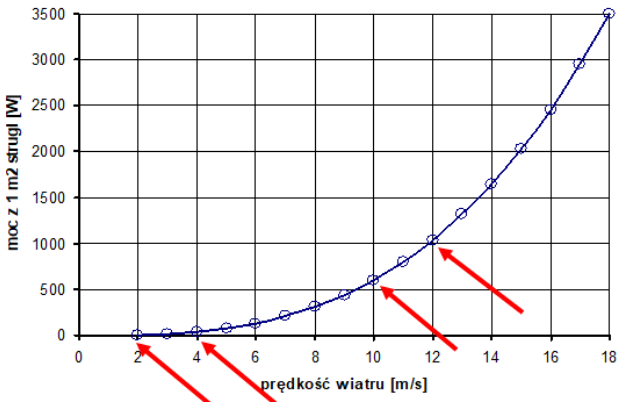
Istotnym aspektem w ocenie produktywności jest kształt charakterystyki prędkości wiatru. Na rysunku 1.11 przedstawiono dwie możliwe charakterystyki dla tej samej wartości całorocznej średniej prędkości wiatru wynoszącej 5,39 m/s. W tym przypadku średnioroczna wartość mocy jest już różna i tak dla niebieskiej krzywej ma wartość 169 W/m² a dla czerwonej 209 W/m². Jest to różnica na poziomie aż 24%.

Handlowy wyścig sprzedawców wiatraków przekonujących, że ich produkt generuje energię elektryczną przy bardzo małych prędkościach wiatru, np. już przy wietrze 1,5 m/s, należy traktować z rozwagą. Moc niesiona w jednym metrze kwadratowym strumienia wiatru przy 12 m/s wynosi 1080 W, a przy 2 m/s jest to zaledwie 5 W (Rys. 1.12). Wykonanie sterowania, które jest w stanie zagospodarować rozpiętość mocy od wartości rzędu 5W do ponad 1000W jest bardzo trudne i kosztowne.



Rys. 1.11 Rozkład procentowy godzin wietrznych dla średniej prędkości wiatru 5,39m/s

a) b)

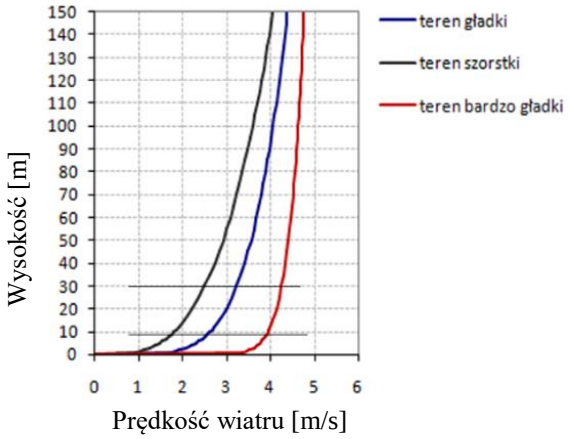


V [m/s]	P [W/m²]
2	5
4	38
10	625
12	1080

Rys. 1.12 Moc niesiona w wietrze w jednym metrze kwadratowym a) wykres mocy w funkcji prędkości wiatru b) wybrane wartości parametryczne

Przedstawiona mapa średniorocznej prędkości wiatru na terenie Polski (Rys. 1.9) pokazuje wartość na wysokości 10 metrów, w teranie o klasie szorstkości (0-1). Dla lepszego zrozumienia, jaki wpływ na prędkość wiatru w funkcji wysokości ponad gruntem ma czynnik szorstkości gruntu należy posłużyć się wykresem, rysunek 1.13. Z przedstawionych zależności wynika, dla przykładu, że gdy w terenie bardzo gładkim, na 10 metrach wysokości prędkość wiatru wynosi 4 m/s to w terenie szorstkim wynosi już zaledwie 1,5 m/s. Wraz ze wzrostem wysokości różnica ta maleje i na wysokości około 250m zanika.

Z przeprowadzonych badań własnych i doświadczeń innych badaczy wynika, że dla konstrukcji prosumenckich turbiny wiatrowe instalować należy na wysokości do około 30m, gdzie obserwuje się mniejszą dysproporcję w zależności od szorstkości terenu. Na wysokości tej relacja prędkości jest już w zakresie 4,2 m/s porównując do 2,5 m/s.



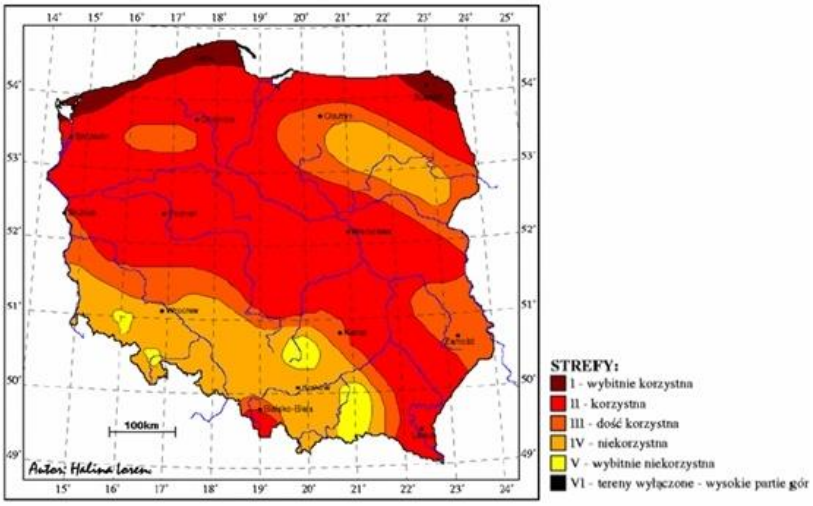
Rys. 1.13 Prędkość wiatru w zależności od szorstkości terenu

Klasy szorstkość terenu orientacyjnie przedstawiono w opisowej tabeli 1.3. Informację tę traktować należy tylko ogólnie, gdyż naturalnie pełen opis jest bardzo obszerny i szczegółowy.

Tabela 1.3 Klasy szorstkości terenu

Klasa szorstkości	Energia do wykorzystania [%]	Rodzaj terenu
0	100	Powierzchnia wody
0,5	73	Trawiasta łąka, betonowe lotnisko
1	52	Otwarte pola uprawne, lekko pofałdowany teren
1,5	45	Tereny uprawne z nielicznymi zabudowaniami oddalonymi od siebie o 1,2 km
2	39	Tereny uprawne z nielicznymi zabudowaniami oddalonymi od siebie o 0,5 km
2,5	31	Tereny uprawne z nielicznymi zabudowaniami oddalonymi od siebie o 0,25 km
3	24	Wioski, małe miasteczka, las, pofałdowany teren
3,5	18	Duże miasta z wysokimi budynkami
4	13	Bardzo duże miasta z wysokimi budynkami i drapaczami chmur [11]

Graficzne podsumowanie zebranych informacji przedstawiono na rysunku 1.14. Znaczącą różnicą jest to, że wskazuje ona średnioroczną energię niesioną w wietrze na wysokości 10 i 30 metrów nad poziomem gruntu. Widoczna jest duża różnica w stosunku do mapy średniorocznych prędkości wiatru (Rys. 1.9). Pewne podobieństwa wykazuje pas nadmorski, jednak rozkład w centralnej Polsce wydaje się być niepowiązany w sposób oczywisty. Rozdział na dwie wysokości pozwala uzmysłowić czytelnikowi, jak istotne jest wyniesienie turbiny nad poziom gruntu.



Nr i nazwa strefy	*Energia wiatru na wys. 10 m*	*Energia wiatru na wys. 30 m*
I - bardzo korzystna	> 1000	> 1500
II - korzystna	750 - 1000	1000 - 1500
III - dość korzystna	500 - 750	750 - 1000
IV - niekorzystna	250 - 500	500 - 750
V - bardzo niekorzystna	< 250	< 500
VI – szczytowe partie gór	tereny wyłączone	tereny wyłączone

Źródło: Lorenc H. 2001, IMGW

Rys. 1.14 Mapa energii niesionej w wietrze w ciągu roku na terenie Polski [10]

2. ANALIZA STANU WIEDZY I TECHNIKI

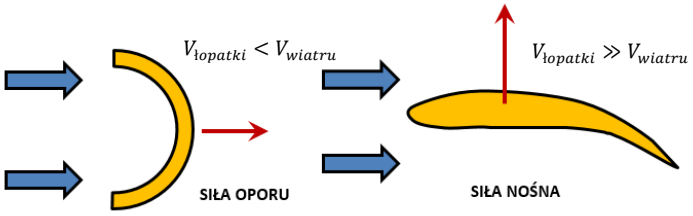
2.1. PODZIAŁ KONSTRUKCJI TURBIN

Wykorzystanie energetyki wiatrowej w zakresie prosumenckim spotyka się z wielkim zainteresowaniem, ponieważ budowa niewielkich prototypów jest w zakresie możliwości indywidualnego pomysłodawcy. Szczególne miejsce zajmują wiatraki przydomowe. Jak pokazują statystyki [26], dynamika rozwoju tego rynku jest znacznie większa niż wiatraków dużej mocy.

Ten fakt odróżnia zasadniczo małą energetykę wiatrową od dużych wiatraków, w których to w ostatnich dziesięcioleciach dopracowano się jednego powszechnie stosowanego rozwiązania [13]. Jest to wiatrak trójłopatowy o osi poziomej, który jest jedynie skalowany dla uzyskania odpowiedniej mocy. Dokonuje się jedynie nieznacznych zmian konstrukcyjnych w geometrii łopat [14,15] i prawie nie spotyka się już rozwiązań jedno- dwu- czy wielołopatowych [16].

Odmiennym torem podążają małe turbiny, których wymiar, koszty oraz zastosowanie wymuszają różnorodność podejścia przy ich konstruowaniu. Przykładem mogą być tu cztery mechanizmy z dużych elektrowni, trudne do aplikowania w mniejszych rozwiązaniach. Po pierwsze należy wspomnieć o systemie naprowadzania turbiny do kierunku wiatru [17]. Kolejnym jest ustawianie kąta łopat [18,19] tak, aby zoptymalizować ich pracę w zależności od prędkości wiatru i obrotów wirnika. Także hamulce [20,21] odpowiedzialne za zabezpieczenie turbiny przed zniszczeniem, nie dają się łatwo skalować. Ostatnim z mechanizmów jest przekładnia [22,23] umożliwiająca optymalną pracę generatora. Zapewnienie wysokiego stopnia niezawodności wspomnianych systemów zazwyczaj wymaga regularnego serwisu i związanych z nim kosztami. Zastosowanie wymienionych mechanizmów w małych turbinach wiatrowych może tak podnieść ich cenę, że czas zwrotu inwestycji będzie zbyt długi. W związku z powyższym w małych konstrukcjach konkurują ze sobą rozmaite turbiny o przeróżnej konstrukcji, z mniej lub bardziej skutecznymi rozwiązaniami.

Według powszechnej nomenklatury turbiny wiatrowe dzieli się na rozwiązania o osi poziomej, (HAWT) oraz pionowej, (VAWT). Podział taki jest zrozumiały ze strony konstrukcyjnej jednak zasadniejszym podziałem elektrowni wiatrowych jest rodzaj wykorzystywanych sił aerodynamicznych, a wiec podział na wiatraki wykorzystujące siły nośne albo siły oporu (Rys. 2.1)[24,25].



Rys. 2.1 Schemat ideowy mechaniki działania wirników wykorzystujących siłę oporu i siłę nośną

Główną przyczyną takiego rozróżnienia są cechy charakterystyczne wiatraków, co w konsekwencji ma wpływ na podstawowe założenia konstrukcyjne tych rozwiązań turbin wiatrowych.

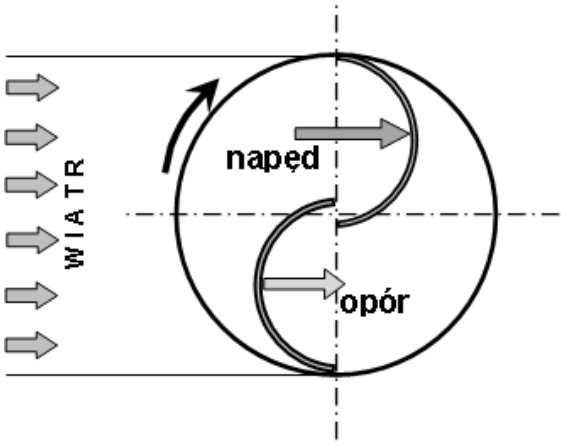
Wiatraki wykorzystujące siłę nośną (Rys. 2.2) cechuje wysoka prędkość przemieszczania się łopat. Ich końcówki poruszają się z prędkością wiele większą niż prędkość wiatru. Prędkości liniowe końcówki łopaty HAWT nie powinny przekraczać 100 m/s, aby ograniczyć generowany hałas. Ponieważ siła nośna na profilu zależy od kwadratu prędkości, dzięki czemu można zastosować stosunkowo małe powierzchnie łopat, więc są one bardzo smukłe. Wadą wirników wykorzystujących siłę nośną jest zjawisko rozbiegania wirnika, które może być przyczyną bardzo niebezpiecznych awarii. Stąd powstaje konieczność stosowania hamulców dla zatrzymania wirnika. Jest to niesłychanie trudne oraz kosztowne przy małych rozmiarach urządzeń.

a) b) c) d)

Rys. 2.2 Turbiny wykorzystujące siłę nośną HAWT (a), (b) oraz VAWT (c), (d) [64]

Wirniki Savoniusa oraz inne wirniki wykorzystujące siłę oporu mają tą charakterystyczną właściwość, że połowa wirnika spowalnia obrót (Rys. 2.3). Wiatrak wykorzystujący siłę oporu jest napędzany z jednej strony osi, tam gdzie łopata porusza się zgodnie z kierunkiem wiatru, a z drugiej daje opór, ponieważ łopata porusza się pod wiatr. Pozytywne działanie wirnika uzyskuje się wtedy, gdy opór elementu napędzającego jest większy od oporu elementu hamującego. Polepszenie efektu napędowego w typowym układzie wirnika Savoniusa zostaje uzyskane poprzez wprowadzenie szczeliny, przez którą następuje przedmuch zmniejszający opór elementu hamującego. Dzięki temu zwiększa się efektywna

moc wirnika. Ponieważ część strumienia wiatru działa negatywnie na generowaną moc to oczywistym jest, że musi być ona mniejsza niż w przypadku wirnika o osi poziomej, w którym cały strumień wiatru przyczynia się do napędu wirnika.



Rys. 2.3 Schemat ideowy wirnika Savoniusa

Należy podkreślić, że wielką zaletą wiatraka wykorzystującego siłę oporu jest bezpieczeństwo jego pracy, uzyskane dzięki temu, że taki wirnik nie może się rozbiegać, ponieważ elementy napędowe poruszają się wolniej od wiatru.

Konstrukcje wiatraków o osi pionowej typu Savoniusa [27] (Rys. 2.4) mają swoją ustaloną pozycję na rynku dzięki temu, że:

- „startują" przy małych wiatrach,
- posiadają duży moment rozruchowy,
- pracują stosunkowo cicho,
- nie rozbiegają się przy dużych wiatrach,
- są bezpieczne dla otoczenia ze względu na niskie obroty.

Zastosowanie tego typu wirnika skłania do przemyśleń w kierunku zwiększenia jego efektywności aerodynamicznej. Pod tym kątem opracowywane były różne koncepcje konfiguracji łopat [28].

Rys. 2.4 Turbiny wykorzystujące siłę oporu-różne modyfikacje [64]

Istotną cechą wiatraków o osi pionowej jest niezależność ich pracy od kierunku wiatru. Odpada więc konieczność instalowania systemów śledzących kierunek wiatru.

Istnieją rozwiązania będące połączeniem obu typów turbin i wykorzystujące siłę nośną i siłę oporu (Rys. 2.5). Konstrukcyjnym wyzwaniem jest zintegrowanie obu wirników, aby nie zakłócały swojej pracy, jednocześnie korelując wzajemnie ich obroty oraz dopasowanie ich charakterystyki do generatora.

Rys. 2.5 Typ turbiny-pionowe hybrydowe

2.2. BEZPIECZEŃSTWO UŻYTKOWANIA WIATRAKÓW

Na podstawie założeń dotyczących turbin wiatrowych w wersji prosumenckiej można określić warunki bezpieczeństwa użytkowania wiatraków.

Przede wszystkim, dla małych elektrowni wiatrowych najbardziej prawdopodobnym umiejscowieniem będzie bezpośrednie sąsiedztwo zabudowań mieszkalnych czy gospodarczych. Dla zastosowań przydomowych ważne jest bezpieczeństwo [29,30] co przemawia za wiatrakami o osi pionowej, wykorzystującymi siły oporu, dla przykładu wiatrak typu Savoniusa. Typowe wiatraki wykorzystujące siłę nośną (o osi poziomej jak i pionowej) przy silnych wiatrach rozbiegają się [31] osiągając bardzo duże obroty, powodując niebezpieczeństwo rozerwania wirnika. Jest to jedna z częstszych przyczyn katastrof wiatrakowych. Konieczne staje się zatem zastosowanie systemów hamowania wirnika, pozwalających na ich zatrzymanie przy silnych wiatrach. Prowadzi to do sytuacji bardzo niepożądanej, w której wiatrak przy silnym wietrze nie może produkować energii elektrycznej.

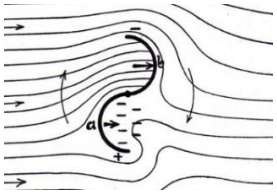
Cechy konstrukcyjne wirnika Savoniusa dają istotną przewagę, ponieważ jest on samohamowny, zatem system hamulcowy nie jest potrzebny. Zniszczenie dużej elektrowni [32,33] lądowej czy offshore zasadniczo stanowi jedynie stratę finansową ponieważ ich lokalizacja znajduje się zazwyczaj w dużej odległości od terenów zabudowanych. Tymczasem awaria wiatraków prosumenckich niesie ze sobą ryzyko uszczerbku na zdrowiu ludzi i zwierząt.

Konsekwencje destrukcji całej konstrukcji pokazano na rysunku 2.6.

Rys. 2.6 Uszkodzone turbiny wiatrowe [65]

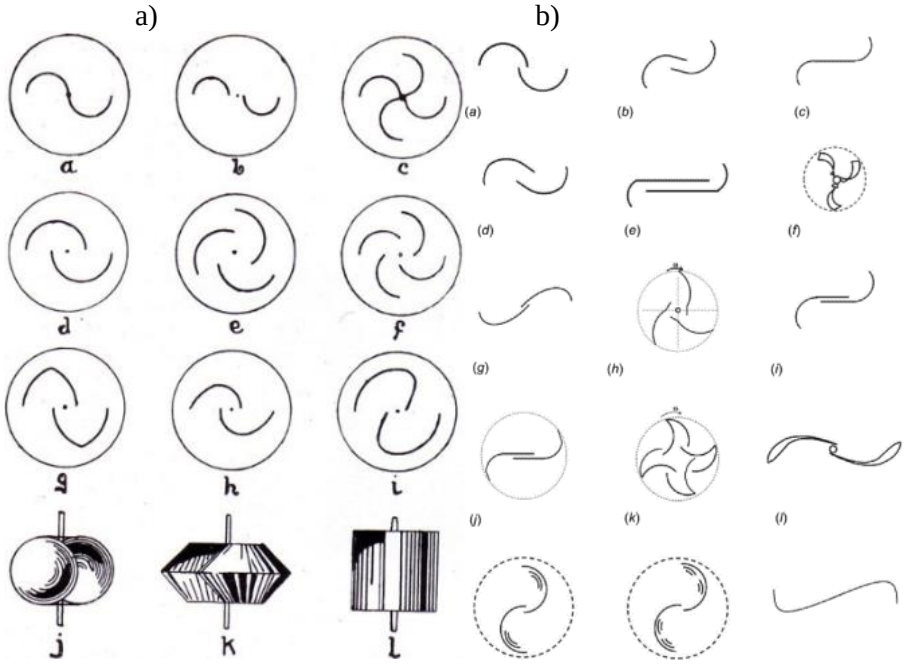
2.3. KONSTRUKCJA SAVONIUSA - MODYFIKACJE

Sigurd Johannes Savonius to inżynier i wynalazca pochodzenia fińskiego, urodzony 2 listopada 1884 roku. Turbina jego koncepcji według idei przedstawionej na rysunku 2.7 powstała około 1921 roku i opatentowana została w 1926 roku. Był on niezmiernie twórczy i w swoim krótkim 46 letnim życiu stworzył wiele urządzeń. Zmarł w wyniku powikłań, po przeziębieniu nabytym w trakcie badań w stworzonym przez siebie, pierwszym fińskim tunelu aerodynamicznym. Inspiracją przy tworzeniu wirnika był dla niego wirnik Flettnera wykorzystujący efekt Magnusa.



Rys. 2.7 Schemat ideowy opływu strug powietrza w wirniku Savoniusa [36]

Twórca turbiny w latach 1924-1926 przebadał ponad 40 różnych typów turbiny. Jego pomysły rozwijane są na całym świecie, aż do dzisiejszych czasów [34,35]. Na rysunku 2.8, przedstawiono koncepcje twórcy umieszczone w pracy [36] oraz współcześnie badane [37,38,39,40,41,42].

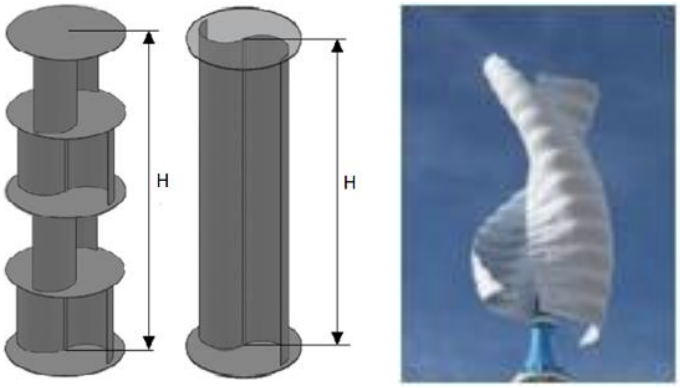


Rys. 2.8 Schematy modyfikacji wirników: a) Savoniusa [36] oraz b) współczesne rozwiązania [34]

Poza standardowym wirnikiem Savoniusa najbardziej szczegółowo przebadany jest wirnik Bacha pokazany na rysunku 2.8 b) pozycja d). Łopata składa się z części prostej w centrum wirnika oraz z części zakrzywionej w swojej zewnętrznej części. Możliwe są różne modyfikacje geometryczne obejmujące różne proporcje pomiędzy częścią prostą a promieniową. Konfiguracja ta była między innymi badana przez Kamojiego [43]. Autorzy tej pracy uzyskali efektywność na poziomie 21%, podczas gdy dla typowego Savoniusa uzyskali 19%. Tak, więc zysk był nieznaczny.

Zmiany konstrukcyjne oraz pomysły racjonalizatorskie dotyczą nie tylko przekrojów wirnika, ale także jego geometrii wzdłużnej (po wysokości). Koncepcje takie związane są nie tylko z próbami podwyższenia sprawności konstrukcji lecz także obniżeniem kosztów wytwarzania czy też redukcją drgań przenoszących się na konstrukcję wsporczą. Wraz z rozwojem technologii oraz materiałoznawstwa bez wątpienia będą się pojawiać kolejne propozycje koncepcyjne.

a) b)



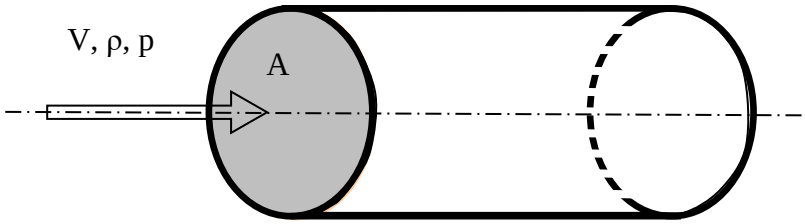
Rys. 2.9 Wirniki Savoniusa: a) jedno i cztero modułowy oraz b) wersja spiralna [64]

Przeciwdziałanie oscylacjom momentu obrotowego prowadzi do zastosowania wirników wielomodułowych albo w wersji spiralnych (Rys. 2.9). Z analizy literaturowej przedmiotu wynika, że oscylacje momentu obrotowego mogą zostać zmniejszone poprzez zastosowanie multiplikacji łopat. Szerokie badania tego aspektu wirników były prowadzone między innymi przez Vance'a [44], Blackwella [45] oraz Sahy [46]. W tych pracach wykazano, że dodanie kolejnych łopat zmniejsza średnią moc uzyskiwaną z wirnika. Powstaje efekt „kaskadowy", w którym każda łopata ma wpływ na osiągi kolejnej. Stąd wynika, że jednomodułowy wirnik Savonisa będzie posiadać najwyższy współczynnik mocy a fluktuacje momentu na wale będą największe.

Zastosowanie łopat spiralnych ma podobny efekt jak multiplikowanie łopat prostych [43,47,48]. Wahania momentu obrotowego są zmniejszane, ale powoduje, że efektywność pracy wirnika jest nieco mniejsza.

2.4. PRAWO I LIMIT BETZA

Do zrozumienia złożoności zjawiska pobierania energii z wiatru i ograniczeń tam występujących należy przeanalizować prawo Betza i wynikający z niego maksymalny limit odzyskanej mocy, zwany limitem Betza.



Rys. 2.10 Masowy wydatek powietrza przechodzący przez powierzchnię A

Masowy wydatek przez powierzchnię A wyznacza zależność:

$$\dot{m} = AV\rho \; [kg/s] \tag{2.4.1}$$

Równanie Bernouliego [49] ma postać:

$$p_s + \frac{\rho V^2}{2} = p_0 \tag{2.4.2}$$

$$p_{dyn} = \frac{\rho V^2}{2} \tag{2.4.3}$$

$$p_s + p_{dyn} = p_0 \tag{2.4.4}$$

Mając ciśnienie dynamiczne łatwo wyliczyć siłę, jaką należy wywrzeć na płyn, aby go zatrzymać:

$$F = p_{dyn}\, A \tag{2.4.5}$$

$$F = A\, \frac{\rho V^2}{2} \tag{2.4.6}$$

Moc, którą można uzyskać z zatrzymanego strumienia wyznacza się następująco:

$$P = \frac{F\, x}{t} = F\, V \; \left[N\frac{m}{s} = W\right] \tag{2.4.7}$$

Co daje:

$$P = \frac{E_k}{t} = \frac{\frac{1}{2}mV^2}{t} = \frac{1}{2}\dot{m}V^2 = \frac{1}{2}A\rho V^3 \tag{2.4.8}$$

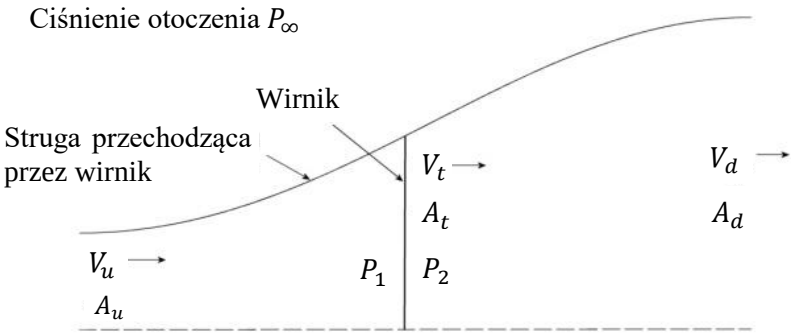
$$p = \Delta \mathrm{p} AV \tag{2.4.9}$$

Limit Betz'a

Wykorzystując strumień powietrza o prędkości U_u (Rys. 2.11) do produkcji energii to przeprowadzono poniższą analizę[50].

W opisie przyjęto następujące oznaczenia i zależności:

- A_u, powierzchnia strugi dostarczająca energię na wlocie,
- A_d, powierzchnia strugi odprowadzająca energię na wylocie,
- A_t, powierzchnia strugi na turbinie,
- V_u, prędkość na wlocie,
- V_t, prędkość na turbinie,
- $V_d > 0$, prędkość na wylocie,
- P_1, ciśnienie przed turbiną,
- P_2, ciśnienie za turbiną,
- $A_u < A_d$, ponieważ odbiór mocy przez wiatrak powoduje wyhamowanie to z prawa zachowania masy strumień powietrza zwiększa swój przekrój,
- $P_1 > P_2$, na wirniku turbiny następuje spadek ciśnienia,
- P_∞, ciśnienie otoczenia.



Rys. 2.11 Schemat przepływu strugi powietrza przez turbinę [63]

Ponieważ:

$$p = \Delta p A V \tag{2.4.11}$$

gdzie:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \tag{2.4.12}$$

Zachowując masę przy stałej gęstości (ρ):

$$A_u V_u = A_d V_d = A_t V_t \tag{2.4.13}$$

Z prawa zachowania pędu wiadomo, że siła działająca na wirnik jest równa zmianie pędu strumienia powietrza, zatem:

$$(p_1 - p_2)A_t = \dot{m}\Delta V \tag{2.4.14}$$
$$(p_1 - p_2)A_t = \rho A_t V_t (V_u - V_d) \tag{2.4.15}$$
$$(p_1 - p_2) = \rho V_t (V_u - V_d) \tag{2.4.16}$$

Korzystając z równania Bernouliego otrzymano:

$$Przed:\ p_0 + \frac{\rho V_u^2}{2} = p_1 + \frac{\rho V_t^2}{2} \qquad za:\ p_0 + \frac{\rho V_d^2}{2} = p_2 + \frac{\rho V_t^2}{2}$$
$$Przed:\ p_1 = p_0 + \frac{\rho V_u^2}{2} - \frac{\rho V_t^2}{2} \qquad za:\ p_2 = p_0 + \frac{\rho V_d^2}{2} - \frac{\rho V_t^2}{2}$$
$$p_1 - p_2 = p_0 + \frac{\rho V_u^2}{2} - \frac{\rho V_t^2}{2} - p_0 - \frac{\rho V_d^2}{2} + \frac{\rho V_t^2}{2} = \frac{1}{2}\rho(V_u^2 - V_d^2) \tag{2.4.17}$$

Z powyższego po przeliczeniach otrzymujemy:

$$\frac{1}{2}\rho\left(V_u^2 - V_d^2\right) = \rho V_t (V_u - V_d) \tag{2.4.18}$$
$$\frac{1}{2}\rho(V_u + V_d)(V_u - V_d) = \rho V_t (V_u - V_d) \tag{2.4.19}$$
$$V_t = \frac{1}{2}(V_u + V_d) \tag{2.4.20}$$

Prędkość na wirniku turbiny jest równa średniej arytmetycznej prędkości wlotowej i wylotowej.

Sprawność pozyskania mocy jest stosunkiem uzyskanej energii do całkowitej energii zawartej w strumieniu wiatru, zatem:

$$\eta = \frac{P}{P_{total}} \tag{2.4.21}$$

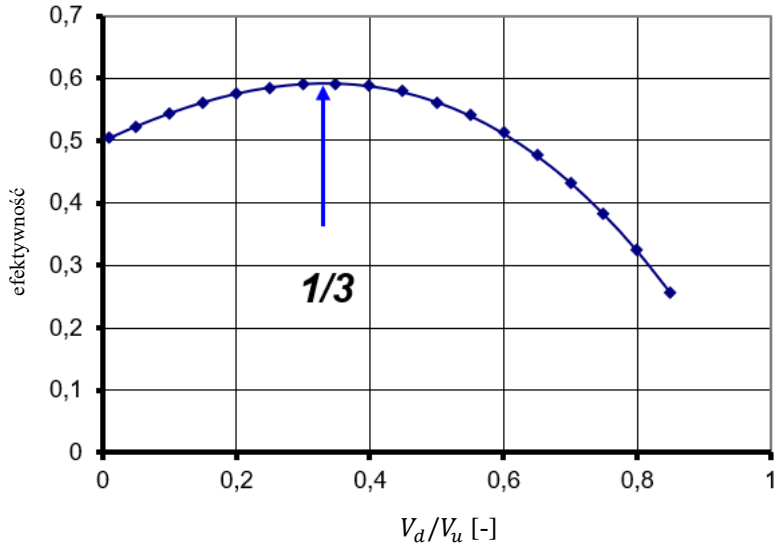
$$P_{total} = \frac{1}{2}A_t \rho V_u^3 \qquad P = (p_1 - p_2)A_t V_t \tag{2.4.22}$$

$$\eta = \frac{P(p_1 - p_2)A_t V_t}{\frac{1}{2}A_t \rho V_u^3} = \frac{\frac{1}{2}\rho\left(V_u^2 - V_d^2\right)A_t V_t}{\frac{1}{2}A_t \rho V_u^3} = \frac{V_u - V_d}{V_u}\frac{V_u + V_d}{V_u}\frac{1}{2}\frac{V_u + V_d}{V_u} \tag{2.4.23}$$

Efektywność pracy turbiny wyznaczono z zależności:

$$\eta = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{V_d}{V_u}\right)\left(1 + \frac{V_d}{V_u}\right)^2 \tag{2.4.24}$$

W ujęciu graficznym efektywność w funkcji V_d/V_u (stosunek prędkości wlotowej do wylotowej) przedstawiono na rysunku 2.12.



Rys. 2.12 Charakterystyka efektywności turbiny w funkcji stosunku prędkości wlotowej do wylotowej

Jak widać na rysunku 2.12, krzywa efektywności turbiny posiada maksimum, które odpowiada przepływowi w punkcie najwyższej efektywności. Ten fakt wskazuje, na maksymalną efektywność, którą można uzyskać przy konwersji energii wiatru.

Konkluzją z tych wyliczeń jest tzw. limit Betza [51], mówiący, że doskonały wirnik może uzyskać maksymalnie 59,3% mocy niesionej przez wiatr. Jednocześnie doprowadzi to do obniżenia prędkości wiatru do 33%, przy trzykrotnym zwiększeniu przekroju w stosunku do strugi wlotowej.

3. CEL I PROBLEM BADAWCZY PRACY

Z przeprowadzonej analizy stanu wiedzy i techniki wynika, że współczesny światowy rynek małych turbin wiatrowych stale się rozwija [5]. Zatem założyć można, że pojawienie się nowych skutecznych rozwiązań konstrukcyjnych powinno zostać przyjęte pozytywnie. Należy zatem poszukiwać rozwiązań, które zdominują rynek małej energetyki wiatrowej. W celu zwiększenia ilości użytkowników małych turbin wiatrowych należy stworzyć produkt nie tylko usprawniający obecne rozwiązania, lecz także wypełniający niszę widoczną na rynku. Dwa główne pola do rozwoju elektrowni wiatrowych, to obszary niskich średniorocznych prędkości wiatru, jak i bardzo wysokich chwilowych prędkości, przy których obecnie stosowane turbiny muszą być zatrzymywane.

Nowe rozwiązanie należy zweryfikować nie tylko w sferze teorii, ale również eksperymentalnie w warunkach rzeczywistych. Kluczowym elementem jest opracowanie metod wytwarzania nowych konstrukcji, które mają bezpośrednie przełożenie na finalne koszty wiatraków. Minimalizacja kosztów inwestycyjnych jest podstawą dla skutecznego wdrożenia małej energetyki wiatrowej.

3.1. CEL PRACY

Zastosowania prosumenckie, lokalizujące instalacje wiatraków w pobliżu zabudowań, wymuszają priorytet, którym jest bezpieczeństwo konstrukcji. To wymaganie wskazuje na wiatraki oporowe, które eliminują niebezpieczeństwo rozerwania wirnika przy bardzo silnych wiatrach. Podstawowym mankamentem takich wiatraków jest konieczność stworzenia wytrzymałej, co za tym idzie funkcjonalnej konstrukcji, ponieważ ich powierzchnia robocza powinna przesłaniać pełną powierzchnię strumienia wiatru.

Istotnym elementem zawartym w celach rozwojowych innowacyjnego wiatraka jest doskonalenie wirników jako elementów decydujących o efektywności wiatraka. Modernizacja wirników i redukcja ich ciężaru musi uwzględniać wpływ zmian na efektywność ich pracy.

Zaplecze badawcze pozwalające na osiągniecie tych celów obejmuje stanowisko do badania wirników, pozwalające na wyznaczenie charakterystyk samych wirników. Z drugiej strony analizowany prototyp wiatraka, eksploatowany na budynk IMP PAN, pozwala na weryfikację użytkową w warunkach rzeczywistych.

Podstawowy cel pracy postanowiono osiągnąć poprzez studium wiedzy literaturowej i technologii przemysłowych, także poprzez przeprowadzenie innowacyjnych badań eksperymentalnych prototypowej konstrukcji, według nowej idei wiatraka (patenty UP RP: PL B1 219489 oraz PL B1 219927).

Przedstawione w rozprawie wyniki badań oparte są na wieloletniej eksploatacji trzech prototypów innowacyjnego wiatraka oraz na wszechstronnej

analizie wykorzystanych konstrukcji, zaprojektowanych i udoskonalanych przez autora. Zaproponowane w pracy nowe modyfikacje innowacyjnego wiatraka zostały przebadane a wyniki analizy zostały zawarte w dalszej części rozprawy.

Głównym celem pracy jest uzyskanie odpowiedzi na pytanie: jak konstrukcyjne cechy geometryczne i nowe parametry robocze wpływają na charakterystyki użytkowe innowacyjnego zespołu procesowo-napędowego, w szczególności na uzyskiwane momenty obrotowe, prędkości kątowe, uzyskiwane moce i efektywność procesowa?

W świetle sformułowanych zagadnień za szczegółowe cele naukowo-badawcze pracy doktorskiej przyjęto opracowanie:

- cech konstrukcyjnych,
- wytycznych geometrycznych,
- parametrów pracy,

głównych elementów konstrukcyjnych wiatraka dla potrzeb pro-wdrożeniowego projektowania, konstruowania zespołów roboczych innowacyjnego zespołu procesowo-napędowego.

Ważnym komponentem celów pracy jest eksperymentalne wyznaczenie wpływu kształtu geometrycznego i wymiarów głównych elementów roboczych wirnika (zespołu wirników), na efektywność przetwarzania energii wiatru wyrażonych poprzez generowaną moc, momenty obrotowe, prędkości kątowe i ich wzajemne relacje

3.2. PROBLEM BADAWCZY

Pomiędzy koncepcją ogólną a rozwiązaniem funkcjonalnym pojawia się wiele problemów natury technicznej i naukowej. Przy przyjętym priorytecie, jakim jest bezpieczeństwo użytkowe, niezbędne jest doskonalenie rozwiązania pod kątem wdrożeniowo-komercjalizacyjnym. Zwracać trzeba uwagę zarówno na same wirniki, całość turbiny oraz posadowienie. Wszystkie te aspekty należy skonfrontować z funkcjonalnością procesową produktu dla uzyskania konkurencyjności rynkowej. Założeń tych nie da się wypełnić nie rozwiązując wielu problemów metodami naukowymi, poprzez obliczenia i symulacje, także przy pomocy metod eksperymentalnych.

Podstawowymi kryteriami dla doskonalenia analizowanej w rozprawie konstrukcji jest poprawa efektywności energetycznej wiatraka przy jednoczesnym minimalizowaniu materiałochłonności konstrukcji nowego rozwiązania. Istotny potencjał leży w badaniach literaturowych, które pozwalają na wyznaczenie drogi postępowania w doskonaleniu innowacyjnego rozwiązania.

Poza czysto analitycznym podejściem do wyboru elementów konstrukcyjnych, spełniających kryteria optymalizacji, koniecznym jest zwrócenie uwagi na elementy decydujące o efektywności wiatraka, czyli

doskonalenie wirników również w kierunku eliminacji przekładni stosowanej w tego typu konstrukcjach.

Bezpośredni napęd generatorów przez wirniki wymaga specjalnego doboru generatorów. Wymusza to wykonanie badań na specjalistycznym stanowisku do badań charakterystyk generatorów.

Badania rozwojowe wirników zostały wykonane na specjalnym prototypowym stanowisku badawczym znajdującym się w laboratoriach IMP PAN w Gdańsku.

Na obecnym etapie rozwoju innowacyjnej turbiny, niezbędne są koncepcyjno-projektowe i badawcze działania twórcze, skierowane na budowę i eksploatację nowego zespołu procesowo-napędowego, które przez sformułowane problemy pozwolą osiągnąć cele określone w rozdziale 3.1 rozprawy doktorskiej. Dla zrealizowania przyjętych celów rozprawy doktorskiej sformułowano problemy badawcze pracy:

1) Czy uwzględniając zmienne nowej konstrukcji możliwe jest opracowanie zintegrowanej metodologii dla potrzeb efektywnego, użytecznego pro wdrożeniowego projektowania, zespołów roboczych innowacyjnego zespołu procesowo-napędowego?
2) Jaki wpływ na charakterystyki użytkowe (moce, momenty obrotowe, prędkości kątowe i ich wzajemne relacje oraz sprawność) innowacyjnego zespołu procesowo-napędowego wiatraka wywierają:
   - geometryczne cechy konstrukcyjne wirnika/wirników roboczych?
   - relacje elementów konstrukcyjnych i parametrów ruchu tych zespołów?
   - zmienne prędkości wiatru, konstrukcyjne rozwiązania mechanizmu samonaprowadzania zespołu wiatraka do kierunku wiatru?

4. METODYKA BADAŃ

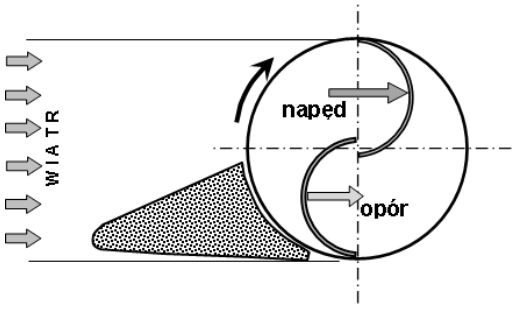
4.1. KONCEPCJA TURBINY

4.1.1. Dwa rozwiązania podjęte w pracy

Zapotrzebowanie na turbiny przydomowe powinno doprowadzić do powstania rozwiązania przede wszystkim bezpiecznego użytkowo, trwałego i o prostej konstrukcji. Znane i uznane powszechnie rozwiązanie turbiny Savoniusa spełnia te wymagania. Wykorzystanie sił oporu w pracy wirnika poprawia bezpieczeństwo użytkowania, nie pozwalając na rozbieganie się wirników do destruktywnych prędkości. Wszędzie tam gdzie podstawowym priorytetem nie jest sprawności lecz niezawodność i bezpieczeństwo, zaleca się tego typu rozwiązanie. Ponieważ wiatrak wykorzystujący opór aerodynamiczny przesłania większą część strugi powietrza, zatem jego główną wadą stosunkowo duże wymiary i ciężar konstrukcji, która musi wytrzymać również napór huraganowych wiatrów.

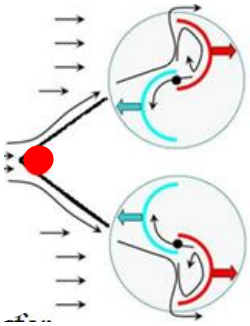
Powstaje zatem pytanie jak zmniejszyć masę konstrukcji przy zachowaniu lub nawet zwiększeniu efektywności pracy wiatraka?

Koncepcję usprawnienia przedstawia rysunek 4.1. W rozwiązaniu takim sprawność zostaje podniesiona poprzez dwa zjawiska. Pierwszym jest zmniejszenie oporu na powrotnej łopacie, którą odciążamy od naporu strugi napływającego powietrza. Drugim natomiast jest skierowanie części strugi z obszaru powrotnego na obszar roboczy turbiny, czym zapewnia się lepsze jej wykorzystanie podczas pracy wirnika.



Rys. 4.1 Schemat ideowy przysłony łopatki powrotnej wirnika Savoniusa

Konsekwencją zastosowania tak zwanej owiewki jest utrata niezależności układu od kierunku wiatru. Wymagany jest tu system ustawiania wiatraka do kierunku przepływu strugi roboczej. Zamierzony efekt uzyskać można poprzez zbudowanie systemu symetrycznego, dzięki czemu struga wiatru samoczynnie pozycjonować będzie ustawienie wiatraka (Rys. 4.2)

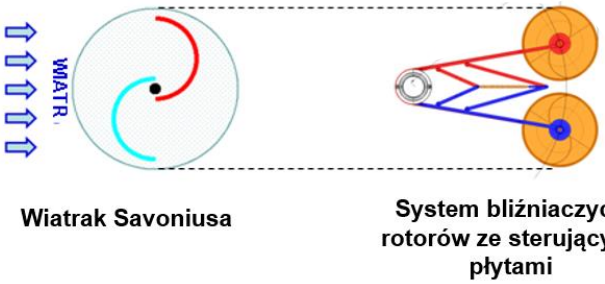


Rys. 4.2 Układ wirników symetryczny z kierownicą

Dzięki rozwiązaniu przedstawionemu na rysunku 4.2 pojawiają się przynajmniej trzy niezmiernie istotne właściwości:

- tandem wirników, jak na rysunku 4.3, posiada taką samą powierzchnię jak jeden duży rotor przy znacznym zmniejszeniu średnicy wirników a w konsekwencji i masy konstrukcji,
- mniejsze wirniki łatwiej jest zbudować i wyważyć.
- dzięki zmniejszeniu średnicy wirnika uzyskuje się większe obroty, przy tej samej wartości współczynnika (λ) Tip Speed Ratio (TSR).

Ta właściwość przekłada się to na korzystniejsze warunki pracy generatorów oraz zmniejszenie ich masy.



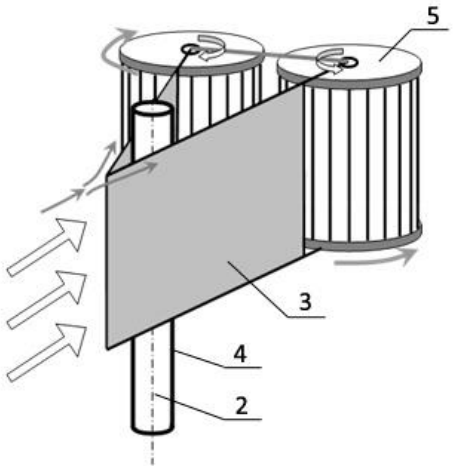
Rys. 4.3 Wirnik Savoniusa oraz tandem wirników – relacje gabarytowe

W ramach rozwoju koncepcji kierownic zapropowane zostało rozwiązanie z większym kątem między kierownicami, niż pokazano na rysunku 4.3, tak aby dalej zmniejszyć średnicę wirników w stosunku do pola powierzchni wykorzystanej strugi wiatru rysunek 4.4.

Rys. 4.4 Wirnik Savoniusa oraz tandem wirników w szerokim kącie rozstawienia

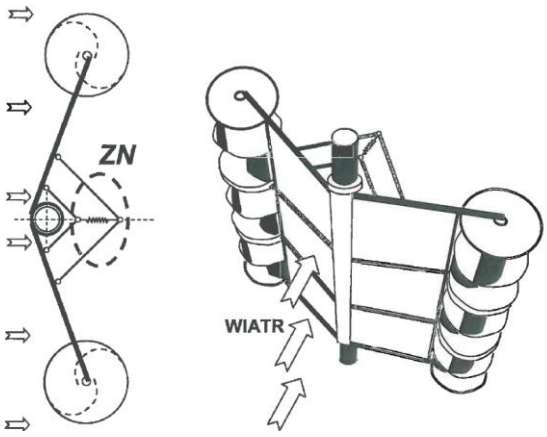
W ramach rozwinięcia powyższych koncepcji powstały dwa opatentowane rozwiązania konstrukcyjne turbin w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN.

Pierwszy patent uzyskany przez IMP PAN [8] dotyczy turbin o stałym kącie rozwarcia kierownic, niezależnym od siły wiatru (Rys. 4.5).



Rys. 4.5 Schemat ideowy turbiny z wniosku patentowego ze stałym kątem natarcia [8]

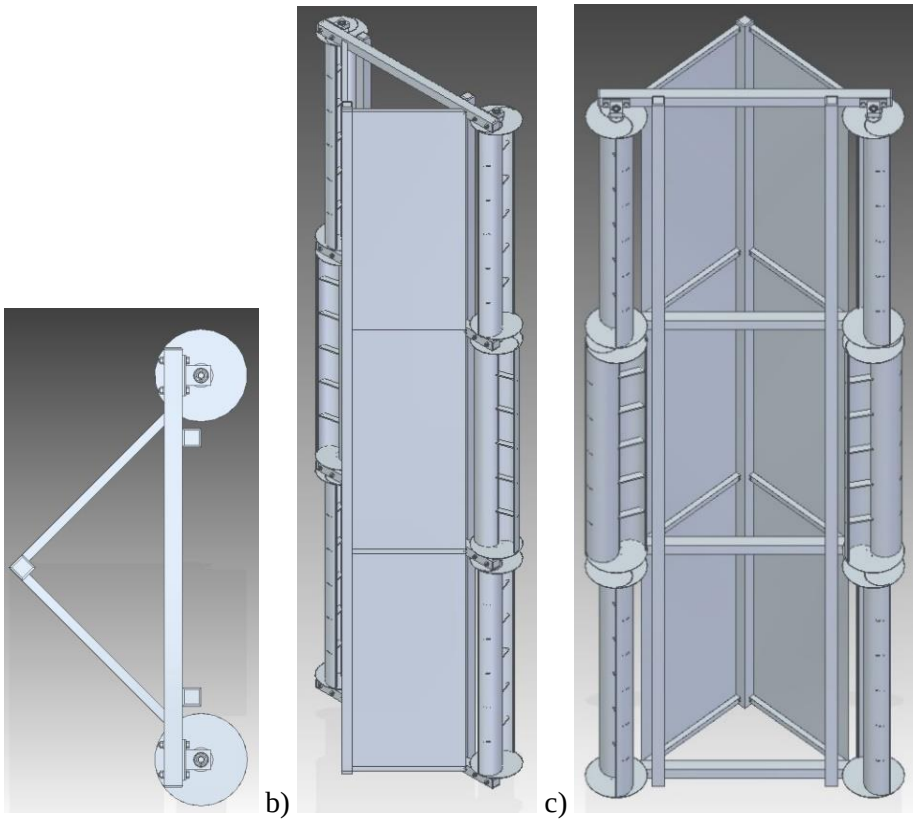
Kolejne rozwiązanie uwzględnia zmianę kąta rozwarcia kierownic w zależności od siły wiatru napierającego na turbinę (Rys. 4.6). Należy nadmienić, żegłoszenie patentowe powstało w IMP PAN, a patent został uzyskany we współpracy z firmą WINENERG.



Rys. 4.6 Schemat ideowy z wniosku patentowego ze zmiennym kątem natarcia [9]

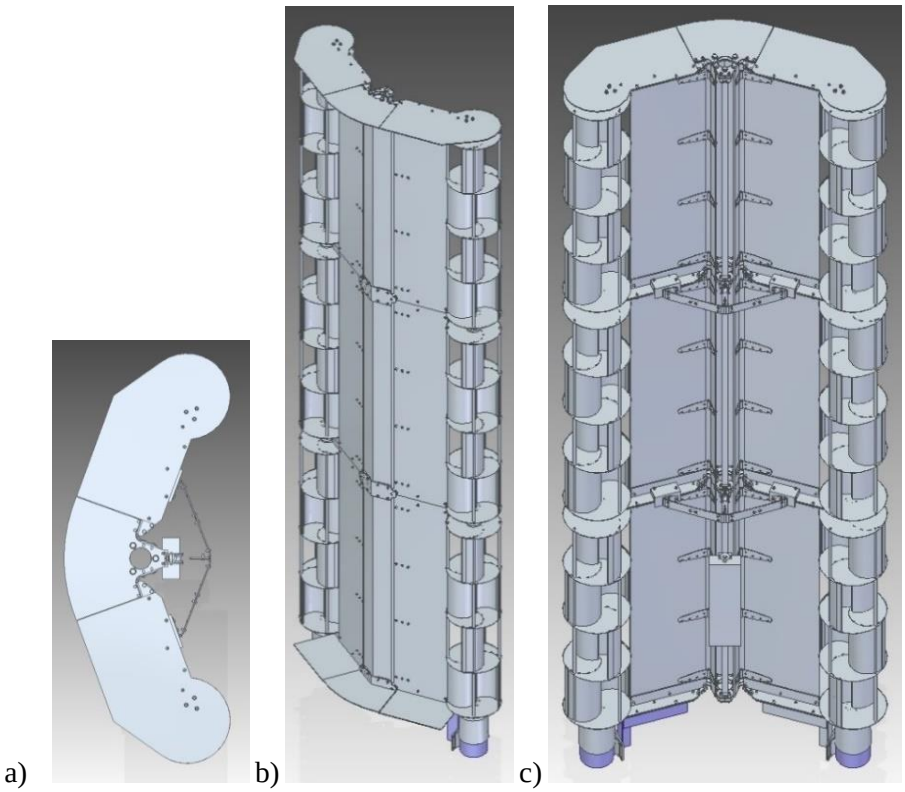
W obu rozwiązaniach konieczne jest sprawdzenie ich funkcjonalności w dwóch aspektach, czyli działania w odniesieniu do samodzielnego wirnika Savoniusa oraz zdolności do śledzenia kierunku wiatru. Mocowanie generatorów do osi wirnika bez zastosowania przekładni upraszcza rozwiązanie i zmniejsza jego koszt, a przede wszystkim likwiduje straty wynikające z przekładni. Wyższe obroty małych wirników w innowacyjnym rozwiązaniu korzystne, są ponieważ w konsekwencji oznaczają mniejszy i lżejszy generator.

Rozwiązanie o stałym kącie rozwarcia (Rys. 4.7) cechuje się prostą konstrukcją kratownicową w kształcie trójkąta. Rozwiązanie takie cechuje się względnie dużą sztywnością przy zminimalizowanej masie. Dodatkowo, zaletą jest prosty montaż, demontaż i transport turbiny.



Rys. 4.7 Model 3D konstrukcji turbiny ze stałym kątem rozwarcia kierownic, a) widok z góry, b) aksonometria widok z boku c) aksonometria widok górny

Rozwiązanie umożliwiające zmianę kąta rozwarcia kierownic podczas pracy (Rys. 4.8) jest złożone technicznie. Wymusza to zastosowanie mechanizmu składania. Koniecznym staje się zastosowanie mechanizmów obrotu w pobliżu wierzchołka kierownicy. Taka konstrukcja zmniejsza sztywność wiatraka.

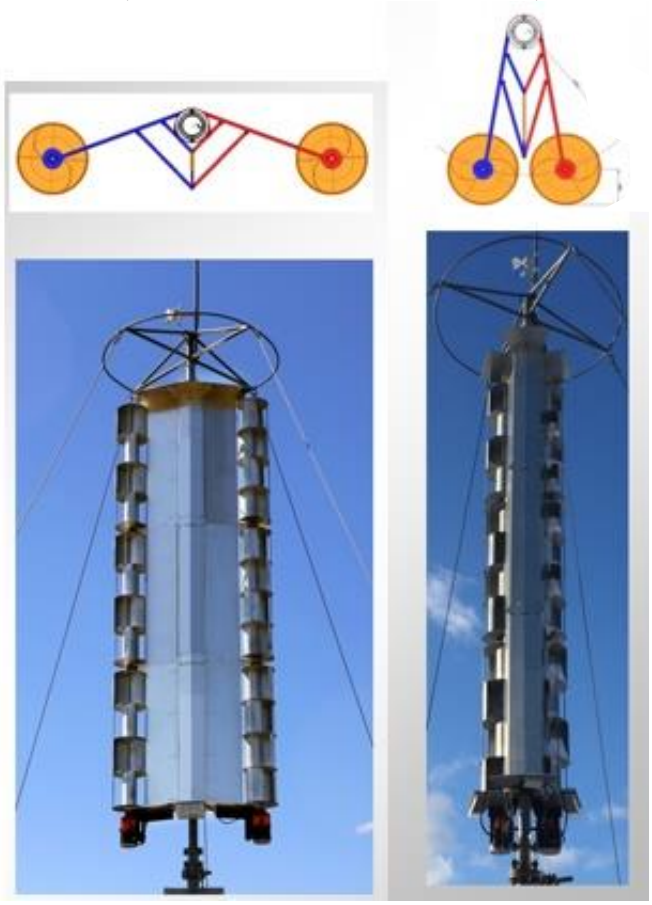


Rys. 4.8 Model 3D konstrukcji turbiny o zmiennym kącie rozwarcia kierownic, a) widok z góry, b) aksonometria widok z boku c) aksonometria widok górny

Turbina podczas pracy przy małych wiatrach pracuje z tak zwanym pełnym otwarciem kierownic. Przy zwiększeniu się prędkości wiatru do około 12 m/s zaczyna się proces zamykania kierownic i trwa aż do pełnego zamknięcia przy wartości około 16 m/s (Rys.4.9). Zmiana ta wpływa na zmniejszenie powierzchni rzutu wiatraka na kierunek wiatru, o ponad 50%. Powoduje to zmniejszenie generowanej mocy a jak zostanie pokazane w dalszej części pracy, efektywność wiatraka pozostaje na podobnym poziomie, niezależnie od kąta otwarcia kierownic.

Pełne zamknięcie kierownic zabezpiecza turbinę, ponieważ zmniejsza siły aerodynamiczne a w konsekwencji, przez złączenie się odbijaczy krańcowych, konstrukcja dodatkowo się usztywnia.

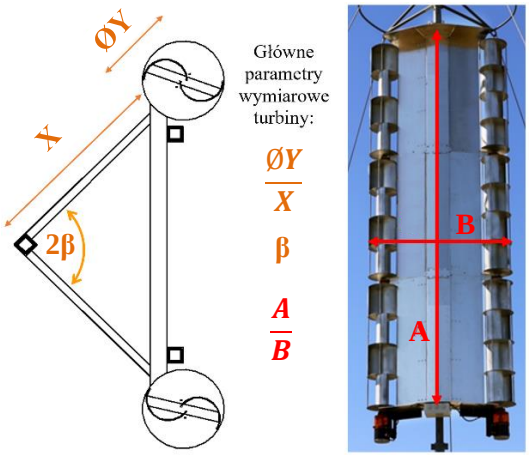
a) b)



Rys. 4.9 Widok ogólny turbiny 800W oraz schematy funkcjonalne podczas pracy
a) otwarta i b) zamknięta

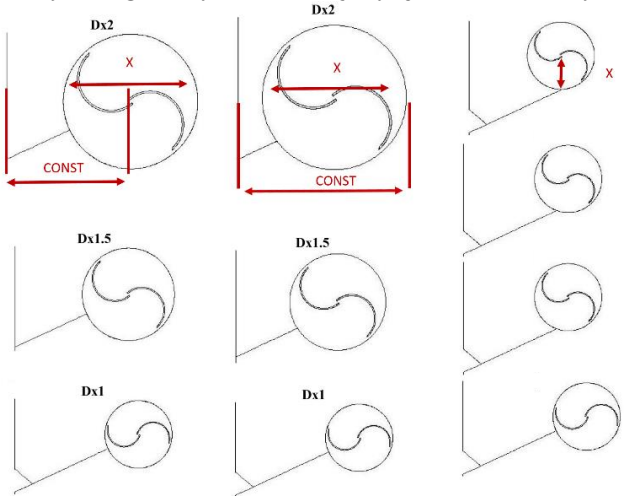
4.1.2. Wyznaczenie proporcji turbiny

W kolejnym kroku, po opracowaniu koncepcji turbiny, jest określenie jej głównych parametrów wymiarowe. Wymienić tu można trzy podstawowe zależności: pierwszą jest stosunek średnicy wirnika ΦY do długości kierownicy X (Rys. 4.10), a kolejnym jest kąt między kierownicami 2xβ. Trzecią charakterystyczną relacją jest proporcja wysokości do szerokości turbiny.



Rys. 4.10 Główne parametry wymiarowe turbiny A- wysokość, B-szerokość, X-długość kierownicy, ØY-średnica wirnika oraz β kąt rozwarcia

W badaniu zagadnień wpływu proporcji geometrycznych na efektywność wiatraka koniecznym jest wykorzystanie metod numerycznych. W tym celu wykorzystany został komercyjny program Fluent firmy Ansys. Przyjęto uogólnienie, że czynnik gazowy traktowany był jako nieściśliwy.



Rys. 4.11 Różne konfiguracje proporcji pomiędzy kierownicą a wirnikiem

Obliczenia prowadzono w sposób niestacjonarny używając warunku „sliding mesh” na granicy obszaru wirującego i stacjonarnej kierownicy. Ten warunek pozwala na przenikanie przez tę granicę wirów i strug powietrza tworzących warstwy tarcia. Przepływ traktowano jako turbulentny i zastosowano model turbulencji Spalarta-Almarasa.

Jak pokazano na rysunku 4.11 w podstawowej konfiguracji oś wirnika znajduje się na przedłużeniu kierownicy. Zmieniano proporcje pomiędzy długością kierownicy i średnicą wirnika. Rozpatrywano przypadki, gdy wirnik był przesuwany za kierownicę. Przedstawiona analiza pozwoliła na wyznaczenie najlepszej proporcji pomiędzy długością kierownicy a średnicą wirnika. Pozyskano również bardzo ważną informację na temat wpływu wzajemnego ulokowania wirnika w stosunku do kierownicy.

Istotne znaczenie ma kąt rozwarcia pomiędzy kierownicami. Jego wpływ na efektywność wiatraka został wyznaczony numerycznie. Kąt rozwarcia kierownicy może mieć znaczenie na stabilność pracy wiatraka. Badania eksperymentalne w tunelu aerodynamicznym jak i badania polowe pokazały, że wiatrak zachowuje się stabilnie przynajmniej do wychylenia kierownicy 70^{o} na stronę.

Kolejnym parametrem określającym wymiary wiatraka jest proporcja jego wysokości do szerokości. Wiatrak dzieli strugę powietrza na dwie strony, w pionie, na lewą i prawą stronę. Jeżeli wiatrak ma skończoną wysokość to na górnym i dolnym końcu powietrze omija wiatrak i powoduje „ucieczkę” wiatru bez oddania mocy. Ze względu na powstające na końcach wiatraka straty „idealny” byłby wiatrak nieskończenie długi.

Proporcje wysokości wiatraka do jego szerokości są podyktowane głównie względami konstrukcyjnymi. Wykonane prototypy wskazały na to, że graniczną wartością jest wysokość wiatraka 3-4 razy większa od jego szerokości. Proporcja A/B na rysunku 4.10 powinna zawierać się w przedziale <3, 4>.

4.2. BADANIA POLOWE

4.2.1. Małe laboratorium polowe IMP PAN

W Instytuci Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku powstało w 2014r. laboratorium małych turbin wiatrowych (Rys. 4.12). W zakresie jego właściwości jest badanie rozwiązań komercyjnych dostępnych na rynku. Przygotowane są tam trzy moduły aplikacji badanych systemów. Jednocześnie zbudowano dodatkowe stanowisko laboratoryjne do badań prototypów innowacyjnej turbiny przeanalizowanych w pracy.

Dzięki zainstalowanej aparaturze gromadzone są informacje takie jak siła i kierunek wiatru (w dwóch punktach na różnej wysokości) oraz parametry prądowo-napięciowe na każdym generatorze. Mierzonym parametrem jest również sygnał składania kierownic. Pomierzone wartości przekazywane są do komputerowej bazy danych za pomocą nadajnika radiowego. Prowadzona jest stała rejestracja badanych obiektów za pomocą kamer wideo.

a) b) c)

Rys. 4.12 Laboratorium wiatrowe na dachu IMP PAN a) innowacyjny prototyp, b) konwencjonalny o osi poziomej 1kW c) hybrydowy Savonius-Darrieus

Turbiny zainstalowane są na wysokość około 20m ponad gruntem by zminimalizować zakłócenia wynikające z tak zwanej szorstkości terenu. Dla potrzeb prowadzonej w pracy analizy badawczej w laboratorium poza prototypowym wiatrakiem zainstalowano wiatrak o osi poziomej o mocy znamionowej 1 kW. Drugim rozwiązaniem jest wiatrak hybrydowy, który na osi głównej ma zainstalowany wirnik Savoniusa, a na zewnątrz łopaty wirnika Darrieusa. Ten wiatrak został wyposażony w profesjonalne skrzynie sterownika.

4.2.2. Laboratorium wiatrowe CTO

Istotnym elementem rozwoju konstrukcji wiatraków oraz weryfikacji działania mechanizmów są badania funkcjonalne i eksploatacyjne prototypów. W tym celu nawiązano współpracę z Centrum Techniki Okrętowej (CTO), aby prototypy można było zainstalować i badać w warunkach rzeczywistych.

Aplikacja zawierała prototypy turbin począwszy od najwcześniejszego jedno modułowego rozwiązania, które przebudowano po badaniach na dwu modułowy, model konstrukcyjny widoczny na rysunku 5.42 b). W projekcie NCBiR GEKON zbudowano turbiny 2 i 4 kW widoczne na rysunku 4.13, o szerokości 2,4m oraz odpowiednio wysokości 4,5 oraz 8,5m

Prototyp jednomodułowy poddany został również badaniom w największym w Polsce tunelu aerodynamicznym w Instytucie Lotnictwa w Warszawie. Poza pomiarami charakterystyk wiatraków badane były systemy ustawiania na wiatr. Istotnym elementem było też badanie mechanizmu składania i rozkładania wiatraka przez siły aerodynamiczne.

Dwumodułowe rozwiązanie 350 watowe miało wysokość turbiny 2,2m i szerokość 1,2 m. Zainstalowane ono zostało w 2012 roku.

a) b)

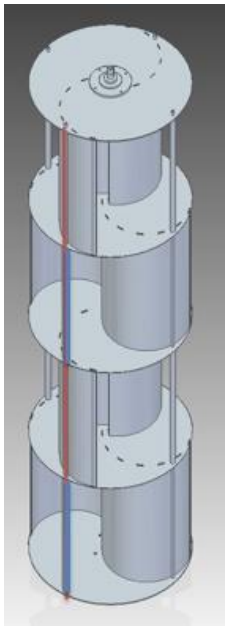
Rys. 4.13 Laboratorium wiatrowe w Centrum Techniki Okrętowej a) wiatraki 2 i 4kW b) wiatrak 350W dwu modułowy

Kolejny etap badań prowadzony był na zbudowanych w ramach projektu GEKON dwóch prototypach (2 kW oraz 4kW) (Rys. 4,13 a). Mniejszy z nich miał całkowitą wysokość 15m, przy wymiarach turbiny wysokość 4,5m i szerokości 2,4m. Większy wiatrak miał wysokość 26,5m a wymiary samej turbiny wynosiły 8,5m wysokości oraz 2,4m szerokości.

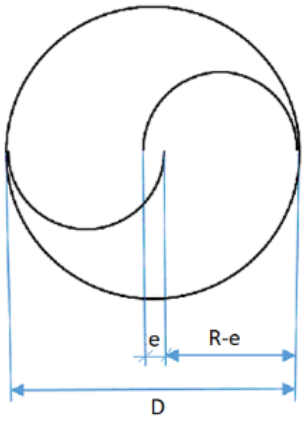
4.3. BADANIA LABORATORYJNE

4.3.1. Wirniki- eksploatacyjne cechy konstrukcyjne

Wprowadzanie zmian konstrukcyjnych w obrębie przestrzeni roboczej wirnika musi być wnikliwie przebadane, ponieważ wirnik jest kluczowym elementem w układzie wytwarzania energii. Nowe rozwiązania mogą przyczynić się do zmian zarówno kosztu wytworzenia, wytrzymałości oraz efektywności pracy turbiny. Ważnym elementem konstrukcyjnym jest szczelina wewnętrzna „e" widoczna na rysunku 4.15, między łopatami, której cechy opisane są w literaturze [52][53]. Ze względów wytrzymałościowych pierwsze badane na potrzeby pracy wykonywane były z rozwiązaniem cztero segmentowym (Rys. 4.14). Każdy z segmentów obrócony był o 90 stopni w stosunku do poprzedniego. W rozwiązaniu tym znajdują się cztery elementy prętowe przechodzące przez całą wysokość wirnika. Ich konstrukcja umożliwia łatwy montaż z wprowadzeniem montażowego naprężenia wstępnego.

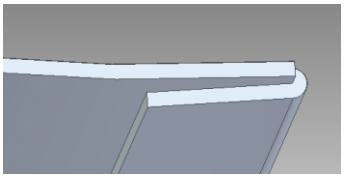


Rys. 4.14 Badany wirnik Savoniusa czteromodułowy

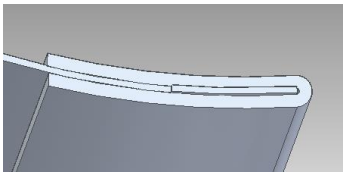


Rys. 4.15 Schemat ideowy Wirnik Savoniusa ze szczeliną, przekrój

Krytycznym elementem turbin są krawędzie natarcia łopat wirnika. Narażone są one na działanie siły odśrodkowej i jednocześnie siły wynikającej z naporu wiatru, której zwrot i wartość gwałtownie się zmieniają podczas przejścia w pobliżu krawędzi kierownicy. W celu zwiększenia trwałości krawędzi natarcia zastosowano różne wzmocnienia na badanych prototypach (Rys. 4.16, 4.17).



Rys. 4.17 Krawędź natarcia łopatki zagięta 180°



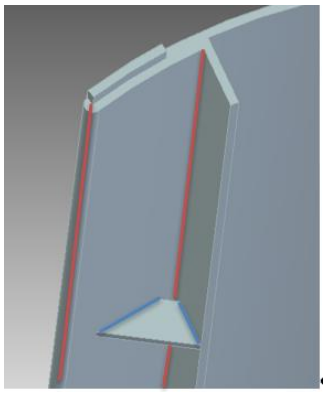
Rys. 4.16 Krawędź natarcia łopatki ze wzmocnieniem „U”

Uszkodzone elementy badanych turbin wiatrowych przedstawiono przykładowo na rysunku 4.18

a) b)

Rys. 4.18 Zniszczenia łopatki ze wzmocnieniem typu U a) widok łopatki i krawędzi b) zniszczony wirnik zaklinowany o kierownicę

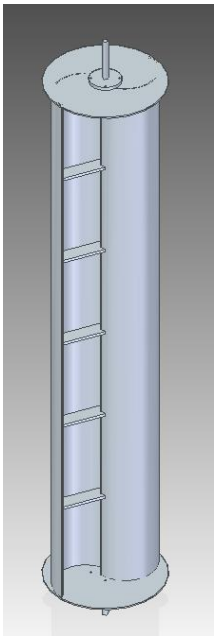
Konstrukcja gięto spawana przedstawiona na rysunku 4.19. zapewnia wzmocnienie krawędzi w trzeciej płaszczyźnie. Wspawane żebra znacząco usztywniły konstrukcję krawędzi, nie wprowadzając specjalnych utrudnień w wytwarzaniu. Pomimo czterech lat użytkowania jest jak dotychczas bezawaryjne i nie nosi śladów degradacji.



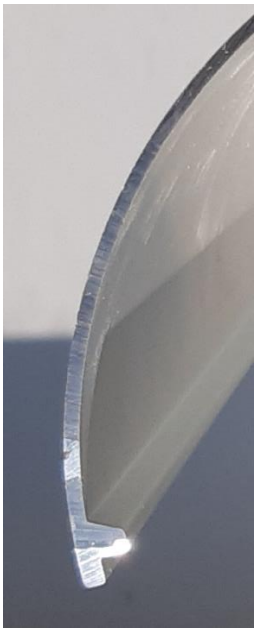
Rys. 4.19 Wzmocnienie krawędzi natarcia łopatki gięto-spawane

Rozwiązaniem, które opracowano na potrzeby znacznego uproszczenia konstrukcji jest wirnik jednomodułowy z profili aluminiowych (Rys. 4.20). Rozwiązanie z użyciem takiego materiału ma pogrubienie końcówki łopaty i żebro poprzeczne nadające jemu dodatkową sztywność (Rys. 4.21). Zastosowano tu elementy węzłowe sprzęgające ze sobą wszystkie krawędzie profilu, zarówno zewnętrzne jak i wewnętrzne.

Na tę konstrukcję zgłoszony został europejski wzór wspólnotowy w Alicante, zwany także wzorem przemysłowym o numerze 005308632-0001. Jego współtwórcą jest autor pracy doktorskiej[54].



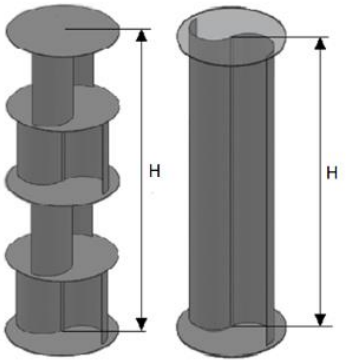
Rys. 4.20 Badany wirnik Savoniusa jednomodułowy



Rys. 4.21 Krawędź natarcia łopatki z profilu usztywnionego

W związku ze zmianą wirnika w tak szerokim zakresie niezbędne było eksperymentalne przebadanie nowej konstrukcji. Przeprowadzone porównanie wskazać miało czy nie utracono wymaganej sprawności i odpowiedniej wytrzymałości wirnika.

Badaniu poddane zostały wirniki dwóch typów: nowy jednomodułowy i drugi starszy czteromodułowy. Badane wirniki mają 250 mm średnicy i 1000mm wysokości, w obu wirnikach szczelina „e” jest taka sama i wynosi e=8% średnicy wirnika.



Rys. 4.22 Badane wirniki izometria

Stanowisko do badań zaprojektowane zostało przez autora pracy. Podstawę stanowił wentylator 2,2 kW sterowany falownikiem. W tunelu zastosowano dwie przegrody rozbijające wiry w strudze powietrza pochodzące z wentylatora. Pierwsza z nich umiejscowiona jest tuż za wentylatorem i składa się z kompletu kanałów o średnicy 30mm i długości 200mm, kolejna w środkowej części przepływu jest tradycyjną „ulownicą". Kanał zapewnia dodatkowo możliwość zmniejszania pola powierzchni wylotu tunelu. Funkcjonalność tę przewidziano w związku z potrzebą odwzorowania sytuacji pojawiającej się w opatentowanej turbinie gdzie przysłonięta jest część powrotna łopaty.

Na wylocie zamontowano wirnik wraz z momentomierzem oraz generatorem służącym do odbioru mocy z regulacją obciążenia. Daje to możliwość odczytu parametrów elektrycznych takich jak moc, napięcie i natężenie prądu oraz momentu mechanicznego.

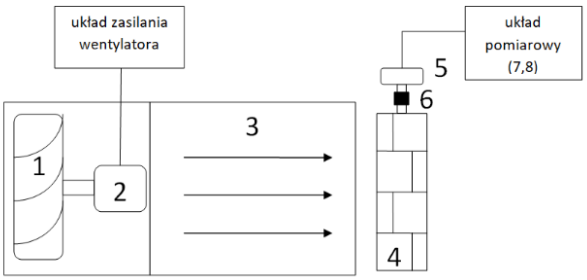
Zastosowany momentomierz to NCTE 2200-15. Generator jest konstrukcji rdzeniowej i mocy nominalnej 300W o dokładnie zbadanej w IMP PAN charakterystyce. Dodatkowym przyrządem pomiarowym jest czujnik Halla umożliwiający dokładne określenie obrotów wirnika. Niezbędna była także sonda do pomiaru prędkości przepływu powietrza firmy TSI o oznaczeniu 8455-300-1. Stanowisko zaprojektowano tak, aby zapewniało możliwość prostej wymiany wirników między seriami pomiarowymi. Wylot tunelu jest o następujących wymiarach: szerokość 400mm i wysokość 1200 mm. Dzięki czemu struga powietrza może swobodnie przepływać dookoła wirnika.

Układ taki nie odzwierciedla w pełni rzeczywistego przepływu strugi na wiatraku, ponieważ wpada ona do otwartej przestrzeni pomieszczenia i za wirnikiem ślad znajduje się w stojącym powietrzu. Takie warunki przepływu powinny zaniżać wyniki dotyczące mocy produkowanej przez wirnik. Nie ma wiec ryzyka uzyskania zawyżonych wyników pomiarów mocy. Trzeba tu podkreślić, że podstawowym zadaniem przeprowadzonych pomiarów jest porównanie dwóch rozwiązań w identycznych warunkach a nie określenie wartości bezwzględnych [55].

W skład stanowiska badawczego wchodzi (Rys. 4.23):

1) Wentylator,
2) Silnik wentylatora,
3) Tunel,
4) Badany wirnik,
5) Generator,
6) Momentomierz,
7) Aparatura do pomiaru napięcia, natężenia, mocy i obrotów,
8) Radiator do rozproszenia wytwarzanej mocy.

a)



b)

Rys. 4.23 Stanowisko do badania wirników a) schemat b) widok stanowiska

Przed przystąpieniem do badań właściwych wirników wykonano pomiary prędkości przepływu powietrza w tunelu oraz określono charakterystyki strumienia na jego wylocie. Następnie właściwe pomiary strugi wylotowej były wykonywane już w obecności wirników przy różnych prędkościach strugi i różnych obciążeniach wirnika.

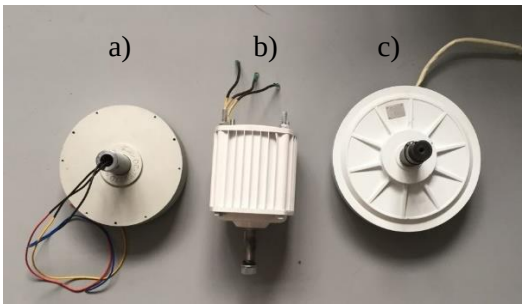
4.3.2. Badania generatorów

Jednym z istotnych etapów konstruowania elektrowni wiatrowej jest właściwy dobór generatora zamieniającego energię mechaniczną ruchu obrotowego wirnika elektrowni wiatrowej na energię elektryczną [56]. Optymalnie dobrany generator pod względem mocy i sprawności w zależności od obrotów ma kluczowy wpływ na efektywność całego wiatraka. W celu poprawnego doboru generator do elektrowni wiatrowej trzeba dysponować rzeczywistymi charakterystykami generatora, bowiem deklarowane przez producentów dane często są niepełne, a nawet nierzetelne.

Dostatecznie szczegółowej informacji nie można uzyskać od producenta a dostępne dane skupione są zazwyczaj na wartościach około nominalnych.

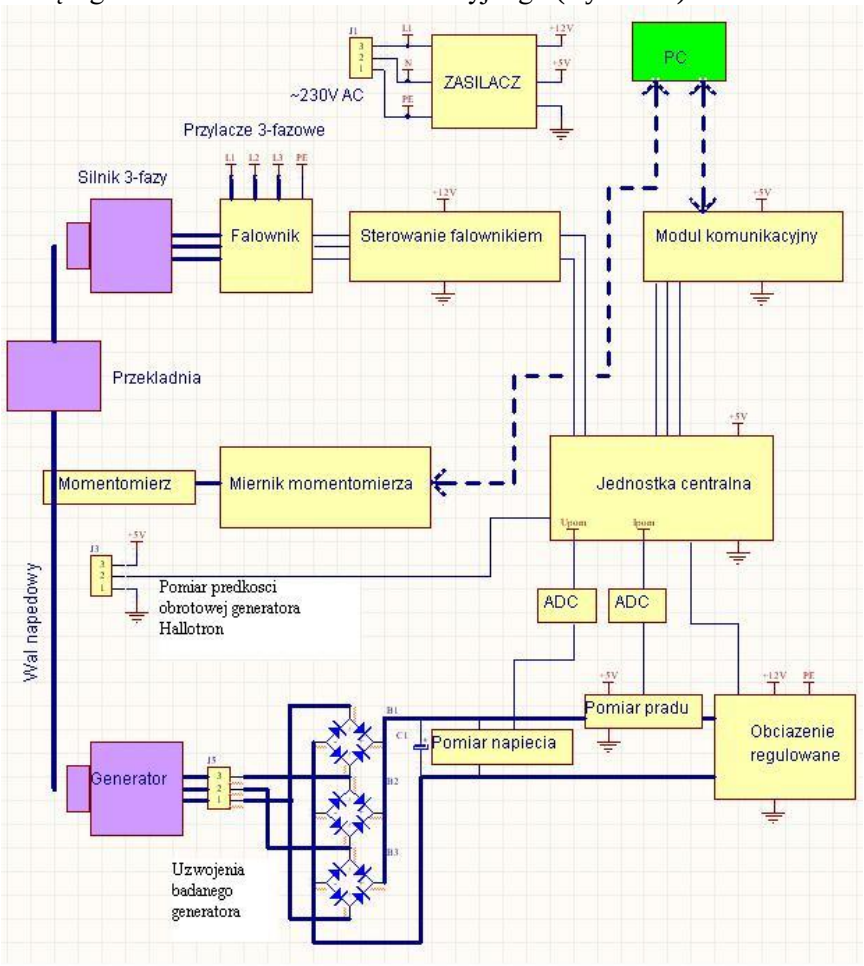
Niezbędne są zatem badania stanowiskowe generatorów dotyczące zarówno bardzo niskich jak i wysokich obciążeń. Krytyczne obciążenia powinny być utrzymywane nie tylko przez krótki czas pomiaru, lecz także w parogodzinnych testach sprawdzających przeciążenie i przegrzanie generatora.

Dla potrzeb pracy zaprojektowane i zbudowane zostało stanowisko do badań generatorów z napędem symulującym obroty i momenty uzyskiwane z elektrowni wiatrowej. Stanowisko (Rys. 4.26) wyposażono w silnik z falownikiem, co zapewniło odpowiedni napęd generatora. Silnik wyposażony jest w zewnętrzny system chłodzenia. Jest to niezmiernie istotna cecha dla tego typu eksperymentu, ponieważ zabezpiecza silnik przed przekroczeniem dopuszczalnej temperatury nawet przy wymuszeniu niższych obrotów niż zalecane przez producenta w długotrwałych testach. Badaniu poddawane były generatory z turbin typu oporowego (Rys. 4.24 A i C) cechujących się niskimi obrotami nominalnymi. Celowym w tym eksperymencie było sprawdzenie charakterystyk od wartości minimalnej obrotów. Pod uwagę przy projektowaniu stanowiska wzięto także możliwość testów generatorów wysokoobrotowych (Rys. 4.24 B). Zwiększenie obrotów za pomocą przesterowania falownika w trakcie testów generatorów wysokoobrotowych nie stanowi zagrożenia dla silnika napędzającego dzięki zastosowaniu chłodzenia zewnętrznego.



Rys. 4.24 Badane generatory a) typ bez rdzeniowy outer rotor” b) tradycyjny rdzeniowy c) typ bez rdzeniowy inner rotor”

Badanie generatorów przeprowadzono z wykorzystaniem specjalistycznego oprzyrządowania z dedykowanym systemem regulowanego obciążania wchodzącego w skład stanowiska laboratoryjnego (Rys. 4.25).



Rys. 4.25 Schemat stanowiska laboratoryjnego do badania generatorów

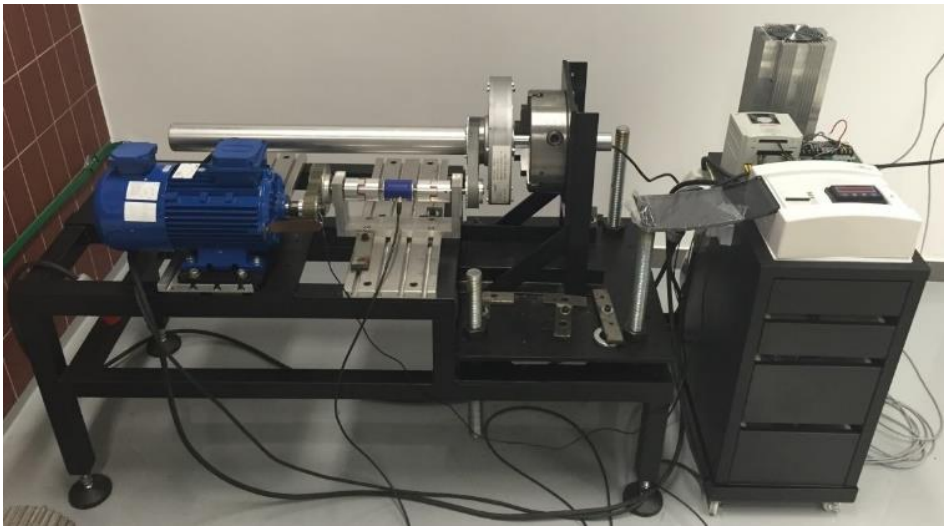
Stanowisko badawcze do badań generatorów składa się z następujących elementów (Rys. 4.25 i Rys. 4.26):

1. falownik LG 4kW,
2. silnik trójfazowy CELMA 3kW,
3. pierwsza przekładnia z kołami zębatymi i paskiem zębatym,
4. momentomierz NCTE model 2200-75 Nm,
5. druga przekładnia z kołami zębatymi i paskiem zębatym,
6. elektroniczny układ pomiarowy o napięciu do 300VDC i prądzie do 40A,
7. regulowane obciążenie o zdolności rozpraszania 2kW mocy,
8. komputer PC z aplikacją MatLab.

W układzie tym mierzone było napięcie i natężenie prądu wytworzonego z generatora dla różnych obciążeń wirnika. Pełną i płynną regulację obciążeniem testowanego generatora zapewnia zestaw tyrystorów w kominowym układzie radiatorów. Aby zwiększyć stabilność termiczną wymuszony jest przepływ powietrza wokół radiatorów.

Pomiędzy zespołami: napędowym i odbioru mocy zainstalowano układ pomiaru momentu (za pomocą momentomierza) i obrotów (przy zastosowaniu hallotronu).

Zbudowane stanowisko daje możliwość testowania generatorów, które mogą być wykorzystane do budowy elektrowni wiatrowej.



Rys. 4.26 Stanowisko do badania charakterystyk roboczych generatorów

Zastosowanie falownika pozwala na uzyskanie obrotów (250-2000) [rpm] Zwiększenie tego zakresu można uzyskać przez zastosowanie zestawu dwóch przekładni z paskami zębatymi (Rys. 4.27). Przekładnie te znajdują się pomiędzy silnikiem napędowym a momentomierzem. Dzięki temu umożliwiono pomiar parametrów w zakresie prędkości (20-4500) [rpm].

Celem wyznaczenia efektywności pracy generatorów dokonano następujących pomiarów:

1. prędkości obrotowej n [1/s],
2. momentu obrotowego M [Nm],
3. napięcia prądu uzyskiwanego z generatora U [V],
4. natężenia prąd płynący z generatora I [A],

Efektywność generatora wyznaczono z zależności:

$$\eta = (U * I) / (2 * \pi * n * M) \qquad (4.3.2.1)$$

Rys. 4.27 Przekładnia dwupoziomowa zastosowana do budowy stanowiska pomiarowego generatorów − widok ogólny

W badaniach przyjęto następującą procedurę pomiarową:

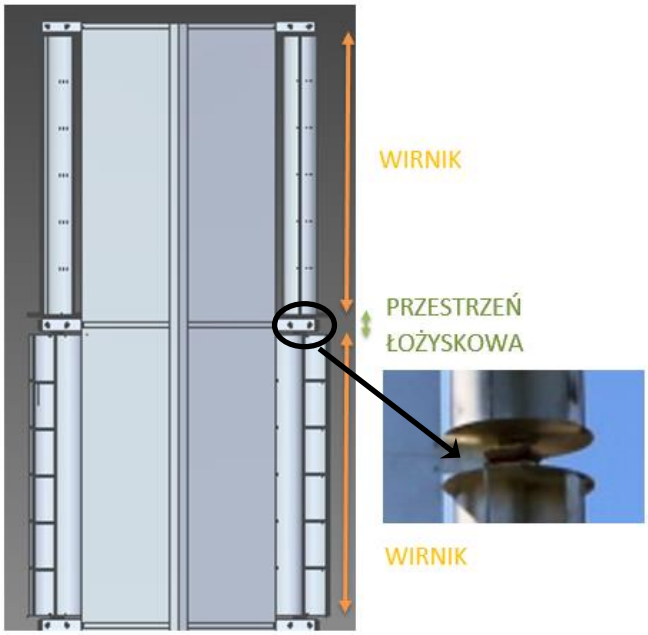
1. po mechanicznym zamocowaniu generatora na stanowisku pomiarowym podłączono jego uzwojenia do elektronicznego układu, który wymusza obciążenie generatora celem pomiaru mocy elektrycznej produkowanej przez generator,
2. sterowanie falownikiem i regulowanym obciążeniem prowadzono z poziomu pulpitu aplikacji MatLab zainstalowanego na komputerze klasy PC,
3. zadano określoną prędkość obrotową wału generatora poprzez ustalenie częstotliwości falownika,
4. przy ustalonych obrotach wymuszono zmianę prądu generatora poprzez zmianę obciążenia,
5. dokonano pomiarów prędkości obrotowej wału generatora i wartości momentu obrotowego na wale napędzającym generator oraz napięcia i prądu dostarczanego przez generator,

6. znając prędkość obrotową i moment obrotowy na wale generatora określano moc dostarczaną do generatora,
7. znając napięcie generatora i jego prąd wyznaczono moc elektryczną wytwarzaną przez generator ,
8. pomiary 6 i 7 pozwalają wyznaczyć charakterystykę efektywności generatora w funkcji obrotów,
9. wyniki badań archiwizowano automatycznie w komputerowej bazie danych wynikowych,
10. uzyskane charakterystyki pracy generatorów wykorzystano do oceny jakości użytkowej.

4.4. ZAGADNIENIA KONSTRUKCYJNO-WYTWÓRCZE

4.4.1. Przeniesienie napędu, ułożyskowanie

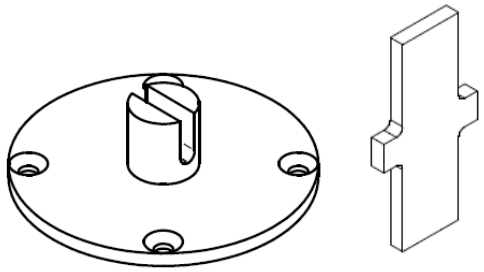
Średnica wirników jest niewielka w stosunku do szerokości wiatraka, wynosi około 20% jego szerokości przy rozwartej kierownicy. Jeżeli proporcje wiatraka wynoszą 4 : 1 (wysokość do szerokości), to oznacza, że długość wirnika wynosi równowartość 20 jego średnic. W związku z tym wirniki nie mogą być jednoelementowe. Utrzymanie sztywności i wytrzymałości na takim długim wirniku jest bardzo trudne konstrukcyjnie. W związku z tym zaprojektowano podział wirnika na segmenty z proporcją 1:4 (Rys. 4.28).



Rys. 4.28 Rozwiązanie konstrukcyjne podziału badanego wirnika

Łączenie segmentowe wirników wymaga wprowadzenia węzła montażowego umożliwiającego ich ułożyskowanie i zesprzęglenie, tak aby zminimalizować przestrzeń między wirnikami przedstawioną na rysunku 4.28. Przestrzeń robocza między wirnikami stanowi stratę obszaru strugi powietrza przekładającą się bezpośrednio na sprawność całej turbiny. Konieczne jest jednoczesne spełnienie kilku warunków dla takiego połączenia. Musi ono umożliwiać montaż oraz demontaż poszczególnych wirników. Ponadto potrzebne jest zastosowanie łożysk wahliwych, tak aby deformacje wirników nie przenosiły się na kierownice.

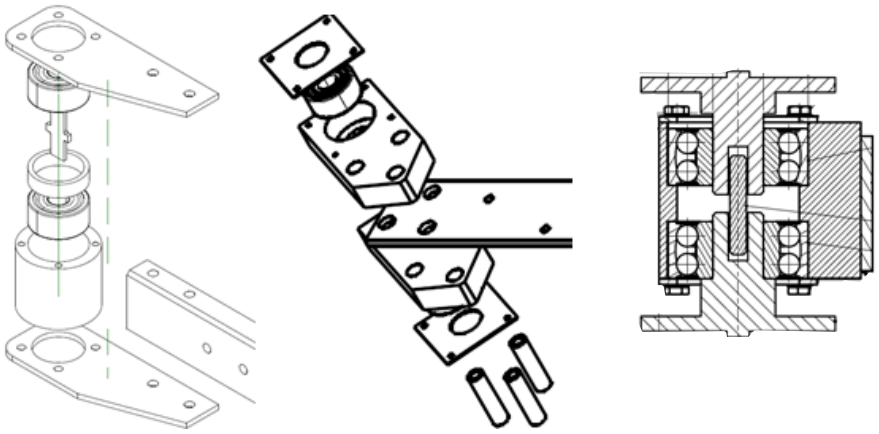
Cechą charakterystyczną dla pracy wirnika jest zmienny moment wynikający z sekwencyjności działania łopat. Specjalnie na potrzeby prototypu zaprojektowano sprzęgło „płytkowe” (Rys. 4.29).



Rys. 4.29 sprzęgło płytkowe – konstrukcja autorska

Zaproponowane rozwiązanie ewoluowało wraz z kolejnymi prototypami i konstrukcjami kierownic (Rys. 4.30). W celu uzyskania parametrów pracy spełniających założone kryteria wykonano obliczenia oraz testy na prototypie.

a) b) c)



Rys. 4.30 Sposoby łożyskowania wirników: a) tulejowy, b) dzielony, c) blokowa (w przekroju z osiami i płytką)

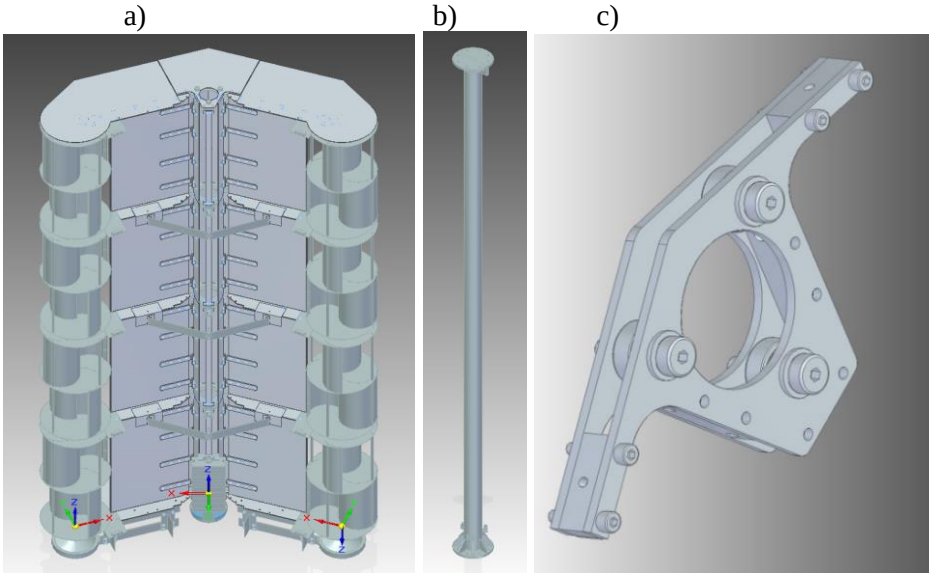
Istotnym jest fakt, że sprzęgło powinno zajmować bardzo mało miejsca, tak aby odległość miedzy wirnikami była minimalna. Ponadto warto zwrócić uwagę, że wiatrak napędzany jest strugą wiatru, którą cechuje elastyczność. W związku z tym zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne sprzęgła nie zawierało elementów podatnych, redukujących skutki gwałtownych obciążeń mechanicznych.

4.4.2. Mechanizm śledzenia kierunku wiatru

Symetryczna budowa prototypowej turbiny umożliwia jej samoczynne ustawienie się do kierunku wiatru. Na charakterystykę takiego zachowania wpływa wiele czynników takich jak umiejscowienie osi obrotu na maszcie wobec wierzchołka kierownicy oraz opór stawiany przy obrocie. Możliwe są dwa rozwiązania tego mechanizmu. Pierwsze rozwiązanie, dla analizowanej konstrukcji pokazano na rysunku 4.31.

Podstawowym elementem konstrukcyjnym jest stały rurowy wspornik (Rys. 4.31 b). Turbina (Rys. 4.31 a) obraca się dzięki specjalnie zaprojektowanemu elementowi (Rys. 4.31 c) zoptymalizowanemu do tego celu.

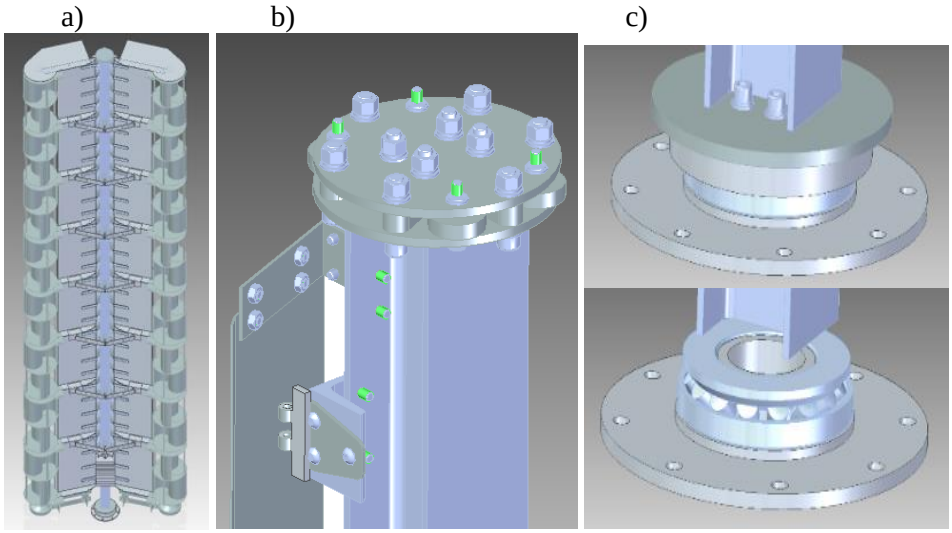
Rozwiązanie takie umożliwia instalację turbiny na konstrukcjach masztowych i zostało zastosowane na wszystkich dotychczasowych konstrukcjach prototypów poza rozwiązaniem umiejscowionym w CTO (4kW).



Rys. 4.31 Turbina z nieruchomym masztem: a) część ruchoma, b) maszt, c) moduł obrotowy

Nowatorskim, drugim rozwiązaniem, niezmiernie upraszczającym konstrukcję, było zastosowanie ruchomego masztu na którym na stałe zamocowano elementy konstrukcyjneturbiny. Maszt ułożyskowano w gniazdach obrotowych na dole i na górze, co zapewnia jego obrót.

Takie rozwiązanie zwiększa sztywność na skręcanie wiatraka, ale jego zastosowanie możliwe jest w sytuacji, gdy można umocować dwa niezależne gniazda modułowe na już istniejących konstrukcjach.



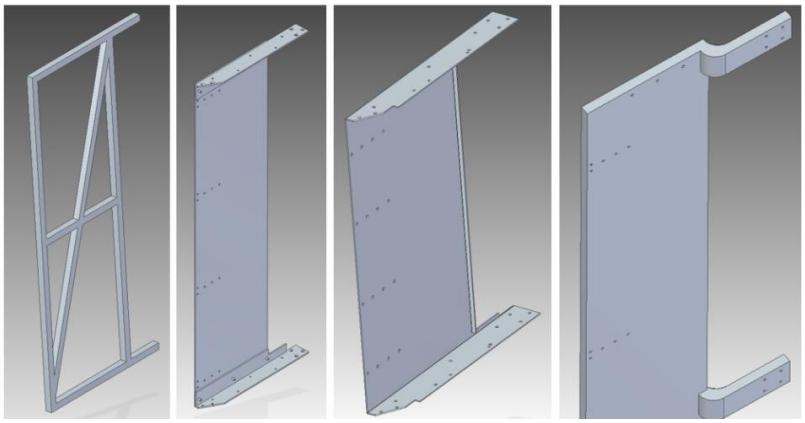
Rys. 4.32 Rozwiązanie konstrukcyjne z ruchomym masztem: a) część ruchoma, moduły gniazd obrotowych b) górne i c) dolne.

Istotnym parametrem systemu śledzenia kierunku wiatru jest czas reakcji na zmiany kierunku strugi powietrza. Pierwotnie we wszystkich prototypach oś masztu znajdowała się poza wierzchołkiem kierownicy kierownic. Takie położenie masztu względem wiatraka pozwalało na bardzo szybką reakcję na zmianę kierunku wiatru. Drugim elementem decydującym o szybkości dostosowywania się ustawienia turbiny względem kierunku wiatru są opory obrotu wiatraka wokół osi masztu. W celu zmniejszenia oporów ruchu początkowo w konstrukcji zastosowano pierścienie ślizgowe, co jednak okazało się mało skuteczne i nie przyniosło oczekiwanych efektów. Obecnie w badanej konstrukcji stosowane są łożyska kulkowe. Takie rozwiązanie zapewnia niskie opory ruchu i szybką zmianę ustawienia wywołana zmianą kierunku przepływu strugi powietrza.

4.4.3. Konstrukcje kierownic

Ważnym elementem składowym turbiny są kierownice. Elementy te poprawiają efektywność pracy turbin wiatrowych. Mają bezpośredni wpływ na wytrzymałość oraz ciężar konstrukcji. Dotychczas wykorzystane były trzy rozwiązania i czwarte wykonane z laminatu nie zaimplementowane do konstrukcji (Rys. 4.33). Rysunek 4.33 pokazuje kierownicę ze wspornikami do zamontowania wirnika. Przednia prosta pionowa krawędź jest integrowana z zawiasem kierownicy.

a) b) c) d)



Rys. 4.33 Prototypy kierownic a) z profilu zamkniętego stalowego, b) z płyty aluminiowej z kątownikiem, c) z płyty nierdzewnej giętej, d) z płyty laminatowej

Kierownicą nazywana jest umownie powierzchnia oznaczona na rysunku 4.34 a) kolorem pomarańczowym. Istotną funkcję pełni element oznaczony kolorem żółtym 4.34 b). Takie rozwiązanie ogranicza przepływ strug roboczych, górą i dołem turbiny, co przyczynia się bezpośrednio do redukcji strat strumienia napędzającego.

a) b)

Rys. 4.34 Obszary kierownicy a) główna pionowa b) pomocnicza pozioma

4.4.4. Konstrukcje wsporcze

Zadaniem konstrukcji wsporczych jest utrzymanie elementów roboczych wiatraka i przeniesienia obciążeń mechanicznych (pionowych i poziomych) do podłoża (fundamentu). Dobór konstrukcji wsporczej uzależniony jest w dużej mierze od lokalizacji, wartości inwestycji, przenoszonych obciążeń oraz kapitału inwestora. Rozwiązaniem najlżejszym oraz prostym konstrukcyjnie jest zastosowanie masztu rurowego z odciągami (Rys. 4.35). Główną wadą tego rozwiązania jest dość duża przestrzeń posadowienia.

Rys. 4.35 Maszty rurowy z odciągami

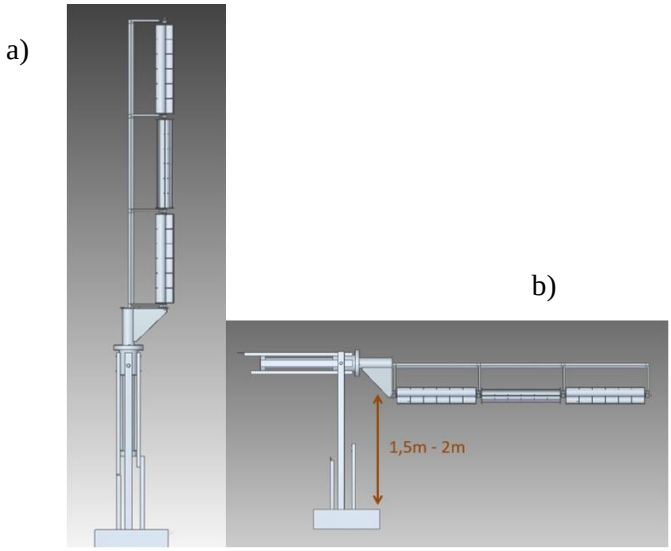
Kolejną koncepcją masztu jest konstrukcja samonośna (Rys. 4.36). Zaletą tego rozwiązania jest brak odciągów. Jednak odbywa się to kosztem znacznego zwiększenia średnicy i masy całości konstrukcji wiatraka.

Rys. 4.36 Maszt rurowy samonośny

W celu optymalizacji masy i wytrzymałości zastosowano rozwiązanie kratownicowe, o całkowitej wysokości 26 metrów (Rys. 4.37) wykorzystane w największym badanym prototypie o mocy 4 kW.

Rys. 4.37 Maszt kratownicowy

W turbinach prosumenckich wygodnym użytkowo jest konstrukcja masztu umożliwiająca jego złożenie, tak aby możliwa była jego konserwacja i naprawa z poziomu gruntu. Rozwiązanie takie zwiększa koszt inwestycji, lecz zdecydowanie ułatwia wykonywanie czynności eksploatacyjnych turbin. Dotychczas opracowane zostały składane wersje masztów rurowych bez odciągów (Rys. 4.38) a także odmienne rozwiązanie z odciągami.



Rys. 4.38 Maszt samonośny składany a) w pozycji roboczej, b) w pozycji obsługowej

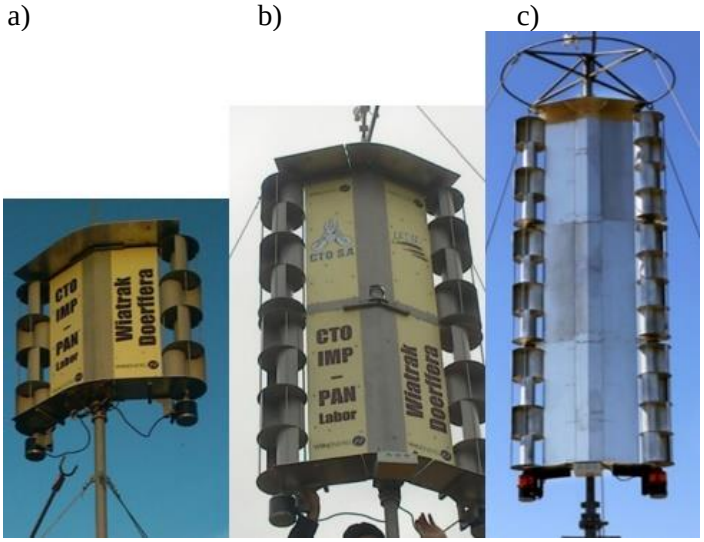
4.5. DOSTOSOWANIE MOCY TURBINY

4.5.1. Konstrukcje modułowe turbin

Kluczowym parametrem konstrukcyjnym decydującym o mocy turbiny jest powierzchnia czynna wirnika. Zwiększenie mocy (tym samym powierzchni) można osiągnąć w dwojaki sposób: poprzez zwiększenie gabarytów turbiny lub wprowadzenie dodatkowego modułu turbiny. W pierwszym rozwiązaniu, na przykład zwiększając szerokość i wysokość dwukrotnie, zwiększamy powierzchnię czterokrotnie, i tylokrotnie zwiększa się moc wiatraka. Niestety przy tym działaniu musimy zwiększyć także gabaryty i przekroje innych elementów, co przyczynia się do powiększenia masy całkowitej konstrukcji.

Jeżeli zwiększenie mocy wiatraka ma być niewielkie to zamiast zwiększania gabarytu możemy zwiększyć liczbę wiatraków. Wykorzystać możemy konstrukcję modułową, przedstawioną na rysunku 4.39. Pozwala to na wykorzystanie dowolnej ilości modułów jedynie zwiększając wysokość turbiny. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość dostosowania mocy dokładnie do potrzeb.

a) b) c)

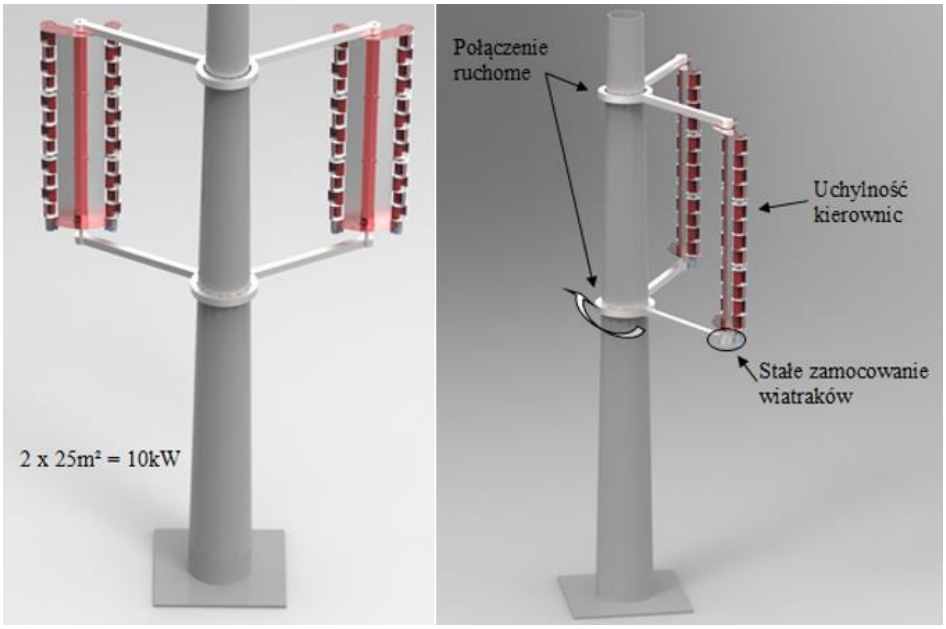


Rys. 4.39 Multiplikacja pionowa a) jedno, b) dwu c) trzy segmentowa

4.5.2. Multiplikacja ilości turbin

Rozwinięciem przestrzennym konstrukcji modułowej jest umieszczenie kilku turbin na jednym maszcie. Multiplikacja tego typu może na przykład obejmować rozwiązania dwu i trój modułowe.

Przy zastosowaniu dwóch pakietów turbin możliwe jest zmiana ustawienia turbiny względem kierunku wiatru na maszcie (Rys. 4.40) [26,57,58],

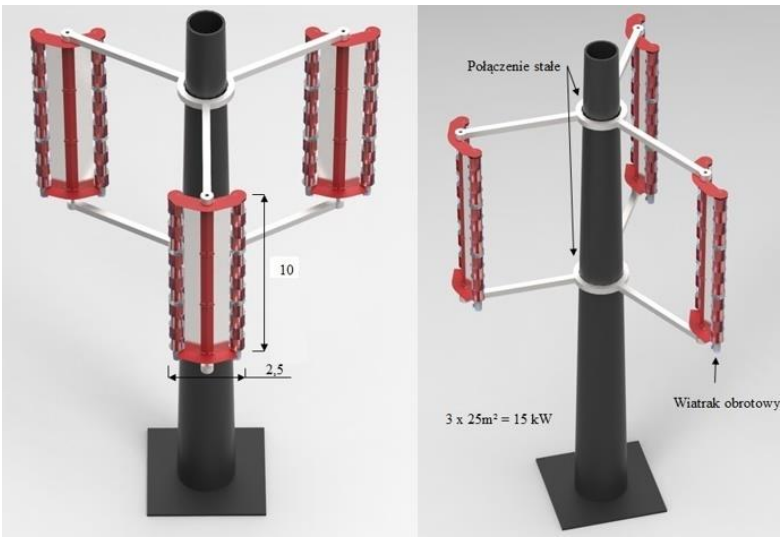


Rys. 4.40 Multiplikacja turbin – rozwiązanie podwójne ruchome

Przy zestawieniu trzech pakietów turbin można zrezygnować z tak zwanej ruchomości całej konstrukcji na maszcie i realizować ustawienia turbin dla każdej turbiny niezależnie. Takie rozwiązanie ma niestety pewną wadę: że przy pewnych kierunkach wiatru jeden z modułów może znajdować się w śladzie drugiego (Rys. 4.41).

W takim rozwiązaniu ustawienie turbin powinno być determinowane charakterystykami wietrzności wynikającymi z róży wiatrów. Ustawiając jeden z wiatraków w jej kierunku powodujemy, że wszystkie trzy wiatraki pracują w obszarze niezaburzonym. Ponieważ wiatry są bardzo zmienne to ewentualna interakcja wiatraków będzie sporadyczna i krótko-okresowa. Umieszczenie trzech pakietów wiatraków na jednej konstrukcji wsporczej nie daje tak dobrych

rezultatów jak postawienie trzech wiatraków niezależnie z dala od siebie. Jednakże utrata produkowanej energii nie jest znacząca i zależne od kierunku wiatru (3-15%).



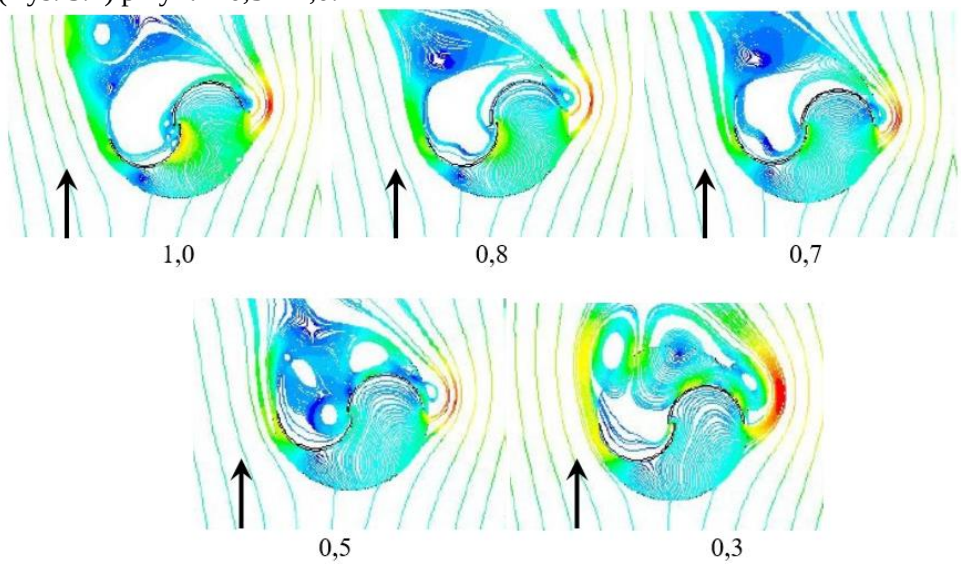
Rys. 4.41 Multiplikacja turbin – rozwiązanie potrójne

5. WYNIKI BADAŃ

5.1. KONCEPCJA TURBINY

Rozwój koncepcji innowacyjnego wiatraka wymagał po pierwsze rozpoznania cech charakterystycznych nowego rozwiązania. Zastosowanie symulacji numerycznych jest bardzo przydatne w takim celu. Istniejące numeryczne kody komercyjne pozwalają na wykonanie odpowiednich obliczeń. Dla określonej prędkości wiatru interesujące parametry wirników to: moment na wale, obroty wirnika, moc, efektywność oraz prędkość końcówki łopaty w odniesieniu do prędkości wiatru (Tip Speed Ratio TSR).

Planując obliczenia określono warunki pracy wirnika poprzez określenie parametru TSR oznaczanego jako λ. Parametr ten będzie wykorzystywany w dalszych symulacjach. Obliczenia przeprowadzono dla prędkości wiatru 8 m/s (Rys. 5.1) przy λ = 0,3 – 1,0.

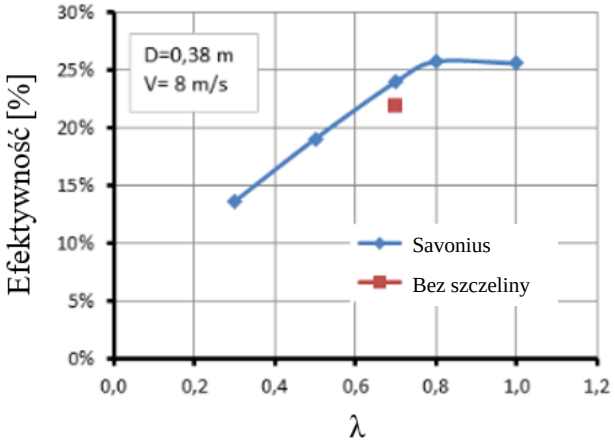


Rys. 5.1 Linie prądu dla wartości TSR λ= 1, 0.8, 0.7, 0.5, 0.3 dla wirnika Savoniusa

Na rysunku 5.2 wykres przedstawia efektywności wirnika w funkcji λ. W wybranym przypadku prędkości wiatru wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika, czyli dla rosnącego λ rośnie generowana moc. Ten wzrost osiąga maksimum przy λ=0,8.

Jak wspomniano wcześniej szczelina przy osi wirnika jest stosowana dla zwiększenia efektywności wirnika. Przedmuch przez szczelinę zmniejsza opór powracającej łopaty. Na rysunku 5.2 przedstawiono wynik obliczeń przy zamkniętej szczelinie przedmuchowej dla omawianego wirnika. Obliczenia wykonana tylko dla jednego przypadku przepływu przy λ = 0,7. Dodatkowo naniesiono punkt dla wirnika bez szczeliny między łopatkami pokazuje, że

wprowadzenie szczeliny poprawia efektywność (Rys 5.2). Otrzymane wyniki są zgodne z wynikami prezentowanymi w literaturze [52][53], co wskazuje na poprawność przeprowadzonych symulacji numerycznych.

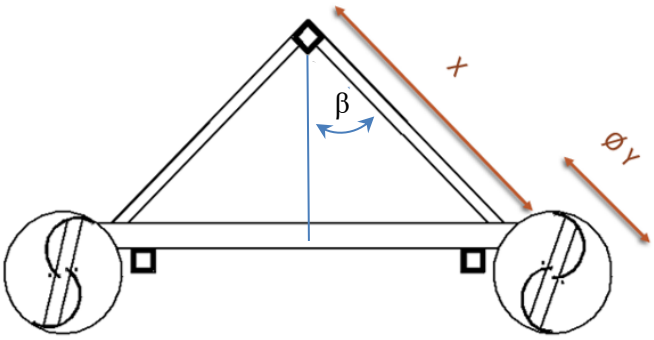


Rys. 5.2 Zależność efektywności od λ

Uzyskany wynik potwierdza prawidłowość decyzji o zastosowaniu wirnika ze szczeliną przedmuchową. Dzięki temu uzyskuje się dodatkowo około 2-3% wzrostu efektywności produkcji energii.

Zastosowanie metod numerycznych pozwoliło również na wyznaczenie optymalnej długości kierownicy w stosunku do średnicy wirnika. Numeryczne podejście jest dużo łatwiejszą metodą niż badanie eksperymentalne. Eksperymentalne podejście wymagałoby wykonania szeregu kierownic o różnej długości i przeprowadzenie cyklu pomiarowego z dużą ilością przypadków.

Pierwszym zagadnieniem istotnym dla badania funkcjonalności innowacyjnego wiatraka w ramach analizy numerycznej była analiza wpływu proporcji długości kierownicy X do średnicy wirnika ØY (Rys. 5.3). Obliczenia były wykonane dla trzech przypadków X/ØY równych 1 , 1,5 oraz 2,5. Symulacje przeprowadzone zostały dla dwóch wartości kąta β równych 20° oraz 60°. Obliczenia przeprowadzone zostały dla czterech wartości prędkości wiatru V = 8, 10, 15 oraz 25 m/s.



Rys. 5.3 Proporcje konstrukcyjne wiatraka X/ØY

Tabela 5.1 Wyniki obliczeń numerycznych dla różnych proporcji długości kierownicy do średnicy wirnika dla kątów β=20° i 60°

X/ØY=1 β=20°

Prędkość wiatru [m/s]	Prędkość obrotowa		M[Nm]	P[W]	P /P$_0$ [-]
	TSR	[rad/s]			
8	1	32.65	1.21	39.67	0,14
10	1	40.82	1.89	77.18	0,14
15	1	61.22	4.27	261.56	0,14
25	1	102.04	11.86	1210.43	0,14

X/ØY=1,5 β=20°

Prędkość wiatru [m/s]	Prędkość obrotowa		M[Nm]	P[W]	P /P$_0$ [-]
	TSR	[rad/s]			
8	0.94	30.68	1.15	35.20	0,19
10	0.9	36.69	1.90	69.66	0,19
15	1	61.22	3.72	227.56	0,18
25	1	102.04	10.33	1053.73	0,18

X/ØY=2,5 β=20°

Prędkość wiatru [m/s]	Prędkość obrotowa		M[Nm]	P[W]	P /P$_0$ [-]
	TSR	[rad/s]			
8	1	32.65	1.07	34.95	0,15
10	1	40.82	1.67	68.10	0,14
15	1	61.22	3.95	242.05	0,15
25	1	102.04	11.12	1134.19	0,15

X/ØY=1 β=60°

Prędkość wiatru [m/s]	Prędkość obrotowa		M[Nm]	P[W]	P /P$_0$ [-]
	TSR	[rad/s]			
8	1	32.65	1.90	62.12	0,15
10	1	40.82	2.95	120.38	0,15
15	1	61.22	6.63	405.61	0,15
25	1	102.04	18.10	1846.48	0,14

X/ØY=1,5 β=60°

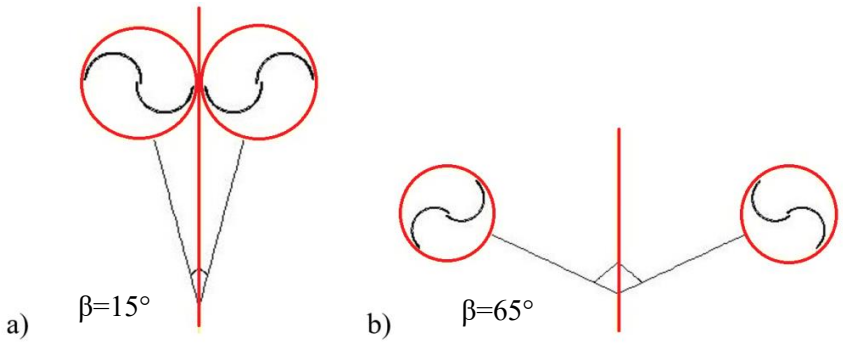
Prędkość wiatru [m/s]	Prędkość obrotowa		M[Nm]	P[W]	P /P$_0$ [-]
	TSR	[rad/s]			
8	1	32.65	2.44	79.62	0,23
10	1	40.82	3.78	154.15	0,22
15	1	61.22	8.45	517.17	0,22
25	1	102.04	23.02	2348.50	0,22

X/ØY=2,5 β=60°

Prędkość wiatru [m/s]	Prędkość obrotowa		M[Nm]	P[W]	P /P$_0$ [-]
	TSR	[rad/s]			
8	1	32.65	2.20	71.89	0,15
10	1	40.82	3.42	139.52	0,15
15	1	61.22	7.69	470.84	0,15
25	1	102.04	20.96	2139.04	0,14

Wyniki przedstawione w tabeli 5.1 pokazują, że efektywność przy proporcji X/ØY=1,5 jest najwyższa dla obu wartości kąta β i zadanych prędkości wiatru. W związku z tym dla dalszych zastosowań przyjęto proporcję 1,5 jako standardową. Przykładowo dla wirnika 500 mm kierownica ma długość 750 mm.

Kąt β został ustalony arbitralnie dla wartości zbliżonych do możliwego minimum i maksimum. W dalszych badaniach wpływ kąta β został przeanalizowany według relacji geometrycznych przedstawionych na rysunku 5.4. Obliczenia wykonane zostały dla prędkości wiatru V=8 m/s i współczynnika prędkości λ=0,7. Zmiana kąta β zawierała się w zakresie 15°-65° (Rys.5.5). Dalsze symulacje numeryczne z kierownicą prowadzone były dla wirnika o tej samej średnicy ØY=0,38 m.



Rys. 5.4 Geometria wiatraka z klinem naprowadzającym o różnym kącie rozwarcia a) 15° , b) 65°

Symulacje dla przypadku współczynnika obrotów λ = 0,7 dla samego wirnika Savoniusa wykazały moc wirnika równą 29W. Wirnik z kierownicą generuje taka samą moc przy kącie ustawienia kierownicy = 20° (Rys. 5.5) Oznacza to, że przysłonięcie powracającej strony wirnika w analizowanym przypadku nie przynosi korzyści energetycznych. Analizując wyniki obliczeń zauważono, że w podejściu 2-D, interakcja wirników w przestrzeń pomiędzy kierownicami zwiększa ciśnienie i opory wirnika.

Przy kącie rozwarcia kierownicy β=65° moc uzyskana z wirnika jest już ponad dwukrotnie większa niż dla kąta β=20°. Wraz ze zmianą kąta β ustawienia kierownicy zmienia się przekrój strumienia wiatru, który naciera na układ kierownica-wirnik.

Rys. 5.5 Moc turbiny w funkcji kąta β- rozwarcia kierownicy

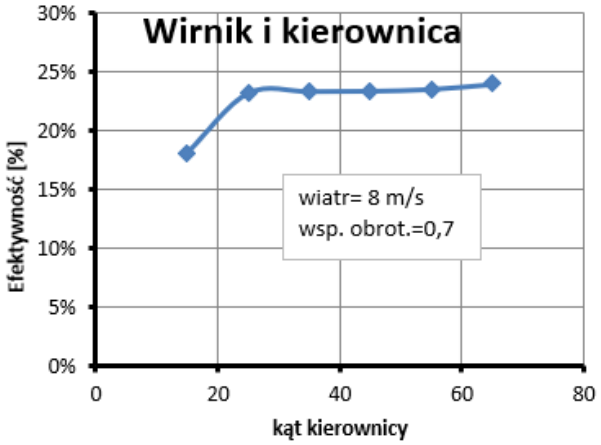
Zależność zmian powierzchni czynnej turbiny od kąta ustawienia kierownicy podana została w tabeli 5.2.

Tabela 5.2 Zmiana powierzchni czynnej turbiny w zależności od kąta β

Kąt [º]	powierzchnia [m^2]	Zwiększenie powierzchni
15	0,39	1
25	0,51	1,31
35	0,63	1,62
45	0,73	1,87
55	0,81	2,08
65	0,88	2,26

Wyniki przedstawione w tabeli 5.2 wskazują, że przyrost powierzchni ze zmianą kąta rozwarcia jest ponad dwukrotny. Ten fakt należy wziąć pod uwagę przy wyznaczaniu efektywności wiatraka, ponieważ przyrost mocy wynika z dostępu do coraz to większej powierzchni strugi powietrza. Efektywność wiatraka w zależności od rozwarcia kierownic przedstawiono na rysunku 5.6.

Wyniki badania przedstawione na rysunku 5.6 pokazują, że efektywność układu kierownica-wirnik powyżej kąta rozwarcia β=30° jest niemalże stała i jest na poziomie nieco wyższym od wirnika Savoniusa. Oznacza to, że ten sam wirnik dostarcza coraz więcej mocy przy zwiększaniu rozwarcia kierownicy, proporcjonalnie do zwiększania przekroju wiatraka.



Rys. 5.6 Efektywność układu kierownica wirnik w funkcji kąta β

Powyższy wniosek jest bardzo ważny dla określenia charakterystyki wiatraka. Wykazuje on na uniwersalność pomysłu zastąpienia dużego wirnika Savoniusa znacznie mniejszym wirnikiem z kierownicą. Skierowanie znacznie szerszej strugi powietrza na wirnik przez kierownice pozwala na przetworzenie całej szerokości strugi wiatru na energię mechaniczną. Bardzo istotne jest to, że efektywność takiego rozwiązania jest niezależna od kąta ustawienia kierownicy powyżej 25% oraz, że proporcja długości kierownicy do średnicy wirnika jest istotna i powinna wynosić około 1,5.

5.2. BADANIA POLOWE

5.2.1. Badania polowe w IMP PAN

Laboratorium Wiatrowe (LMEW) znajduje się na budynku IMP PAN. Głównym celem laboratorium jest badanie małych siłowni wiatrowych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych i ma charakter tzw. laboratorium polowego [59]. Możliwe jest wykonanie pomiarów długookresowych w zmiennych warunkach atmosferycznych. Takie pomiary pozwalają na określanie rzeczywistych charakterystyk użytkowych małych elektrowni wiatrowych. Należy jednakże podkreślić, że parametry wiatru są bardzo zmienne, często o krótkich i silnych impulsach. Powoduje to, że określenie prędkości wiatru jest problematyczne, a wyznaczenie mocy, którą wiatrak ma być właściwie obciążony jest skomplikowanym zagadnieniem naukowym.

LMEW wyposażone jest w cztery składane maszty, na których umocowane są różne typy siłowni wiatrowych. Znajdują się tam trzy komercyjne rozwiązania i jeden wiatrak opracowany w IMP PAN a opatentowany przez firmę WINENERG sp. z o.o. SKA, który jest uwzględniony jako prototyp w realizowanej rozprawie doktorskiej. Maszty wiatraków umieszczone są na specjalnie zaprojektowanej konstrukcji przytwierdzonej do elementów nośnych dachu.

Wszystkie siłownie wiatrowe są opomiarowane i na bieżąco monitoruje się generowaną przez nie moc elektryczną. Poniżej omówione będą tylko pomiary wykonane na prototypie innowacyjnego wiatraka.

W zastosowanej procedurze pomiarowej obroty wirników były określane na podstawie pomiaru napięcia. Zależność obrotów od napięcia jest linowa, wiec taka procedura jest bardzo dokładna.

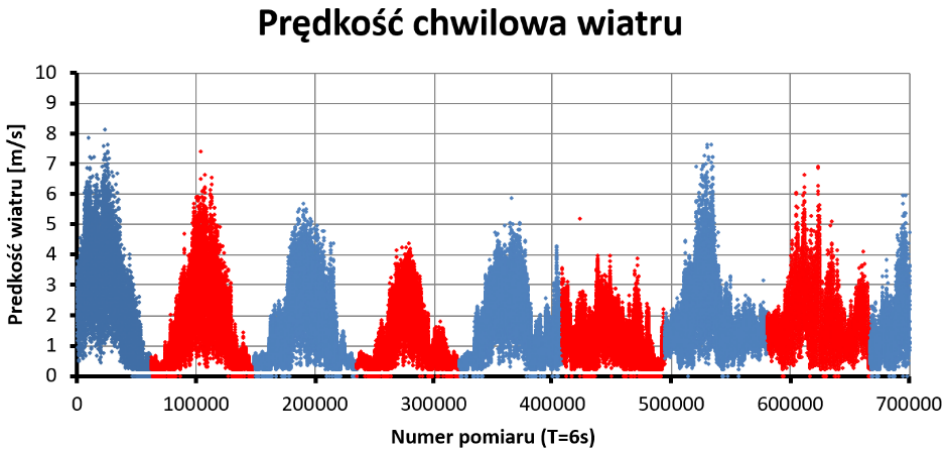
Na bazie przeprowadzonych badań ustalono, że dla użytych generatorów zależność między napięciem generowanym a prędkością obrotową wału opisuje równanie:

$$N[RPM] = 28.5 \cdot U_g[V] \tag{5.2.1.1}$$

Prędkość wiatru

Podstawowym celem analizy jest wyznaczenie zależności mocy generowanej od prędkości wiatru. Zarówno prędkość wiatru jak i moc wytracona w obciążeniu to wielkości mierzone przez system i zapisywane w danych pomiarowych.

Przebieg zmian prędkości wiatru w czasie przedstawiono na rysunku 5.7. Na wykresie kolorami zaznaczono odcinki pomiaru o długości 24 godzin; wyraźnie zauważalna jest periodyczność wiatru w zakresie dobowym.



Rys. 5.7 Wyniki badania prędkość chwilowej wiatru

Pomiar mocy turbiny

Obciążanie wirników jest kluczem do właściwego wykorzystania wiatraka. Jeżeli wiatrak będzie obciążany zbyt mocno to zostanie zdławiony, obroty spadną i turbina dostarczy mniej energii niż mogła by wyprodukować. Jeżeli wiatrak będzie niedociążony, to rozwinie zbyt duże obroty i również nie będzie dostarczać tyle mocy, co byłoby w granicach osiągów optymalnych.

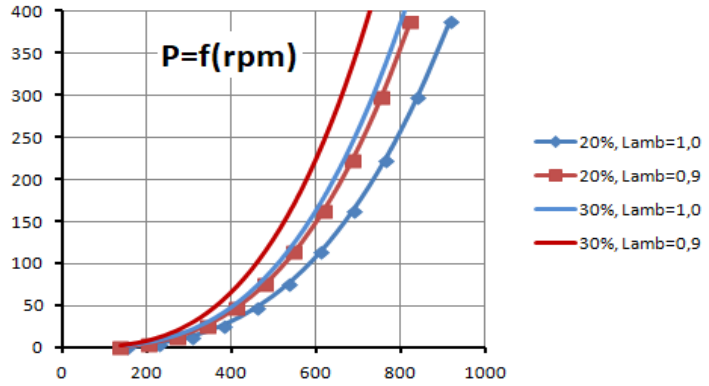
Własne badania wirników w innowacyjnym wiatraku pokazały, że maksymalna moc osiągana jest przy obrotach dla których współczynnik λ (TSR) = 0,8 do 1,0. Mając taką informację można powiązać moc uzyskiwaną z danego wiatru z zadaną efektywnością i obrotami wirnika. Dzięki temu dla założonej prędkości wiatru możliwe jest wyliczenie mocy wiatraka w zależności od założonej efektywności. Jednocześnie, zakładając wartość współczynnika prędkości TSR (λ) możemy wyliczyć oczekiwaną prędkość obrotową wirnika. Przykładowe zależności dla wiatraka zainstalowanego na budynku IMP PAN zestawiono w tabeli 5.3 dla efektywności wiatraka 20 i 30% oraz dla λ = 0,9 oraz 1,0. Każdy generator dostarcza mocy tylko z połowy wiatraka, dlatego poniższe wyliczenia dotyczą tylko połówki wiatraka o powierzchni A = 1,8 m^2.

Wyliczono moc strumienia powietrza uzyskiwaną z powierzchni równej połowie przekroju turbiny (druga kolumna tabeli 5.3) dla określonej prędkości wiatru. Moc na generatorze wynika z założonej efektywności systemu. W trzeciej i czwartej kolumnie zestawiono oczekiwaną moc przy 20 i 30% efektywności wiatraka.

Tabela 5.3 Wyniki obliczeń mocy dla turbiny 800W

V wiatru	Moc wiatru na stronę [W]	Moc oczekiwana 20%	Moc oczekiwana 30%	λ=1,0 RPM	λ=0,9 RPM
2	9,0	1,8	2,7	152,8	137,5
3	30,4	6,1	9,1	229,2	206,3
4	71,9	14,4	21,6	305,6	275,0
5	140,5	28,1	42,2	382,0	343,8
6	242,8	48,6	72,8	458,4	412,5
7	385,6	77,1	115,7	534,8	481,3
8	575,6	115,1	172,7	611,2	550,0
9	819,5	163,9	245,9	687,5	618,8
10	1124,1	224,8	337,2	763,9	687,5
11	1496,2	299,2	448,9	840,3	756,3
12	1942,5	388,5	582,8	916,7	825,1

Relacja pomiędzy prędkością wiatru a obrotami wirnika jest bardzo istotna. Tabela 5.3 podaje obroty wirnika dla λ = 1,0 oraz dla 0,9. Rysunek 5.8 ilustruje zależność oczekiwanej mocy [W] od prędkości obrotowej wirnika [obr/min].

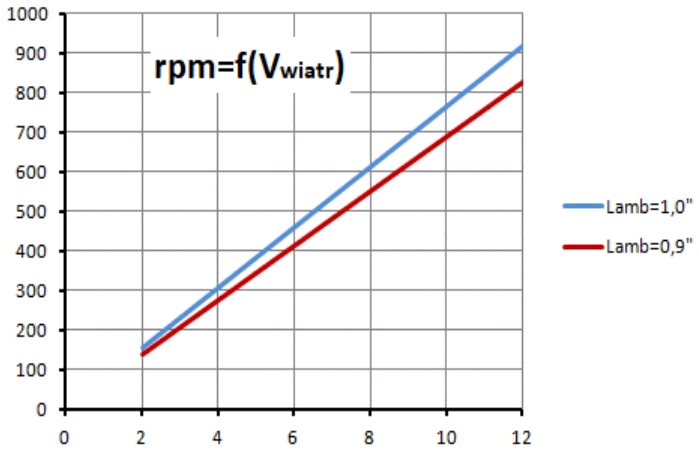


Rys. 5.8 Zależność mocy od obrotów wirnika dla wiatraka 800W.

Istotnym jest to, że jeżeli wyznaczymy wartość TSR, dla którego uzyskiwana jest maksymalna moc, to zależność pomiędzy obrotami, przy których osiągalna jest maksymalna moc, a prędkością wiatru jest liniowa. Na rysunku 5.9 pokazano tą zależność dla TSR = 1,0 oraz dla TSR = 0,9.

Algorytm obciążania wiatraka wykorzystuje tą zależność, że maksymalne moce uzyskiwane są przy stałym TSR niezależnie od prędkości wiatru. Tak więc dla zarejestrowanej prędkości obrotowej wirników wystawiane jest obciążenie. Ta zależność obciążenia od prędkości obrotowej wirnika jest najważniejsza dla

właściwej eksploatacji wiatraka. Musi ona być właściwie dobrana i zależy od typu wiatraka.



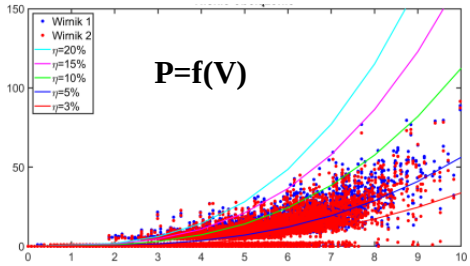
Rys. 5.9 Zależność obrotów dla maksymalnej mocy od prędkości wiatru

Wyniki badań przedstawione w rozprawie uzyskane są dla zadanych charakterystyk obciążeń. Obroty były mierzone dla danej chwili a moc zadawana z poprzedniego kroku. Przy słabo zmiennych wiatrach to „opóźnienie" nie ma znaczenia, natomiast przy silnie zmiennych wiatrach relacja „obroty – moc" może być nieodpowiednia.

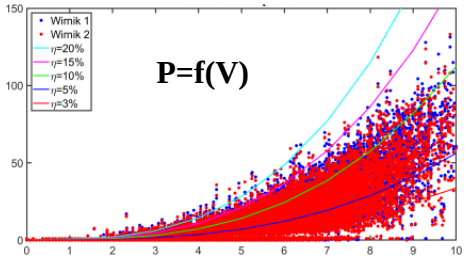
W badaniach analizowano cztery poziomy mocy w zależności od obrotów. Było to „słabe obciążenie", „średnie obciążenie", „duże obciążenie" i „bardzo duże obciążenie".

Wykresy na rysunkach 5.10, 5.11, 5.12 oraz 5.13 przedstawiają zależność pomiędzy prędkością wiatru a pozyskaną mocą. Dla porównania przedstawiono krzywe odpowiadające efektywności 5% - 20%.

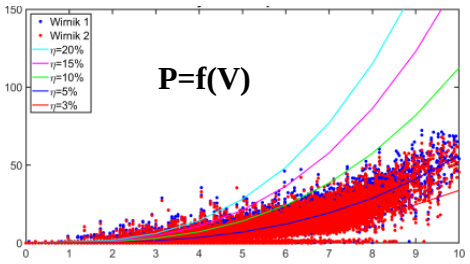
Niska efektywność produkcji energii elektrycznej (Rys. 5.10, 5.11, 5.12, 5.13) stoi w wyraźnej sprzeczności z symulacjami numerycznymi i pomiarami wirników w tunelu. Należy jednak zaznaczyć, że na wykresach pokazano moc pomierzoną na zaciskach generatorów. Czyli po uwzględnieniu niskiej sprawności elektrycznej zastosowanych generatorów oraz po stratach mechanicznych w łożyskach wirnika i generatorów. Stale otwartym pytaniem jest na ile adekwatny jest pomiar wiatru przy jego silnych pulsacjach. Szczególnie silne średnie wiatry obarczone są często bardzo szybkimi pulsacjami. Wiadomo, że takie duże fluktuacje występują w przypadku opływu budynków, tak jak to ma miejsce w analizowanej aplikacji turbiny.



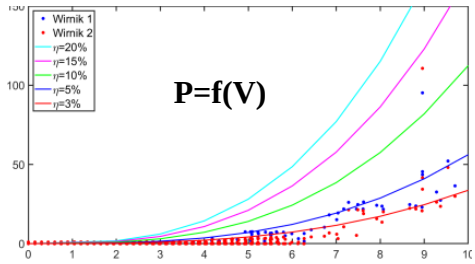
Rys. 5.10 Słabe obciążenie



Rys. 5.11 Średnie obciążenie



Rys. 5.12 Mocne obciążenie



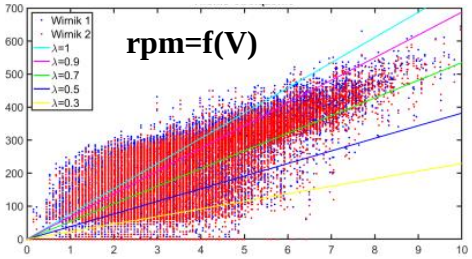
Rys. 5.13 Bardzo mocne obciążenie

W przypadku testowania nowego wiatraka szczególnie istotnym jest pytanie o poprawność charakterystyki obciążania wiatraka. Ta funkcja realizowana jest w dużej mierze hardwarowo i wszelkie większe modyfikacje wymagają ingerencji w układy elektroniczne. Wyniki badań zarejestrowanych na rysunkach 5.10 i 5.11 pokazują, że to dla najmniejszych obciążeń uzyskano największe moce, z efektywnością około 10%.

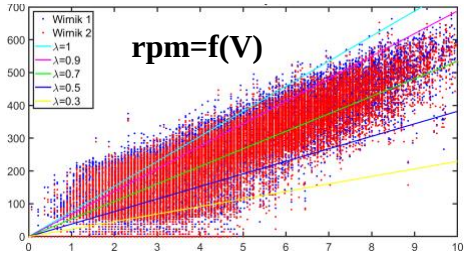
Właściwość obciążania wirnika może być zweryfikowana poprzez analizę współczynnika prędkości TSR (λ) dla przeprowadzonych pomiarów.

Zależność obrotów wirnika od prędkości wiatru dla wszystkich czterech obciążeń wiatraka pokazano na rysunkach 5.14, 5.15, 5.16 oraz 5.17. Na tych wykresach zaznaczono liniowe charakterystyki dla TSR od 0,3 do 1,0. Dla każdej chmury wirników można dopasować średnią wartość TSR. Okazuje się, że taka dopasowana wartość TSR jest wyraźnie poniżej $\lambda = 0{,}8$. Stąd narzuca się naturalnie wniosek, że zastosowany charakter obciążenia powodował za duże wyhamowanie wirnika i nie pozwalał na uzyskanie maksymalnej mocy, która jest osiągana przy $\lambda \approx 1.0$ dla innowacyjnego wiatraka. Z tego wynika, że wiatrak ma potencjał dostarczenia większej mocy, jeżeli zmniejszymy obciążenie wirnika.

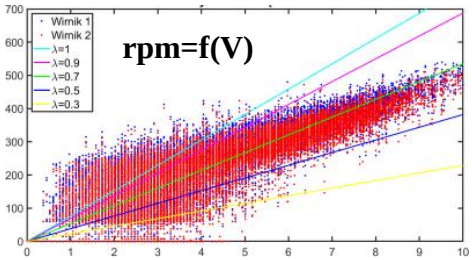
Na rysunkach 5.14, 5.15, 5.16 oraz 5.17 przedstawiono bardzo duży rozrzut prędkości wiatru dla danej prędkości obrotowej. Z wykresów wynika, że dla danej prędkości obrotowej wirnika częściej rejestrujemy większe prędkości wiatru niż mniejsze. Zachowanie chmury wyników wskazuje na możliwość zmieniającego się charakteru zależności Vw = f(n) w zależności od prędkości wiatru. Oznaczać to może, że założenie stałego TSR dla maksymalnej mocy nie jest w pełni słuszne.



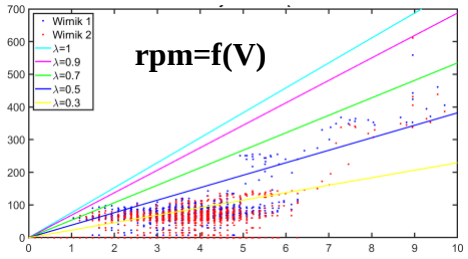
Rys. 5.14 Słabe obciążenie



Rys. 5.15 Średnie obciążenie



Rys. 5.16 Mocne obciążenie



Rys. 5.17 Bardzo mocne obciążenie

Hardwareowa realizacja systemu sterowania analizowanego innowacyjnego wiatraka 800W pozwala na dalsze badania i optymalizację algorytmu zadawania obciążenia dla wiatraka.

Podsumowanie

Dedykowane wiatrakom przygotowane oprogramowanie w systemie pomiarowo-kontrolnym wykorzystane jest w trzech instalacjach (0.5kW, 2kW i 4kW). Podstawowym celem systemu jest wyznaczenie zależności mocy generowanej od prędkości wiatru oraz ich archiwizacja. Analogicznie do danych przedstawiających zależności mocy generowanej od prędkości wiatru system wyznacza zależności opisujące zależność mocy od obrotów wirników. Zarówno prędkość wiatru jak i moc wytracona w obciążeniu to wielkości mierzone przez system i zapisywane w danych pomiarowych. Opracowano metodologię wyznaczania charakterystyk turbin.

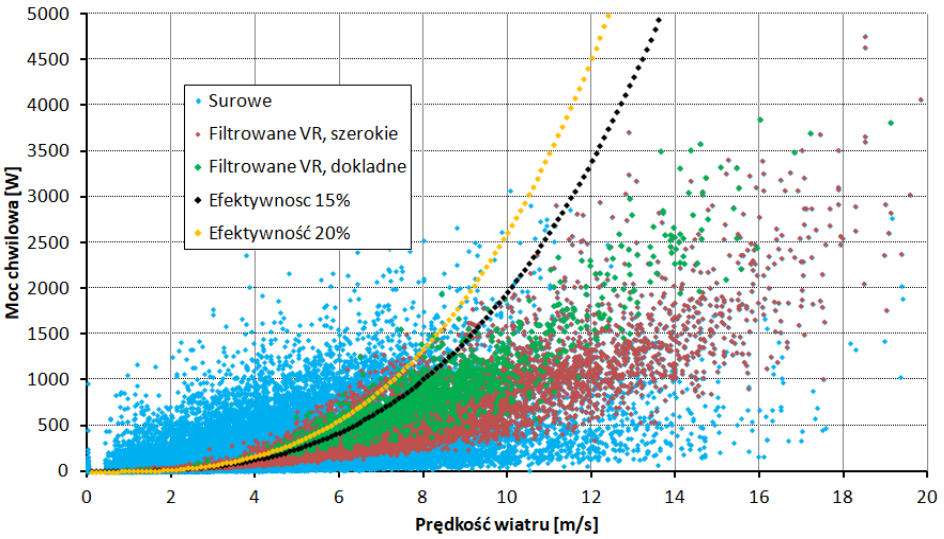
Badania przeprowadzone na stanowisku badawczym wykazały, że zainstalowany system obciążania wiatraka jest zbyt intensywny i nie pozwala na rozwinięcie maksymalnych możliwości wiatraka.

5.2.2. Badania laboratoryjne w CTO

W Centrum Techniki Okrętowej CTO badano turbiny 2 i 4 kW. Metodyka badań możliwości weryfikacji wiatraka w CTO była bardziej złożona niż w przypadku wiatraka w IMP PAN. Badania prowadzono w ramach projektu typu GEKON, wspólnie z CTO, WIENERG i InvertEnergy.

Zadawano różne charakterystyki obciążania wiatraka, a analiza uzyskanych pomiarów pozwala na wyciąganie wniosków, co do dalszych możliwości procesu poszukiwania maksymalnej mocy.

Przykładowe wyniki eksperymentu w zakresie działania wiatraka, przy pewnej funkcji obciążenia przedstawiono na rysunku 5.18.



Rys. 5.18 Przykładowy pomiar mocy wiatraka 4 kW w funkcji prędkości wiatru

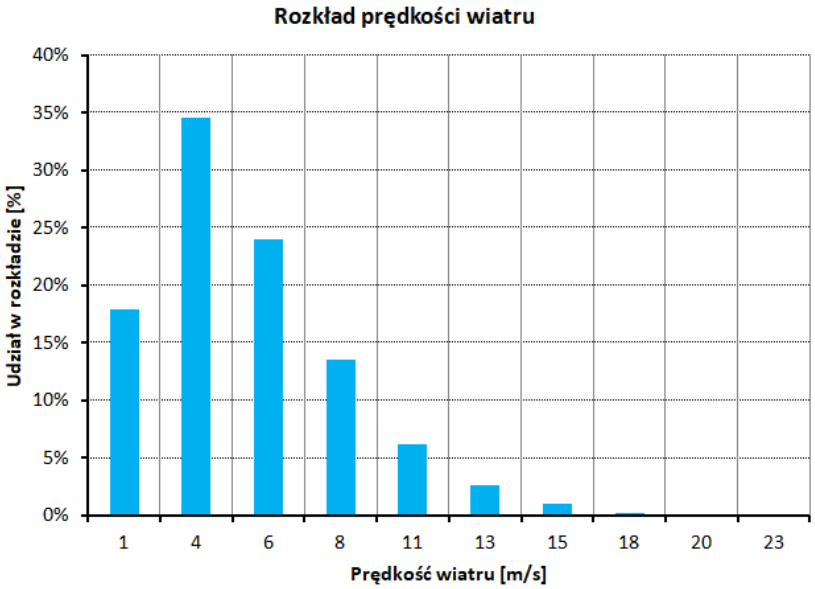
Widoczna jest wielka różnorodność rozkładu punktów pomiarowych, Na ich tle przedstawiono krzywe dla 15% oraz 20% efektywności wiatraka. Duża intensywność fluktuacji prędkości wiatru powoduje olbrzymi rozrzut uzyskiwanej mocy. Jest to wynikiem tego, że pewne pomiary dotyczą przypadku, gdy wirnik jest silnie rozkręcony a wiatr ustaje, lub gdy wiatr gwałtownie przyspiesza a wirnik jeszcze nie uzyskał właściwych obrotów. Punkty eksperymentalne można posegregować względem wartości TSR, która dla właściwej pracy wirnika powinna wynosić około λ=1,0.

Podział tych punktów został uzyskany przez odpowiednie filtrowanie. Kolorem brązowym zaznaczono punkty pomiarowe o $0{,}8 < \lambda < 1{,}2$ natomiast kolorem zielonym oznaczono punkty z zakresu $0{,}9 < \lambda < 1{,}1$.

Dla zadanej charakterystyki obciążenia, szczególnie dla małych prędkości wiatru (do 8 m/s) badany wiatrak wykazuje się 15% - 20% efektywnością. Dla

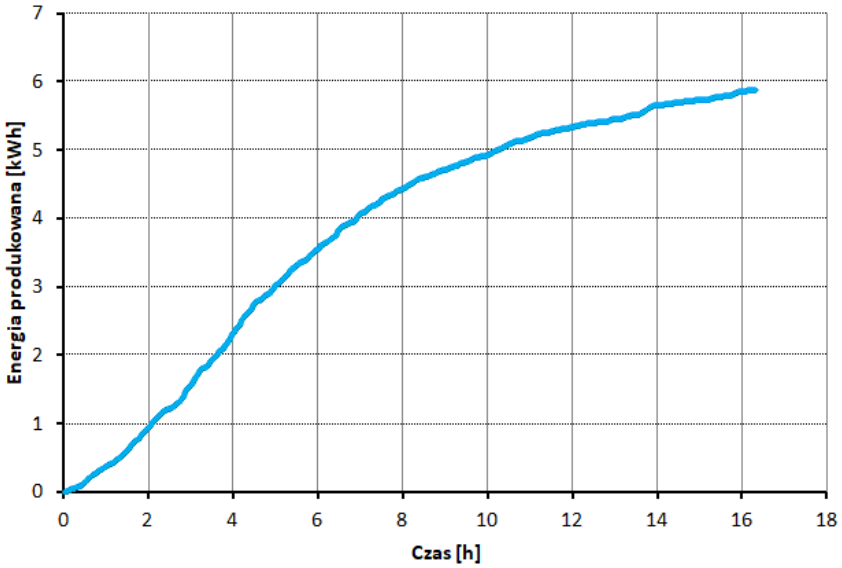
większych prędkości wiatru turbina wykazuje mniejszą efektywność. Pozostawia to miejsce na dalsze doskonalenie charakterystyk obciążania wiatraka, szczególnie w obszarze dużych mocy. Jest to wniosek potwierdzający wyniki uogólnione otrzymane w badaniach polowych w IMP PAN.

Rozkład prędkości wiatru w ramach przeprowadzonego cyklu pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.19.



Rys. 5.19 Rozkład prędkości wiatru w przeprowadzonym cyklu pomiarowym

Prędkość wiatru w czasie badań 5wynosiła około 5 m/s chwilami ze sporym udziałem wiatrów rzędu 8 m/s. W trakcie trwania pomiarów wyprodukowana energia przyrastała w sposób pokazany na rysunku 5.20. Wykres pokazuje, że w czasie jednej doby wyprodukowane byłoby około 10 kWh. Co dla powierzchni 20 m^2 oznacza produkcje rzędu 0,5 kWh/m^2/dzień. Jeżeli traktować taką produkcję jako średnią roczną to w roku oczekiwać można by 180 kWh/m^2/rok. Taki wynik, odnosząc się do mapy energii w wietrze (Rys. 1.14), oznaczałby, że traktując naszą strefę jako „dość korzystna" efektywność wykorzystania energii wiatru jest na poziomie 20%.

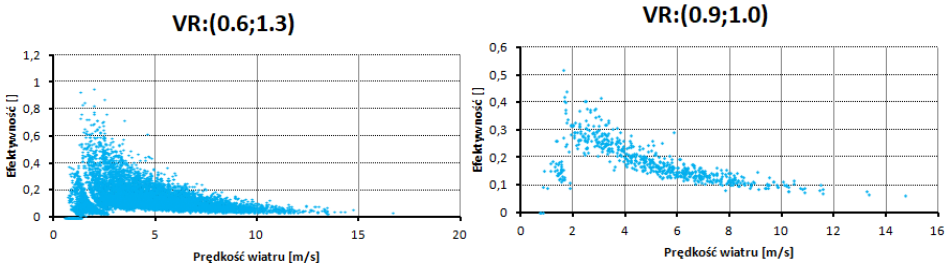


Rys. 5.20 Przyrost wyprodukowanej mocy.

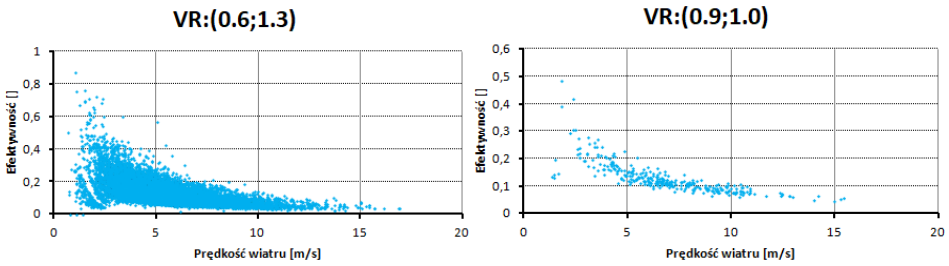
W dalszej części eksperymentu zaproponowano jeszcze inną metodę poszukiwania możliwości określenia produkcji energii przez wiatrak. Zadano stałe obciążenie, i prowadzono pomiary przez określony czas obejmujący różne prędkości wiatru. Obciążenie zadawano przez stałą wartość rezystancji. Tak arbitralnie zadane obciążenie może być jedynie dobrze dopasowane do jednej prędkości wiatru. Z wielkiej ilości punktów pomiarowych należy wybrać te, dla których ta moc jest odpowiednia. Jedyną możliwością jest poszukiwanie przypadków, w których TSR jest rzędu $\lambda = 1.0$.

Na rysunkach 5.21, 5.22 oraz 5.23 przedstawiono wyniki uzyskane przy rezystancjach 28 Ohm, 35 Ohm oraz 88 Ohm. Na tych wykresach przedstawiono punkty pomiarowe, spełniające zadane kryterium wartości TSR. Pierwszy wykres pokazuje szeroką chmurę danych o wartościach $0,6 < TSR < 1,3$, a drugi wykres zawęża punkty do zakresu $0,9 < TSR < 1,0$.

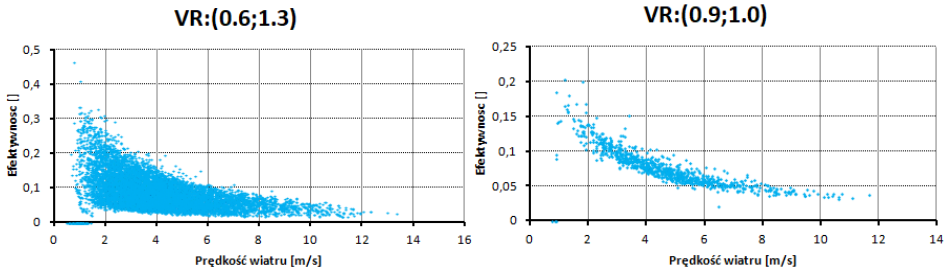
Punkty wybrane dla zakresu $0,9 < TSR < 1,0$ dają bardzo istotną informację. Od wartości rezystancji zależy istotnie poziom efektywności wiatraka. Najwyższy poziom efektywności dotyczy najmniejszej rezystancji. Tak więc wybrane rezystancje przeciążają wirniki, jak już zauważono w analizie wyników z prototypu w IMP PAN.



Rys. 5.21 Punkty pomiarowe dla rezystancji 28 Ohm



Rys. 5.22 Punkty pomiarowe dla rezystancji 35 Ohm



Rys. 5.23 Punkty pomiarowe dla rezystancji 88 Ohm

Niestety z tych punktów pomiarowych nie daje się zauważyć, które są błędne a które wynikają faktycznie z dynamiki wiatru. Można jednak przypuszczać, że niskie efektywności dotyczą przypadków, gdy wiatr przyspiesza bardzo silnie a wirnik bezwładnie się opóźnia. Natomiast wysokie efektywności pojawiają się wtedy, gdy wirnik jest rozpędzony a wiatr gwałtownie maleje. Jeżeli przyjąć by, że średnie wartości są uzyskiwane przy wietrze rzędu 4-5 m/s to dla najmniejszej rezystancji efektywność wynosi około 20%, dla średniej 13% a dla największej około 7%.

Przedstawione wyniki pozwalają wnioskować, że dla postaci konstrukcyjnej innowacyjnego wiatraka średni poziom efektywności pracy powinien wynosić około 20%, co jest wynikiem bardzo satysfakcjonującym. Przedstawione wyniki pokazują, że wiele można osiągnąć przez właściwy algorytm obciążania wiatraka.

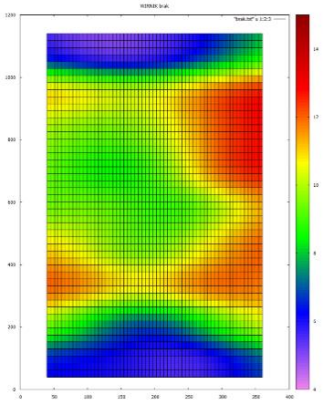
Podsumowanie

Wyniki uzyskane na prototypie w IMP PAN oraz w CTO pokazują, że już teraz zastosowane algorytmy obciążania wiatraka dają zadawalające efektywności dla małych prędkości do 8 m/s. Powyżej tej prędkości zastosowane metody prowadzą do znacznie mniejszych efektywności. Należy jednak rozważyć, czy te mniejsze efektywności są korzystne, ponieważ przy dużym wietrze moce dostarczane przez wiatr przekraczają moce, nominalne dla wiatraków prosumenckich. Oczywiście nadwyżkę mocy można rozproszyć, ale jeżeli nie zostanie ona wyprodukowana to też jest korzystne rozwiązanie.

5.3. BADANIA LABORATORYJNE

5.3.1. Badania wirników turbin wiatrowych

Wykres przedstawiony na rysunku 5.24 pokazuje rozkład prędkości na wylocie tunelu dla przypadku pomiarowego zwanego V3, przy prędkości wewnątrz tunelu równej 7,5 m/s. Prędkość ta jest umowna i niezbędna do celów nastawczych stanowiska. Do analizy badań pod uwagę brana jest średnia prędkość strugi powietrza na wylocie. Na rysunku 5.24 pokazano przypadek bez zamontowanego wirnika. Prędkość strugi mierzona była w dziewięciu kolumnach i jedenastu wierszach, czyli w 99 punktach pomiarowych. Rozkład predkości na wylocie jest nieregularny. Spowodowane to jest konstrukcją tunelu i charakterystyką wentylatora.



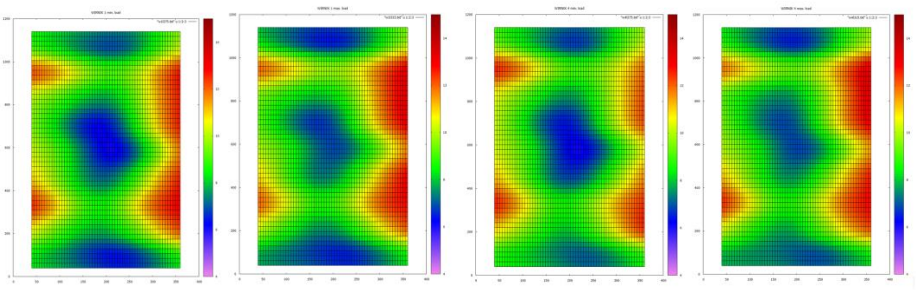
Rys. 5.24 Rozkład prędkości powietrza
na wylocie z tunelu bez wirnika

Założenie wirników ma wpływ na wylotowe pole predkości, co jest przedstawione na rysunku 5.25. Przedstawiono cztery ilustracje ponieważ dla każdej konstrukcji przedstawiają one warunki przy minimalnym i maksymalnym odbiorze mocy od wirnika. Jak widać różnice nie są znaczące poza przyśpieszeniem na krawędziach pionowych tunelu co jest spodziewanym efektem. Jak wykazał eksperyment minimalna moc odbierana, obarczona jest stratami na łożyskach, sprzęgle i generatorze. Jest to efekt wspólny dla obu przypadków [60,61].

Istotnym jest, że wirniki umieszczone były w takiej samej strudze. Pomiary dotyczyły generowanego momentu i obrotów. Z tych pomiarów powstała praca dyplomowa na Politechnice Gdańskiej [60].

Podstawowe pomiary dotyczyły określenia prędkości strugi napędzającego powietrza V [m/s], która była mierzona w wybranym miejscu w kanale, na tyle daleko przed wirnikiem, że jego obecność nie miała już wpływu. Kolejnym parametrem był moment na wale wirnika M [Nm], który był regulowany poprzez obciążenie generatora, który pełnił rolę hamulca. Ostatnim istotnym parametrem była prędkość obrotowa wirnika n [1/s].

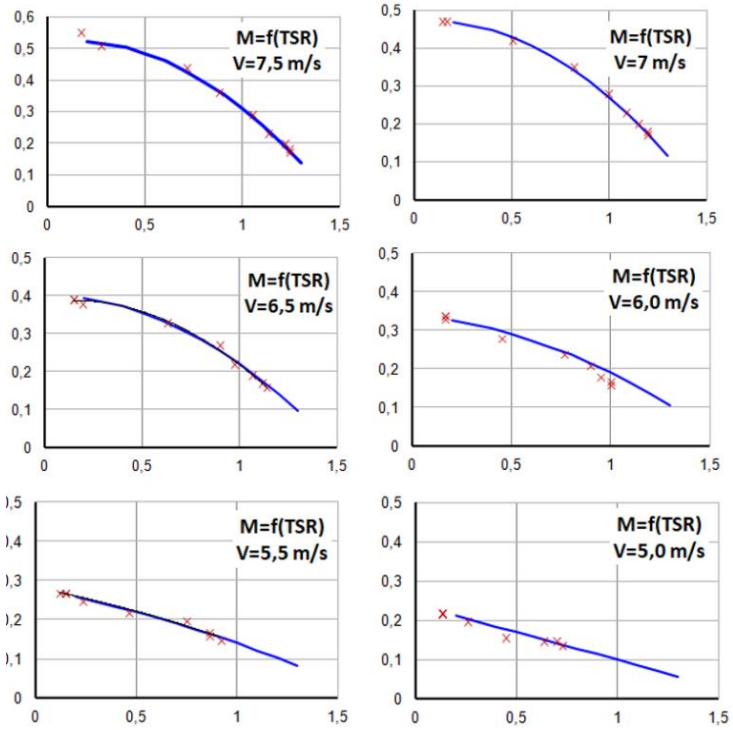
a) b)



Rys. 5.25 Rozkład prędkości powietrza dla minimalnego i maksymalnego odbioru mocy na wylocie z tunelu z wirnikiem a) jednomodułowym i b) czteromodułowym,

Pomiary wirnika jednosegmentowego

Dla każdej prędkości strugi napędzającej zadawano kilka obciążeń, dzięki którym uzyskiwano charakterystykę momentów obrotowych w zależności od obrotów wirnika. Na poniższych wykresach (Rys. 5.26) przedstawiono moment w funkcji TSR, a więc prędkości obwodowej wirnika odniesionej do prędkości strugi napędzającej.



Rys. 5.26 Moment wirnika w funkcji prędkości obrotowej dla wirnika jedno modułowego dla różnych prędkości wiatru

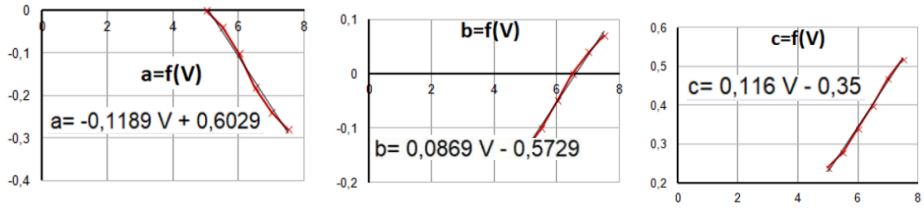
Charakter krzywej momentu zmienia się w zależności od prędkości strugi. Dla dużych prędkości jest wypukłą krzywą drugiego rzędu, a dla małych prędkości strugi staje się zależnością liniową. Podobne wyniki przedstawiono w pracach innych badaczy [62]. Linia ciągła na powyższych wykresach jest aproksymacją punktów pomiarowych. Współczynniki krzywych drugiego rzędu wykreślonych na powyższych wykresach podane są w tabeli 5.4.

Tabela 5.4 Współczynniki krzywych aproksymujących wyniki pomiarów

V [m/s]	**a** [-]	**b** [-]	**c** [-]
7,50	-0,28	0,07	0,52
7,00	-0,24	0,04	0,47
6,50	-0,18	0	0,4
6,00	-0,1	-0,05	0,34
5,50	-0,04	-0,1	0,28
5,00	0	-0,14	0,24

Okazuje się, że wartość tych współczynników jest zależna od prędkości wiatru w sposób prawie liniowy. Współczynniki z tabeli 5.4 krzywych aproksymujących na wykresach (Rys. 5.27) zostały tak dobrane aby współczynniki były liniowo zależne od prędkości strugi. Zostało to przedstawione na wykresach na rysunku 5.27

Na wykresach podano zależności liniowe pozwalające na wyznaczenie wartości współczynników równania kwadratowego. Równania te mają postać graficzną przedstawioną na rysunku 5.27

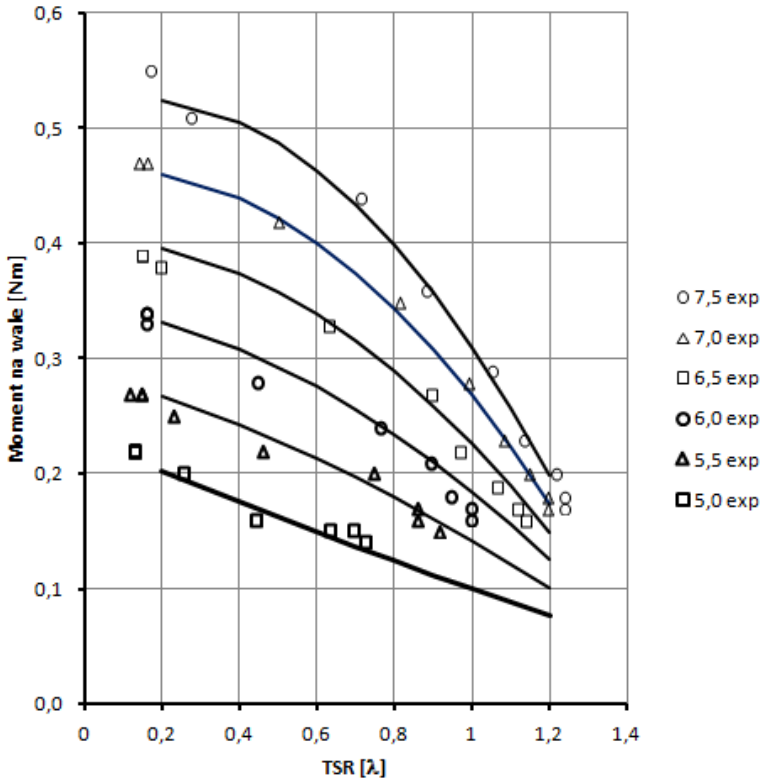


Rys. 5.27 Zależność współczynników (a, b, c) od prędkości napływu V

W konsekwencji równanie opisujące funkcję aproksymacji ma następującą postać:

$$M = (-0{,}1189\,V+0{,}6029)\,TSR^2+(0{,}0869\,V-0{,}5729)\,TSR+(0{,}116\,V-0{,}35) \quad (5.3.1.1)$$

Zestawienie krzywych aproksymujących oraz wyników pomiaru momentu przedstawiono na rysunku 5.28.

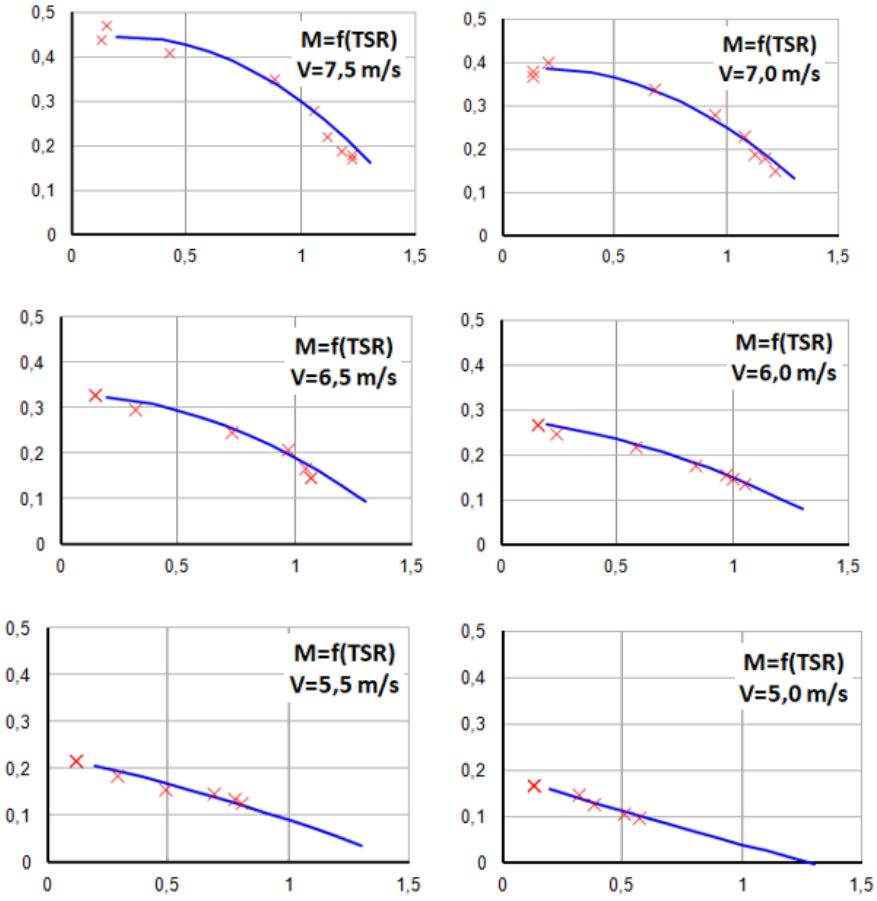


Rys. 5.28 Wyniki eksperymentów i ich aproksymacja dla wirnika jedno modułowego

Pomiary wirnika czterosegmentowego

Tak jak dla wirnika jednomodułowego, dla każdej prędkości strugi napędzającej zadawanych było kilka obciążeń, dzięki którym uzyskiwano charakterystykę momentów obrotowych w zależności od obrotów wirnika. Na wykresach (Rys. 5.29) przedstawiono moment w funkcji TSR, a więc prędkości obwodowej wirnika odniesionej do prędkości strugi napędzającej.

Charakter krzywej momentu zmienia się w zależności od prędkości strugi. Dla dużych prędkości jest wypukłą krzywą drugiego rzędu, a dla małych prędkości strugi staje się zależnością liniową. Linia ciągła na powyższych wykresach jest aproksymacją punktów pomiarowych. Współczynniki krzywych drugiego rzędu wykreślonych na powyższych wykresach (Rys. 5.29) podane są w tabeli 5.5.



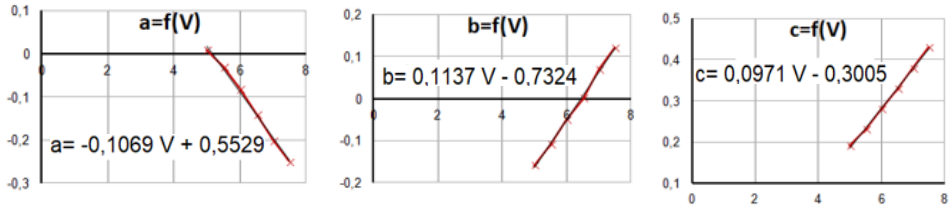
Rys. 5.29 Moment wirnika w funkcji prędkości obrotowej dla wirnika cztero modułowego

Tabela 5.5 Współczynniki krzywych aproksymujących wyniki pomiarów

V [m/s]	**a** [-]	**b** [-]	**c** [-]
7,50	-0,25	0,12	0,43
7,00	-0,2	0,07	0,38
6,50	-0,14	0	0,33
6,00	-0,08	-0,05	0,28
5,50	-0,03	-0,11	0,23
5,00	0,01	-0,16	0,19

Współczynniki (Tabela 5.5) krzywych aproksymujących na wykresach rysunek 5.30 zostały tak dobrane, aby współczynniki były liniowo zależne od prędkości strugi. Zostało to przedstawione na wykresach na rysunku 5.30.

Na wykresach podano zależności liniowe pozwalające na wyznaczenie wartości współczynników równania kwadratowego. Równania te mają następującą formę:



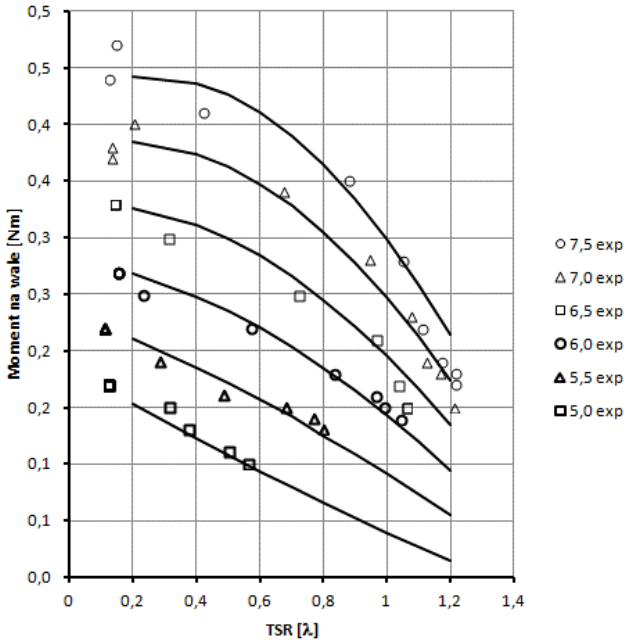
Rys. 5.30 Zależność współczynników a, b i c od prędkości napływu V

Równanie opisujące funkcję aproksymacji ma postać:

$$M = (-0{,}1069\,V+0{,}5529)\,TSR^2+(0{,}1137\,V-0{,}7324)\,TSR+(0{,}0971\,V-0{,}3005) \quad (5.3.1.2)$$

Zestawienie krzywych aproksymujących oraz wyników pomiaru momentu przedstawiono na rysunku 5.31

Należy zwrócić tu uwagę, że maksymalna moc produkowana jest przez wirnik przy obrotach w zakresie 0,7 < TSR < 0,9. Słaba jakośc aproksymacji dla małych TSR oraz dla wiekszych od TSR>1,0 nie ma wiekszego znaczenia dla chraktrystyki wirnika.



Rys. 5.31 Wyniki eksperymentów i ich aproksymacja dla wirnika czteromodułowego

Porównanie charakterystyk wirników

Charakterystyka wirnika dotyczy generowanej mocy. Dąży się wiec do wyznaczenia zależności P = f (TSR). Z przeprowadzonych pomiarów wyznaczenie mocy polega na wyliczeniu:

$$P = M \omega$$

gdzie $\omega = n\, 2\, \pi$

biorąc pod uwagę, że $TSR = n\, 2\, \pi\, R / V = \omega\, R / V$

otrzymano: $\omega = TSR\, V / R$

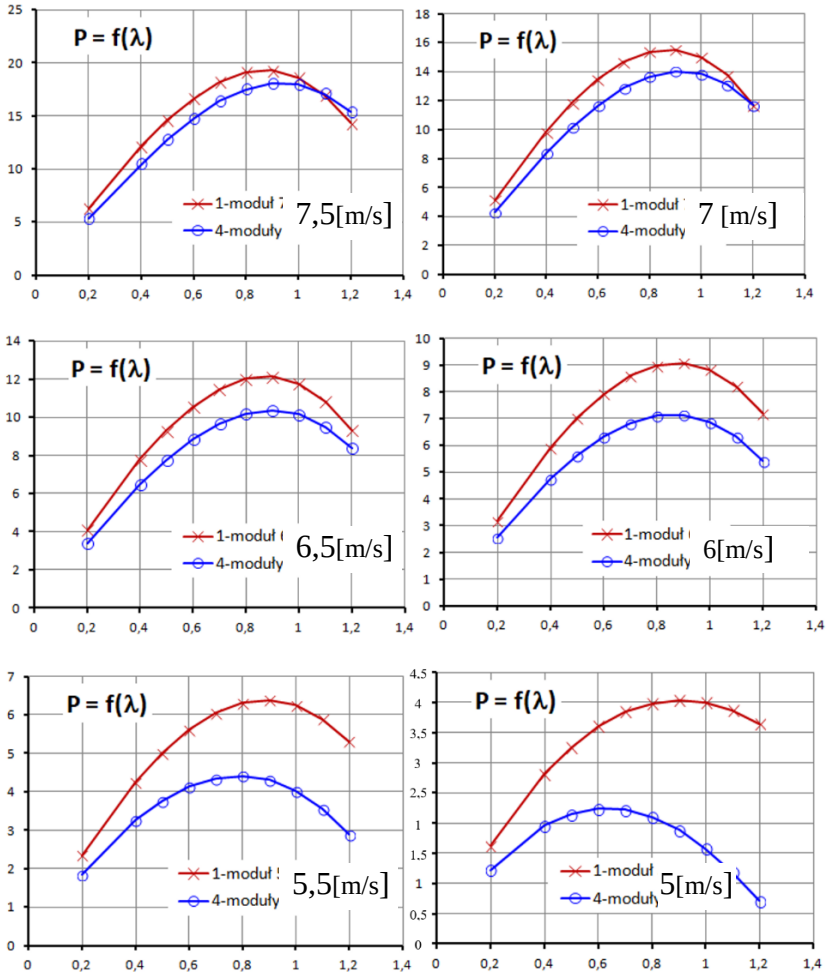
Dane zawarte w pomiarach opisanych w poprzednim rozdziale pozwalają więc na wyliczenie charakterystyk mocy dla wszystkich przebadanych przypadków.

Celem analizy jest porównanie wirnika jednosegmentowego z czterosegmentowym. Dlatego dla każdej z przebadanych prędkości strugi powietrza przedstawiono charakterystyki mocy obu wirników na jednym wykresie (Rys. 5.32).

Dla całego zakresu badanych prędkości strugi powietrza wirnik jednomodułowy wykazuje wyższą moc niż wirnik czteromodułowy. Różnica ta jest nieznaczna przy wysokiej prędkości wiatru, ale staje się bardzo istotna przy słabych wiatrach.

W przypadku wirnika jednomodułowego maksymalna moc uzyskiwana jest stale dla tej samej wartości TSR = 0,9. W przypadku wirnika czteromodułowego TSR dla maksymalnej mocy maleje wraz ze zmniejszaniem się prędkości wiatru. Jest to istotna różnica zachowania obu wirników.

Należy również zauważyć, że im mniejsza prędkość strugi tym większa staje się różnica w uzyskiwanej mocy pomiędzy wirnikami. Dla najmniejszej prędkości v = 5,0 m/s moc wirnika jednomodułowego jest dwukrotnie wyższa od mocy wirnika czteromodułowego. Ta znaczna różnica występuje przy małej prędkości wiatru, ale bardzo istotnej dla pracy wiatraka.



Rys. 5.32 Porównanie charakterystyk mocy P [W] obu wirników

5.3.2. Generatory

W użytkowaniu turbin wiatrowych generatory odgrywają istotną rolę. Ich sprawność wpływa na efektywność elektrowni wiatrowej. Niestety często dane dostarczane przez producentów pozostawiają wiele niewiadomych w związku z czym skonstruowano i zbudowano, stanowisko badawcze dla wyznaczenia podstawowych charakterystyk generatorów.

Na zaprojektowanym i wykonanym autorskim stanowisku przebadano różne generatory, jednak przedstawione zostaną wyniki jednego, zdaniem autora najlepszego rozwiązania, AFPMG330. Generator ten został przebadany zarówno na stanowisku laboratoryjnym jak i w warunkach badań polowych.

Stosowany generator AFPMG330 jest maszyną elektryczną z neodymowymi magnesami stałymi bez rdzenia magnetycznego z wewnętrznym rotorem, czyli tak zwaną potocznie „amerykanką". Ten generator był zastosowany w badanych prototypach w laboratorium CTO. Dane katalogowe producenta przedstawiono w tabeli 5.6:

Tabela 5.6 Specyfikacja generatora AFMPG330-1.0

AFPMG330-1.0KW 350RPM 112VDC

Technical Parameters

No.	Parameter	Units	Data
1	Rated output power	KW	1.0
2	Rated speed	RPM	350
3	Rated output voltage	VDC	112（83 VAC）
4	Rated current	A	6.96
5	Phase Resistance	Ω	20℃ 0.64Ω
6	Output wire square section	mm^2	2 mm^2
7	Efficiency at rated speed		>85%
8	Winding type		Y
9	Insulation resistance		100Mohm Min(500V DC)
10	Voltage withstand	ma	<5 ma
11	Insulation		H class
12	Start torque	Nm	<0.3
13	Temperature rise	℃	<80
14	Max. working temperature	℃	<120
15	Generator diameter	mm	330
16	Shaft diameter	mm	45
17	Housing material		Aluminum Alloy
18	Shaft material		Steel
19	Bearing		NSK
20	Weight	Kg	23
21	Design lifetime	Year	>20

Producent generatorów przedstawia dokładne wyniki pomiarów (Tabela 5.7) dzięki czemu możliwe jest porównanie parametrów pracy generatora określonych przez producenta z wynikami przeprowadzonych badań własnych.

Tabela 5.7 Wyniki testów producenta dla badanego generatora AFMPG330-1.0

Testing Data

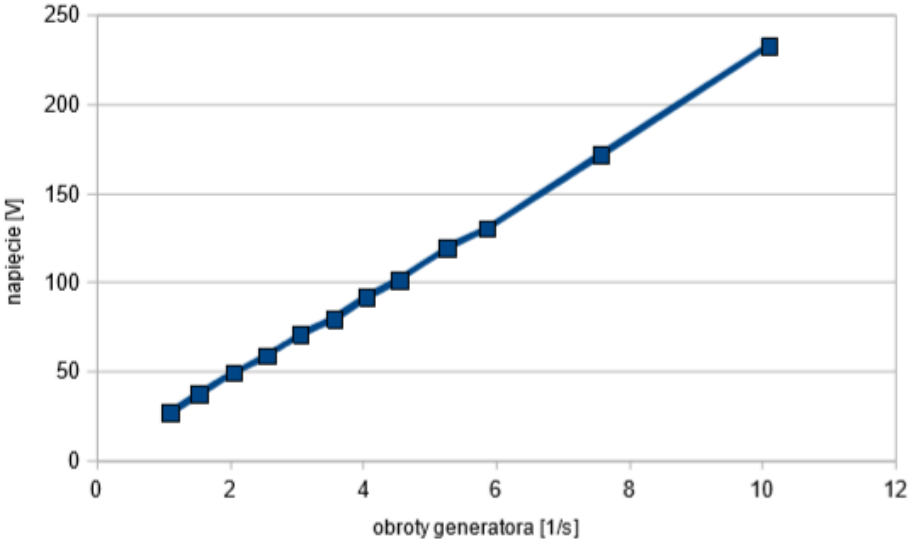
Speed (RPM)	NO-Load voltage (VAC)	Load voltage (VAC)	Load current (A)	Load power (W)	Torque (N.m)	Efficiency (%)	Frequency (Hz)
420	109.2	100	8.35	1440.4	36.7	89.2	70
350	91.0	83	6.96	1000.3	30.7	88.9	58.3
280	72.8	66	5.57	640.2	24.8	88.2	46.7
210	54.6	50	4.18	360.1	18.9	86.8	35
140	36.4	33	2.78	160.0	13.1	83.1	23.3
70	18.2	17	1.39	40.0	8.1	67.3	11.7

Badania parametrów generatora rozpoczęto od wyznaczenia zależności napięcia na zaciskach generatora w funkcji obrotów wirnika bez obciążenia generatora. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 5.8 oraz na rysunku 5.33.

Tabela 5.8 Wyniki pomiarów zależności napięcia od obrotów generatora AFPMG330

nr	Obroty generatora [1/s]	Obroty generatora [RPM]	Napięcie U DC [V]
1	1,09	65,64	26,3
2	1,53	91,68	36,7
3	2,05	122,94	48,5
4	2,57	154,14	58,7
5	3,07	184,38	70,7
6	3,58	214,56	79,3
7	4,06	243,78	91,8
8	4,55	272,94	101,4
9	5,26	315,6	119,1
10	5,87	352,08	130,2
11	7,57	454,14	171,4
12	10,1	606,24	232,5

gdzie:
Napięcia podane w wynikach pomiarów są napięciami DC w [V]
Przełożenie silnik->->momentomierz = 3,6
Przełożenie momentomierz->->generator = 1,6



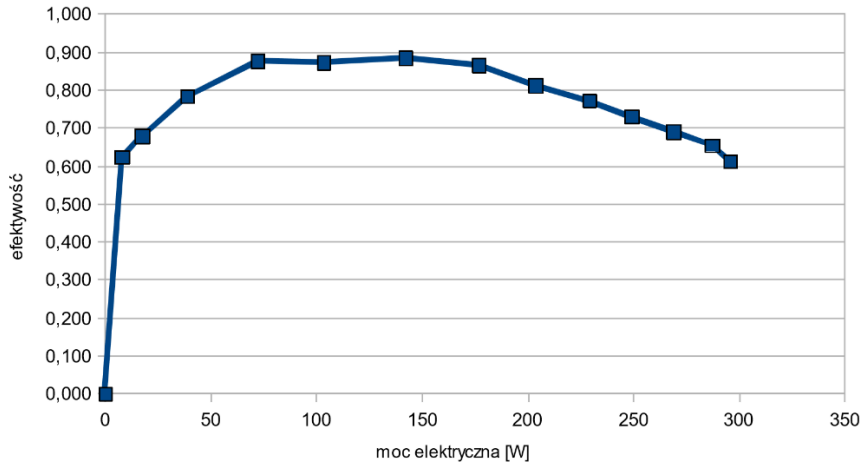
Rys. 5.33 Napięcie na zaciskach generatora AFPMG330 w funkcji prędkości obrotowej bez obciążenia

Pomiary wykonane zostały dla prędkości obrotowych 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 320, 350, 450, 600.

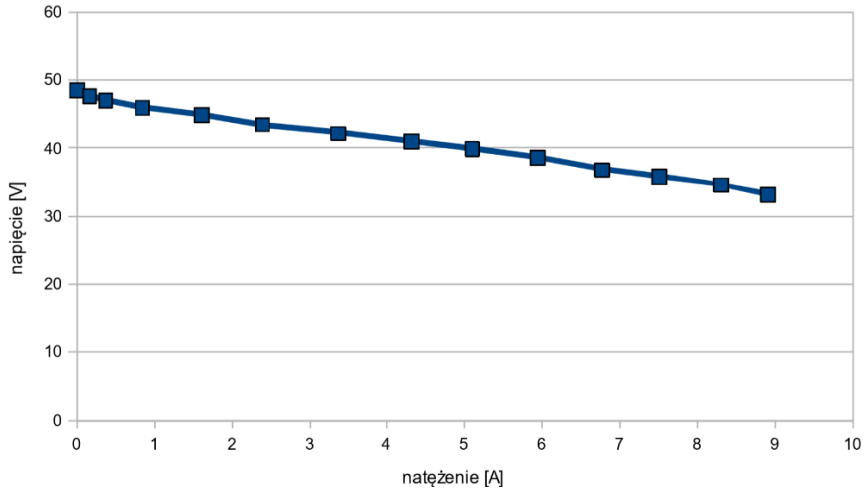
Wyniki pomiarów dla prędkości obrotowej 120 RPM zestawiono w tabeli 5.9 oraz przedstawiono na rysunkach 5.34 i 5.35, natomiast pozostałe dane wynikowe dla pozostałych prędkości obrotowych zestawiono w załączniku (aneks 2).

Tabela 5.9 Wyniki pomiarów dla 120 RPM

nr	Obroty silnika [1/s]	Obroty momento mierza [1/s]	Moment na wale momento-mierza [Nm]	Moc mechaniczna [W]	Obroty generatora [1/s]	Napięcie U[V]	Natężenie I[A]	Moc el. [W]	Efektywność []
1	11,8	3,28	0,3	6,238	2,05	48,5	0	0	0,000
2	11,8	3,28	0,63	13,031	2,05	47,7	0,17	8,11	0,622
3	11,8	3,28	1,25	25,650	2,05	47	0,37	17,39	0,678
4	11,8	3,28	2,42	49,838	2,05	45,9	0,85	39,02	0,783
5	11,8	3,28	4,01	82,570	2,05	44,9	1,61	72,29	0,875
6	11,7	3,25	5,8	118,337	2,03	43,4	2,38	103,29	0,873
7	11,7	3,25	7,89	160,994	2,03	42,2	3,37	142,21	0,883
8	11,7	3,25	10,02	204,508	2,03	41	4,31	176,71	0,864
9	11,7	3,25	12,3	251,043	2,03	39,9	5,1	203,49	0,811
10	11,7	3,25	14,58	297,557	2,03	38,6	5,94	229,28	0,771
11	11,6	3,22	16,89	341,836	2,01	36,8	6,77	249,14	0,729
12	11,6	3,22	19,29	390,398	2,01	35,8	7,51	268,86	0,689
13	11,6	3,22	21,73	439,648	2,01	34,6	8,3	287,18	0,653
14	11,5	3,19	24,08	482,984	2	33,2	8,91	295,81	0,612

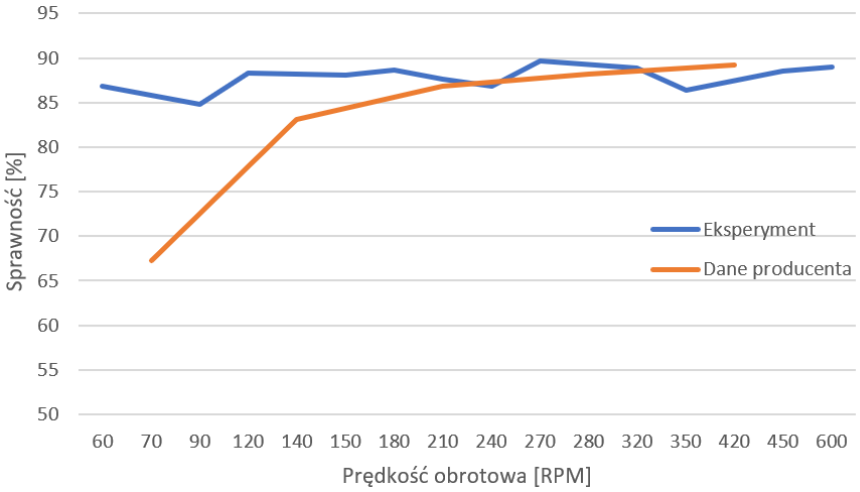


Rys. 5.34 Efektywność generatora AFPMG330 w funkcji mocy elektrycznej dla prędkości obrotowej 120RPM



Rys. 5.35 Napięcie na zaciskach generatora AFPMG330 w funkcji natężenia prądu dla prędkości obrotowej 120 RPM

Otrzymane wyniki badań zestawiono porównawczo na rysunku 5.36. Dokonano oceny w zakresie otrzymanych sprawności wynikowych z danymi deklarowanymi przez producenta. Z wyników badań przedstawionych na rysunkach 5.36 (również aneks 2) wynika, że badany generator AFPMG330 osiąga już przy niskich obrotach wysoką sprawność i co najważniejsze utrzymuje ją wraz ze wzrostem mocy wytwarzanej. Taka charakterystyka jest bardzo pożądana przy wykorzystaniu w turbinach wiatrowych.



Rys. 5.36 Porównanie wyników eksperymentu z danymi producenta dla generatora AFPMG330

Z przedstawionych danych wynika, że generator AFPMG330 charakteryzuje wysoka sprawność już od relatywnie niskich prędkości obrotowych. Dla obrotów około 150 [rpm] wysoka sprawność (około 87%) utrzymuje się w szerokim zakresie prądu obciążenia. Nominalna moc 1000W jest deklarowana przez producenta przy 350RPM. Przy pomiarach długotrwale obciążano generator mocą 1300W, przy obrotach nominalnych nie zarejestrowano widocznego wzrostu temperatury obudowy generatora. Dla 600RPM uzyskano moc rzędu 2kW przy wysokiej sprawności (ok. 90%) i bez efektu grzania się generatora. Z przeprowadzonych badań wynik, że generatory AFPMG330 doskonale pracują w zakresie prędkości obrotowych nawet do 1200 rpm. Warto podkreślić, że parametry deklarowane przez producenta pokrywają się z wartościami uzyskanymi w pomiarach. Bezrdzeniowa i solidna konstrukcja mechaniczna skutkuje jednak dużą masą generatora, która wynosi 22kg.

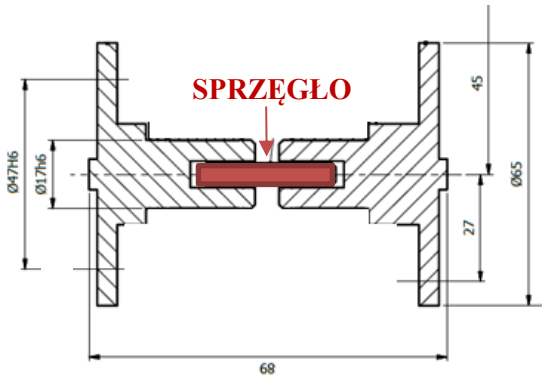
5.4. ZAGADNIENIA KONSTRUKCYJNO-WYTWÓRCZE

Prowadzone eksperymenty wykazały, że w konstrukcji turbiny, w przypadku bezpośredniego połączenie wirnika z generatorem należy wprowadzić sprzęgło celem zabezpieczenia mechanicznego przed gwałtownym zatrzymaniem wirników. Sytuacja taka może nastąpić na przykład w wypadku uszkodzenia jednego z wirników lub przy gwałtownym zatrzymaniu generatora (Rys. 5.37).

a) b)

Rys. 5.37 Łącznik generatora turbiny wiatrowej a) przed awarią i b)po awarii

Zaproponowanym autorskim zabezpieczeniem wirników przed takim zdarzeniem krytycznym jest opracowane sprzęgło o konstrukcji przedstawionej na rysunku 5.38. Założeniem było, że w momencie przeciążenia zniszczeniu ulegnie element łącznika tak, aby uchronić elementy konstrukcyjne turbiny przed uszkodzeniem.



Rys. 5.38 Sprzęgło płytkowe

W analizie rozpatrywano przypadek bez łożysk. W czasie pracy oś będą usztywniać łożyska (Rys. 4.30). Dzięki temu wiemy, że rzeczywiste warunki pracy będą bezpieczniejsze dla strony osi tego układu.

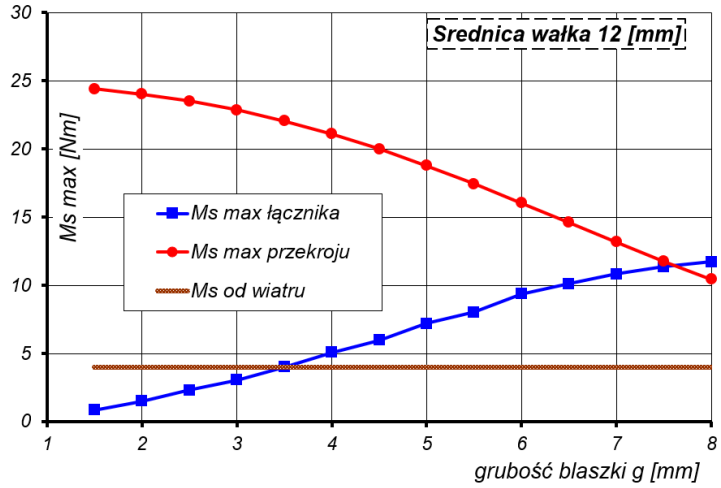
Dla potrzeb pracy przeanalizowano przypadek dla osi Ø12 i Ø30mm oraz łącznika w zakresie grubości kolejno (1,5-8,0) mm oraz (3,0-20,5) mm. Materiał osi i łącznika to stal nierdzewna 18G2A. Zakładany jest luz między osią a łącznikiem rzędu 0,5mm.

W tabeli 5.10 kolumna oznaczona niebieskim kolorem pokazuje maksymalny moment skręcający łącznika w zależności od jego grubości „b". Kolejna kolumna o kolorze czerwonym przedstawia moment skręcający osi z wycięciem pod łącznik. Ostatnia kolumna przedstawia jaki maksymalny moment skręcający generowany jest od wiatru. Wiersz oznaczony kolorem zielonym wskazuje minimalną grubość „b" łącznika będącego w stanie przenieść moment skręcający od wiatru.

Tabela 5.10 Wyniki obliczeń maksymalnych momentów skręcających dla Ø12

b	hmax	h	h/b	α	β	h/b	β wyc	Js blaszki	Js wałka	Js wyciecia	Js przek	Ws blaszki	Ws przek	Ms max łącznika	Ms max przekroju	Ms od wiatru
[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[mm^4]	[mm^4]	[mm^3]	[mm^4]	[mm^3]	[mm^3]	[Nm]	[Nm]	[Nm]
1,5	11,8	11,5	7,7	2,34	2,3	7,9	2,44	11,9	2035,8	39,0	1996,8	7,9	332,8	0,9	24,4	4,0
2,0	11,7	11,5	5,8	1,71	1,7	5,9	1,77	27,3	2035,8	69,0	1966,7	13,7	327,8	1,5	24,0	4,0
2,5	11,6	11,5	4,6	1,34	1,3	4,7	1,36	51,7	2035,8	110,5	1925,3	21,0	320,9	2,3	23,5	4,0
3,0	11,5	11,0	3,7	1,03	1,0	3,9	1,09	82,0	2035,8	164,2	1871,6	27,9	311,9	3,1	22,9	4,0
3,5	11,3	11,0	3,1	0,85	0,8	3,3	0,90	125,7	2035,8	230,4	1805,3	36,5	300,9	4,0	22,1	4,0
4,0	11,1	11,0	2,8	0,72	0,7	2,9	0,75	180,9	2035,8	309,0	1726,7	46,3	287,8	5,1	21,1	4,0
4,5	10,9	10,5	2,3	0,60	0,6	2,5	0,64	232,9	2035,8	399,1	1636,6	54,3	272,8	6,0	20,0	4,0
5,0	10,7	10,5	2,1	0,52	0,5	2,3	0,55	306,4	2035,8	499,4	1536,3	65,5	256,1	7,2	18,8	4,0
5,5	10,4	10,0	1,8	0,44	0,4	2,0	0,47	363,9	2035,8	607,7	1428,1	73,1	238,0	8,0	17,5	4,0
6,0	10,1	10,0	1,7	0,40	0,3	1,8	0,41	451,4	2035,8	723,0	1312,7	85,3	218,8	9,4	16,0	4,0
6,5	9,7	9,5	1,5	0,34	0,3	1,7	0,35	503,7	2035,8	841,2	1194,6	92,1	199,1	10,1	14,6	4,0
7,0	9,4	9,0	1,3	0,29	0,2	1,5	0,30	547,4	2035,8	957,3	1078,4	98,4	179,7	10,8	13,2	4,0
7,5	8,9	8,5	1,1	0,24	0,2	1,4	0,26	572,9	2035,8	1073,4	962,4	103,3	160,4	11,4	11,8	4,0
8,0	8,5	8,0	1,0	0,21	0,1	1,3	0,23	573,4	2035,8	1180,0	855,7	106,5	142,6	11,7	10,5	4,0

Z wykresu przedstawionego na rysunku 5.39 można odczytać z przecięcia krzywych „Ms od wiatru" i „Ms max łącznika", że minimalną grubością łącznika przenosząca moment od wiatru jest „b"=3,5mm. Dla grubości „b"=7,5mm, istnieje ryzyko zniszczenia osi w warunkach krytycznych a nie jak jest to założone łącznika.



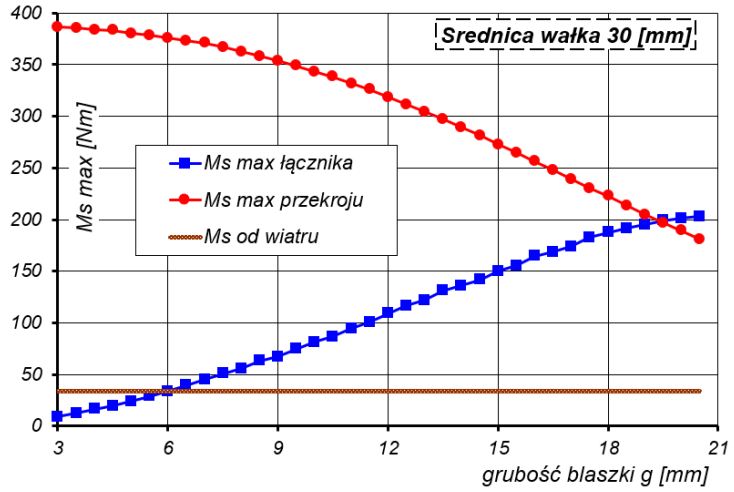
Rys. 5.39 Wykres maksymalnych momentów skręcających dla Ø12

Analogiczne działanie wykonano dla osi Ø30mm a wyniki umieszczono w tabeli 5.11.

Tabela 5.11 Wyniki obliczeń maksymalnych momentów skręcających dla Ø30

b [mm]	hmax [mm]	h [mm]	h/b [-]	α [-]	β [-]	h/b [-]	β wyc [-]	Js blaszki [mm^4]	Js wałka [mm^4]	Js wycięcia [mm^3]	Js przek [mm^4]	Ws blaszki [mm^3]	Ws przek [mm^3]	Ms max łącznika [Nm]	Ms max przekroju [Nm]	Ms od wiatru [Nm]
3,0	29,8	29,5	9,8	3,1	3,1	10,0	3,11	248,5	79521,5	466,9	79054,6	82,8	5270,3	9,1	386,5	34,0
3,5	29,7	29,5	8,4	2,6	2,6	8,5	2,63	390,0	79521,5	674,3	78847,2	111,4	5256,5	12,3	385,5	34,0
4,0	29,7	29,5	7,4	2,2	2,2	7,5	2,28	575,4	79521,5	932,9	78588,6	143,8	5239,2	15,8	384,2	34,0
4,5	29,6	29,5	6,6	2,0	2,0	6,6	2,00	809,6	79521,5	1247,4	78274,1	179,9	5218,3	19,8	382,7	34,0
5,0	29,5	29,0	5,8	1,7	1,7	5,9	1,77	1076,5	79521,5	1621,6	77899,9	215,6	5193,3	23,7	380,8	34,0
5,5	29,4	29,0	5,3	1,6	1,5	5,4	1,59	1415,4	79521,5	2059,4	77462,1	259,0	5164,1	28,5	378,7	34,0
6,0	29,3	29,0	4,8	1,4	1,4	4,9	1,44	1815,0	79521,5	2563,8	76957,7	305,9	5130,5	33,7	376,2	34,0
6,5	29,2	29,0	4,5	1,3	1,3	4,6	1,31	2279,0	79521,5	3137,4	76384,1	356,3	5092,3	39,2	373,4	34,0
7,0	29,0	29,0	4,1	1,2	1,2	4,2	1,20	2810,5	79521,5	3782,6	75738,9	410,1	5049,3	45,1	370,3	34,0
7,5	28,9	28,5	3,8	1,1	1,1	3,9	1,10	3342,5	79521,5	4501,0	75020,5	455,7	5001,4	50,1	366,8	34,0
8,0	28,8	28,5	3,6	1,0	1,0	3,7	1,01	4003,1	79521,5	5294,0	74227,5	510,6	4948,5	56,2	362,9	34,0
8,5	28,6	28,5	3,4	0,9	0,9	3,4	0,94	4737,4	79521,5	6162,3	73359,2	567,6	4890,6	62,4	358,6	34,0
9,0	28,5	28,0	3,1	0,8	0,8	3,2	0,87	5425,9	79521,5	7106,1	72415,4	612,2	4827,7	67,3	354,0	34,0
9,5	28,3	28,0	2,9	0,8	0,8	3,1	0,81	6291,8	79521,5	8125,1	71396,4	672,9	4759,8	74,0	349,0	34,0
10,0	28,1	28,0	2,8	0,7	0,7	2,9	0,76	7234,0	79521,5	9218,5	70303,0	739,4	4686,9	81,3	343,7	34,0
10,5	27,9	27,5	2,6	0,7	0,7	2,8	0,71	8060,5	79521,5	10384,8	69136,7	791,4	4609,1	87,1	338,0	34,0
11,0	27,7	27,5	2,5	0,6	0,6	2,6	0,66	9128,7	79521,5	11622,0	67899,5	861,2	4526,6	94,7	332,0	34,0
11,5	27,5	27,0	2,3	0,6	0,6	2,5	0,62	10018,8	79521,5	12927,5	66594,0	912,7	4439,6	100,4	325,6	34,0
12,0	27,3	27,0	2,3	0,6	0,5	2,4	0,59	11202,6	79521,5	14298,0	65223,5	985,0	4348,2	108,3	318,9	34,0
12,5	27,0	27,0	2,2	0,5	0,5	2,3	0,55	12458,0	79521,5	15729,5	63792,0	1059,1	4252,8	116,5	311,9	34,0

Z wykresu rysunku 5.40 można odczytać z przecięcia krzywych „Ms od wiatru" i „Ms max łącznika", że minimalną grubością łącznika przenosząca moment od wiatru jest „b"=6mm. Natomiast największą grubością łącznika o wytrzymałości równej osi wirnika na skręcenie wskazuje punkt na linii przecięcia „Ms max łącznika" z linią „Ms max przekroju osi" „b"=20mm.



Rys. 5.40 Wykres maksymalnych momentów skręcających dla Ø30

Na rysunku 5.41 przedstawiony został zespół oś-łącznik po przeciążeniu. Odkształcenia łącznika wynikają z przekroczenia granicy plastyczności.

a) b)

Rys. 5.41 Elementy poddane zbyt wysokim obciążeniom a) łącznik osi, b) oś wirnika

W stanach obciążeń eksploatacyjnych, gdy pojawi się na osi wirnika zbyt duży moment obrotowy zniszczeniu ulega płytka sprzęgła (Rys 5.41). Przy pełnym zerwaniu łącznika sprzęgła w wyniku braku połączenia z generatorem wirniki obracają się swobodnie. Dzięki takiej konstrukcji wirnika nie stanowi to zagrożenia a prędkość obrotowa ustabilizuje się na poziomie relacji TSR około λ=1,7. Wykorzystujemy tu właściwości konstrukcyjno-ruchowe wirnika Savoniusa.

5.5. DOSTOSOWANIE MOCY TURBINY

W rozważaniach dotyczących dostosowania mocy turbiny do potrzeb użytkownika istotną kwestią jest jak kształtują się wymiary turbiny oraz jej moc i ciężar. Istnieją dwie możliwości modyfikacji wiatraka:

-Zwiększenie ilości modułów turbiny

-Zbudowanie nowej większej turbiny.

W rozpatrywanym podejściu nie można uwzględnić konstrukcji wsporczej, która będzie dla obu przypadków różna.

1) Zwiększenie ilości modułów wiatraka

Najprostszym podejściem jest zastosowanie kilku egzemplarzy mniejszego wiatraka. W takim przypadku zastosowano istniejące i opracowane rozwiązanie. Takie działanie powoduje liniowy wzrost mocy gabarytów oraz kosztów całej instalacji wiatraka.

Zwiększenie ilości modułów może się odbyć w dwojaki sposób:

a) Multiplikacja wertykalna

Polega ona na umieszczaniu kolejnych modułów jeden nad drugim, jak pokazano na rysunku 5.42. Taka realizacja jest najkorzystniejsza, ponieważ eliminuje niekorzystne interakcje pomiędzy modułami i dodatkowo zmniejsza efekt strat przepływu ponad i pod turbiną.

Przykładowo moduł o szerokości 1m i wysokości 2 m, na podstawie zrealizowanych konstrukcji można określić, że jego powierzchnia to $2m^2$, moc 400W a ciężar wyniesie około 50 kg.

a) b)

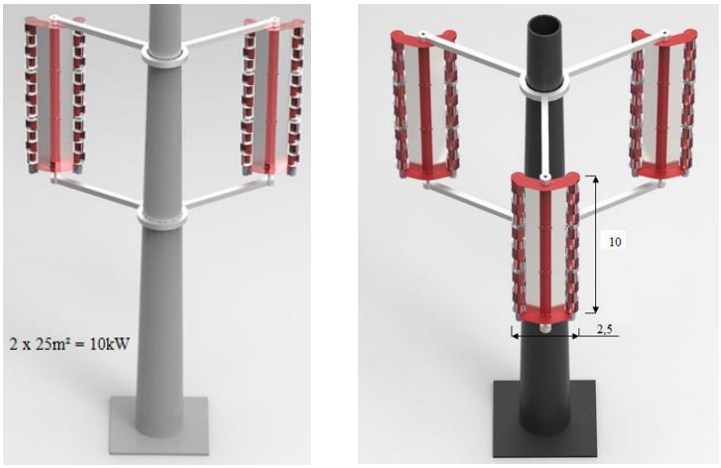
Rys. 5.42 Zmiana ilości modułów a) jeden moduł, b) dwa moduły

Możliwość zwiększenia ilości modułów (Rys. 5.42) jest w zasadzie nieograniczona, jednak proporcje wiatraka muszą być racjonalne pod kątem konstrukcji wsporczej. Przy czterokrotnym zwiększeniu ilości modułów uzyskano aż 8 m wysokości i wydaje się być to maksymalnym rozwojem dla tej koncepcji. Otrzymamy wtedy 1600W przy gabarytach 1x8 m, co prowadzi do wagi 200kg.

b) Multiplikacja horyzontalna

Inną konstrukcyjną propozycją zwiększenia mocy wiatraków prosumenckich jest horyzontalne powielenie modułów, co pokazano na rysunku 5.43. Proponowane jest, dla analizy przypadku, zamontowanie na jednym maszcie dwóch lub trzech turbin po cztery moduły w pionie, 1 x 2m każdy moduł. Dzięki takiemu rozwiązaniu możemy otrzymać odpowiednio 3200W oraz 4800W. co prowadzi do ciężaru konstrukcji wiatraków odpowiedni 400kg lub 600kg.

a) b)



Rys. 5.43 Multiplikacja turbin a) podwójna i b) potrójna

Zwiększenie ilości turbin powyżej trzech wprowadziłoby duże straty na turbinach będącymi w śladzie za turbinami nawietrznymi. Można pokusić się jednak o podwojenie takiego układu (Rys. 5.44), lecz niezmiernie skomplikuje to konstrukcję wsporczą.

Zbyt duże multiplikowanie ilość modułów w elektrowni wiatrowej może prowadzić nie tylko do utrudnień w systemie sterowania poszczególnymi turbinami, ale również spowodować komplikacje eksploatacyjne.

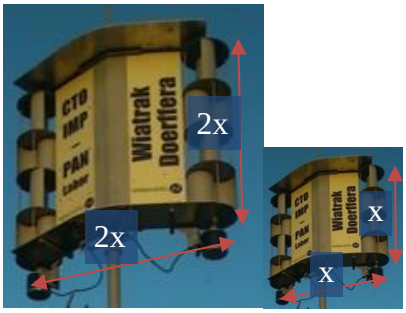
Rys. 5.44 Elektrownia sześcio-turbinowa kratownicowa

Metoda multiplikowania ilości wiatraków ma tą ważna zaletę, że koszty wiatraka zależne są liniowo od ilości modułów. Moc wiatraka zależy od jego sumarycznej powierzchni, tak więc koszt systemu wiatraków liniowo jest zależny od kosztów jednej sztuki.

2) Zwiększenie wymiaru wiatraka

Przy zwiększaniu mocy poprzez modułów, udział kosztów konstrukcji wsporczej zaczyna odgrywać coraz większą rolę. Należy więc wziąć pod uwagę zwiększenie wymiaru wiatraka.

Czterokrotne zwiększenie powierzchni modułu (Rys. 5.45) prowadzi do modułu o szerokości 2 m oraz o wysokości 4 m, odnosząc się do poprzednio omawianego przykładu. Pozwoli to na uzyskanie mocy 1600 W z jednego modułu. Jeśli jednak nie tylko skalujemy, lecz także optymalizujemy konstrukcję to powiększymy cały moduł także w trzecim wymiarze „grubości. Konsekwencją tego będzie odmienna niż w poprzednim rozdziale tendencja i moc nie będzie wzrastała liniowo z masą turbiny.



Rys. 5.45 Zwiększenie wymiarów modułu

Jak już wspomniano istotną niewiadomą w przedstawionym rozważaniu jest koszt konstrukcji wsporczej. Można jednak przypuszczać, że nie będzie on się różnił zasadniczo pomiędzy oboma podejściami. Z jednej strony zamocowanie wielu małych modułów wymaga skomplikowanej konstrukcji, aby wszystkie moduły zamocować w bezpieczny sposób. Z drugiej zaś strony dla zwiększonego wiatraka konstrukcja wsporcza jest prostsza, ale musi unieść większy ciężar.

6. WNIOSKI

Wizja rozwoju energetyki wiatrowej ma dwa równoległe kierunki, które są tworzone i rozwijane przy zupełnie innych założeniach i celach działania.

Pierwszy kierunek to tak zwana duża energetyka wiatrowa, którą można by nazwać „zawodową", obejmująca wiatraki o mocach powyżej 1 MW. W tym segmencie mocy wypracowana została w zasadzie jedna konstrukcja wiatraka, którą jest trzyłopatowy wiatrak o osi poziomej. Ta konstrukcja jest od wielu lat doskonalona pod kątem zwiększenia efektywności jednostek. Wielki wysiłek badawczy i wykonawczy jest ostatnio również nakierowany na zwiększanie mocy jednostki, które obecnie przekraczają nawet 10 MW.

W kontekście dużej energetyki wiatrowej istotna jest wątpliwość czy tak wielkie skoncentrowanie pozyskiwania mocy ze źródeł rozproszonych jest właściwym postępowaniem. Pomijając aspekty techniczno-ekonomiczne, istotnym jest wpływ na środowisko wielkich urządzeń. Zauważyć można, że posadowienie dużych wiatraków na lądzie stwarza coraz więcej problemów społecznych i może mieć negatywny wpływ na środowisko. Z tego powodu nowe duże inwestycje nakierowane są głównie na farmy morskie, pomimo znacznie większych kosztów inwestycyjnych.

Drugim kierunkiem rozwoju energetyki wiatrowej są małe lub mikro instalacje. To działanie koresponduje bardzo dobrze z uzasadnionym podejściem, że rozproszona energia powinna być pozyskiwana i wykorzystywana w sposób rozproszony. W tym kontekście mała energetyka, a w szczególności rozwiązania prosumenckie stają się bardzo istotne.

W zakresie małych mocy nie ma jednoznacznie wypracowanego rozwiązania technicznego, które zdominowałoby rynek. W ramach tego segmentu rynku istnieją rozwiązania, które wykorzystują siły oporu aerodynamicznego. Takie rozwiązania nie są stosowane w dużych wiatrakach, ponieważ mają duże gabaryty, zasłaniając całą strugę wiatru. Prowadzi to do dużych i ciężkich konstrukcji. Wiatraki takie mają jednak wielką zaletę, że nie rozbiegają się, dlatego nie grozi im destrukcja wirnika od siły odśrodkowej. Wybierając jako priorytet bezpieczeństwo, konieczne dla zastosowań prosumenckich, wybór musi paść na turbiny oporowe. Wprowadzenie ich na rynek wymaga jednak innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych oraz uzyskania jak najwyższych efektywności.

Prace konstrukcyjne i eksploatacyjne prowadzone były przez autora od wielu lat. Analizy rozpoczęto od symulacji numerycznych, których zadaniem było uwiarygodnienie innowacyjnej koncepcji wiatraka. Pozytywne wyniki uzasadniały przeprowadzenie badań w tunelu aerodynamicznym a następnie wybudowanie prototypów. Cały ten cykl badawczy, konstrukcyjny, pomiarowy i eksploatacyjny pozwolił na wyciągnięcie odpowiednich wniosków, które dotyczą wytwarzania tego innowacyjnego wiatraka.

Przeprowadzone w pracy analizy i rozważania dotyczą wielu aspektów elektrowni wiatrowej, pod kątem jej eksploatacyjnej doskonałości, pozwalających minimalizować nakłady inwestycyjne.

Nadrzędnym celem postawionym w tej dysertacji jest analiza bezpiecznej, prosumenckiej konstrukcji przydomowej turbiny wiatrowej. Na tak szeroko postawiony problem odpowiedzieć należy wielopłaszczyznowo.

Jako pierwsze zadanie w pracy wykonane zostało studium literaturowe w celu przeprowadzenia rozpoznania tematu. W wyniku analizy przedstawionej w dwóch pierwszych rozdziałach wskazano na koncepcję turbiny typu oporowego. Jednocześnie wybrany do dalszej pracy został klasyczny rotor Savoniusa.

W dalszym ciągu pracy podjęto się odpowiedzi na pomocnicze cele pracy wraz z problemami badawczymi. Rozdzielić tu należy dwa podstawowe aspekty. Pierwszym z nich jest opracowanie głównych cech konstrukcyjnych, wytycznych geometrycznych oraz parametrów pracy.

Przeprowadzone w przedstawionej pracy analizy dotyczyły:

-wyznaczenia proporcji wymiarowych dla dwuwirnikowego wiatraka
-metody podziału wirników na moduły i ich zesprzęglenie
-analizy konstrukcyjno-eksploatacyjne rozwiązań kierownic i wirników
-metody przejścia z małej mocy na większą.

Najistotniejsze wnioski dotyczące działania wiatraka pokazują, że:

- odpowiednią proporcją długości kierownicy do średnicy wirnika jest relacja wymiarowa 1,5; oznacza to, że przy rozwarciu kierownic o 70° na stronę stosunek średnicy małego wirnika do dużego wirnika Savoniusa jest jak 1 : 5.
- sugerowana wysokość wiatraka do jego szerokości jest jak 1 :3 lub 1:4.

Analiza wpływu ilości modułów w wirniku na jego efektywność prowadzi do następujących wniosków:

- zastąpienie wirnika wielo-segmentowego jedno-segmentowym ma potencjał zmniejszenia kosztów wytwarzania wirników,
- mały wirnik jednomodułowy do stanowiska badawczego i do prototypu w IMP PAN został wykonany o wiele taniej niż wirnik czteromodułowy; jednakże wirniki o różnych ilościach modułów zamówione w firmie Konwektor nie wykazują redukcji kosztów wraz z redukcją ilości modułów; okazało się, że redukcja ceny wirnika jest ściśle związana z technologia jego wytwarzania,
- uwzględniając fakt, że w Polsce mamy do czynienia raczej niskimi prędkościami wiatru to właściwym wyborem jest wirnik jednomodułowy, ponieważ dla zakresu niskich prędkości wiatru

efektywność wirnika czteromodułowego wykazuje znacznie niższe efektywności działania.

Wpływ wysokości zespołu wirników w wiatraku,

- średnica wirników wynosi około 1/5 szerokości wiatraka; biorąc pod uwagę proporcję szerokości do wysokości wiatraka 1:4 okazuje się, że linia wirników ma długość rzędu 20 średnic wirnika,
- biorąc pod uwagę elastyczność wiatraka, to nie można zastosować jednego wirnika zamocowanego na swoich końcach
- linia wirników musi być podzielna na elementy, które będą ułożyskowane na swoich dwóch końcach, i stanowić będą sztywny wirnik,
- węzeł mocowania wirników musi zajmować jak najmniej miejsca, ponieważ zajęta przestrzeń nie uczestniczy w produkcji mocy wiatraka
- konieczność uelastycznienia linii wirnika wymaga zastosowania łożysk wahliwych
- elastyczność węzłów łączących poszczególne wirniki zawierać musi również ich zesprzęglenie, aby przekazać moment generowany na każdym wirniku
- zastosowanie sprzęgieł komercyjnych jest wykluczone ze względu na duże gabaryty, ponadto podatność sprzęgieł komercyjnych nie jest w tym przypadku potrzebna, ponieważ napęd strugą wiatru jest ze swojej zasady bardzo podatny;
- zaproponowano w pracy zastosowanie bardzo prostego rozwiązania sprzęgła płytkowego, które dzięki swoim wymiarom pozwala na elastyczność, co do osiowości wirników i pozwala na prawie bezpośrednie sąsiedztwo łożysk, minimalizując wymiary węzła łożyskowego

Wybór generatorów do innowacyjnej siłowni wiatrowej:

- Mając na uwadze otrzymane z badań i analiz wyniki proponuje się wykorzystanie generatora typu „inner rotor", w którym wirnik stanowi płyta z magnesami neodymowymi, wewnątrz generatora; w stacjonarnej obudowie zamocowane są cewki generujące energię elektryczna; przy dużych obciążeniach cewki oddają ciepło do obudowy, która jest dobrze chłodzona przez wiatr; dzięki takiemu rozwiązaniu można pozwolić sobie na przeciążenie generatora, a wiec odpada potrzeba przewymiarowania generatora ze względu na ewentualne piki wiatru.

Analizy konstrukcyjno-eksploatacyjne rozwiązań kierownic i wirników nasuwa następujące uogólnienia:

- zaproponowano i przetestowano na prototypach dwa rozwiązania zapewniające obrót wiatraka na konstrukcji wsporczej, umożliwiający śledzenie kierunku wiatru
- jedno rozwiązanie polega na zamocowaniu wiatraka na słupie, sztywno zamocowanym w konstrukcji wsporczej; elementy obrotowe, ulokowane wzdłuż wysokości wiatraka pozwalają na jego obrót pod wpływem sił aerodynamicznych
- takie rozwiązanie wymaga zastosowania własnego rozwiązania pierścieni ślizgowych do przekazania energii elektrycznej z ruchomego wiatraka na stałą konstrukcje wsporczą
- drugie rozwiązanie to wykonanie całego wiatraka jako samonośny moduł z dolnym i górnym gniazdem obrotowym,
- ponieważ w takim rozwiązaniu wiatrak stoi na dolnym łożysku oporowym to łatwo zastosować komercyjne moduły pierścieni ślizgowych, przekazujące wyprodukowaną energię do stacjonarnej konstrukcji wsporczej wiatraka
- odrębną kwestią jest zastosowanie kierownic stałych lub rozkładanych,
- kierownica o stałym kącie rozwarcia jest rozwiązaniem prostszym pod kątem wytwórczym, ale należy zdać sobie sprawę, że stawia większe wymagania co do wirników, ponieważ nie chroni ich przed silnymi wiatrami; istotna jest odpowiednia wytrzymałość wirników na wysokie obroty
- kierownica składana chroni wirniki przed wysokimi obciążeniami, ale wprowadza konieczność zastosowania systemu składania, który musi być napinany; do tej pory stosowany był naciąg grawitacyjny, ale powinien on być zastąpiony naciągiem sprężynowym
- krawędź natarcia wirnika jest najbardziej narażonym elementem wiatraka na warunki eksploatacyjne, po pierwsze duże obroty powodują jej deformację na zewnątrz wirnika, a przejście przy krawędzi kierownicy powoduje szybkie zmiany modułu i kierunku działających sił aerodynamicznych; wynikające stąd deformacje krawędzi natarcia mogą spowodować jej kolizję z kierownicą, co może prowadzić do zniszczenia wirnika
- zaproponowano w pracy takie rozwiązanie krawędzi natarcia, które zwiększa jej wytrzymałość na deformacje, a jednoczenie powoduje, że ewentualny kontakt krawędzi z kierownicą nie prowadzi do zniszczeń

Przejścia z małej mocy na większą

- często powstaje potrzeba zastosowania dwa lub trzy razy większej mocy niż rozpatrywany wiatrak; powstaje pytanie czy lepiej zastosować kilka małych wiatraków czy lepiej zwiększyć gabaryt całego wiatraka

- w pracy wyjaśniono, że bardziej korzystne jest zastosowanie kilku małych wiatraków zamiast jednego dużego,
- jeżeli zwiększenie mocy ma być znaczące to oczywiście zamiast wielkiej liczby małych wiatraków lepiej i taniej jest zbudować jeden większy wiatrak ze względu na koszty związane z konstrukcją wsporczą.

Drugim celem pomocniczym i problemem badawczym były zagadnienia wpływu na charakterystyki użytkowe poszczególnych elementów innowacyjnego zespołu procesowo-napędowego.

Przeprowadzone w przedstawionej pracy badania i analizy dotyczyły:
-zmiany wirników z wielomodułowych na jednomodułowe,
-wyboru i testowania generatorów,
-analizy działania prototypów.

Najistotniejsze wnioski dotyczące działania wiatraka wskazują, że:
- zastąpienie dużego wirnika Savoniusa dwoma małymi wirnikami z kierownicami daje przynajmniej taką samą efektywność produkcji energii,
- kąt rozwarcia kierownic nie ma wpływu na efektywność wiatraka, biorąc pod uwagę aktualną dla tego rozwarcia szerokość wiatraka,

Wpływ ilości modułów w wirniku prowadzi do następujących wniosków:
- wirnik jedno-modułowy zastosowany na prototypie nie wprowadza ani dodatkowych drgań wiatraka ani nie powoduje innych trudności eksploatacyjnych
- wykonane pomiary porównawcze wirnika jedno-modułowego i cztero-modułowego wykazały, że przy wysokich prędkościach wiatru (rzędu 8 m/s) ich charakterystyki mocy są podobne; natomiast przy małych prędkościach wiatru (rzędu 5 m/s) wirnik jedno-modułowy znacząco przewyższa swoją efektywnością wirnik czteromodułowy.

W zakresie doboru generatorów do innowacyjnych siłowni wiatrowych wyniki przeprowadzonych w tym zakresie badań i analiz wskazują, że:
- typowy wirnik Savoniusa jest wolno obrotowy i dla tego generatory typu „amerykanka" z magnesami neodymowymi są dużych wymiarów i ciężkie
- przedstawione tu rozwiązanie pozwalające na pięciokrotną redukcję średnicy wirnika powodują, że przy takim samym TSR, obroty wirnika są pięciokrotnie wyższe niż w typowym wirniku Savoniusa, pozwala to na zastosowanie znacznie mniejszego generatora.

Testowanie prototypów innowacyjnego wiatraka:

- dwa wymiary prototypów innowacyjnego wiatraka były testowane, jeden o średnicy wirnika D = 0,25 m i mocy około 0,8 W, oraz drugi o średnicy wirnika D = 0,5 m i mocy około 4 kW(przy 12 m/s).
- w ramach obecnej pracy przetestowano system sterowania produkcją energii elektrycznej, ale również zweryfikowano użytkowe właściwości rozwiązań technicznych
- choć nie było to celem stawianym w tej dysertacji stwierdzić można, że zastosowane obecnie algorytmy obciążania wirników wymagają dopracowania, szczególnie dla silnych wiatrów, ale dla słabych wiatrów do 5-7 m/s została osiągnięta efektywność około 20%

Całość wykonanych prac wskazuje jednoznacznie na celowość prac komercjalizacyjnych dla tego typu konstrukcji. Odpowiada także na zadane pytania w tej dysertacji i wyznacza zintegrowaną metodologię dla potrzeb efektywnego, użytecznego pro wdrożeniowego projektowania, zespołów roboczych innowacyjnego zespołu procesowo-napędowego.

Przedstawiony został także wpływ na charakterystyki użytkowe elementów zespołu procesowo napędowego.

Ujawnia jednak jednoznacznie, że na polu obciążania wirników wymagane są dodatkowe analizy podnoszące sprawność całkowitą turbiny.

7. PERSPEKTYWY APLIKACYJNO-ROZWOJOWE

Przedstawione powyżej wnioski z obecnej pracy doktorskiej wykorzystane zostają w realizowanym obecnie nowym projekcie z NCBiR p.t. „Trójmodułowy, bezpieczny, cichy i innowacyjny dwu-wirnikowy wiatrak o osi pionowej", którego moc wyniesie 15 kW przy prędkości wiatru 12 m/s.

Realizacja nowego projektu badawczego, kolejnej elektrowni wiatrowej, stwarza niezwykłą możliwość wykorzystania wniosków z tej pracy doktorskiej oraz pozwala na dalszy rozwój technologii wypracowanej w obecnej pracy.

Bazując na dyskusji przeprowadzonej w tej pracy podjęto decyzję o zwielokrotnieniu mocy elektrowni wiatrowej z 5 kW poprzez zastosowanie trzech wiatraków na jednej konstrukcji wsporczej. Celem badań w tym aspekcie jest zweryfikowanie skutków wpływu jednego wiatraka na drugi. Postawiono pytanie na ile ślad z jednego wiatraka, padający na drugi może ograniczyć produkowaną moc.

W nowym projekcie podjęto również zagadnienie ilości segmentów, z których składa się wirnik. Wirniki w nowym projekcie są większe niż rozpatrywano w obecnej pracy. Ale dzięki zdobytemu tu doświadczeniu zaplanowano odpowiedni program badawczy. Zbudowane zostanie również nowe stanowisko badawcze do badania wirników. Badane wirnik będą jedno-, dwu-, i pięciomodułowe. Poza badaniami na stanowisku pomiarowym zostaną one zamontowane na budowanej elektrowni wiatrowej. Każdy z trzech wiatraków zostanie wyposażony w inne wirniki. Zdobyte w ten sposób doświadczenie pozwoli na podjęcie decyzji co do wyboru wirnika do przyszłych wiatraków.

Na podstawie analizy przeprowadzonej w tej pracy podjęto decyzje, że kierownice wirnika będą posiadały stały kąt rozwarcia. Uprości to konstrukcję wiatraka, ale jednocześnie narazi wirniki na większe obciążenia przy silnych wiatrach. Uzupełni to dotychczasowy brak doświadczenia w eksploatacji takiej konstrukcji.

Wnioski wyciągnięte z analizy metod obciążania wiatraków i pobierania wygenerowanej energii zostaną poddane wnikliwej analizie w celu doskonalenia tego najważniejszego aspektu innowacyjnej elektrowni wiatrowej. Zweryfikowane zostanie, czy zasugerowane w tej pracy rozróżnienie charakterystyki obciążania dla małych prędkości wiatru (do 8 m/s) oraz dla dużych prędkości (powyżej 8 m/s) pozwoli na udoskonalenie tej funkcji. Jak pokazano w obecnej pracy miałoby to szczególne znaczenie dla pobierania mocy przy silniejszych wiatrach.

Na zakończenie warto nadmienić, że właśnie otrzymano informację o przyznaniu projektu europejskiego dla konsorcjum, w którym IMP PAN jest członkiem. W ramach tego projektu zostanie zatrudniony doktorant do analizy hałasu przez różne typy wirników w innowacyjnym rozwiązaniu wiatraka.

LITERATURA

[1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady z 23 kwietnia 2009r (2009/28/WE) https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0028

[2] *Zestawienie danych ilościowych dotyczących funkcjonowania KSE w 2017 roku*, Raport 2017 KSE

[3] NIK *Rozwój sektora odnawialnych źródeł energii KGP.430.022.2017 Nr ewid. 171/2017/P/17/020/KGP*

[4] PSE *Produkcja i zużycie energii elektrycznej w elektrowniach krajowych* https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-rb

[5] Jean-Daniel Pitteloud and Stefan Gsanger, *"Small Wind World Report by the World Wind Energy Association",* , Bonn/Monachium, 2 czerwca 2017 (WWEA) Niemcy

[6] AWEA U.S. 2012 *Market Report on U.S. Wind Technologies in Distributed Applications,* https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/08/f33/2015-Distributed-Wind-Market-Report-08162016_0.pdf

[7] The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) Small *Turbines Lead to Big Growth in Exports.* http://energy.gov/eere/wind/articles/distributed-wind-market-report-small-turbines-lead-big-growth-exports-0

[8] Patent, "Wiatrak o osi obrotu poprzecznej do kierunku wiatru", ogłoszono 29.05.2015 roku, pod numerem PL B1 219489, IMP PAN

[9] Patent, „Aktywny wiatrak o osi obrotu poprzecznej do kierunku wiatru", ogłoszono 31.08,2015 roku o numerze: PL B1 219927, WINENERG

[10] H. Lorec Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej *Atlas Klimatu Polski* 2005

[11] P. Mendis, T. Ngo, D. Mohotti *Wind Design of Tall Buildings, Problems, Mistakes and Solutions* ICIFC Melbourne 2014;

[12] GWEC Global Wind Energy Council *Global Wind Energy Report,* april 2018

[13] P.J. Schubel, R.J. Crossley *Wind Turbine Blade Design*, doi 10.3390/en5093425 Energies 2015

[14] Y. Bazilevs, M.C. Hsu, I. Akkerman, S. Wright, *3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part I: Geometry modeling and aerodynamics* International Jurnal for Numerical Methods in Fluids, January 2011

[15] M. Hansen *Aerodynamics of Wind Turbines* 2nd edition ISBN 978-1-84407-438-9 Earthscan London 2008

[16] E. Solingen, *Control Design for Two-blsded Wind Turbines,* Bernisse, Nederland ISBN 978-94-6259-828-7

[17] G. Cortina,V. Sharma, M. Calaf,, *Investigation of the incoming wind vector for improved wind turbine yaw-adjustment under different atmospheric and wind farm conditions* Renewable Energy Vol 101 february 2017

[18] V. Ramakrishnan, S.K. Srivatsa, *Pitch control of wind turbine generator by using new mechanism,* Journal of Electrical Systems 6 (4) (2010) 62-87

[19] A. Gawad *New, Simple Blade-Pitch Control Mechanism for Small-Size, Horizontal-Axis Wind Turbines,* Jurnal of Power and Energy Engineering december 2013

[20] J. Kung, H Lee, *The Development of Rotor Brakes for Wind Turbines*International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, 2017

[21] E. Sirotkin, E. Solomin, A. Martyanov, S. Kozlov , *Emergency braking system for the wind turbine,*, 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering

[22] S. Mcfadden, *Wind turbine gearbox design with drivetrain dynamic analysis* Offshore Wind Farms March 2016

[23] A. Ragheb, M. Ragheb, *Wind Turbine Gearbox Technologies,* Nuclear & Renewable Energy Conference (INREC), 2010

[24] Hau E., "*Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*", 2nd edition, Springers 2006

[25] E.A.D. Kumara, N.K. Hettiarachchi, K.G.R.M. Jayathilake "*Review Paper: Overview of the Vertical Axis Wind Turbines*", International Journal of Scientific Research and Innovative Technology, August 2017

[26] Akinari Shigetomi, et al. *Interactive flow field around two Savonius turbines* Renew Energy, 36 (2) (2011), pp. 536-545

[27] J.P. Abraham, B. D. Plourde, Greg Mowry, W. J. Minkowycz *Summary of Savonius wind turbine development and future applications for small-scale power generation* Journal of Renewable and Sustainable Energy Vol.4 2012

[28] W. Tian, B. Song, J. VanZwieten, P. Pyakurel, *Computational Fluid Dynamics Prediction of a Modified Savonius Wind Turbine with Novel Blade Shapes,* Energies 2015, 8, 7915-7929

[29] J. Yen, N. Ahmed, Improving Safety and Performance of Small-Scale Vertical Axis Wind Turbines

[30] C. Morgan, G. Hassan, E. Bossanyi, *Wind Turbine Icing And Public Safety - A Quantifiable Risk?*, January 1996

[31] S. Brouwer, I. Cardenas, S. Jibouri, J. Halman, *Towards analysing risks to public safety from wind turbines,* Reliability Engineering & System Safety Vol 180 December 2018

[32] W. Palmer *Wind Turbine Public Safety Risk, Direct and Indirect Health Impacts*, Research, November 2018 DOI: 10.13140/RG.2.2.19049.75362

[33] Z. Guoqiang, L. Hang, X. Ting, T. De, *Blade tip deflection calculations and safety analysis of wind turbine*, 2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG 2013)

[34] M. Zemamou, M. Aggour, A. *Toumi Review of savonius wind turbine design and performance* CPESE 2017 Berlin

[35] N.H. Mahmoud, Ahm A El-Haroun, E. Wahba, M.H. Nasef, *An experimental study on improvement of Savonius rotor performance* Alexandria Engineering Journal Vol. 51 2012

[36] S. Savonius, *The wing-rotor in theory and practice,* Helsingfors, 1926

[37] N. Alom, U. Saha, *Four Decades of Reserch Into the Augmention Techniques of Savonius Wind Turbine Rotor* Journal of Energy Resources Technology Vol 140 2018

[38] K. Anwar, S. Himran, L. Sule, N. Azis, *Numerical investigation of modified savonius wind turbine with various straight blade angle* Journal of Mechanical Engineering Research and Developments Vol. 41 2018

[39] B. D. Plourde, J. P. Abraham, and G. S. Mowry, W. J. Minkowycz; *Simulations of Three-Dimensional Vertical-Axis Turbines for Communications Applications* Wind Engineering Volume 36, No. 4, 2012 pp. 443-454

[40] M.H. Mohamed, G. Janiga, E. Pap, D. Thévenin; *Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade,* Energy Conversion and Management, Volume 52, Issue 1, January 2011, Pages 236–242

[41] U.K. Saha, S. Thotla, D. Maity *Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments* J Wind Eng Ind Aerodyn, 96 (2008), pp. 1359–1375

[42] Krzysztof Sobczak, *Numerical investigations of the aspect ratio influence of the Savonius rotor performance*, XXIII KKMP, Fluid Dynamics Conference 2018, 9-12 September 2018.

[43] Kamoji M.A., Kedare S,B., Prabhu S.V. *Performance tests on helical Savonius rotor*, Renewable Energy, 2009, 34 (3): 521-529

[44] Wance W., *Vertical axis wind rotors – status and potential*, Proc. Cpnf. Wind Energy Converrs Systems, 1973, p.96 – 102

[45] Sheldahl R.E., Feltz L.V., Blackwell B.F., *Wind tunnel performance data for two- and three-bucket Savonis rotors*, J. Energy, 1978, 2: 160-164

[46] Saha U.K., Tholta S., Maity D., *Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2008, 96: 1359 – 1375

[47] Vitale A.J., Rossi A.P., *Computational method for the design of wind turbine blades*, Int. J. Hydrogen Energy 2008, 33: 3466 – 3470

[48] Damak A., Driss Z., Abid M.S., Experimental investigation of Savonis rotor with a twist of 180°, Renew. Energy 20013, 52: 136 - 142

[49] R. Qin, C. Duan, *The principle and applications of Bernoulli equation,* Journal of Physics Conference Series 916(1):012038 October 2017

[50] M. Ragheb, A. Ragheb, Wind Turbines Theory - *The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio*, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power DOI: 10.5772/21398 June 2011

[51] P. Jamieson *Innovation in wind turbine designe* 2nd edition ISBN: 978-1-119-13790-0 May 2018

[52] Z. P. Tang, Y.X. Yao, L. Zhou, B. Yu *A Review on the New Structure of Savonius Wind Turbines,* Advanced Materials Research Online Vol 608 2012

[53] J.Swirydczuk, P.Doerffer, M.Szymaniak, *Unsteady Flow through the Gap of Savonius Turbine Rotor* TASK Quarterly Scientific Bulletin of the Academic Computer Centre in Gdansk ISSN 1428-6394 Volume 15, Number 1, 2011

[54] P.Doerffer, K. Doerffer Zarejestrowany Wzór Wspólnotowy, *Wirnik w kategorii Turbiny wiatrowe [konstrukcje]* 12/06/2018, No 005308632-0001

[55] B.F. Blackwell, R.E. Sheldahl, L.V. Feltz *Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savonius rotors* Sandia Laboratories (1978) SAND76-0131

[56] S. Szkolny, O. Małyszko, *Hardware-In-The-Loop Simulator For Testing Wind Turbine Generators,* Electrical Engeneering DOI: 10.4467/2353737XCT.15.044.3844 January 2015

[57] Xiaojing Sun, Daihai Luo, Diangui Huang, Guoqing Wu *Numerical study on coupling effects among multiple Savonius turbines* J Renew Sustain Energy, 4 (5) (2012), Article 053107

[58] M. Tahani, A. Rabbani, A. Kasaeian, M. Mehrpooya, M. Mirhosseini *Design and numerical investigation of Savonius wind turbine with discharge flow directing capability* Energy, 130 (2017), pp. 327-338

[59] Alessandro Chiappalone, *Study of a wind turbine innovative layout*, Diploma thesis, Università Degli Studi Di Genova, Scuola Politecnica, Tesi di Laurea Magistrale, Decembre 2016

[60] P.Hercel Praca dyplomowa, *Wpływ trójwymiarowych struktur przepływu na sprawność wirnika Savoniusa* 2018, Pages 38-46

[61] Mateo Costa „*Praca Dyplomowa*" Diploma thesis, Università Degli Studi Di Genova, Scuola Politecnica, Tesi di Laurea Magistrale, Decembre 2015

[62] M. Hadi Ali, *Experimental Comparision Study for Savonius Wind Turbine of Two and Three Blades at Low Wind Speed* International Jurnal of Modern Engineering Research Vol 3 2013 pp 2985

[63] J.B. Sapra, *Aerodynamic Design using Numerical Method (Trapezoidal) for Horizontal axis wind turbine (HAWT) Blade with CAD Model* DOI: 10.13140/RG.2.2.29538.38080 Chicago December 2018

[64] P. Gipe, *Wind Energy basics- A guide to Home- and Community-Scale Wind Energy System.* 2 ed. Vermont 2009

[65] X. Chen, J. Xu, *Structural failure analysis of wind turbines impacted by super typhoon Usagi*, in Engineering Failure Analysis vol 60 November 2015

SPIS TABEL

Tabela 1.1 Moc zainstalowana [MW] w Polsce w latach 2015-2017r. 9
Tabela 1.2 Energia elektryczna wyprodukowana [GWh] w Polsce w 2017r. 10
Tabela 1.3 Klasy szorstkości terenu 21
Tabela 5.1 Wyniki obliczeń numerycznych dla różnych proporcji długości kierownicy do średnicy wirnika dla kątów β=20° i 60° 69
Tabela 5.2 Zmiana powierzchni czynnej turbiny w zależności od kąta β 71
Tabela 5.3 Wyniki obliczeń mocy dla turbiny 800W 75
Tabela 5.4 Współczynniki krzywych aproksymujących wyniki pomiarów 86
Tabela 5.5 Współczynniki krzywych aproksymujących wyniki pomiarów 88
Tabela 5.6 Specyfikacja generatora AFMPG330-1.0 92
Tabela 5.7 Wyniki testów producenta dla badanego generatora AFMPG330-1.0 93
Tabela 5.8 Wyniki pomiarów zależności napięcia od obrotów generatora AFPMG330 93
Tabela 5.9 Wyniki pomiarów dla 120 RPM 94
Tabela 5.10 Wyniki obliczeń maksymalnych momentów skręcających dla Ø12 98
Tabela 5.11 Wyniki obliczeń maksymalnych momentów skręcających dla Ø30 99

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1 Moc zainstalowana w Polsce w 2017r. [3] 9
Rys. 1.2 Energia elektryczna wyprodukowana w Polsce 2017r[3]..... 10
Rys. 1.3 Struktura produkcji energii elektrycznej w Polsce w latach 1960-2017 a) moc zainstalowana b) wyprodukowana energia elektryczna [2] 11
Rys. 1.4 Struktura pozyskania energii pierwotnej ze źródeł odnawialnych w 2016 r [3]. 12
Rys. 1.5 Produkcja energii elektrycznej w Polsce z odnawialnych nośników energii w 2016 r [3]. 13
Rys. 1.6 Średnie miesięczne krajowe zapotrzebowanie na moc w dobowych szczytach obciążenia w dni robocze w latach 2008-2017 [4] 13
Rys. 1.7 Pokrycie zapotrzebowania na moc a) maksymalną i b) minimalną w rozbiciu na źródła 2017 r [4]..... 14
Rys. 1.8 Przebieg zapotrzebowania (minimalnego i maksymalnego) na moc w roku 2017 [4] 15
Rys. 1.9 Mapa średniorocznej prędkości wiatru na terenie Polski [10]..... 18
Rys. 1.10 Prędkość wiatru i niesiona w nim moc..... 19
Rys. 1.11 Rozkład procentowy godzin wietrznych dla średniej prędkości wiatru 5,39m/s 20
Rys. 1.12 Moc niesiona w wietrze w jednym metrze kwadratowym a) wykres mocy w funkcji prędkości wiatru b) wybrane wartości parametryczne 20
Rys. 1.13 Prędkość wiatru w zależności od szorstkości terenu 21
Rys. 1.14 Mapa energii niesionej w wietrze w ciągu roku na terenie Polski [10] 22
Rys. 2.1 Schemat ideowy mechaniki działania wirników wykorzystujących siłę oporu i siłę nośną..... 24
Rys. 2.2 Turbiny wykorzystujące siłę nośną HAWT (a), (b) oraz VAWT (c), (d) [64] 24
Rys. 2.3 Schemat ideowy wirnika Savoniusa 25
Rys. 2.4 Turbiny wykorzystujące siłę oporu-różne modyfikacje [64] 25
Rys. 2.5 Typ turbiny-pionowe hybrydowe..... 26
Rys. 2.6 Uszkodzone turbiny wiatrowe [65] 27
Rys. 2.7 Schemat ideowy opływu strug powietrza w wirniku Savoniusa [36] 28
Rys. 2.8 Schematy modyfikacji wirników: a) Savoniusa [36] oraz b) współczesne rozwiązania [34] 28
Rys. 2.9 Wirniki Savoniusa: a) jedno i cztero modułowy oraz b) wersja spiralna [64]..... 29
Rys. 2.10 Masowy wydatek powietrza przechodzący przez powierzchnię A 30
Rys. 2.11 Schemat przepływu strugi powietrza przez turbinę [63] 31
Rys. 2.12 Charakterystyka efektywności turbiny w funkcji stosunku prędkości wlotowej do wylotowej 33
Rys. 4.1 Schemat ideowy przysłony łopatki powrotnej wirnika Savoniusa 37

Rys. 4.2 Układ wirników symetryczny z kierownicą 38
Rys. 4.3 Wirnik Savoniusa oraz tandem wirników – relacje gabarytowe 38
Rys. 4.4 Wirnik Savoniusa oraz tandem wirników w szerokim kącie rozstawienia 38
Rys. 4.5 Schemat ideowy turbiny z wniosku patentowego ze stałym kątem natarcia [8] 39
Rys. 4.6 Schemat ideowy z wniosku patentowego ze zmiennym kątem natarcia [9] 39
Rys. 4.7 Model 3D konstrukcji turbiny ze stałym kątem rozwarcia kierownic, a) widok z góry, b) aksonometria widok z boku c) aksonometria widok górny 40
Rys. 4.8 Model 3D konstrukcji turbiny o zmiennym kącie rozwarcia kierownic, a) widok z góry, b) aksonometria widok z boku c) aksonometria widok górny 41
Rys. 4.9 Widok ogólny turbiny 800W oraz schematy funkcjonalne podczas pracy a) otwarta i b) zamknięta 42
Rys. 4.10 Główne parametry wymiarowe turbiny A- wysokość, B-szerokość, X-długość kierownicy, ØY-średnica wirnika oraz β kąt rozwarcia 43
Rys. 4.11 Różne konfiguracje proporcji pomiędzy kierownicą a wirnikiem 43
Rys. 4.12 Laboratorium wiatrowe na dachu IMP PAN a) innowacyjny prototyp, b) konwencjonalny o osi poziomej 1kW c) hybrydowy Savonius-Darrieus 45
Rys. 4.13 Laboratorium wiatrowe w Centrum Techniki Okrętowej a) wiatraki 2 i 4kW b) wiatrak 350W dwu modułowy 46
Rys. 4.14 Badany wirnik Savoniusa czteromodułowy 47
Rys. 4.15 Schemat ideowy Wirnik Savoniusa ze szczeliną, przekrój 47
Rys. 4.16 Krawędź natarcia łopatki ze wzmocnieniem „U” 48
Rys. 4.17 Krawędź natarcia łopatki zagięta 180° 48
Rys. 4.18 Zniszczenia łopatki ze wzmocnieniem typu U a) widok łopatki i krawędzi b) zniszczony wirnik zaklinowany o kierownicę 48
Rys. 4.19 Wzmocnienie krawędzi natarcia łopatki gięto-spawane 48
Rys. 4.20 Badany wirnik Savoniusa jednomodułowy 49
Rys. 4.21 Krawędź natarcia łopatki z profilu usztywnionego 49
Rys. 4.22 Badane wirniki izometria 50
Rys. 4.23 Stanowisko do badania wirników a) schemat b) widok stanowiska 51
Rys. 4.24 Badane generatory a) typ bez rdzeniowy outer rotor” b) tradycyjny rdzeniowy c) typ bez rdzeniowy inner rotor” 52
Rys. 4.25 Schemat stanowiska laboratoryjnego do badania generatorów 53
Rys. 4.26 Stanowisko do badania charakterystyk roboczych generatorów 54
Rys. 4.27 Przekładnia dwupoziomowa zastosowana do budowy stanowiska pomiarowego generatorów − widok ogólny 55
Rys. 4.28 Rozwiązanie konstrukcyjne podziału badanego wirnika 57
Rys. 4.29 sprzęgło płytkowe – konstrukcja autorska 58
Rys. 4.30 Sposoby łożyskowania wirników: a) tulejowy, b) dzielony, c) blokowa (w przekroju z osiami i płytką) 58

Rys. 4.31 Turbina z nieruchomym masztem: a) część ruchoma, b) maszt, c) moduł obrotowy 59
Rys. 4.32 Rozwiązanie konstrukcyjne z ruchomym masztem: a) część ruchoma, moduły gniazd obrotowych b) górne i c) dolne. 60
Rys. 4.33 Prototypy kierownic a) z profilu zamkniętego stalowego, b) z płyty aluminiowej z kątownikiem, c) z płyty nierdzewnej giętej, d) z płyty laminatowej 61
Rys. 4.34 Obszary kierownicy a) główna pionowa b) pomocnicza pozioma 61
Rys. 4.35 Maszty rurowy z odciągami 62
Rys. 4.36 Maszt rurowy samonośny 62
Rys. 4.37 Maszt kratownicowy 63
Rys. 4.38 Maszt samonośny składany a) w pozycji roboczej, b) w pozycji obsługowej 63
Rys. 4.39 Multiplikacja pionowa a) jedno, b) dwu c) trzy segmentowa 64
Rys. 4.40 Multiplikacja turbin – rozwiązanie podwójne ruchome 65
Rys. 4.41 Multiplikacja turbin – rozwiązanie potrójne 66
Rys. 5.1 Linie prądu dla wartości TSR λ= 1, 0.8, 0.7, 0.5, 0.3 dla wirnika Savoniusa 67
Rys. 5.2 Zależność efektywności od λ 68
Rys. 5.3 Proporcje konstrukcyjne wiatraka X/ØY 68
Rys. 5.4 Geometria wiatraka z klinem naprowadzającym o różnym kącie rozwarcia a) 15° , b) 65° 70
Rys. 5.5 Moc turbiny w funkcji kąta β- rozwarcia kierownicy 71
Rys. 5.6 Efektywność układu kierownica wirnik w funkcji kąta β 72
Rys. 5.7 Wyniki badania prędkość chwilowej wiatru 74
Rys. 5.8 Zależność mocy od obrotów wirnika dla wiatraka 800W. 75
Rys. 5.9 Zależność obrotów dla maksymalnej mocy od prędkości wiatru 76
Rys. 5.10 Słabe obciążenie 77
Rys. 5.11 Średnie obciążenie 77
Rys. 5.12 Mocne obciążenie 77
Rys. 5.13 Bardzo mocne obciążenie 77
Rys. 5.14 Słabe obciążenie 78
Rys. 5.15 Średnie obciążenie 78
Rys. 5.16 Mocne obciążenie 78
Rys. 5.17 Bardzo mocne obciążenie 78
Rys. 5.18 Przykładowy pomiar mocy wiatraka 4 kW w funkcji prędkości wiatru 79
Rys. 5.19 Rozkład prędkości wiatru w przeprowadzonym cyklu pomiarowym 80
Rys. 5.20 Przyrost wyprodukowanej mocy. 81
Rys. 5.21 Punkty pomiarowe dla rezystancji 28 Ohm 82
Rys. 5.22 Punkty pomiarowe dla rezystancji 35 Ohm 82
Rys. 5.23 Punkty pomiarowe dla rezystancji 88 Ohm 82
Rys. 5.24 Rozkład prędkości powietrza na wylocie z tunelu bez wirnika 84

Rys. 5.25 Rozkład prędkości powietrza dla minimalnego i maksymalnego odbioru mocy na wylocie z tunelu z wirnikiem a) jednomodułowym i b) czteromodułowym, ... 85
Rys. 5.26 Moment wirnika w funkcji prędkości obrotowej dla wirnika jedno modułowego dla różnych prędkości wiatru 85
Rys. 5.27 Zależność współczynników (a, b, c) od prędkości napływu V 86
Rys. 5.28 Wyniki eksperymentów i ich aproksymacja dla wirnika jedno modułowego 87
Rys. 5.29 Moment wirnika w funkcji prędkości obrotowej dla wirnika cztero modułowego 88
Rys. 5.30 Zależność współczynników a, b i c od prędkości napływu V 89
Rys. 5.31 Wyniki eksperymentów i ich aproksymacja dla wirnika czteromodułowego 89
Rys. 5.32 Porównanie charakterystyk mocy P [W] obu wirników 91
Rys. 5.33 Napięcie na zaciskach generatora AFPMG330 w funkcji prędkości obrotowej bez obciążenia 94
Rys. 5.34 Efektywność generatora AFPMG330 w funkcji mocy elektrycznej dla prędkości obrotowej 120RPM 95
Rys. 5.35 Napięcie na zaciskach generatora AFPMG330 w funkcji natężenia prądu dla prędkości obrotowej 120 RPM 95
Rys. 5.36 Porównanie wyników eksperymentu z danymi producenta dla generatora AFPMG330 96
Rys. 5.37 Łącznik generatora turbiny wiatrowej a) przed awarią i b)po awarii 97
Rys. 5.38 Sprzęgło płytkowe 97
Rys. 5.39 Wykres maksymalnych momentów skręcających dla Ø12 99
Rys. 5.40 Wykres maksymalnych momentów skręcających dla Ø30 100
Rys. 5.41 Elementy poddane zbyt wysokim obciążeniom a) łącznik osi, b) oś wirnika 100
Rys. 5.42 Zmiana ilości modułów a) jeden moduł, b) dwa moduły 101
Rys. 5.43 Multiplikacja turbin a) podwójna i b) potrójna 102
Rys. 5.44 Elektrownia sześcio-turbinowa kratownicowa 103
Rys. 5.45 Zwiększenie wymiarów modułu 104
Rys. 0.1 Rekord danych 124
Rys. 0.1 Wyniki dla 240 RPM 126
Rys. 0.2 Wyniki dla 350 RPM 127
Rys. 0.3 Wyniki dla 450 RPM 128
Rys. 0.4 Wyniki dla 600 RPM 129

STRESZCZENIE

Badania i rozwój prototypów innowacyjnej elektrowni wiatrowej

Autor uczestniczył w opracowaniu koncepcji, projektowaniu i budowie prototypów innowacyjnego rozwiązania turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu wirników. W miarę postępu prac i przygotowania komercjalizacji wiatraka pojawiły się nowe problemy, pytania i koncepcje. Wymagały one przeprowadzenia badań i weryfikacji na poziomie naukowym. Analizowane zagadnienia związane były z wytwarzaniem wiatraka. Stąd zestawienie przeprowadzonych badań w postaci pracy doktorskiej zostało opracowane w Instytucie Technik Wytwarzania w Zakładzie Inżynierii Systemów Technicznych na Uniwersytecie Technologiczno-Przyrodniczym w Bydgoszczy.

W pracy przeanalizowano różne warianty rozwiązań konstrukcyjnych elementów wiatraka w aspekcie wytwarzania oraz w aspekcie eksploatacyjnym. Kilkuletnie użytkowanie prototypów pozwoliło na wyciągnięcie wniosków co do jakości różnych rozwiązań oraz wytypowanie tych, które najlepiej nadają się do dalszej eksploatacji.

Szczególną uwagę zwrócono w pracy na możliwości modyfikacji samych wirników. Takie działanie musi być jednak zweryfikowane pod kątem efektywności produkcji energii przez zmodyfikowany wirnik. Zaprojektowano i zbudowano stanowisko do badań wirników. Opracowano systemy pomiarowe oraz metodologię prac badawczych. W ramach tej tematyki, na tym stanowisku wykonano dwie prace magisterskie pod kierunkiem autora. Jedną na Politechnice Gdańskiej a drugą na Politechnice w Genui we Włoszech.

Istotnym elementem składowym elektrowni wiatrowej jest generator. Okazało się, że dostępne generatory są zazwyczaj bardzo słabej jakości a ich opisy techniczne dostarczane przez producentów są niedostateczne. Koniecznym więc stało się zbudowanie specjalnego stanowiska do badania generatorów, aby można było wybrać odpowiedni generator do wiatraka. Zaprojektowano stanowisko o szerokich możliwościach pomiarowych oraz opracowano metodologię pomiarową. Pozwoliło to na wybór odpowiedniego generatora oraz na pomierzenie pełnej jego charakterystyki.

Opracowano metodologię badania efektywności użytkowanych prototypów. Wyznaczono charakterystyki obciążeń i zweryfikowano je zarówno w badaniach w tunelu jak i w warunkach rzeczywistych. Zidentyfikowano wiele aspektów pomiarów w warunkach rzeczywistych, które są bardzo trudne w interpretacji. Oceniono możliwości generowania energii elektrycznej przez prototypy wiatraków oraz przeanalizowano funkcjonowanie zastosowanych algorytmów obciążania wirników w celu pozyskiwania energii elektrycznej.

Na zakończenie podjęto dyskusję na temat metodologii multiplikowania mocy z wiatraków. Nie zawsze opłaca się budowa nowego wiatraka o większych gabarytach, ale zastosowanie kilku egzemplarzy istniejącego wiatraka.

ABSTRACT

Investigation and development of innovative wind power plant prototypes

The author of this dissertation participated from the beginning in the designing and construction of prototypes of the innovative type of a wind turbine, of vertical axis of rotation. During the development of this wind turbine and the efforts towards its commercialisation new problems appeared which requested further investigations on scientific level. Analysed problems were connected with manufacturing processes, materials and technology. Hence, the present analysis was carried out at Manufacturing Dept. in the Faculty of Mechanical Engineering at the Technological-Environmental University in Bydgoszcz.

Within the thesis different variants of construction for many details were analysed, in the aspect of its production and exploitation. Multi-year exploitation of different prototypes allowed to choose superior constructions which are the best fitted for further exploitation.

Specific attention was taken in the thesis to the modifications of rotors. Proposed modifications have to be validated in the light of effectiveness of energy production. Test stand for the investigation of rotors has been designed and built. Measurement systems were developed together with the investigation methodology. Within the scope of work two master thesis were prepared under the supervision of the author of this thesis. One was defended at the Gdansk University of Technology and the other at the Technical University in Genova, Italy.

An essential part of the wind turbine power plant is the generator. It has turned out that the generators offered on the market are of low quality and the technical information delivered by the manufacturers is very limited. A special test section has been designed and built with wide spectrum of possible measurements. This allowed to choose generator and to measure its power characteristics.

Methodology of prototype effectiveness measurement has been worked out and applied. The characteristics of rotor loading was defined and it was verified in wind tunnel testing and in real conditions. Many aspects in real conditions measurement were identified which make such tests very difficult for interpretation. Prototype ability to power generation was estimated and functionality of rotor loading algorithms was evaluated.

Finally a discussion was undertaken concerning multiplication of power generation from wind mills. Not always the construction of new larger wind turbine is advantageous but the use of few small wind turbines may be superior.

ANEKS I

Struktura danych z pomiarów na dachu IMP PAN

Dane:

Przykładowe analizowane dane obejmują pomiar trwający osiem dni (okres ciągłego zapisu trwał od 2015-08-18 10:18:31 do 2015-08-26 12:42:02). Dane zapisywane były w pliku z okresem 6 sekund, pojedynczy rekord danych zawiera rysunku 0.1.

```
2015-08-18 10:18:31
Naj,Ud=11.61,Ug=11.77,I=0.08,N1=304.50,N2=271.50,D=0,P=1.1
5,PAvg=0.24
2015-08-18 10:18:32 PnajUsrH,SUM=90.51,CNT=240,AVG=0.38
2015-08-18 10:18:32 anemoUsrH,SUM=476.00,CNT=240,AVG=1.98
2015-08-18 10:18:32 Nieb,U=0.00,I=4.22
2015-08-18 10:18:33 Vert,U=0.00,I=0.00
2015-08-18 10:18:34
Czar,Iwind=0.0,Ubat=26.3,Uwind=24.2,Ibat=0.0,Pwind=0.18
2015-08-18 10:18:34 Anemo,T=290636,v=2.87,vAvg=3.23
2015-08-18 10:18:35 AvgH,PNajAvgH=0.38,AnemoAvgH=1.98
```

Rys. 0.1 Rekord danych

Kolejne rekordy danych zapisywane są w pliku tekstowym, który jest następnie analizowany.

Każdy wiersz danych składa się z trzech elementów:

znacznik czasu (w formacie YYYY-MM-DD hh:mm:ss)

identyfikator wiersza danych (w formacie „XXX,")

dane.

Znacznik czasu opisuje datę i godzinę pomiaru wielkości w danym wierszu.

Identyfikator wiersza danych opisuje jakie wielkości będzie zawierał dany wiersz

Dane zawierają liczbowe wartości wielkości mierzonych zapisane w postaci" SKRÓT=XX.YY", gdzie „SKRÓT" to symbol mierzonej wielkości, po nim występuje znak równości, a następnie wartość zmierzona (zależnie od wielkości zapisana w postaci liczby całkowitej albo liczby z dwoma miejscami dziesiętnymi).

Ze względu na przedmiot niniejszego opracowania interesujące są tylko dane z wierszy rozpoczynających się od identyfikatorów „Naj" i Anemo". Znaczenie poszczególnych wielkości w tych wierszach to:

w wierszu zaczynającym się od **Anemo**:

v prędkość chwilowa wiatru [m/s]

vAvg uśredniona wartość wiatru z 15 sekund z wielu pomiarów [m/s] w wierszu zaczynającym się od **Naj**

Ug chwilowe napięcie DC zmierzone za mostkiem - do obliczenia mocy należy dodać do tej wartości 2V z tytułu strat na mostku [V]

I wartość prądu chwilowego płynącego w obciążeniu [A]

N1 obroty wirnika 1. [RPM]

N2 obroty wirnika 2. [RPM]

D stan położenia kierownic:

D=0 kierownice otwarte i nie było zmiany stanu

D=1 kierownice otwarte i była zmiana stanu

D=2 kierownice zamknięte i nie było zmiany stanu

D=3 kierownice zamknięte i była zmiana stanu

P wartość mocy obliczona wartości chwilowych napięcia i prądu [W]

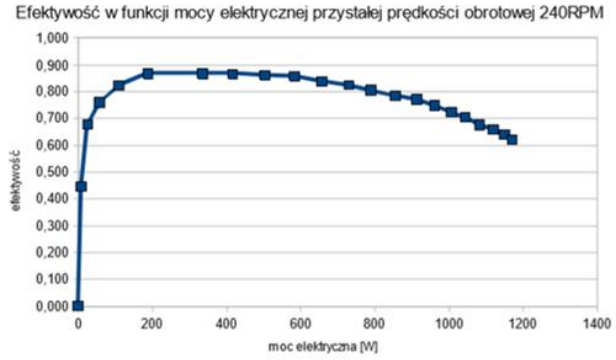
PAvg uśredniona wartość mocy z 15 sekund [W]

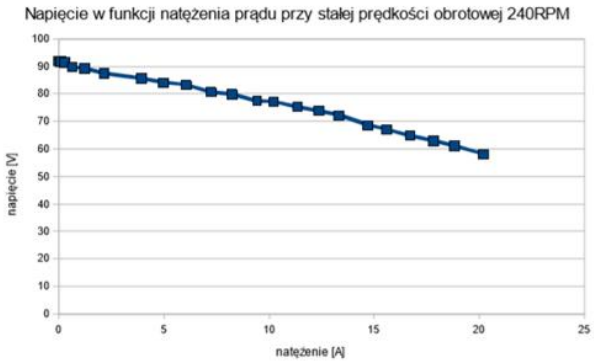
Przy odczycie danych z pliku kolejność wierszy z danymi nie jest zawsze powtarzalna. Konieczna jest niezależna analiza każdego wiersza danych; z zawartości odczytanego wiersza nie można wnioskować o tym jakie dane są zapisane w kolejnym wierszu.

ANEKS II

Obroty generatora 240RPM

nr	Obroty silnika [1/s]	Obroty momento mierza [1/s]	Moment na wale momento-mierza [Nm]	Moc mechaniczna [W]	Obroty generatora [1/s]	Napięcie U[V]	Natężenie I[A]	Moc el. [W]	Efektywność []
1	23,4	6,5	0,35	14,246	4,06	91,8	0	0	0,000
2	23,4	6,5	0,45	18,532	4,06	91,6	0,09	8,24	0,445
3	23,4	6,5	0,93	37,799	4,06	91,3	0,28	25,56	0,676
4	23,4	6,5	1,86	75,721	4,06	89,7	0,64	57,41	0,758
5	23,4	6,5	3,27	133,441	4,06	89,2	1,23	109,72	0,822
6	23,4	6,5	5,32	217,326	4,06	87,3	2,16	188,57	0,868
7	23,3	6,47	9,5	385,957	4,05	85,5	3,92	335,16	0,868
8	23,3	6,47	11,8	479,764	4,05	84	4,95	415,8	0,867
9	23,3	6,47	14,37	584,138	4,05	83,2	6,05	503,36	0,862
10	23,3	6,47	16,74	680,261	4,05	80,6	7,24	583,54	0,858
11	23,3	6,47	19,26	782,928	4,05	79,8	8,23	656,75	0,839
12	23,3	6,47	21,81	886,449	4,05	77,4	9,44	730,66	0,824
13	23,2	6,44	24,25	981,397	4,03	77,1	10,23	788,73	0,804
14	23,2	6,44	26,98	1091,916	4,03	75,2	11,37	855,02	0,783
15	23,1	6,42	29,49	1188,290	4,01	73,8	12,38	913,64	0,769
16	23,1	6,42	31,94	1286,941	4,01	72,1	13,33	961,09	0,747
17	23,1	6,42	34,6	1394,418	4,01	68,5	14,7	1006,95	0,722
18	23	6,39	37,06	1486,875	3,99	67	15,59	1044,53	0,703
19	23	6,39	40,03	1606,000	3,99	64,8	16,71	1082,81	0,674
20	22,9	6,36	42,57	1700,467	3,98	62,8	17,82	1119,1	0,658
21	22,9	6,36	45,04	1799,097	3,98	61,1	18,81	1149,29	0,639
22	22,9	6,36	47,37	1892,133	3,98	58	20,19	1171,02	0,619

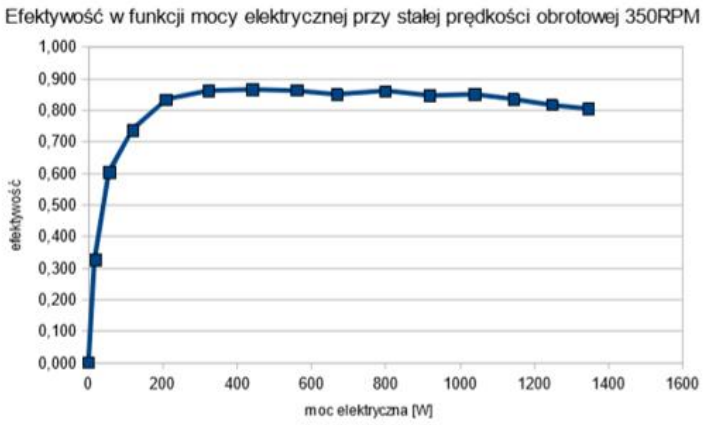


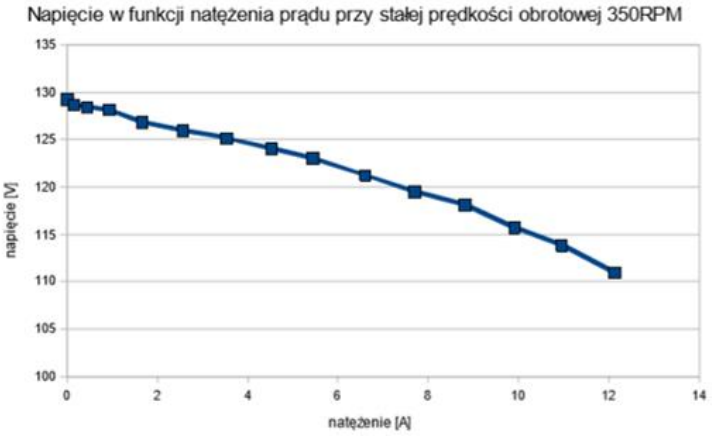


Rys. 0.1 Wyniki dla 240 RPM

Obroty generatora 350RPM

nr	Obroty silnika [1/s]	Obroty momento mierza [1/s]	Moment na wale momento-mierza [Nm]	Moc mechaniczna [W]	Obroty generatora [1/s]	Napięcie U[V]	Natężenie I[A]	Moc el. [W]	Efektywność []
1	33,8	9,39	0,48	28,184	5,87	129,2	0	0	0,000
2	33,8	9,39	0,94	55,543	5,87	128,6	0,14	18	0,324
3	33,8	9,39	1,59	93,751	5,87	128,4	0,44	56,5	0,603
4	33,8	9,39	2,72	160,143	5,87	128,1	0,92	117,85	0,736
5	33,7	9,36	4,3	252,726	5,85	126,8	1,66	210,49	0,833
6	33,7	9,36	6,4	376,002	5,85	125,9	2,57	323,56	0,861
7	33,7	9,36	8,7	511,212	5,85	125,1	3,53	441,6	0,864
8	33,6	9,33	11,1	650,350	5,83	124	4,52	560,48	0,862
9	33,6	9,33	13,43	786,856	5,83	123	5,43	667,89	0,849
10	33,6	9,33	15,9	931,626	5,83	121,2	6,61	801,13	0,860
11	33,5	9,31	18,63	1088,885	5,82	119,5	7,7	920,15	0,845
12	33,5	9,31	20,98	1225,814	5,82	118,1	8,81	1040,46	0,849
13	33,4	9,28	23,59	1374,200	5,8	115,7	9,9	1145,43	0,834
14	33,4	9,28	26,22	1527,963	5,8	113,8	10,97	1248,39	0,817
15	33,3	9,25	28,86	1676,652	5,78	110,9	12,14	1346,33	0,803

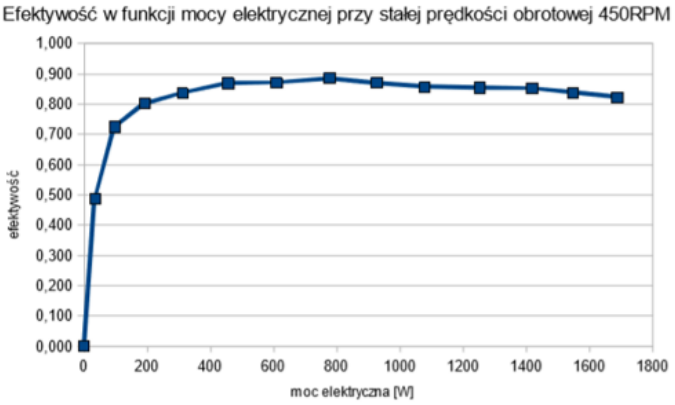


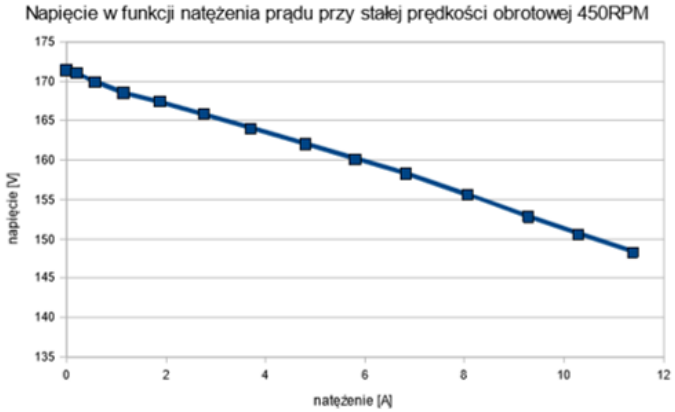


Rys. 0.2 Wyniki dla 350 RPM

Obroty generatora 450RPM

nr	Obroty silnika [1/s]	Obroty momento mierza [1/s]	Moment na wale momento-mierza [Nm]	Moc mechaniczna [W]	Obroty generatora [1/s]	Napięcie U[V]	Natężenie I[A]	Moc el. [W]	Efektywność []
1	43,6	12,11	0,44	33,769	7,57	171,4	0	0	0,000
2	43,6	12,11	0,97	73,927	7,57	171	0,21	35,91	0,486
3	43,6	12,11	1,76	133,860	7,57	169,9	0,57	96,84	0,723
4	43,6	12,11	3,15	239,808	7,57	168,5	1,14	192,09	0,801
5	43,5	12,08	4,93	374,398	7,55	167,4	1,87	313,04	0,836
6	43,5	12,08	6,93	525,478	7,55	165,8	2,75	455,95	0,868
7	43,4	12,06	9,23	699,046	7,54	164	3,71	608,44	0,870
8	43,4	12,06	11,63	880,148	7,54	162	4,81	779,22	0,885
9	43,3	12,03	14,14	1067,850	7,52	160,1	5,8	928,58	0,870
10	43,2	12	16,75	1262,129	7,5	158,3	6,82	1079,61	0,855
11	43,1	11,97	19,57	1471,279	7,48	155,6	8,06	1254,14	0,852
12	43,1	11,97	22,15	1665,480	7,48	152,8	9,28	1417,98	0,851
13	42,9	11,92	24,72	1850,014	7,45	150,6	10,28	1548,17	0,837
14	42,8	11,89	27,53	2055,246	7,43	148,3	11,38	1687,65	0,821

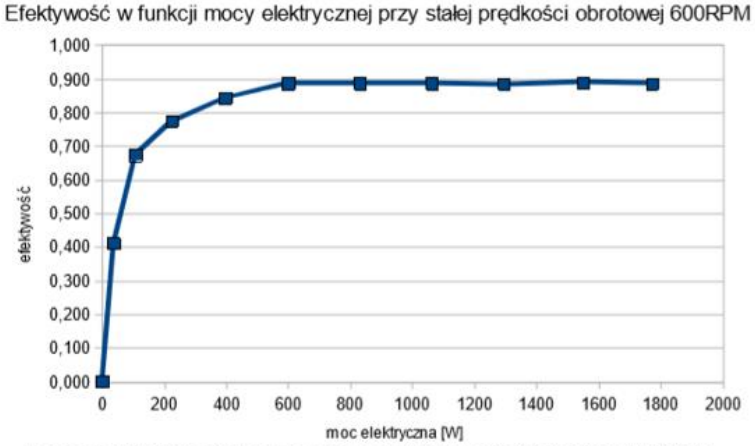


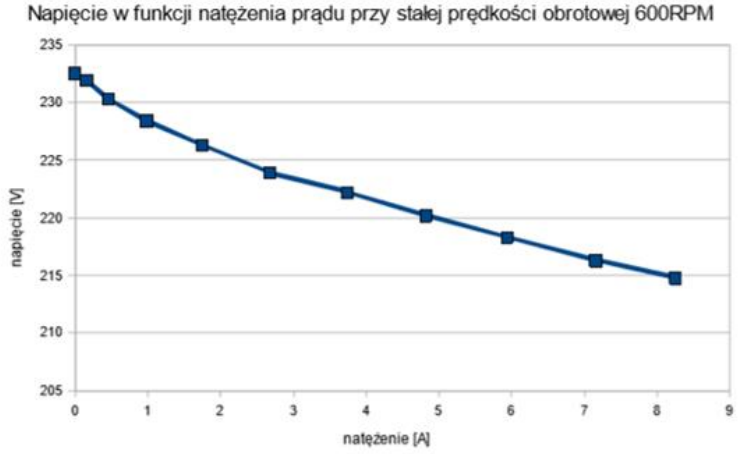


Rys. 0.3 Wyniki dla 450 RPM

Obroty generatora 600RPM

nr	Obroty silnika [1/s]	Obroty momento mierza [1/s]	Moment na wale momento-mierza [Nm]	Moc mechaniczna [W]	Obroty generatora [1/s]	Napięcie U[V]	Natężenie I[A]	Moc el. [W]	Efektywność []
1	58,2	16,17	0,52	52,998	10,1	232,5	0	0	0,000
2	58,2	16,17	0,89	90,158	10,1	231,9	0,16	37,1	0,412
3	58,1	16,14	1,55	156,996	10,09	230,3	0,46	105,94	0,675
4	58,1	16,14	2,85	288,957	10,09	228,4	0,98	223,83	0,775
5	58,1	16,14	4,63	469,365	10,09	226,3	1,75	396,03	0,844
6	57,9	16,08	6,67	673,880	10,05	223,9	2,67	597,81	0,887
7	57,8	16,06	9,28	935,920	10,04	222,2	3,74	831,03	0,888
8	57,6	16	11,9	1195,712	10	220,2	4,82	1061,36	0,888
9	57,5	15,97	14,59	1463,237	9,98	218,3	5,93	1294,52	0,885
10	57,3	15,92	17,4	1739,482	9,95	216,3	7,16	1548,71	0,890
11	57,1	15,86	20,07	1999,014	9,91	214,8	8,25	1772,1	0,886





Rys. 0.4 Wyniki dla 600 RPM