

Andrzej SZAFRANIEC

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

NIEKTÓRE ASPEKTY PRACY WIATRaków O OSI PIONOWEJ

Streszczenie. W opracowaniu podjęto próbę przeanalizowania warunków pracy wiatraka pionowego. Rezultaty przeprowadzonych obliczeń pozwalają wyciągnąć wnioski przydatne do projektowania tego typu silników.

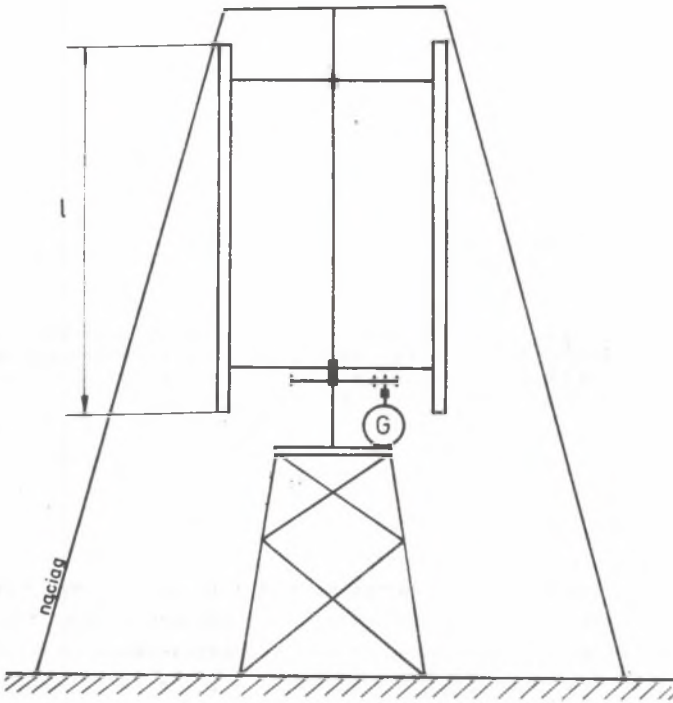
1. Wstęp

Współczesne silownie wiatrowe średniej i dużej mocy są oparte na wiatrakach o osi poziomej. Ich aerodynamika jest stosunkowo nieźle poznana. Istnieje cały szereg udanych konstrukcji odznaczających się dobrą sprawnością. W warunkach krajowych najszersze zastosowanie mogą znaleźć silniki wiatrowe małej mocy rzędu co najwyżej kilkunastu kilowatów, znajdujące zastosowanie głównie w rolnictwie do napędu generatorów, maszyn roboczych, pomp itd. Istotnym elementem staje się niezawodność konstrukcji, brak większych wymagań, co do obsługi i konserwacji oraz oczywiście niski koszt. Wiatry "krajowe" cechują się niewielką prędkością oraz zmiennością kierunku. W związku z tym ostatnim czynnikiem silniki poziome muszą być dodatkowo wyposażone w urządzenia orientujące "na wiatr", co niewątpliwie podnosi koszt całości. Współczesne wiatraki o osi pionowej cechują się niewiele niższą sprawnością [1] (w porównaniu z najlepszymi wiatrakami szybkoobrotowymi poziomymi różnica ta dochodzi do 10%). Są jednak z reguły tańsze. Nie wymagają bowiem urządzeń orientujących "na wiatr" i koszt podstawy (wieży), na której stoi wiatrak jest mniejszy (wieża niższa).

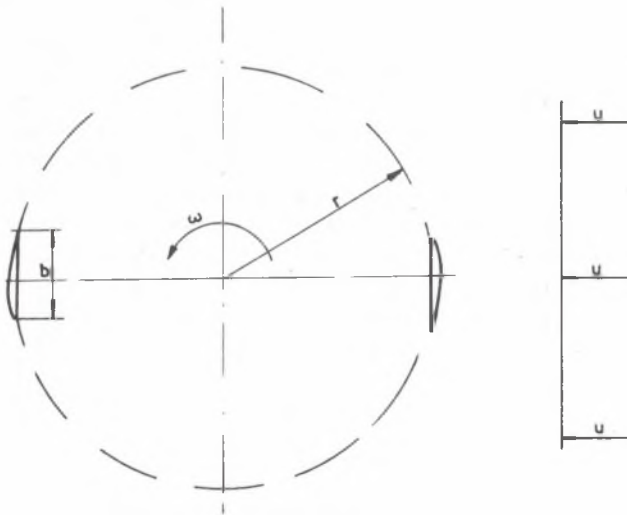
W zakresie małych mocy (do kilkunastu kW) maszyny tego typu są zdolne konkurować z silnikami poziomymi. Ze skąpych źródeł literaturowych wiadomo, że są one przedmiotem badań w wielu wysoko rozwiniętych krajach zachodnich (Kanada, Stany Zjednoczone, Francja, Dania).

2. Analiza pracy wiatraka pionowego

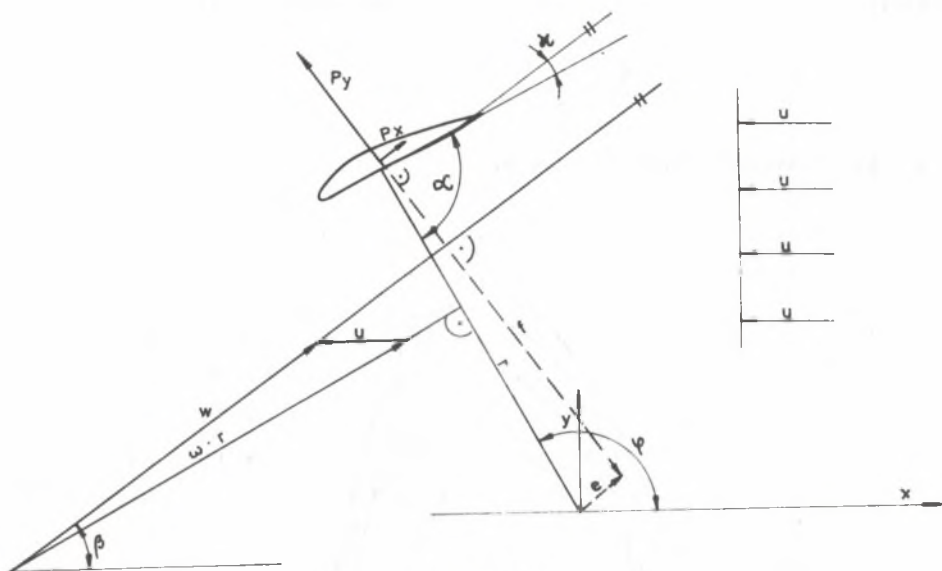
Z wielu stosowanych niegdyś konstrukcji, w chwili obecnej, znajdują zastosowanie silniki typu turbina Darieusa. Na rys. 2.1 i 2.2 przedstawiono schemat ideowy rozważanego wiatraka. Jest to wiatrak o dwóch łop-



Rys. 2.1



Rys. 2.2



Rys. 2.3

tach profilowanych prostych. W zależności od wymagań (rozruch) wiatrak może posiadać więcej łopat, niemniej należy pamiętać, że koszt silnika wzrośnie. Na rys. 2.3 przedstawiono siły działające na profil łopaty. Położenie profilu łopaty określono kątem φ . Prędkość względna wiatru zgodnie z przyjętym na rys. 2.3 układem współrzędnych wynosi

$$w = -u - \omega r e^{i\varphi}, \quad (2.1)$$

gdzie:

- u - prędkość wiatru,
- ω - prędkość kątowa wiatraka,
- r - promień wiatraka.

W rozważaniach nad silnikami wiatrowymi stosuje się pojęcie szybkoobrotowości

$$\varepsilon = \frac{\omega r}{u}. \quad (2.2)$$

Wtedy

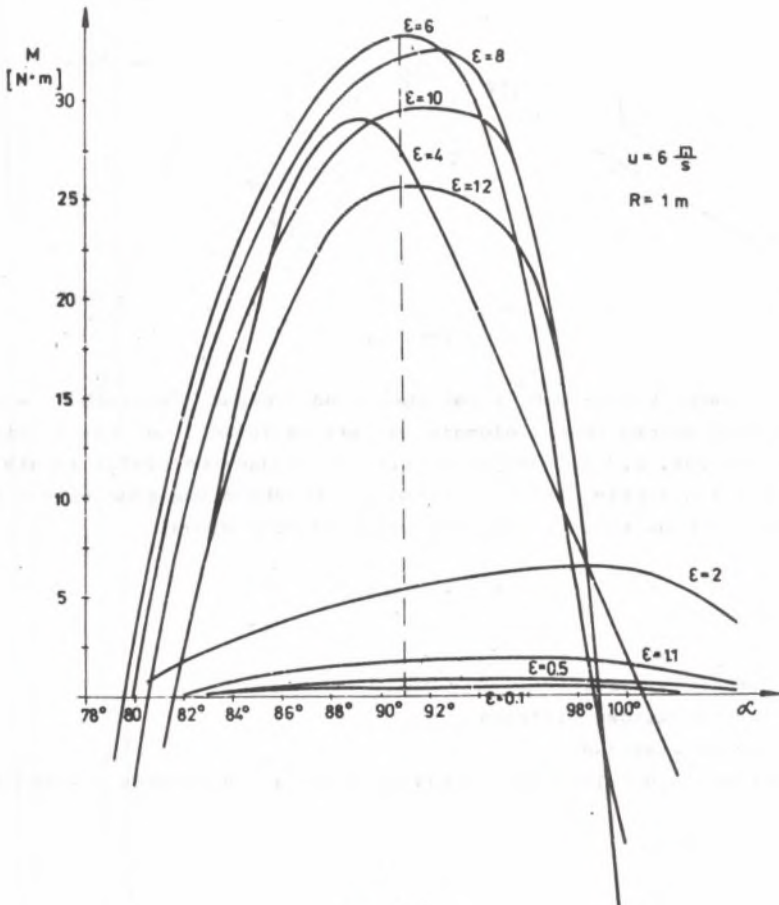
$$w = -u(1 + \varepsilon e^{i\varphi}). \quad (2.3)$$

Niech $|w|$ oznacza bezwzględną wartość prędkości w a β jej kierunek. Kąt natarcia na profil \mathcal{H} zgodnie z przyjętymi oznaczeniami wyniesie

$$\alpha = \beta - \varphi - \alpha\varphi + 180^\circ, \quad (2.4)$$

gdzie:

$\alpha\varphi$ - kąt ustawienia profilu łopaty.



Rys. 2.4

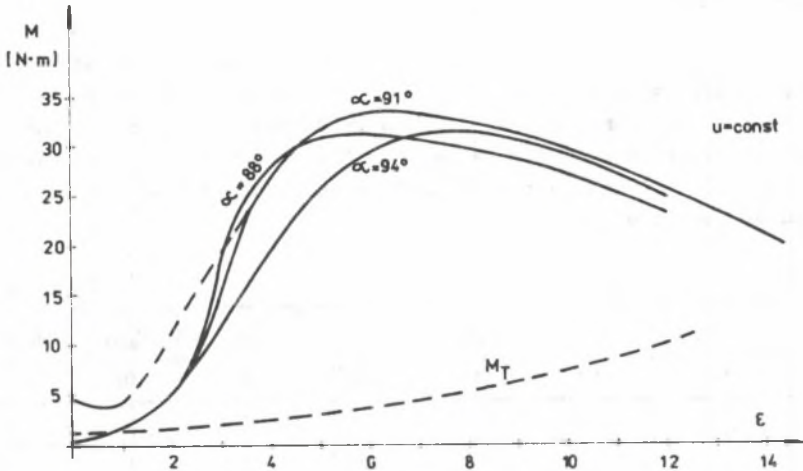
Teraz z katalogu profilów można otrzymać liczby siły nośnej c_y i oporu c_x dla pojedynczego profilu i momenty działające na jednołopatowy wirnik wynoszą

$$M_x = -c_x \rho \cos^2 \delta \frac{\varrho |w|^2}{2} S \quad (2.5)$$

$$M_y = c_y \rho \sin^2 \delta \frac{\varrho |w|^2}{2} S$$

gdzie:

- $\delta = \beta - \varphi + 90^\circ$,
 S - powierzchnia łopaty,
 ϱ - gęstość powietrza.



Rys. 2.5

Znak dodatni obowiązuje dla kierunku przeciwnego ruchowi wskazówek zegara. Jak wiadomo sumaryczny moment działający na wirnik jest funkcją wielu zmiennych, co komplikuje nawet elementarne obliczenia. Wykonano rachunki dla przykładowego i modelowego wirnika przy ε zmieniającym się od 0,1 do 12 przy różnych kątach ustawienia łopaty α_0 . W obliczeniach przyjęto $r = 1$ m, $S = 0,6$ m², $\varphi = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $u_{\text{nom}} = 6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, profil NACA 4412. Zasadnicze wyniki przedstawiono na rys. 2.4 oraz 2.5. Na rys. 2.4 pokazano zależność momentu napędowego z pojedynczej łopaty od kąta ustawienia α_0 i szybkoobrotowości ε . Maksymalny moment jak widać przypada dla $\varepsilon = 6$ i $\alpha_0 = 91^\circ$. Dalej widać, że ze zmianą szybkoobrotowości ε (4 ÷ 12) optymalne kąty α_0 nie odbiegają znacznie od $\alpha_0 = 91^\circ$, co pozwala wysnuć wniosek, że wiatrak pra-

kuje z niewiele mniejszą sprawnością (przy stałym $\alpha = \alpha_0$) dla dosyć szerokiego zakresu obciążenia. Rys. 2.5 przedstawia obliczoną charakterystykę momentu napędowego (przy stałej prędkości wiatru u) dla kąta ustawienia łopaty $\alpha = 88^\circ, 91^\circ, 94^\circ$. Jeżeli prędkość wiatru jest stała, to liczba ε jest proporcjonalna do obrotów wiatraka. Jak widać moment dosyć gwałtownie wzrasta dla $\varepsilon > 4$, osiąga maksimum dla $\varepsilon \approx 6$ a następnie opada. Z [1] wynika, że tego typu konstrukcje osiągają maksimum sprawności przy ε od 5 do 7. Ażeby wyznaczyć rzeczywistą charakterystykę wiatraka przy zmianie prędkości wiatru (od rozruchu do wiatrów silnych) należałoby znać funkcje oporów oraz obciążenia. Należy pamiętać przy tym, że moment zmienia się z kwadratem prędkości wiatru (przy zachowaniu stałego ε) a obroty liniowo.

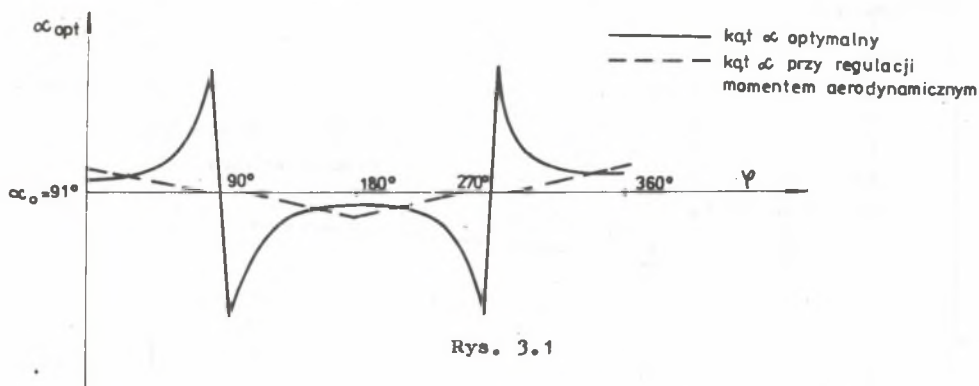
3. Regulacja kąta ustawienia łopaty

Jak łatwo można sobie wyobrazić, otrzymany uprzednio optymalny kąt ustawienia łopaty $\alpha_0 = 91^\circ$ jest pewnym kątem średnim. Teoretycznie, dla każdego kąta φ (położenie profilu) można by dobrać kąt α , przy którym moment napędowy byłby największy. W tabelicy 3.1 porównano wartości momentów maksymalnych dla optymalnych kątów $\alpha(\varphi)$ z momentami dla $\alpha_0 = 91^\circ$. Wartości momentów podano w $[N_m]$.

Tabelica 3.1

φ	M_{α_0}	M_{\max}	$\alpha_{\text{opt}}^\circ$	φ	M_{α_0}	M_{\max}	$\alpha_{\text{opt}}^\circ$
0°	50	50	91°	180°	85	106	86
18°	45	45	92°	198°	75	103	86
36°	34	34	93°	216°	60	83	84
54°	15	22	95°	234°	34	63	82
72°	1	9	97°	252°	9	27	81
90°	-2	-2	86-95	270°	-4	-4	86-95 $^\circ$
108°	9	22	82	288°	-3	10	98
126°	33	50	84	306°	21	28	96
144°	57	75	86	324°	31	41	94
162°	77	95	87	342°	46	46	92
				N_{sr}	34	54	

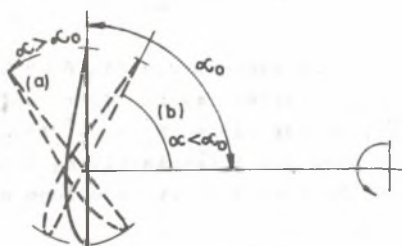
Widać, że możliwe teoretycznie (przy danych ε) jest zwiększenie momentu (czyli i sprawności) o ok. 30%, co w przeliczeniu na sprawność energe-



tyczną szacować można jako wzrost ok. 8%. Jednak charakter zmian kąta α (rys. 3.1) uniemożliwia w praktyce wykorzystanie całej tej nadwyżki. Pomijając rozwiązanie z urządzeniem orientującym, można jedynie rozważać możliwość wykorzystania do regulacji α , momentu sił aerodynamicznych. Charakter zmian tego momentu nie odpowiada żądanym zmianom kąta α . Linia przerywaną na rys. 3.1 zaznaczono zmiany kąta ustawienia przy regulacji momentem aerodynamicznym. Pewien wzrost sprawności jest oczywiście możliwy, nie przekracza on realnie 2-3% w odniesieniu do sprawności energetycznej). Biorąc pod uwagę zawodność tak dobranej regulacji przy innych zakresach prędkości wiatru, przewidywane kłopoty konstrukcyjne i eksploatacyjne wydaje się, że rzeczą uzasadnioną jest rezygnacja ze zmian kąta w trakcie normalnej pracy wiatraka. Pozostaje do rozpatrzenia możliwość i efektywność regulacji przeciw-przeciążeniowej oraz rozruchowej.

3.1. Regulacja przeciążeniowa

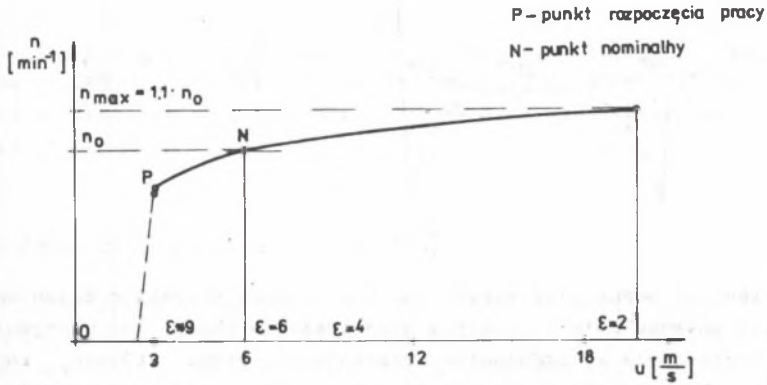
Z kolei zajęto się zagadnieniem regulacji kąta α przy wiatrach nadmiernie silnych ($u > 6 \frac{m}{s}$). Jest rzeczą oczywistą, że można zastosować specjalne urządzenie hamujące, jednak z punktu widzenia kosztów korzystne byłoby wykorzystanie tych samych elementów roboczych. Zmiana kąta α powinna tak obniżyć sprawność (moment napędowy) wiatraka, aby szybkobieżność δ spadała przy niewielkim wzroście obrotów. Teoretycznie mogą istnieć dwa typy tejże regulacji (rys. 3.2), profil może odchylać się na zewnątrz (wzrost



Rys. 3.2

α) lub do wewnątrz (zmniejszanie α). Problem ten można rozwiązać analizując omawiany już rys. 2.4.

Zmiany α powinny być takie, żeby zapewnić charakterystykę wiatraka jak na rys. 3.3



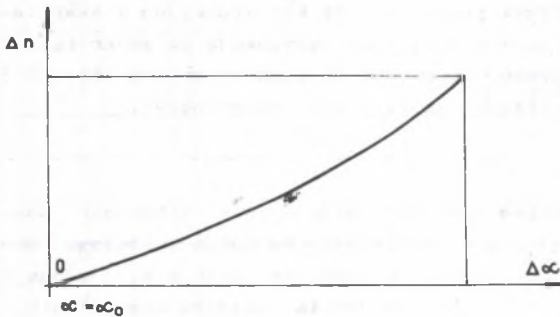
Rys. 3.3

Dla przykładu, w omawianym przypadku, przy prędkości wiatru ok. $20 \frac{m}{s}$, liczba ϵ powinna wynosić ok. 2, obroty mogą wzrosnąć o 10%, o tyle samo może wzrosnąć moment napędowy (wymuszający te obroty).

Jeżeli $M_{Nom} = 33.4 \text{ [N.m]}$
to $M_{max} \approx 37 \text{ [N.m]}$.

Teraz po przeliczeniu M_{max} na nominalną prędkość wiatru

$$M_{max} = M_{max} \left(\frac{u_{nom}}{u_{max}} \right)^2 = 3,3 \text{ [N.m]}.$$



Rys. 3.4

Z wykresu 2.4 dla $\epsilon = 2$ odczytać można $\alpha_b = 86,5^\circ$ lub $\alpha_a = 104,5^\circ$. Dla prędkości $u \approx 9,3 \frac{m}{s}$, analogicznie $\alpha_b = 84^\circ$ i $\alpha_a = 96^\circ$. Jak widać jedynie rozwiązanie (a) z rys. 3.2 zapewni płynną zmianę odchyłki $\Delta\alpha$ ze zmianą prędkości wiatru. Na rys. 3.4 przedstawiono obliczoną zależność $\Delta\alpha$ od Δn .

Oczywiście zmiany $\Delta\alpha$ będą realizowane przy wykorzystaniu siły odśrodkowej. Należy tak teraz dobrać mechanizm regulujący, by zapewnił charak-

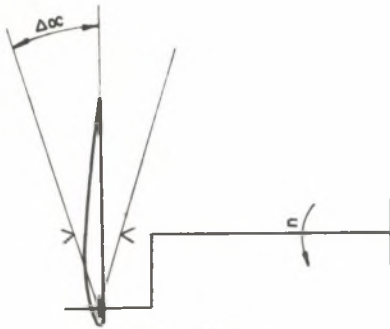
terystykę zbliżoną do rys. 3,4 oraz był mało wrażliwy na działające w tym samym czasie momenty sił aerodynamicznych.

3.2. Możliwości rozruchowe, praca przy niskich szybkościach

Z rys. 2.5 jasno wynika, że wiatrak ma bardzo mały moment rozruchowy, mogący się okazać zbyt mały by pokonać opory własne, przekładni, genera-

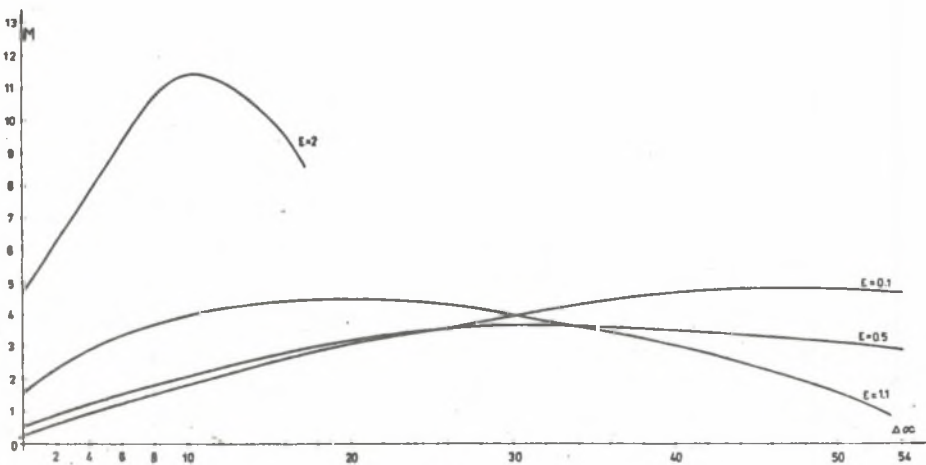
tora. Charakterystyka 2,5 została obliczona dla stałej prędkości wiatru $u = 6 \frac{m}{s}$. Należy pamiętać jednak, że rozpoczęcie pracy powinno nastąpić przy prędkościach mniejszych, ok. $3 \frac{m}{s}$. Wartości i tak małych momentów należy jeszcze podzielić przez cztery, co w naszym przypadku daje uśredniony moment rozruchowy ok. 0,08 N.m z łopaty.

Wynika stąd oczywista potrzeba jakiegoś urządzenia rozruchowego. Zwykle stosuje się dodatkowy wiatrak typu Savoniusa [1]. Można by jednak w tym celu wykorzystać również łopaty robocze.



Rys. 3.5

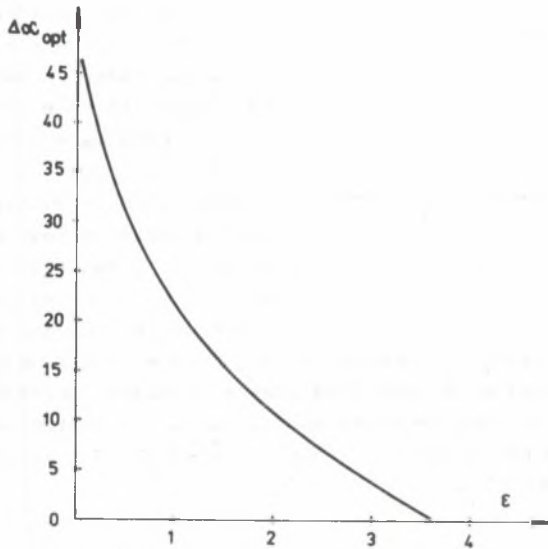
Koncepcja przedstawia się następująco: łopaty wiatraka mają swobodę ustawiania się pod wpływem wiatru (pod wpływem momentu aerodynamicznego) w granicach $\alpha_0 \pm \Delta\alpha_0$. Jak wykazała analiza wyników obliczeń jest to bardzo korzystne przy pracy z małym ϵ . Poczawszy od $\epsilon \approx 3,6$ cecha ta przestaje



rys. 3.6

Rys. 3.6

być pożądana (łopata stawia tylko opór profilowy, a siła nośna jest 0). Schemat mocowania łopaty przedstawia rys. 3.5. Z kolei na rys. 3.6 przedstawiono zależność momentu napędowego od kąta $\Delta\alpha$ dla różnych ε . Widać, że krzywe $M = f(\Delta\alpha, \varepsilon)$ mają maxima przesuwające się w stronę $\Delta\alpha = 0$ ze wzrostem ε . Ciekawostką może być fakt, że zmiany kąta $\Delta\alpha$, o których była mowa na początku rozdziału 3, miałyby kierunek przeciwny ($\Delta\alpha < 0$). Rys. 3.7 przedstawia zależność $\Delta\alpha_{opt}$ w funkcji ε . Na rys. 2.5 linią przerywaną zaznaczono przebieg charakterystyki w obszarze rozruchowym przy założeniu, że zmiany $\Delta\alpha$ są optymalne. Jak widać średni moment rozruchowy (uśredniony po ψ) wzrósł ok. 15 razy.



Rys. 3.7

Mechanizm regulacji $\Delta\alpha$ powinien wykorzystywać siłę odśrodkową i wyłączać się samoczynnie po doprowadzeniu wirnika do obrotów odpowiadających $\varepsilon \approx 3.5$. W obliczonym modelu, byłyby to obroty ok. 30% nominalnych.

4. Uwagi końcowe

W opracowaniu zarysowano jedynie pewne ogólne, potencjalne możliwości wynikające ze specyfiki działania pionowego silnika wiatrowego. Stopień wykorzystania tych możliwości będzie zależał od wielkości (mocy) badanego silnika oraz jego przeznaczenia. Oprócz ww. problemów istnieje cały szereg zagadnień do rozwiązania, jak np. stosunek średnicy wiatraka do wysokości łopat, wpływ ilości łopat, szerokość łopaty, dynamika regulacji itd.

nie mówiąc już o problemach eksploatacyjnych. Nie można ich rozwiązać bez pracochłonnych badań doświadczalnych.

Problemem, który natomiast można podjąć jest badanie wpływu geometrii profilu na przedstawione wyżej zagadnienia. Będzie ono rozwiązywane w toku dalszych obliczeń. Należy podkreślić tutaj trudności związane z dostępnością podstawowej literatury, nie mówiąc już o wynikach badań maszyn tego typu. Przedstawione rozważania pozwoliły jedynie zarysować pewne prawidłowości, które będą wykorzystane do projektowania sprawnych i niedrogich konstrukcji wiatraków o osi pionowej.

LITERATURA

- [1] Guy Cunty, Eoliennes et aerogenerateurs Aix en, Provence 1979.
- [2] Andrianow W.N. i inni: Wietroelektriczeskije stancji, Moskwa 1960.

Recenzent: prof. dr Jerzy Tymiński

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ ВЕТРЯНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ

Р е з ю м е

В статье описано попытку анализа условий работы ветряного двигателя с вертикальной осью. Результаты выполненных вычислений дадут возможность сформулировать рекомендации по проектированию двигателей этого типа.

SOME ASPECTS OF WORK OF WINDMILL WITH VERTICAL AXIS

S u m m a r y

An analyses of horizontal windmill work is presented. Results of computations enable to draw conclusions useful for design of these motors.