



Elektrownie wiatrowe

spis zawartości:

strony 2 – 169

Wacław Jagodziński – „Silniki wiatrowe”

strony 170 – 192

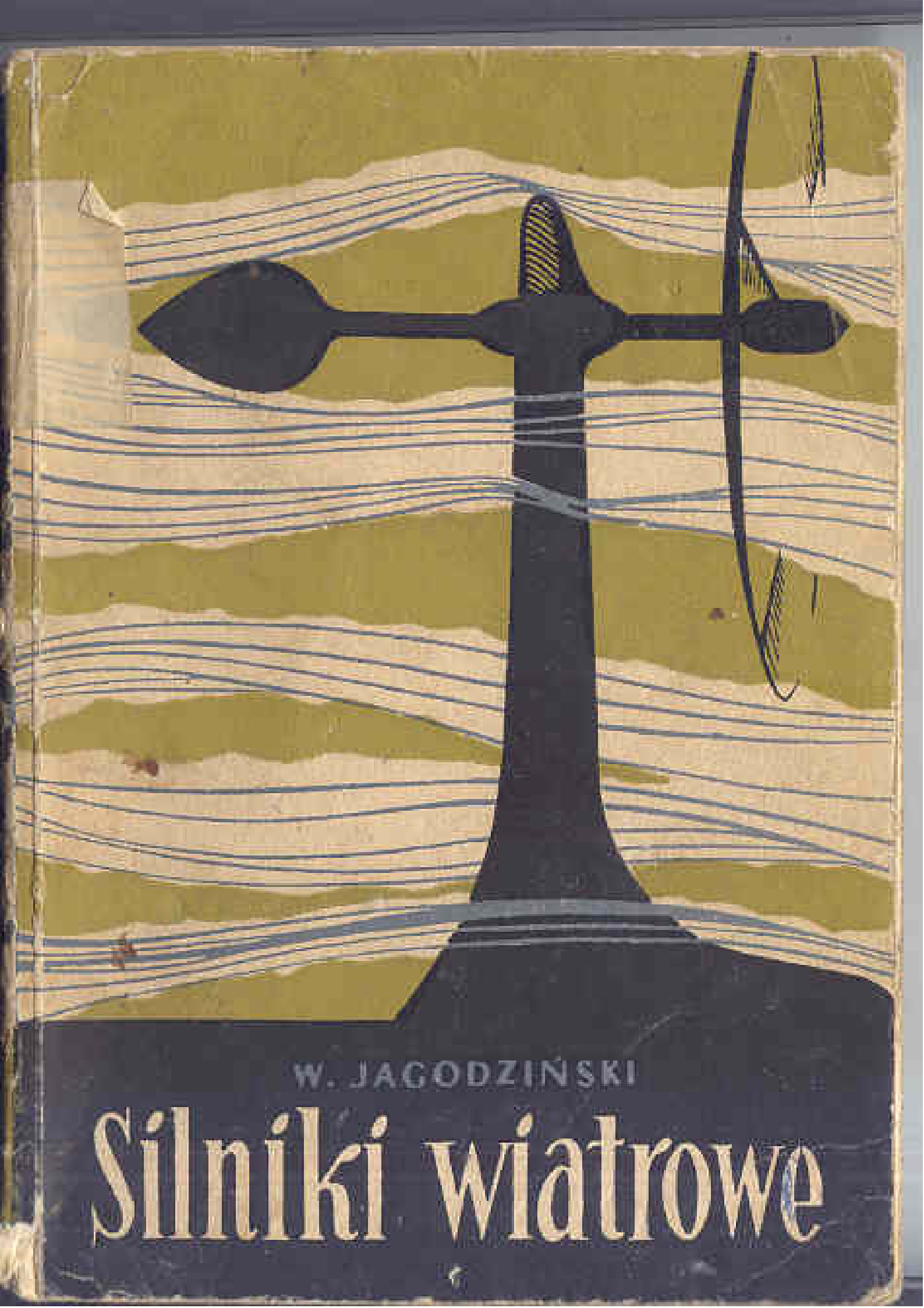
Tadeusz Nowiński, Stanisław Zienkowicz – „Silniki wietrzne”

strony 193 – 207

Zbigniew Osiński – „Silniki wiatrowe”

strony 208 – 210

„Silnik wiatrowy” – opracowanie encyklopedyczne



W. JAGODZIŃSKI

Silniki wiatrowe

Opiniodawca mgr inż. Mieczysław Gajewski
Redaktor naukowy mgr inż. Stefan Błażewski

1959-K-19/4

Książka zawiera podstawowe wiadomości o wietrze i jego energii oraz elementarny wykład aerodynamiki w zastosowaniu do silników wiatrowych. Podano w niej również podstawowe zasady działania silników wiatrowych oraz omówiono ich konstrukcję, właściwości i zastosowanie. Szereż zostały omówione silniki wiatrowe mniejszej mocy oraz urządzenia wiatrowo-elektryczne.

Książka przeznaczona jest dla wszystkich interesujących się zagadnieniem wykorzystania energii wiatru, szczególnie zaś dla techników energetyków.



WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE
Printed in Poland

Redaktor techniczny Bożenna Radzikowska
Korektor techniczny M. Krumholz, M. Kamiński

PWT Warszawa 1959. Wydanie 1. Nakład 2173 Ark. wyd. 22,2 Ark. druk.
Format B5. Pap. druk. sat. kd. V, 70 g. 86x122 produkcji Zakł. Cel-pi-
Włocławku Rękopis oddano do skład. 13. 11. 1958. Podpisano do druku 21.
Druk ukończono w marcu 1959. Symbol 76089/Ms Cena 25.- zł

Zakłady Graficzne im. M. Kasprzaka w Poznaniu 3477/XI.53.-F-3

SPIS TREŚCI

Rozdział I

Właściwości wiatru pod względem wykorzystania energetycznego

	Str.
Właściwości powietrza	7
Powstawanie wiatrów i ich rodzaje	9
Szybkość wiatru	15
Pomiary szybkości wiatru	19
Skala wiatrów Beaufortta	30
Zmienność i częstotliwość wiatrów	31
Energetyka wiatru	35

Rozdział II

Podstawowe wiadomości z aerodynamiki

1. Pojęcia ogólne	49
2. Równanie ciągłości	50
3. Prawo Bernoulliego	51
4. Ciśnienie spiętrzenia przed przeszkodą	53
5. Przepływy potencjalne	55
6. Ruch wirowy. Cyrkulacja	56
7. Podobieństwo mechaniczne	58
8. Warstwa przyścienna. Przepływy burzliwe	58
9. Kształty opływowe	60
10. Czołowe parcie wiatru wywierane na ciała stałe	61
11. Parcie wiatru na płaszczyzny ustawione skośnie	66
12. Parcie wiatru na ciała o profilach opływowych	67
13. Współczynniki aerodynamiczne	68
14. Doskonałość profilu	72
15. Siła nośna niektórych profilów	73
16. Opór indukcyjny	74
17. Moment żyroskopowy	78

Rozdział III

Teoria silników wiatrowych

1. Silniki wykorzystujące czołowe parcie wiatru	84
2. Silniki wykorzystujące boczne oddziaływanie wiatru	89

	Str.
a. Teoria silnika wiatrowego	89
b. Zależności między charakterystycznymi wielkościami wiatru i silników wiatrowych	98
c. Wpływ doskonałości profilu łopatek na moc silnika wiatrowego	105
d. Niektóre przypadki szczególne	112
3. Wyróżnik szybkobieżności	115
4. Straty energii, występujące w silnikach wiatrowych	118
a. Straty wskutek tarcia powietrza o śmigło	121
b. Straty indukcyjne	122
c. Straty ruchu śrubowego powietrza	123
d. Straty w środkowej części koła wiatrowego	123
e. Straty na dopływie i odpływie powietrza	124

Rozdział IV

Nastawianie silników wiatrowych pod wiatr oraz regulacja ich obrotów i mocy

1. Urządzenia do nastawiania silników wiatrowych pod wiatr	125
a. Urządzenia z tylnym sterem	126
b. Urządzenia z nastawczymi silnikami wiatrowymi	136
c. Urządzenia z kołami wiatrowymi za wieżą	138
d. Urządzenia z silnikiem elektrycznym	138
2. Regulacja szybkości obrotowej i mocy silników wiatrowych	140
a. Regulacja przez zmianę powierzchni czynnych skrzydeł	141
b. Regulacja przez zmianę położenia koła wiatrowego względem kierunku wiatru	144
c. Regulacja przez przekręcanie łopat śmigła względem ich osi	153
d. Regulacja hamowaniem aerodynamicznym	166
e. Regulacja obciążeniem użytecznym	171

Rozdział V

Typy silników wiatrowych

1. Klasyfikacja silników wiatrowych	177
2. Silniki wiatrowe o poprzecznej do kierunku wiatru osi obrotu	176
a. Silniki bębnowe	176
b. Silniki karuzelowe	177
c. Silniki rotorowe	184
3. Silniki wiatrowe o równoległej do kierunku wiatru osi obrotu	187
a. Wiatraki	187
b. Silniki wiatrowe wielołopatkowe (turbiny wiatrowe)	199
c. Silniki śmigłowe (szybkobieżne)	206
d. Zespoły wiatrowo-elektryczne	217
4. Porównanie aerodynamicznych charakterystyk silników wiatrowych	252
5. Zalety i wady poszczególnych typów silników wiatrowych	255

Rozdział VI Akumulowanie energii wiatru

	Str.
1. Akumulatory mechaniczne	262
2. Akumulatory elektryczne	266
3. Akumulatory wodne	267
4. Akumulatory chemiczne	269
5. Akumulatory cieplne	270
6. Akumulatory powietrzne (ciśnieniowe)	272

Rozdział VII

Konstrukcje silników wiatrowych, ich wieże, montaż i obsługa

1. Wiatraki wiejskie	274
2. Silniki wiatrowe wolnobieżne (wielołopatkowe)	279
3. Silniki wiatrowe średnobieżne	283
4. Silniki wiatrowe szybkobieżne (śmigłowe)	286
Zespół wiatrowo-elektryczny Д-1,2 o mocy 80 W	286
Zespół wiatrowo-elektryczny ВИМД-3,5 mocy 1 kW	295
5. Słupy i wieże silników wiatrowych	301
a. Słupy drewniane	301
b. Słupy i wieże stalowe	301
c. Słupy i wieże betonowe	304
6. Uwagi dotyczące montażu silników wiatrowych	304
7. Obsługa, remonty i naprawy silników wiatrowych	305
8. Warunki bezpieczeństwa i higieny pracy przy remontach i obsłudze silników wiatrowych	308

Rozdział VIII

Zastosowanie silników wiatrowych

1. Zastosowanie silników wiatrowych w gospodarstwach wiejskich	311
2. Zastosowanie silników wiatrowych w drobnym przemyśle i rzemiośle	317
3. Zastosowanie silników wiatrowych do melioracji gruntów	320
4. Zastosowanie energii wiatru do wytwarzania energii elektrycznej	324
5. Obiór rodzaju prądu elektrycznego w urządzeniach wiatrowych	327

WŁAŚCIWOŚCI WIATRU POD WZGLĘDEM WYKORZYSTANIA ENERGETYCZNEGO

1. WŁAŚCIWOŚCI POWIETRZA

Warstwa powietrza, otaczająca kulę ziemską, stanowi atmosferę. Rozprzestrzenia się ona w górę co najmniej do 1000 km. Objętościowy skład powietrza w całej atmosferze jest jednakowy i wynosi około: 78 % azotu, 21 % tlenu, 0,9 % argonu oraz bardzo małych ilości wodoru, helu, neonu, pary wodnej, dwutlenku węgla, ozonu i innych gazów. Skład powietrza wg ciężaru stanowi nieco ponad 23 % tlenu i nieco mniej niż 77 % azotu oraz innych gazów.

Dolna warstwa atmosfery do wysokości 11 km nazywa się troposferą, zaś pozostała część atmosfery, spoczywająca na troposferze — stratosferą.

Ciśnienie powietrza wynosi przy powierzchni ziemi około 760 mm słupka rtęci (Hg), co odpowiada 10332 kG/m^2 i bardzo szybko maleje z wysokością.

Temperatura powietrza zmienia się również wraz z wysokością; z początku temperatura ta obniża się dość równomiernie wraz ze zwiększeniem się wysokości aż do 11 km, gdzie osiąga ok. -60°C . W troposferze przeciętna roczna temperatura powietrza tuż przy powierzchni ziemi wynosi $+15^\circ\text{C}$ (-18°C na biegunach, $+30^\circ\text{C}$ na równiku). Przeciętny spadek temperatury wraz z wysokością wynosi $6,5^\circ\text{C}$ na 1 km. Przeciętną temperaturę powietrza w strefie umiarkowanej obliczyć można ze wzoru

$$t_p = 15 - 0,0065 \cdot H \quad [1]$$

gdzie:

t_p — temperatura powietrza w $^\circ\text{C}$

H — wysokość w m.



gęstość powietrza $\rho_T = 1,293 \frac{273}{T} \frac{P}{760} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

Gęstość powietrza przy powierzchni ziemi w temperaturze $t_p = 15^\circ\text{C}$ (pod ciśnieniem 760 mm Hg) wynosi

$$\rho_0 = 0,125 \frac{\text{kg} \cdot \text{sek}^2}{\text{m}^4}$$

Zależność gęstości powietrza od jego temperatury i ciśnienia wyraża się wzorem

$$\rho_t = \rho_0 \frac{B}{B_0} \cdot \frac{T_0}{T} = 0,125 \frac{B}{760} \cdot \frac{288}{273+t} = 0,0474 \frac{B}{273+t} \quad [2]$$

stare
jednostki
gdzie:

ρ_t — gęstość powietrza w temperaturze t i pod ciśnieniem barometrycznym B (gęstość — w $\frac{\text{kgsek}^2}{\text{m}^4}$),

ρ_0 — gęstość powietrza w temperaturze 15°C i pod ciśnieniem 760 mm Hg ($0,125 \frac{\text{kgsek}^2}{\text{m}^4}$); $1,2255 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

B — ciśnienie barometryczne w mm Hg,

t — temperatura powietrza.

Lepkość powietrza, charakteryzująca siły jego tarcia wewnętrznego, ujmowana dynamicznym współczynnikiem lepkości μ , w normalnych warunkach ($t = 15^\circ\text{C}$, $B = 760$ mm Hg) wynosi $\mu_0 = 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

lepkość dynamiczna $\mu_0 = 0,181 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kgsek}}{\text{m}^2}$ $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ P}$ $[3]$

Współczynnik kinematyczny lepkości powietrza w normalnych warunkach wynosi

$$\nu_0 = \frac{\mu_0}{\rho_0} = \frac{0,181 \cdot 10^{-5}}{0,125} = 1,45 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{sek}} \quad [4]$$

Wilgotność powietrza jest uzależniona od ilości pary wodnej w nim zawartej. Wilgotność bezwzględna powietrza wyraża się ilością pary wodnej w gramach na 1 m^3 . Wilgotność względna wyraża się procentowym stosunkiem ilości pary wodnej, zawartej w powietrzu i ilości pary wodnej możliwej w tych warunkach w powietrzu w stanie nasycenia.

Wilgotność powietrza wyraża się również i w prężności pary wodnej, przy czym wilgotność względna wyraża się wtedy pro-

centowym stosunkiem prężności pary wodnej w danych warunkach i prężności pary wodnej w stanie nasycenia w tych samych warunkach.

2. POWSTAWANIE WIATRÓW I ICH RODZAJE

Pod pojęciem wiatru rozumiemy ruchy powietrza, powodujące wzajemne przemieszczenie się mas powietrza atmosfery ziemskiej. Ruchy te są nadzwyczaj złożone i tak często zmienne, że tylko ich zasadnicze cechy i przejawy dają się prześledzić i w krótkości opisać.

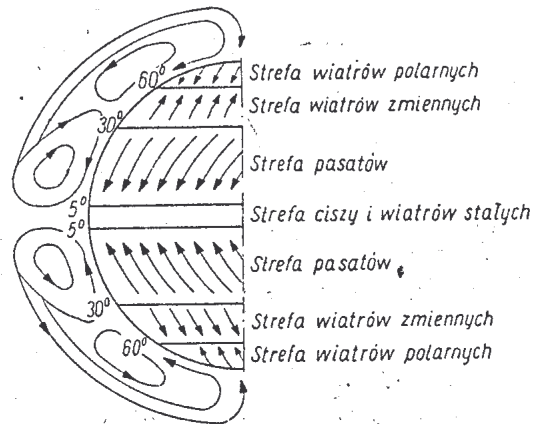
Istotną przyczyną powstawania wiatrów jest niejednakowe ogrzewanie przez słońce powierzchni ziemi w różnych miejscach. Promienie słońca przenikając przez atmosferę, bardzo mało są przez nią pochłaniane, a zatem w małym stopniu ogrzewają bezpośrednio powietrze. Znacznie większa część ciepłego promieniowania słonecznego dostaje się do powierzchni ziemi, która pochłaniając je odpowiednio się ogrzewa. Ilość promieniowania pochłoniętego, przypadająca na jednostkę powierzchni ziemi, zależy w pewnym niewielkim zakresie temperatury — od właściwości tej powierzchni oraz od kąta padania promieni na powierzchnię.

Powietrze, stykając się z powierzchnią ziemi, pobiera od niej ciepło zasadniczo przez przewodzenie i tylko w ten pośredni sposób może ogrzewać się pod działaniem słońca. Ma to bardzo doniosłą rolę w zjawiskach, występujących w atmosferze, zwłaszcza w ruchach jej poszczególnych części.

W związku z tym, że w miejscowościach podrównikowych ogrzewanie powierzchni ziemi jest największe, a więc i największemu nagrzewaniu podlega tam również powietrze. Na biegunach natomiast wobec najmniejszego ich naświetlania przez słońce powierzchnia ziemi jest najmniej ogrzana, a wobec tego i powietrze jest tam najzimniejsze. Ponieważ powietrze ciepłe jest lżejsze od zimnego, w okolicach równika występują silne jego ruchy wstępujące. W wyniku ogrzewania się powietrza i wznoszenia się go ku górze następuje nad powierzchnią ziemi zmniejszenie się barometrycznego ciśnienia powietrza. Na miejsce powietrza, wznoszącego się do góry, w wyniku tego zmniejszenia się ciśnienia napływa od stron biegunów powietrze chłodne, które po ogrza-

niu się znów wznosi się ku górze. Tam na znacznych wysokościach powietrze rozplywa się w kierunku biegunów, stopniowo się oziębia i dotarłszy do nich opada na dół. Na biegunach powietrze ulega zatem ruchom zstępującym.

Na obu półkulach ziemi powstają zatem cyrkulacje powietrza, w wyniku których w pobliżu powierzchni ziemi występują ruchy powietrza w kierunku od biegunów do równika, a na znacznych wysokościach — od równika do biegunów. Na zjawiska te duży wpływ wywiera również zawarta w powietrzu para wodna, która mogąc się w pewnych warunkach skraplać, powoduje przy



Rys. 1. Rozmieszczenie głównych kierunków wiatrów na powierzchni kuli ziemskiej

tym ogrzewanie powietrza, a przez to wznoszenie się go na jeszcze większe wysokości. Takie ruchy powietrza, zwłaszcza poziome, nazywamy wiatrami, przy czym wiatry nad powierzchnią ziemi, nazywają się wiatrami dolnymi, zaś wiejące wysoko — wiatrami górnymi.

Drugim zasadniczym ruchem powietrza na ziemi, ale wywołanym przez jej obrót z zachodu na wschód, jest ruch mas powietrza na znacznych wysokościach w tym samym kierunku, czyli z zachodu na wschód, a nad powierzchnią ziemi — ze wschodu na zachód. W wyniku występowania tego ruchu powietrza poprzednio omówione ruchy od biegunów ku równikowi ulegają odpowiedniemu odchyleniu w stronę zachodnią.

Na rys. 1 przedstawiono schematycznie rozkład głównych kierunków wiatrów na powierzchni kuli ziemskiej.

Na równiku panuje prawie zupełna cisza, a jeśli występują wiatry, to bardzo słabe. Po obu stronach równika, w przyziemnych warstwach, wieją wiatry wschodnie, przy czym na półkuli północnej odchylają się one ku południowi, a na półkuli południowej — ku północy. Strefa tych wiatrów, które nazywamy pasatami, rozprzestrzenia się do ok. 30° szerokości północnej i południowej, czyli obejmuje prawie połowę powierzchni ziemi. Są to zatem najważniejsze wiatry kuli ziemskiej, odznaczające się przy tym znaczną szybkością oraz dużą prawidłowością występowania. Nad pasatami na znacznych wysokościach wieją, jak to już zaznaczono, wiatry zachodnie, zwane antypasatami, których szybkość zwiększa się wraz z szerokością geograficzną.

Bardziej ku północy za strefą pasatów na półkuli północnej wiatr zachodni opada, aż do powierzchni ziemi i odchyła się ku północy. Jest to strefa wiatrów zmiennych o nieregularnych kierunkach i różnych szybkościach, rozciągająca się do ok. 60° szerokości geograficznej.

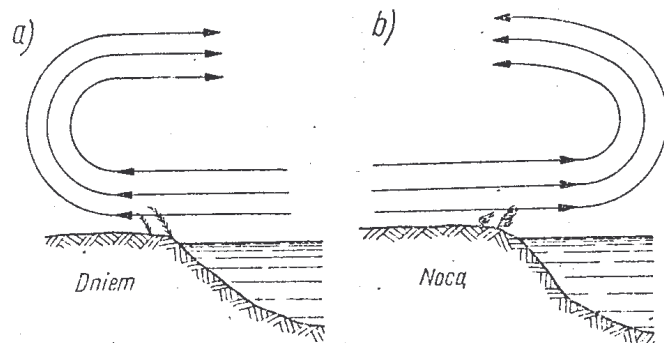
Zmienność wiatrów tej strefy jest spowodowana jej charakterem przejściowym od poprzednio opisanej strefy podrównikowej do strefy podbiegunowej o odrębnej cyrkulacji polarnych wiatrów wschodnich. Cechą strefy polarnej jest stałe ochładzanie się przyziemnych warstw powietrza na skutek niskiej temperatury powierzchni ziemi w wyniku słabego jej nagrzewania przez słońce.

Cyrkulacja wiatrów polarnych przesuwa zimne masy powietrza na półkuli północnej ku południowi, do strefy wiatrów zmiennych, gdzie następuje spotkanie się z powietrzem, napływającym z południa; zachodzi tutaj przemieszanie się obu rodzajów powietrza, przy czym obserwuje się jego ruchy bardziej przypadkowe i miejscowe. Podczas przepływów różnych pod względem temperatury mas powietrza często się zdarza, że warstwy zimniejsze nasuną się nad cieplejsze, co stwarza równowagę niestabilną i przyczyniającą się do powstawania układów cyklonów i antycyklonów.

W cyklonach powietrze ogrzane unosi się nad pewnym obszarem ku górze, a na jego miejsce napływa ze wszystkich stron powietrze zimniejsze, powodujące wiatry dośrodkowe, w antycyklonach natomiast opad z góry chłodniejszego powietrza na pewien obszar powoduje jego rozplyw nad powierzchnią ziemi we

wszystkich kierunkach, czyli powoduje wiatry odśrodkowe. Na kierunki wiatrów w cyklonach i antycyklonach wywiera wpływ również i obrót ziemi dokoła jej osi, powodując ich odchylenie od kierunków promieniowych.

Poza opisanymi ruchami powietrza, powodowanymi różnym nasłonecznieniem powierzchni ziemskiej oraz obrotem ziemi, występują jeszcze ruchy powietrza mniej rozległe, a wywołane różnym nagrzewaniem się powierzchni ziemi ze względu na jej różnorodną rzeźbę, którą tworzą: lądy, oceany, góry, pustynie, lasy itp. Poza tym ujawnia się tutaj jeszcze wpływ różnego zacieniania powierzchni ziemi przez chmury.



Rys. 2. Powstawanie wiatrów nadmorskich

Rejonami, szczególnie sprzyjającymi powstawaniu wiatrów, są wybrzeża morskie. W miejscowościach tych, na skutek występujących różnic temperatury we dnie i w nocy, powstają wiatry nadbrzeżne, nazywane bryzami.

Podczas dnia przy słonecznej pogodzie (rys. 2a) ląd nagrzewa się silniej niż powierzchnia morza. Bardziej ogrzane powietrze nad lądowe unosi się do góry, a znad morza napływa na ląd powietrze chłodniejsze. W górze powietrze znad lądu przesuwają się nad morze, a tam oziębiając się i stając się cięższym, opada na dół. Powstaje tutaj podobna do opisanej już poprzednio cyrkulacja powietrza, jednak o znacznie mniejszym zasięgu, powodująca powstanie dziennego wiatru znad morza w kierunku lądu.

W nocy zaś (rys. 2b), ponieważ ląd stygnie prędzej niż woda, lżejszym jest powietrze nad morzem i tam unosi się do góry, a na jego miejsce z lądu dopływa powietrze zimniejsze. W górnych warstwach morskie powietrze cieplejsze napływa na ląd i ochł-

dzając się opada na dół. Wytworzona teraz cyrkulacja powietrza posiada kierunek odwrotny do cyrkulacji dziennej, a w jej wyniku obserwuje się nocny wiatr, wiejący z lądu w stronę morza. Wiatry dzienne, czyli wiejące znad morza, odznaczają się znacznymi i raptownie występującymi wahaniami natężenia, natomiast zmiany natężenia wiatrów nocnych są nieznaczne i mają przebieg powolny. Rejony występowania tych wiatrów nie są rozległe, gdyż rozciągają się najczęściej na ok. 40 km w obie strony od brzegu, wysokość rozprzestrzeniania się tych wiatrów wynosi zaledwie 200—300 m. W strefach o klimacie umiarkowanym bryzy występują tylko latem i przy słonecznej pogodzie.

W nadbrzeżnych obszarach oceanów i wielkich mórz występują podobne wiatry, jednak rozprzestrzeniające się na większych obszarach oraz z rocznym cyklem zmian. Są to tak zwane m u s o n y.

Oprócz wiatrów, dotychczas opisanych, w wielu miejscowościach o sprzyjających warunkach, np. na rozległych równinach, powstają dość regularne wiatry z cyklem dziennym. Wiatr ten przez znaczną część roku, zjawiając się w godzinach rannych, wzmacnia się do popołudnia, a następnie malejąc, zanika przed wieczorem.

Na obszarach górzystych występują wiatry o dobowym cyklu zmienności. Podczas dnia wieją wiatry od gór ku równinom, natomiast w nocy, od równin w stronę gór. Na powstawanie tych wiatrów poza różnicami temperatury powietrza wywierają znaczniejszy wpływ różnice ciśnień powietrza w górach i na równinach. Wiatry te charakteryzują się występującą dość często gwałtownością (halny) oraz nieregularnością.

Poza wymienionymi wiatrami mniej lub więcej regularnymi występują jeszcze, zwłaszcza w strefie wiatrów zmiennych, wiatry nieregularne, przypadkowe, związane z przesuwającymi się wyżami i niżami barometrycznymi.

Tak urozmaicony pod względem kierunków wachlarz wiatrów odznacza się jeszcze wielką rozpiętością pod względem ich natężenia: od ciszy przez wiatry słabe i wiatry silne oraz bardzo silne do huraganów, tajfunów i orkanów, niweczających na swej drodze wszystko.

Szybkość wiatru zależy bezpośrednio od stosunku różnicy ciśnień barometrycznych i odległości, na której różnica ta występuje.

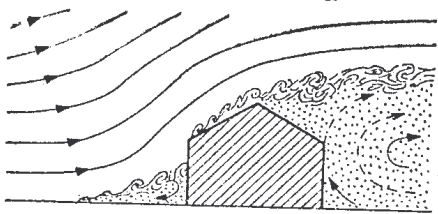
Zatem wiatr jest tym silniejszy, im większa różnica ciśnień barometrycznych występuje na krótszej odległości na powierzchni ziemi.

Na kierunki i natężenie wiatru wielki wpływ wywierają oczywiście przeszkody, napotymane przez niego na drodze. Na przestrzeniach odkrytych, jak np. na morzach, pustyniach, wiatr rozwija się bez większych przeszkód, natomiast góry stanowią dla niego tak wielkie przeszkody, że często zmieniają całkowicie jego kierunek, co powszechnie odczuwa się, jako anormalności klimatyczne. Nawet tak rozległe rozprzestrzeniające się wiatry, jak pasaty i musony swój typowy charakter przejawiają właściwie tylko nad oceanami, morzami i nadbrzeżnymi równinami, w górzystych natomiast obszarach lub w rejonach odgrodzonych od mórz górami ujawniają odchylenia, które niekiedy są bardzo duże.

W Polsce, leżącej w strefie wiatrów zmiennych, obserwuje się wiatry ze wszystkich kierunków ze znaczną jednak przewagą w większości miejscowości kierunku zachodniego. Również i pod względem natężenia nasze wiatry wykazują różnorodność, jakkolwiek nie występują u nas wiatry najsilniejsze.

Należy tutaj jeszcze rozpatrzyć zachowanie się wiatrów o bardziej ograniczonej skali działania, zwłaszcza zaś wiatrów miejscowych, wobec napotykanich na drodze przeszkód, jakimi są budynki, drzewa, lasy, pagórki itp.

Przepływ wiatru w sąsiedztwie takich przeszkód, podlega znacznemu zaburzeniu, powodowanemu przede wszystkim koniecznością ominięcia tych przeszkód; tworzą się przy tym spiętrzenia ciśnienia¹⁾ na stronach odwietrznych, a podciśnienia i wiry za przeszkodami. Natężenie wiatru np. nad dachami domów (rys. 3) od strony odwietrznej jest zasadniczo większe,



Rys. 3. Przepływ powietrza w sąsiedztwie przeszkód (domu)

należące do zaburzenia pierwotnego; za przeszkodami natomiast natężenie to jest mniejsze i występuje ono nawet na większych wysokościach, niż wysokość przeszkody. Zaburzenia te rozprzestrzeniają

się na znacznych odległościach za przeszkodami i zanikają dopiero na odległościach 10 do 15 krotnych wysokości przeszkody.

Nad wierzchołkami pagórków, posiadających łagodne zbocza, szybkość wiatru jest znacznie większa, niż na równinach i w sprzyjających warunkach może osiągnąć wzrost nawet dwukrotny. Nad pagórkami natomiast o zboczach niekorzystnych, np. stromych, urwistych, zwłaszcza od stron zawietrznych, na skutek odrywania się tam strug powietrza¹⁾ od ścian przeszkody, oraz na skutek tworzenia się wirów szybkości wiatru są mniejsze. W pewnych, odpowiednio sprzyjających warunkach terenowych, spotyka się niekiedy i w dolinach wiatry silniejsze, niż na terenie odkrytym; występuje tu zjawisko podobne do powszechnie znanych przeciągów.

W związku z opisanymi zaburzeniami przepływów wiatru w sąsiedztwie przeszkód oraz zmniejszaniem się zasadniczo przy tym jego szybkości, wiatr w miarę zwiększania wysokości nad powierzchnią ziemi musi stawać się silniejszym i bardziej stałym, co również potwierdzają przeprowadzone obserwacje.

3. SZYBKOŚĆ WIATRU

Szybkością wiatru nazywamy drogę przebywaną przez powietrze wprawiane w tym zjawisku w ruch, w ciągu jednostki czasu. W związku z tym, że jednostki pomiaru drogi oraz czasu mogą być różne, jednostki szybkości wiatru też bywają różne. Najczęściej szybkość wiatru wyraża się w m/sek, znacznie rzadziej w km/godz. (Liczba wyrażająca szybkość wiatru w km/godz jest 3,6 raza większa od liczby, wyrażającej tę samą szybkość w m/sek).

Wiatr nie jest równomiernym ruchem powietrza, lecz w znacznej części składa się z wielu stosunkowo krótkotrwałych i powtarzających się podmuchów o różnym natężeniu i różnych kierunkach. Poszczególne podmuchy wiatru, powtarzające się niekiedy dość często, nakładają się na mniej lub więcej ustalony ruch powietrza, tworząc jego przepływ bardziej złożonym; niekiedy podmuchy wiatru, nawet o znacznym natężeniu, powtarzają się rzadziej, a czasem występują nawet pojedynczo.

¹⁾ Bardziej szczegółowe rozpatrzenie tych zjawisk będzie dokonane w rozdz. II.

Ponieważ szybkości wiatrów podlegają tym ciągłym zmianom i to zarówno pod względem wielkości, jak i kierunku, poza pojęciem szybkości wiatru chwilowej używa się również pojęcia szybkości średniej dla pewnego okresu czasu, czyli prędkości średniej okresowej. Szybkość ta może być: minutowa, godzinowa, dobowa, tygodniowa, dekadowa, miesięczna, kwartalna i roczna itp.

W dalszych rozważaniach będzie uwzględniana zasadniczo tylko pozioma składowa szybkości wiatru, czyli szybkość pozioma, a tylko niekiedy będzie mowa o szybkości wiatru skierowanej nieco ukośnie do poziomu.

W pobliżu powierzchni ziemi z powodu napotykanego przeszkód wiatr wykazuje, jak to było już zaznaczone, bardzo duże niekiedy nieregularności oraz wielkie zaburzenia, ujawniające się w znacznych i raptownych zmianach jego szybkości i kierunku. Zaburzenia te rozprzestrzeniają się zwykle do wysokości kilkudziesięciu metrów nad powierzchnią ziemi, jednak nad obszarami górzystymi wznoszą się one znacznie wyżej, dosięgając niekiedy wysokości 400 m. Największe zaburzenia występują nad szczytami oraz odosobnionymi, stromymi wierzchołkami. Dlatego miejsca takie nie są odpowiednie do wznoszenia silników wiatrowych, wbrew dość rozpowszechnionemu mniemaniu, że na wysokich wzgórzach wieże dla silników wiatrowych mogą być niższe niż na równinach.

Wraz ze zwiększającą się odległością od powierzchni ziemi zaburzenia wiatru się zmniejszają; zmniejsza się jego porywistość, a zwiększa się szybkość, która wzrasta na razie bardzo prędko, a powyżej zaś 100 m — znacznie wolniej.

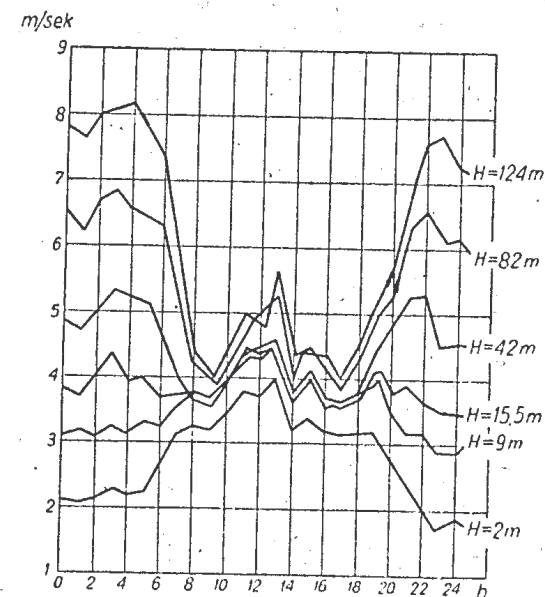
Szybkość wiatru v na pewnej wysokości H , oblicza się z przybliżonego wzoru

$$v = v_0 \sqrt[5]{\frac{H}{H_0}} \quad [5]$$

gdzie v_0 oznacza szybkość wiatru na wysokości H_0 .

Również i okresy trwania wiatrów silniejszych na większych wysokościach są dłuższe, niż w pobliżu powierzchni ziemi, co przemawia za stosowaniem dla silników wiatrowych możliwie wysokich wież.

W obserwowanych powszechnie szybkościach wiatru dają się zauważyć i dobowe prawidłowości, które również podlegają zmianom wraz z wysokością. W wielu miejscowościach obserwuje się najsilniejszy wiatr ok. południa, najslabszy zaś ok. północy, przy czym krzywa zmienności szybkości wiatru (rys. 4) w miarę wzniesienia się nad powierzchnią ziemi coraz bardziej się wyrównywa, aby na jeszcze większych wysokościach (ok. 50 m) swój charak-



Rys. 4. Dobowa zmienność wiatrów

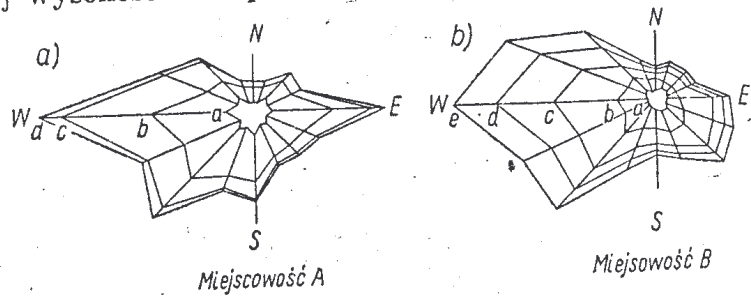
ter zmienności odwrócić. Na tych wysokościach bowiem największa szybkość wiatru występuje ok. północy, najmniejsza natomiast ok. południa.

Dla możliwie prostego scharakteryzowania pod względem wiatrowym poszczególnych miejscowości, dotyczącego zwłaszcza szybkości wiatrów, czasu ich trwania oraz ich kierunków stosuje się parę metod wykresnych, umożliwiających ocenę pod tym względem danego miejsca już z pobieżnego rzutu oka.

Pierwszą czynnością dla scharakteryzowania wiatrów jakiejś miejscowości jest ich rozdzielenie na grupy wg pewnej obranej szybkości średniej, np. średniej godzinowej, w odniesieniu do każdej z 8 lub 16 stron świata. Nazwę kierunku wiatru nadaje się wg strony świata, skąd wiatr wieje. Uzyskane w ten sposób okresy

czasu trwania wiatrów o szybkościach w danym ich zakresie nanosi się w odpowiedniej podziałce na osi, wyznaczające strony świata oraz łączy się poszczególne punkty międzyosiowymi odcinkami prostych. Czasy trwania wiatrów mogą być przy tym wyrażone w godzinach, lub też procentach godzin w ciągu rozpatrywanego większego okresu czasu. W wyniku uzyskuje się figury geometryczne, przedstawione przykładowo na rys. 5, a zwane różami wiatrów.

Róże wiatrów są to wykresy czasów trwania i szybkości wiatrów z poszczególnych kierunków, w danym miejscu, w rozpatrywanym okresie czasu. Taka róża wiatrów odnosi się oczywiście do pewnej wysokości nad powierzchnią ziemi w danym miejscu.



Rys. 5. Róże wiatrów

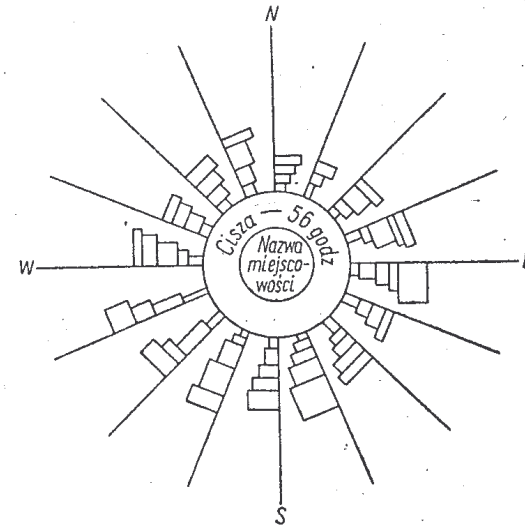
Przedstawione na wykresach figury środkowe odpowiadają czasom trwania wiatrów najslabszych (czas trwania ciszy na tych wykresach nie jest przedstawiony), np. o szybkościach od 0 do 3 m/sek, figury zaś bardziej zewnętrzne — wiatrów silniejszych i najsilniejszych. Długość np. odcinka b-c odpowiada czasowi trwania wiatrów zachodnich o szybkościach od 5 do 10 m/sek.

Porównanie obu wykresów na rys. 5 umożliwia stwierdzenie, że miejscowość B charakteryzuje się znacznie korzystniejszymi wiatrami niż miejscowość A.

Obowiązująca w Polsce metoda sporządzania róż wiatrów jest określona polską normą ^{PN-53}_{B-04901} i jest przedstawiona przykładowo na rys. 6.

W metodzie tej wprowadzone są dwa wewnętrzne i współśrodkowe koła, z których w pierwszym środkowym zakreślonym dowolnym promieniem (jednakowym wszakże dla wszystkich wykresów) wpisuje się nazwę danej miejscowości. Koło następne

wykreśla się promieniem o tyle większym, aby jego nadmiar był równy w odpowiedniej podziałce okresowi trwania ciszy w całym rozpatrywanym okresie czasu. Od obwodu zewnętrznego koła na poszczególnych osiach stron świata odmierza się w odpowiedniej podziałce okresy trwania wiatrów o szybkościach w danym ich zakresie oraz z danego kierunku, przy czym odmierzenie to powinno być rozpoczęte od wiatrów o szybkości najmniejszej, a zakończone wiatrami o szybkościach największych. Na każdym tak wyznaczonym odcinku wykreśla się prostokąty o wysokościach, wyrażających w odpowiedniej podziałce szybkości wiatrów.



Rys. 6. Sposób kreślenia róż wiatrów wg PN-53/B-04901

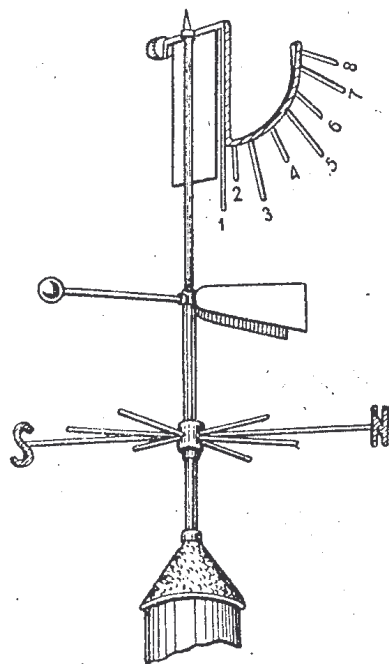
Ponieważ dla celów energetycznych kierunki wiatrów nie odgrywają zasadniczo żadnej roli, powszechnie stosuje się krzywe częstotliwości występowania wiatrów o danych szybkościach wykreślane w prostokątnym układzie współrzędnych (porównaj punkt 6 tego rozdziału).

4. POMIARY SZYBKOŚCI WIATRU

Do pomiarów szybkości wiatrów używa się przyrządów, opartych w swym działaniu na różnych zasadach i wykonanych w rozmaity sposób.

Szybkościomierz wiatrowy Wilda (rys. 7) jest najprostszym i najtańszym, a przy tym najtrwalszym przyrządem

do pomiaru szybkości wiatru. Zasadniczą częścią tego przyrządu jest metalowa płytki, umocowana w górnej swej krawędzi w ten sposób, że może się pod wpływem wiatru odchyłać w płaszczyźnie



Rys. 7. Szybkościomierz wiatrowy Wilda

pionowej. Odpowiedni ster zapewnia nastawianie przyrządu w ten sposób, aby górna krawędź płytki była zawsze prostopadłą do kierunku wiatru. Obok płytki jest umieszczona ośmiostopniowa skala w postaci rozstawionych promieniowo metalowych prętów. Skala ta służy do wyznaczania wychylenia się płytki, a zatem i szybkości wiatru. Rozmieszczone nieruchomo pod sterem w kierunkach stron świata metalowe pręty umożliwiają określenie kierunków wiatru. Wymiary płytki wynoszą 150×300 mm, ciężar jej — 200 G. W tabelicy 1 podano szybkości wiatru w zależności od wychylenia się płytki.

Tablica 1

Szybkości wiatrów według wskazań szybkościomierza Wilda z płytką o ciężarze 200 G

Nr pręta skali	1	1-2	2	2-3	3	3-4	4	4-5
Szybkość wiatru w m/sek	0	1	2	3	4	5	6	7

Nr pręta skali	5	5-6	6	6-7	7	7-8	8	ponad 8
Szybkość wiatru w m/sek	8	9	10	12	14	17	20	ponad 20

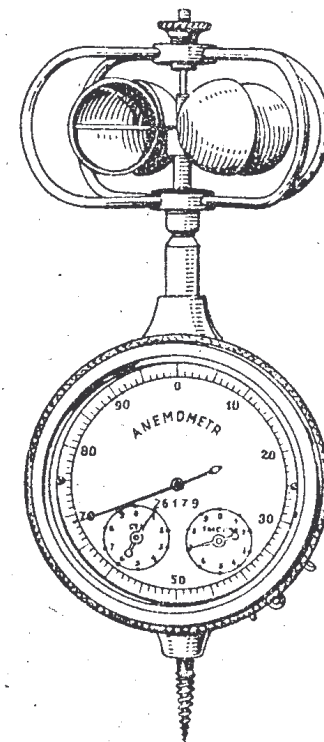
Do pomiaru większych szybkości wiatru używa się niekiedy szybkościomierzy z płytkami o ciężarze 800 G.

Szybkościomierzem Wilda można mierzyć szybkości wiatru chwilowe, jak również i średnie dla niewielkiego okresu czasu, na przykład jednej, dwu lub trzech minut.

Pomiar szybkości wiatru tym przyrządem jest jednak mało dokładny i jest bardzo uzależniony od staranności jego przeprowadzenia.

Anemometry są znacznie doskonalszymi przyrządami do pomiarów szybkości wiatru. Budowane są w kilku odmianach konstrukcyjnych.

Anemometr czasowy (rys. 8) posiada wiatraczek o osi pionowej, którego skrzydełka stanowią cztery półkuliste czasze. Wobec niejednakożnego parcia wiatru na wypukłe i wklęsłe powierzchnie tych czasz, pod wpływem wiatru wiatraczek się obraca, a jego prędkość obrotowa jest, jak to można udowodnić odpowiednim rachunkiem, prawie proporcjonalna do szybkości wiatru ¹⁾. Ilości obrotów wiatraczka są liczone odpowiednim licznikiem, stanowiącym drugą istotną część anemometru. Odczytana na liczniku ilość obrotów wiatraczka stanowi w pewnej skali drogę, przebytą przez powietrze z wiatrem. Podzieliwszy tę drogę przez czas trwania pomiaru, można otrzymać średnią szybkość wiatru w tym okresie czasu. W ten prosty sposób dokonuje się pomiaru szybkości wiatru w anemometrach stałych.



Rys. 8. Anemometr czasowy z licznikiem obrotów

W anemometrach przenośnych lub ręcznych sekundomierz jest wbudowany w anemometr i jest nastawiony na pewien określony czas pracy, np. na jedną minutę. Wprawiając w ruch sekun-

¹⁾ Patrz rozdz. III, punkt 1.

domierz przyciskiem, zazwyczaj zdalnie, włącza się jednocześnie i licznik obrotów wiatraczka, który zlicza obroty w ciągu tej jednej minuty. Po jej upływie wskazówka anemometru zatrzymuje się i można odczytać szybkość wiatru w m/sek.

Przy dokładniejszych pomiarach zwłaszcza mniejszych szybkości wiatru należy uwzględnić występujące w anemometrze tarcie wiatraczka w łożyskach oraz opory w liczniku, na pokonanie których przypada pewna, wprawdzie niewielka, szybkość wiatru. W tych przypadkach stosuje się zwykle wzór Robinsona

$$v = v_a + a \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n$$

gdzie:

- v — szybkość wiatru w m/sek,
- r — odległość środków czasz od osi obrotu w m,
- n — ilość obrotów wiatraczka w sekundzie,
- v_a — szybkość wiatru, przy której wiatraczek zaczyna się obracać; zwykle 0,5 m/sek,
- a — współczynnik proporcjonalności zależny od wielkości wiatraczka; dla małych — $a = 8/3$, dla większych — $a = 7/3$.

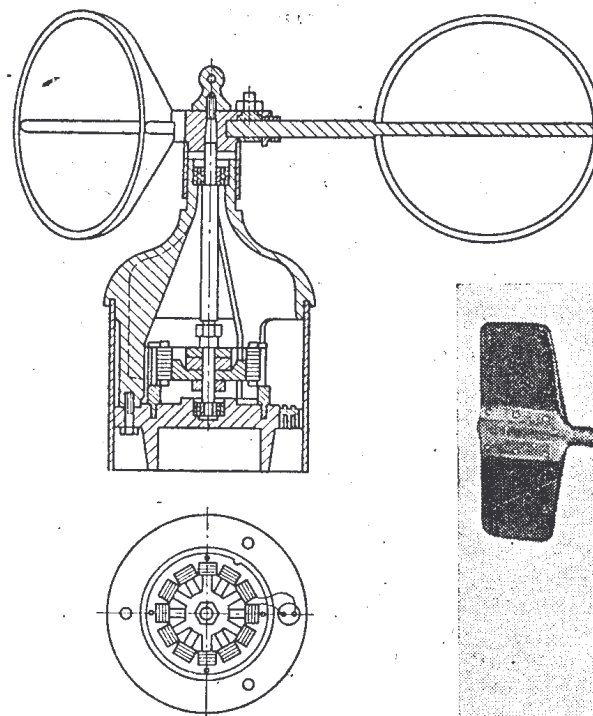
Wadą anemometrów czaszowych jest ich względnie duża bezwładność, powodująca znaczny błąd pomiarów szybkości wiatrów porywistych; błąd ten może wynieść nawet 15 %.

W celu umożliwienia dokonywania anemometrem pomiaru szybkości chwilowych, wiatraczek — zamiast licznika — napędza małą prądnicę (rys. 9), której napięcie jest mierzone odpowiednim woltomierzem, wzorcowanym w m/sek.

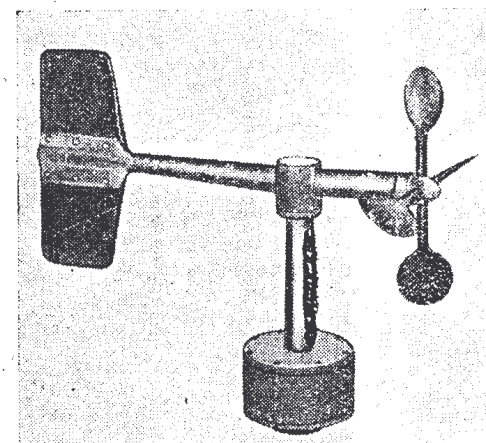
Anemometr skrzydełkowy (rys. 10) stanowi doskonałą odmianę anemometrów wiatraczkowych; posiada on czteroskrzydłowy wiatraczek o osi poziomej, przy czym za skrzydła służą okrągłe tarczki ustawione do płaszczyzny obrotu pod względnie dużym kątem. Główną zaletą tego anemometru jest prędkie przystosowywanie się do zmian szybkości wiatru osiągane w wyniku małej bezwładności wiatraczka. Wiatraczek ten jest nastawiany pod wiatr przy pomocy tylnego steru, który służy jednocześnie do wskazań kierunku wiatru. Wiatraczek napędza prądnicę o stałych magnesach, a wielkość wytwarzanego napięcia

jest mierzona woltomierzem wskazówkowym lub rejestrującym, wywzorcowanym w szybkościach wiatru; jednocześnie mogą być zapisywane i kierunki wiatrów.

Dla umożliwienia pomiarów średnich szybkości wiatru w pewnych okresach czasu anemometr ten jest zaopatrzony w licznik, zliczający ilość okresów prądu wytwarzanych w tym czasie.



Rys. 9. Anemometr czaszowy z prądnicą pomiarową

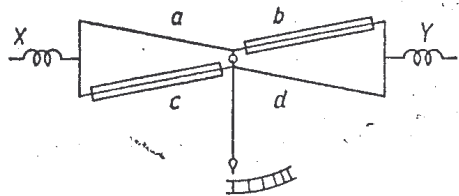


Rys. 10. Anemometr skrzydłowy

Dokładność pomiarów dokonywanych tymi anemometrami wynosi $\pm 0,5$ %.

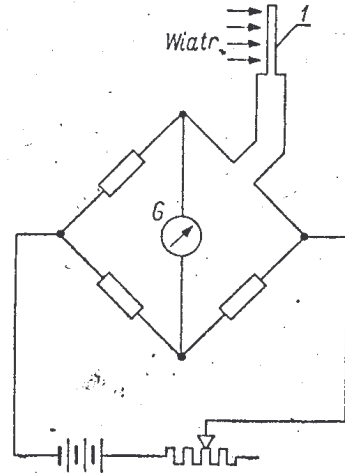
Anemometr elektryczny jest oparty w swym działaniu na zjawisku ochładzania przez wiatr, cienkiego drucika nagrzewanego prądem elektrycznym, a umieszczonego w przepływie powietrza, przy czym do pomiaru szybkości wiatru może być wykorzystana zmiana długości drucika albo też zmiana jego elektrycznej oporności.

Anemometr, wykorzystujący zmianę długości drucika przedstawiono schematycznie na rys. 11. Cztery druciki *a*, *b*, *c*, *d* tworzą dwie równoległe gałęzie, przez które przepływa prąd elektryczny od zacisku *X* do zacisku *Y*, przy czym druciki *a* i *d* są poddane ochładzającemu działaniu wiatru, zaś dwa pozostałe *b* i *c* są przed działaniem tym zabezpieczone przez odpowiednie zaizolowanie. W środku obu par drucików jest odpowiednio umocowana strzałka, wskazująca różnice wydłużania się drucików, które w odpowiedniej skali przedstawiają szybkość wiatru.



Rys. 11. Anemometr elektryczny, wydłużeniowy (schemat)

Rys. 12. Anemometr elektryczny oporowy (schemat): 1 — drucik ochładzany przez wiatr, G — galwanometr wyskalowany w szybkościach wiatru



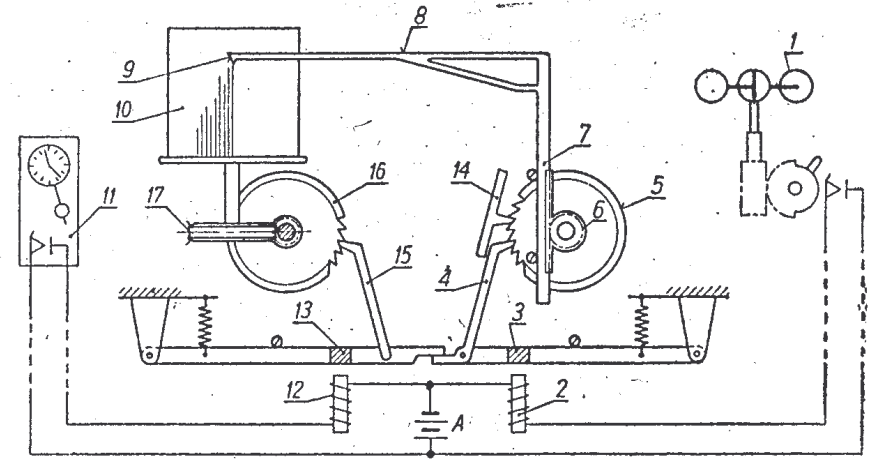
Anemometr elektryczny, wykorzystujący zmiany elektrycznej oporności drucików, przedstawiono schematycznie na rys. 12. W tym przyrządzie drucik 1 grzany prądem elektrycznym, a ochładzany przez wiatr, jest użyty jako jedna gałąź mostka pomiarowego. Zmiany oporności tego drucika w wyniku różnego ochładzania go przez wiatr powodują zmiany wskazań galwanometru G wywzorcowanego w szybkościach wiatru.

Anemometry elektryczne są jednak rzadko stosowane, gdyż budowa ich jest bardzo złożona i kosztowna.

Anemografy służą do rejestracji szybkości wiatru. Działanie ich oparte jest na zasadzie napędu przez wiatraczek (anemometru) prądnicy, której napięcie zapisuje się zwykłym sposobem na taśmie, przesuwanej mechanizmem zegarowym albo też na zasadzie zapisywania na taśmie kresek po każdorazowym nakręceniu przez wiatraczek pewnej, ustalonej ilości obrotów,

czyli po przebyciu przez wiatr pewnej określonej drogi. Anemografy tego ostatniego typu nazywają się stykowymi (kontaktowymi), a jeden z nich przedstawiono na rys. 13.

Za nadajnik służy w tym przyrządzie anemometr z czaszami półkulistymi 1, który po wykonaniu określonej ilości obrotów, odpowiadającej przebyciu przez wiatr 500 m, powoduje przy pomocy odpowiednich styków chwilowe zamknięcie obwodu elek-



Rys. 13. Anemograf stykowy (schemat): 1 — anemometr czaszowy, 2 — elektromagnes przesuwający piórko, 3 — kotwica elektromagnesu, 4 — zapadka, 5 — kółko zapadkowe, 6 — kółko zębate, 7 zębatka, 8 — dźwignia z piórkiem, 9 — rysik, 10 — bęben z papierem, 11 — zegar kontaktowy, 12 — elektromagnes obracający bęben, 13 — kotwica elektromagnesu, 14 — wechwył, 15 — zapadka, 16 — kółko zapadkowe, 17 — ślimacznica, A — akumulator

trycznego, zasilanego z baterii akumulatorów A. Wówczas elektromagnes 2 za pośrednictwem mechanizmu zapadkowego 4 i 14 obraca o jeden ząbek kółko 5. Osadzone na tej samej osi kółko zębate 6 przesuwają wtedy ku górze zębatkę 7, zaopatrzoną w piórko 8 z rysikiem 9, kreślącym na papierze nawiniętym na bębnie 10 linię pionową. Za każdym zamknięciem styków rysik kreśli na papierze, który znajduje się wtedy w spoczynku, linię pionową długości 0,5 mm.

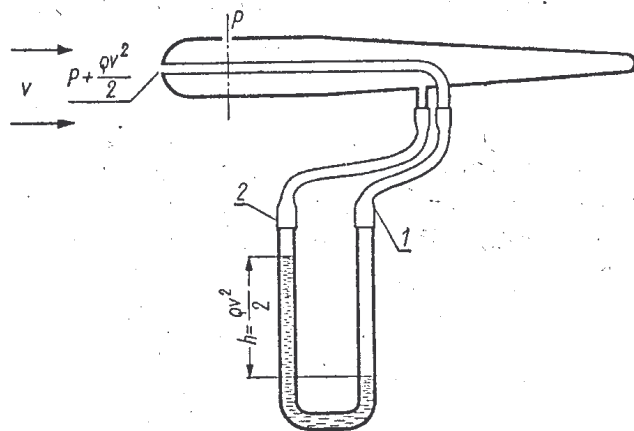
Bęben wraz z umieszczonym na nim papierem, obraca się skokami co godzinę w ten sposób, że jego obwód przesuwany wtedy o 1 mm. Dokonuje tego zegar kontaktowy 11, oddziaływu-

jący na bęben przy pomocy drugiego zupełnie podobnego do poprzednio opisanego urządzenia elektromechanicznego.

Po chwilowym zamknięciu przez zegar (raz na godzinę) elektrycznego obwodu elektromagnesu 12 i przyciągnięciu przez niego kotwicy 13 zostaje przede wszystkim odciągnięta zapadka 4 i zwolniony wechwył 14 kółka 5. Na skutek tego pod wpływem własnego ciężaru opada do położenia zerowego zapadka 7, a wraz z nią i piórko z rysikiem 9. W międzyczasie styk zegara przerywa obwód, w wyniku czego bęben 10 podczas powrotu do pierwotnego położenia kotwicy 13 za pośrednictwem zapadki 15, kółka zapadkowego 16 i przekładni ślimakowej 17 przekręca się na odpowiedni kąt.

Wysokość wykreślonej w ciągu każdej godziny linii przedstawia w pewnej skali drogę przebytą w tym czasie przez wiatr, a zatem jego średnią szybkość godzinową.

Rurka Prandtla umożliwi dokładniejsze, lecz mniej wygodne, pomiary szybkości wiatru (rys. 14)¹⁾.



Rys. 14. Rurka Prandtla (schemat)

Przewód odprowadzający od rurki Prandtla ciśnienie całkowite jest przyłączony do jednego ramienia 1 manometru wodnego, przewód zaś odprowadzający ciśnienie statyczne — do drugiego ramienia 2, w wyniku czego wysokość słupka wody w manometrze odpowiada ciśnieniu dynamicznemu, zależnemu od szybkości

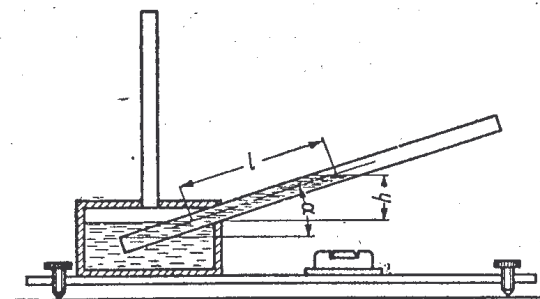
¹⁾ Teoria działania rurki Prandtla opisana jest w rozdz. II, punkt 4.

wiatru. W przyrządzie tym szybkość wiatru jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego wysokości słupka cieczy h , czyli

$$v = k\sqrt{h} \quad [6]$$

przy czym współczynnik proporcjonalności k dla słupka wodnego mierzonego w milimetrach wynosi 4, a dla słupka alkoholowego — 3,56.

Dla zwiększenia dokładności odczytu wysokości słupka cieczy, zwłaszcza podczas pomiaru małych szybkości wiatru, stosuje się zamiast manometru mikromanometr pokazany schematycznie na rys. 15.



Rys. 15. Mikromanometr (schemat)

Zasada działania tego przyrządu polega na rozciągnięciu jakby przez odpowiednie pochylenie rurki manometru — słupka cieczy h na większą długość. Przez to pochylenie uzyskuje się, że ruchy cieczy występują na większych długościach, przez co niedokładność ich odczytu powoduje znacznie mniejsze błędy.

Wysokość pionowa słupka cieczy odpowiadająca długości odczytanej, wyraża się następująco

$$h = l \cdot \sin \alpha \quad [7]$$

gdzie:

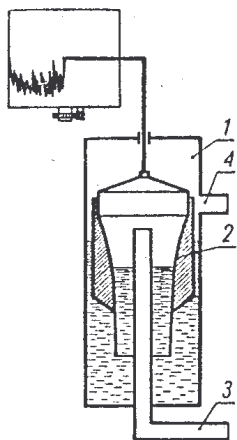
- h — poszukiwana wysokość pionowa słupka cieczy,
- l — długość słupka cieczy odczytana,
- α — kąt pochylenia rurki względem poziomu.

Zwykle nachylenie rurki obiera się takie, aby $\sin \alpha$ był równy 1/2, 1/4 itp., a na skali pochyłej podaje się od razu pionową wysokość słupka cieczy.

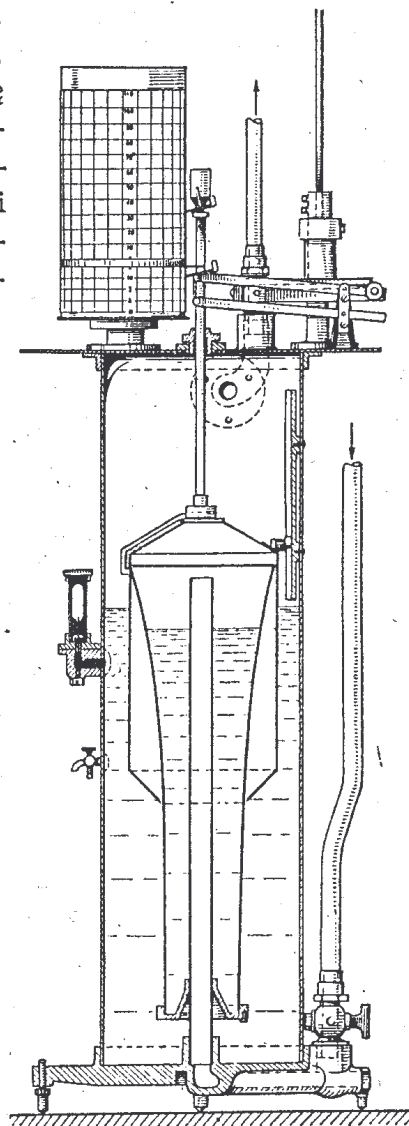
Rurka Prandtla nadaje się szczególnie do pomiarów, a zwłaszcza rejestracji na papierze szybkości podmuchów wiatru nawet

często po sobie następujących. Na rys. 16 przedstawiono schematycznie działanie takiego przyrządu, zaś na rys. 17 — przyrząd w postaci użytkowej.

Główną częścią aparatu odbiorczego jest komora 1 z pływakiem dzwonowym 2, zaopatrzonym w piórko, kreślące na przesuwającym stale papierze linię wzniesienia się pływaka nad położenie zerowe. Przewód, doprowadzający od rurki Prandtla ciśnienie całkowite, jest przyłączony do wlotu 3 (pod pływak), zaś przewód, doprowadzający ciśnienie statyczne, przyłączony do wlotu 4 (nad pływak), w wyniku czego pływak znajduje się pod działaniem tylko ciśnienia dynamicznego, czyli zależnego od szybkości wiatru. Przez nadanie pływakowi odpowiedniego kształtu parabolicznego uzyskuje się prostoliniową zależność zapisów od szybkości wiatru.



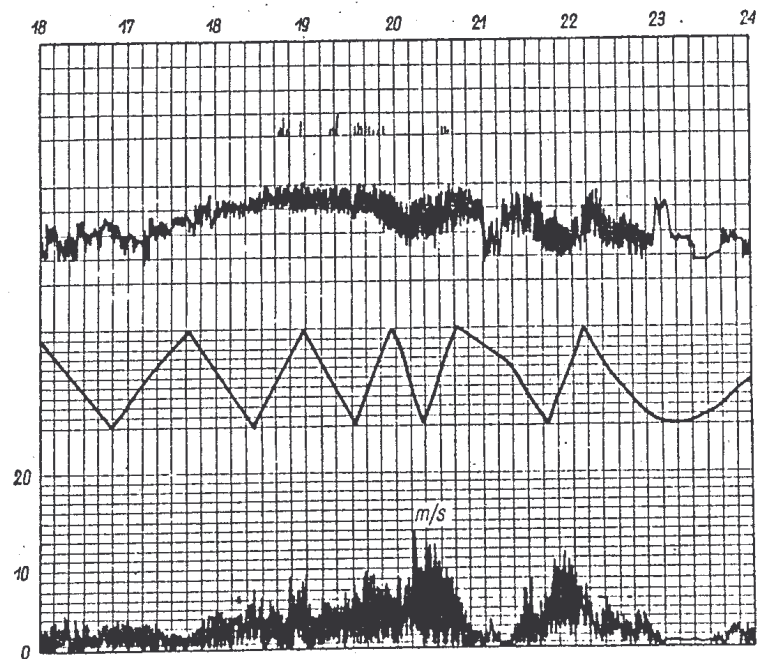
Rys. 16. Przyrząd do rejestracji szybkości podmuchów wiatru (schemat): 1 — komora przyrządu, 2 — pływak dzwonowy, 3 — wlot pod pływak, 4 — wlot nad pływak



Rys. 17. Przyrząd do rejestracji szybkości podmuchów wiatru

Część nadawcza przyrządu — rurka Prandtla — jest wystawiona na działanie wiatru, a część odbiorczą natomiast ustawia się w budynku.

W praktycznym użyciu spotyka się często przyrządy, rejestrujące jednocześnie na tym samym papierze kilka wielkości charakteryzujących wiatr, np.: jego szybkość chwilową, drogę przez niego przebytą, jego kierunki itp. Na rys. 18 podano wycinek taśmy



Rys. 18. Wycinek taśmy rejestracyjnej

takiego przyrządu, z zapisów której można uzyskać najważniejsze dane, dotyczące zarówno szybkości jak i kierunków wiatrów, występujących w danym okresie czasu.

Linia dolna przedstawia chwilowe szybkości wiatru w m/sek, linia zaś środkowa — czasy przebycia przez wiatr pewnych odległości. Gdy wiatr przebędzie 10 km, to piórko przyrządu wzniesie się od położenia zerowego do położenia najwyższego. W czasie przebycia przez wiatr następnych 10 km, piórko opada od położenia najwyższego znowu do położenia zerowego. Z wielkości czasu zużytego na przebycie przez wiatr odległości 10 km łatwo wyznaczyć jego średnią szybkość godzinową. Odpowiednia po-

działka papieru umożliwia wyznaczenie szybkości średnich również i w mniejszych okresach czasu.

Linia najwyższa podaje kierunki wiatrów.

Przyrządy do mierzenia energii wiatru. Do bezpośredniego pomiaru energii wiatru w pewnym okresie czasu stosuje się przyrząd (rys. 19) podobny do anemometru czasowego, ale o kształcie czasz wiatraczka nie półkulistym, ale półwalcowym z ćwierćkulistymi zakończeniami. Wiatraczek taki napędza pomiarową prądnicę, a wytworzoną energię elektryczną mierzy się odpowiednim licznikiem, który można odczytywać w dowolnych okresach czasu. Przyrząd podaje zwykle energię wiatru w odniesieniu do 1 m² przekroju przepływu.

Przyrząd zaczyna działać przy wietrze o szybkości 3 m/sek i wykazuje względnie małe błędy do szybkości wiatru 25 m/sek; powyżej tej szybkości błędy pomiaru szybko wzrastają.

Przyrząd ten nie daje jednak żadnego obrazu zmienności wiatrów; nie wiadomo na przykład, czy uzyskany w danym okresie czasu wynik odczytowy został osiągnięty przez wiatr silny a krótkotrwały, czy też przez wiatr słabszy, ale dłużej występujący.

Na zakończenie należy zaznaczyć, że wartość wszystkich tych pomiarów jest uzależniona przede wszystkim od warunków każdorazowego umieszczenia przyrządów mierniczych, a zatem uzyskane wyniki stanowią dla celów porównawczych wartości dość względne.

5. SKALA WIATRÓW BEAUFORTA

Wobec tego, że wiatr jest zjawiskiem bardzo rozpowszechnionym i mierzenie jego szybkości jest częstą potrzebą, a nie zawsze można tego dokonać z powodu braku odpowiednich przy-

rządów, zostały ułożone odpowiednie tablice szybkości wiatru, według zachowania się pod jego działaniem tak powszechnie spotykanych przedmiotów, jak drzewa, flagi, dym itp. Obserwując zachowanie się tych przedmiotów pod wpływem wiatru, można określić stopień pewnej skali szybkości, a tym samym z pewnym przybliżeniem — szybkość wiatru.

Najczęściej jest używana do tych celów 12 stopniowa skala wiatrów Beauforta, znana już od początku XIX wieku, przedstawiona z uzupełnieniem do 18 stopni przez Simpsona w tabl. 2.

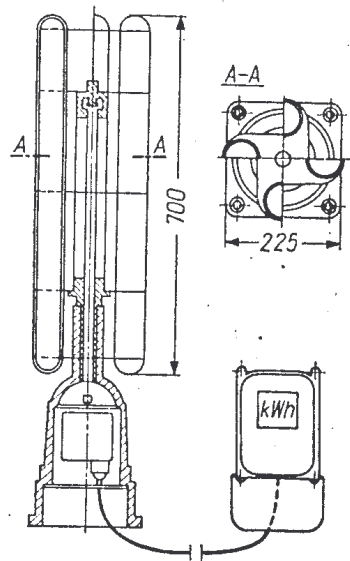
6. ZMIENNOŚĆ I CZĘSTOTLIWOŚĆ WIATRÓW

Jakkolwiek wiatr jest żywiołem wyjątkowo niestałym, nieopanowanym i kapryśnym, a przy tym w przewidywaniach prawie nieobliczalnym, to jednak i on podlega pewnym prawom, dającym możliwość ilościowego ujęcia jego charakteru.

Wiadomym jest, że wiatry o szybkości ponad 20 m/sek są u nas bardzo rzadkie, a nawet podmuchy o szybkościach 30—40 m/sek spotyka się tylko w wyjątkowych warunkach atmosferycznych. Prędkość wiatru, w miarę wznoszenia się w górę nad powierzchnię ziemi, zwiększa się szybko, jakkolwiek dość nieregularnie. Kierunki wiatru są uzależnione od rozmieszczenia wyżów i niżów barometrycznych, gdyż wiatry wieją zawsze od miejsc o wyższym ciśnieniu do miejsc o niższym ciśnieniu, zbaczając nieco z powodu obrotowego ruchu ziemi. W każdej miejscowości występują pewne szybkości wiatrów częściej niż inne. Zwłaszcza częstotliwość występowania wiatrów o jednakowych szybkościach, podlegając prawu wielkich liczb, przedstawia bardzo cenną wielkość, charakteryzującą pod względem wiatrowym daną miejscowość.

Częstotliwość wiatru wyraża się ilością godzin występowania w danym miejscu, w przeciągu pewnego okresu czasu, wiatru o pewnych jednakowych szybkościach. Zwykle za okres czasu dla tych celów przyjmuje się jeden rok. Pojęcie to zezwala ustalić, ile godzin w ciągu roku w danej miejscowości trwa wiatr o pewnych szybkościach, od najmniejszych do największych.

W celu przedstawienia częstotliwości wiatrów na wykresie, na oś odciętych nanosi się szybkości wiatru, a na oś rzędnych



Rys. 19. Przyrząd do mierzenia energii wiatru

2*

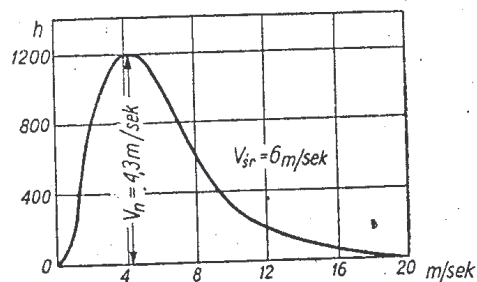
Tablica 2
Nasilenie i prędkości wiatrów według skali Beauforta
(uzupełnionej przez Simpsona)

Sto- pień skali	Prędkość wiatru		Nazwa wiatru	Oznaki nasilenia wiatrów
	m/sek	km/godz		
0	0,0—0,2	1	Cisza	Dym z kominów unosi się pionowo. Rzucony z balkonu kłaczek waty spada pionowo ku ziemi, powierzchnia wody zupełnie gładka
1	0,3—1,5	1—5	Powiew	Dym z komina jest nieco ukośny, łódź posuwa się dokładnie według steru
2	1,6—3,3	6—11	Słaby wiatr	Liście szeleszczą, na twarzy odczuwa się ruch powietrza — lekki podmuch, zaczynają poruszać się flagi, powierzchnia wody marszczy się
3	3,4—5,4	12—19	Łagodny	Kołyszą się cienkie gałązki, flagi powiewają, śnieg zaczyna z lekka przesuwać się po powierzchni jego opadu, na wodzie powstają krótkie fale
4	5,5—7,9	20—28	Umiarkowany wiatr	Unosi się kurz, kołyszą się niewielkie konary, opad śniegu przechodzi w zawieję, wiatr zmiata z ulic kurz i skrawki papieru, proporczyk wyprostowuje się, na wodzie zjawiają się wyraźne fale
5	8,0—10,7	29—38	Dość silny wiatr (świeży wiatr)	Kołyszą się konary średniej grubości, dym urywa się przy wylocie z kominów, wiatr zaczyna pogwizdywać, chorągiew powiewa prawie poziomo, na wodzie ukazują się grzebienie

Sto- pień skali	Prędkość wiatru		Nazwa wiatru	Oznaki nasilenia wiatrów
	m/sek	km/godz		
6	10,8—13,8	39—49	Silny wiatr	Kołyszą się grube konary, szum wiatru słychać w zamkniętym pomieszczeniu, wiatr zrywa z głów kapelusze, na wodzie powstają duże fale z grzebieniami
7	13,9—17,1	50—61	Bardzo silny wiatr	Gną się grube konary, kołyszą się pnie niewielkich drzew, chód jest utrudniony, na wodzie powstają przelewające się fale
8	17,2—20,7	62—74	Gwałtowny wiatr	Kołyszą się drzewa średniej wielkości, łamią się konary, wiatr zrywa dachówkę, na wodzie tworzą się góry wodne
9	20,8—24,4	75—88	Wichura (wicher)	Łamią się grube konary i niewielkie drzewa, wiatr zrywa blachę z dachów, na wodzie powstają wysokie góry wodne
10	24,5—28,4	89—102	Silna wichura	Drzewa wyrwane są z korzeniami, łamią się słupy telegraficzne, szerzy się zniszczenie, góry fal tak wysokie, że łodzie kryją się za nimi
11	28,5—32,6	103—117	Gwałtowna wichura	Powoduje wielkie zniszczenia
12	32,7—36,9	118—133		
13	37,0—41,6	134—149		
14	41,7—46,1	150—166		
15	46,2—50,9	167—183		
16	51,0—56,0	184—201		
17	56,1—61,2	202—220	Huragan (orkan)	Powoduje spustoszenia

ilości godzin występowania tych szybkości w ciągu roku albo też wielkości procentowe tych godzin w odniesieniu do całkowitej ilości godzin w roku (8760). Jest to zatem statystyka wiatrów w odpowiednio przystosowanym ujęciu. Na rys. 20 podano przykładowo krzywą częstotliwości wiatrów dla pewnej dość typowej miejscowości.

W krzywej tej zwraca uwagę niesymetryczność obu jej gałęzi; suma wszystkich rzędnych tej krzywej daje oczywiście roczną ilość godzin (8760) lub 100%. Z krzywej częstotliwości wiatrów można od razu poznać, jakie szybkości wiatrów w danej miejscowości



Rys. 20. Krzywa częstotliwości wiatrów (typowa)

wości występują najczęściej, a jakie szybkości rzadziej oraz jak długo trwają cisze i wiatry bardzo słabe. Należy zwrócić tutaj uwagę, że szybkość najczęściej występująca v_n nie jest szybkością średnią v_{sr} ; szybkość średnia roczna jest większa od szybkości najczęściej występującej o ok. 15% w rejonach obfitujących w wiatry a o ok. 50% większa w rejonach ubogich w wiatry.

Ponieważ kształt krzywych częstotliwości wiatrów jest dla większości miejscowości o średnich stosunkach wiatrowych bardzo podobny, stwierdzenie choć przybliżonej zależności między szybkością średnią roczną, a szybkością najczęściej występującą, umożliwia wykreślenie krzywej częstotliwości wiatrów dla miejscowości, dla których znane są tylko roczne szybkości średnie. Zmniejszając o odpowiedni procent średnią szybkość roczną v_{sr} , otrzymuje się w pewnym przybliżeniu szybkość najczęściej występującą v_n . Zmieniwszy odpowiednio podziałkę wykresu, a zachowując typowy charakter krzywej z rys. 20, otrzymuje się przybliżony wykres częstotliwości wiatrów danej miejscowości.

Jest oczywistym, że wykres częstotliwości wiatrów można wykonać w zasadzie zarówno z szybkości chwilowych, jak i z szybkości średnich minutowych, bądź też średnich godzinowych, a nawet i innych, zależnie od doraźnych potrzeb.

7. ENERGETYKA WIATRU

Wiatr jest najobfitszym ze wszystkich, znajdujących się na kuli ziemskiej, źródeł energii; źródło to jest przy tym w przeciwieństwie do innych źródeł niewyczerpanym i stale odnawiającym się. Wielkość zasobów energetycznych wiatru na całej kuli ziemskiej jest wyrażana w liczbach astronomicznych, przy czym liczby te są u różnych autorów różne. Ostatnio podczas Światowej Konferencji Energetycznej w Wiedniu w r. 1956 podano nową wielkość. Delegat Międzynarodowej Organizacji Meteorologicznej, F. Steinhauser¹⁾ podał, że wykorzystanie energii wiatru całej kuli ziemskiej tylko w jednej dziesięciomilionowej części ($10^{-7} \dots 10^{-8}$) — co może być względnie łatwo w rzeczywistości osiągnięty — dałoby dziesięć milionów (10^7) MW, a to jest przecież ok. 50 razy więcej, niż moc wszystkich obecnie istniejących siłowni na kuli ziemskiej.

Tylko dwóm zasadniczym wadom wiatru, jakimi są: 1) bardzo mała jednostkowa pojemność energetyczna wiatru, oraz 2) wielka jego niestałość, przypisać należy, że pomimo zapoczątkowania przez człowieka ujarzmienia sił przyrody niewątpliwie od wiatru (żagle), to najobfitsze źródło energii jest wykorzystane dotychczas w najmniejszym stopniu. Wobec jednak ogromnego braku energii, odczuwanego prawie w całym cywilizowanym świecie zagadnienie poważniejszego wykorzystania energii wiatru zaczyna wzbudzać większe zainteresowanie.

I w Polsce, kraju bardzo biednym i zacofanym, a już dostatecznie uświadomionym o potrzebach znośniejszego bytowania oraz o roli energii elektrycznej w osiąganiu wygodniejszego życia, wykorzystanie energii wiatru ma pomyślne możliwości rozwoju. Wiele siedzib ludzkich nie jest i jeszcze długo nie będzie przyłączonych do sieci elektrycznych i jedynie wykorzystanie energii

¹⁾ ÖZE. Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft, 1956, Nr 7.

wiatru umożliwia używanie przez znaczny odłam społeczeństwa energii elektrycznej choćby tylko dla tak niezbędnych celów, jak oświetlenie mieszkań i korzystanie z radia. Osiągnięcia te są u nas zupełnie możliwe, jakkolwiek kraj nasz nie jest szczególnie obfitującym w wiatry. Tym bardziej staje się koniecznym zapoznanie się z tymi możliwościami energetycznymi Polski.

Na naszych stacjach meteorologicznych, rozmieszczonych w całym kraju są dokonywane pomiary szybkości wiatrów dolnych przy pomocy szybkościomierzy Wilda trzykrotnie w ciągu doby, mianowicie o godz. 7, 13 i 21. Tylko bardzo nieliczne stacje meteorologiczne, między innymi znajdująca się na Oksywiu, rejestrują szybkość wiatru przy pomocy anemografów. Zaznaczyć należy, że pod względem energetycznym interesującą wielkością jest tylko szybkość wiatru, natomiast jego kierunki są obojętne, gdyż silniki wiatrowe są zaopatrzone w urządzenia, odpowiednio je nastawiające pod wiatr.

Na podstawie uzyskanych w ten sposób w dostatecznie długim okresie czasu (ok. 25 lat) danych została opracowana mapa wiatrów w Polsce (rys. 21).

Na mapie tej zostały wykreślone linie jednakowej częstotliwości występowania wszystkich wiatrów, ujmowanej najczęściej w procentach całkowitego okresu rocznego. Zwykle wykreśla się takie linie dla pewnych zakresów szybkości wiatrów, na przykład do 2, 5, 8 m/sec i wg tych linii można poznać, ile godzin, bądź też dni w roku trwają wiatry użyteczne w poszczególnych rejonach kraju.

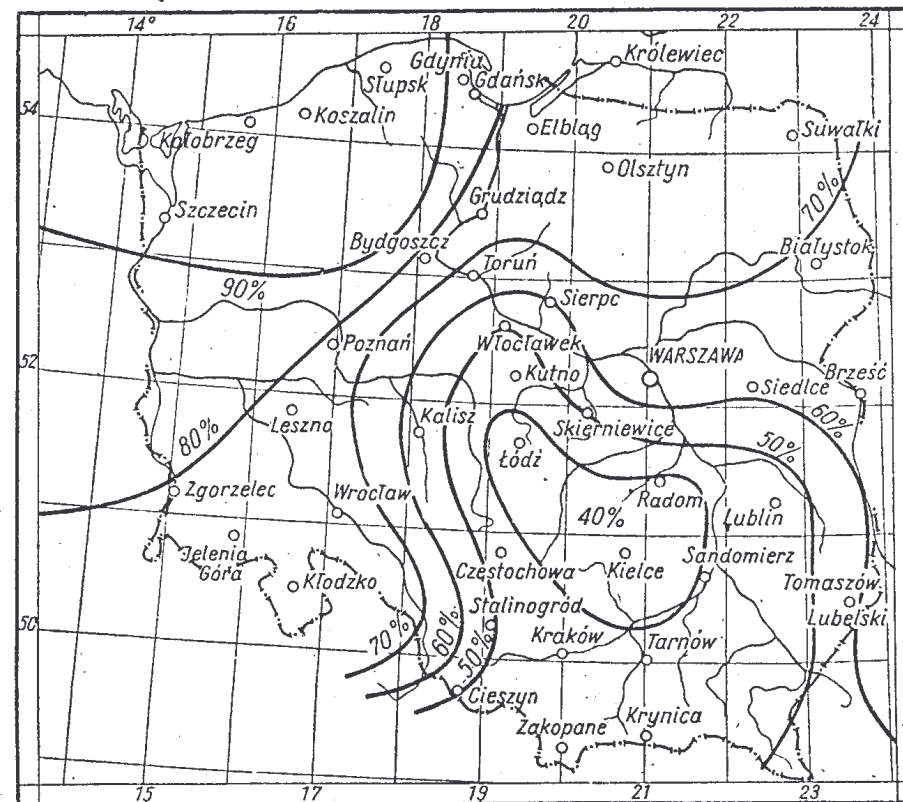
Z przedstawionej mapy wynika, że największa ilość wietrznych dni w roku przypada w pasie nadmorskim (na Pomorzu) oraz na Zachodzie Polski, gdzie wiatry wieją w ciągu 90—80 % wszystkich dni w roku. W miarę przesuwania się coraz bardziej na południo-wschód od tych rejonów ilczeń dni wietrznych maleje i w obszarze południowo-środkowym kraju (objętym Łodzią, Radomiem, Sandomierzem, Tarnowem, Częstochową) dochodzi do 40 % wszystkich dni. Obszar ten jest zatem najuboższy w wiatry z całego kraju.

Linie pośrednich częstotliwości wiatrów (70—50 %) w zachodniej części kraju opadają ku południowi, zaś we wschodniej

części opadają ku południowi i częściowo (70-procentowa) przesuwają się ku północy.

Południowy rejon podgórski jest raczej ubogi w wiatry.

Dla praktycznego oszacowania ilości energii, jaką można uzyskać z wiatrów w danej miejscowości, należy mieć statystykę wiatrów tej okolicy za dość długi okres czasu. Można wówczas



Rys. 21. Mapa wiatrów Polski

sporządzić wykres częstotliwości wiatrów, porządkując je w odpowiednie grupy o pewnych zakresach szybkości, np. co 1 m/sec. Spotykamy się jednak natychmiast z pytaniem, jaką należy tutaj przyjmować szybkość wiatru: chwilową, średnią minutową, średnią godzinową, czy też średnią z jakichkolwiek innych okresów czasu.

Najodpowiedniejszą szybkością wiatru dla celów energetyki jest średnia szybkość godzinowa. Wiadomym jest jednak, że dla

dominującego

miejscowości o często zmniejszających się szybkościach wiatru błęd obliczeń na podstawie średniej szybkości godzinowej może być znaczny.

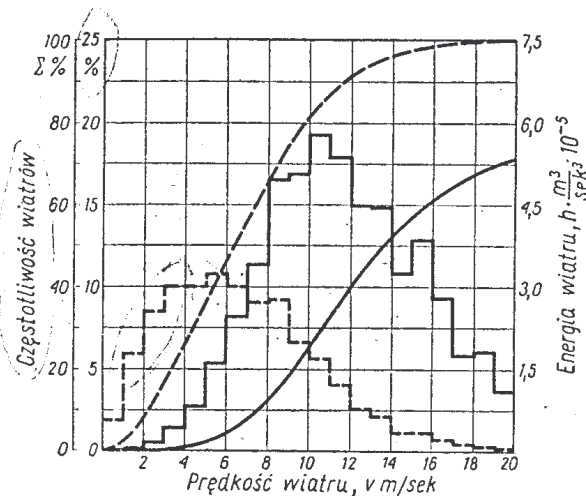
Mając poszczególne szybkości średnie godzinowe za cały rok (8760 pozycji), można je uporządkować w grupy według zakresów szybkości, różniących się od siebie o 1 m/sek, mianowicie: pierwsza grupa o szybkościach od 0 do 1 m/sek, druga grupa od 1 m/sek do 2 m/sek, trzecia od 2 m/sek do 3 m/sek itd. Po takim uporządkowaniu można już obliczyć ilości godzin trwania wiatrów w poszczególnych grupach oraz procenty tych okresów czasu w stosunku do ogólnej ilości godzin w roku. Wyniki tych obliczeń zestawia się w tabelę, a z niej kreśli się krzywą, odkładając na osi odcię-

Tablica 3

Częstotliwość wiatrów oraz ich energia brutto na 1 m² przepływu (Obserwatorium Helgoland)

Zakresy szybkości wiatrów m/sek	Częstotliwość wiatrów $\frac{t}{0/0}$	Trwanie wiatrów w ciągu roku 0/0	$\frac{v_n + v_{n+1}}{2} \cdot t$ m sek	Wielkość energii brutto		Wielkość rocznej energii brutto $h \cdot \frac{m^3}{sek^3} \cdot 10^{-5}$
				$\frac{v_n^3 + v_{n+1}^3}{2} \cdot t$ [%]	$\frac{v_n^3 + v_{n+1}^3}{2} \cdot h \cdot 10^{-5}$	
0—1	2,00	2,00	1,0	1	0,00087	~ 0
1—2	6,00	8,00	9,0	27	0,02367	0,02
2—3	8,40	16,40	21,0	147	0,1289	0,15
3—4	9,95	26,35	35,0	455	0,3990	0,55
4—5	10,00	36,35	45,0	945	0,8280	1,38
5—6	10,55	46,90	58,2	1805	1,5820	2,96
6—7	10,00	56,90	65,0	2795	2,4450	5,40
7—8	9,00	65,90	67,5	3850	3,3750	8,78
8—9	9,15	75,05	77,9	5700	5,0000	13,78
9—10	6,66	71,71	63,3	5755	5,0500	18,83
10—11	5,57	77,28	58,5	6530	5,7000	24,53
11—12	4,00	81,28	46,0	6110	5,3600	29,89
12—13	2,55	83,83	32,4	5100	4,4700	34,36
13—14	2,04	85,87	27,6	5050	4,4300	38,79
14—15	1,20	97,07	17,4	3670	3,2200	42,01
15—16	1,17	98,24	18,1	4360	3,8200	45,83
16—17	0,70	98,94	11,5	3158	2,7700	48,60
17—18	0,57	99,51	6,5	1980	1,7400	50,34
18—19	0,32	99,83	5,9	2030	1,7800	52,12
19—20	0,17	100,00	3,3	1260	1,1050	53,23
			$v_{sr} = 6,7$			

tych szybkości wiatrów, a na osi rzędnych okres czasu ich trwania w godzinach lub w procentach. Dla przykładu dane te¹⁾, dotyczące stacji meteorologicznej na wyspie Helgoland o średnich warunkach wiatrowych zamieszczono w tabl. 3 oraz przedstawiono w postaci schodkowej linii przerywanej na rys. 22, przy czym skalę tej linii w procentach czasów umieszczono po lewej stronie wykresu. W ten sposób otrzymuje się linię częstości wiatrów danej miejscowości.



Rys. 22. Częstość wiatrów na Helgolandzie

Przez stopniowe sumowanie czasów trwania wiatrów w poszczególnych zakresach szybkości otrzymujemy krzywą trwania wiatrów w ciągu roku, wykreśloną na rys. 22 w postaci krzywej przerywanej. Skalę tej krzywej podano również po lewej stronie tego wykresu w procentach.

Na krzywej tej widać, jak długo trwają w danej miejscowości wiatry o szybkościach poniżej pewnych wielkości.

Przez podzielenie sumy wszystkich średnich szybkości godzinowych w ciągu roku (rubr. 4, tabl. 3) przez ilość godzin w roku (100 %) otrzymuje się roczną średnią szybkość wiatru. Dla rozpatrywanego przez nas przykładu szybkość ta wynosi 6,7 m/sek. Łatwo stwierdzić, że ta średnia szybkość roczna nie jest szybko-

¹⁾ Zaczerpnięte z pracy Studiengesellschaft Windkraft, Stuttgart, 1954, Mitteilungen, Nr 3.

$$\frac{1^3 + 2^3}{2} \cdot 526 \cdot 10^{-5} = 0,2367 \cdot 10^{-5}$$

cią najczęściej występującą, która dla rozpatrywanego przykładu wynosi 5,5 m/sek, a która stanowi 82 % szybkości średniej.

W celu oszacowania wielkości energii wiatru, przypadającej na 1 m² przekroju jego przepływu w danej miejscowości, trzeba średnią arytmetyczną sześciątów szybkości skrajnych dowolnego zakresu szybkości, czyli $\frac{v_n^3 + v_{n+1}^3}{2}$ pomnożyć przez ilość godzin lub procent trwania tego zakresu szybkości w ciągu roku. Wynik ten bowiem (w jednostkach $h \cdot \frac{m^3}{sek^3}$) wyraża w pewnej skali energię wiatrów w dowolnym zakresie szybkości. Obliczenie to przeprowadzono w rubr. 5, tabl. 3, a wyniki obliczeń podano na wykresie (rys. 22) w postaci schodkowej linii ciągłej. Skalę dla tej krzywej podano po prawej stronie wykresu. Jest to krzywa zmienności energii brutto. Przez sumowanie poszczególnych rzędnych otrzymuje się krzywą rocznej energii brutto, uzyskanej od wiatrów o szybkości poniżej pewnych wielkości.

Dopiero na podstawie ostatnio otrzymanej krzywej rocznej energii brutto można oszacować zasoby energetyczne wiatrów danej okolicy. Aby uzyskać ilości energii brutto w kWh/m² należy otrzymane wyżej liczby pomnożyć przez współczynnik

$$\frac{1 \cdot 0,736 \cdot 0,125}{2 \cdot 75} = 6,14 \cdot 10^{-4} \frac{kG \cdot sek^2}{m^2} \quad [8]$$

Dla lepszego zapoznania się z różnicami, występującymi w uzyskanych wielkościach w innych miejscowościach, przedstawiono ¹⁾ te same wykresy dla miejscowości o słabych wiatrach, mianowicie dla Altenwalde-Cuxhaven (rys. 23) oraz dla miejscowości o wiatrach silnych — Brocken²⁾ (rys. 24).

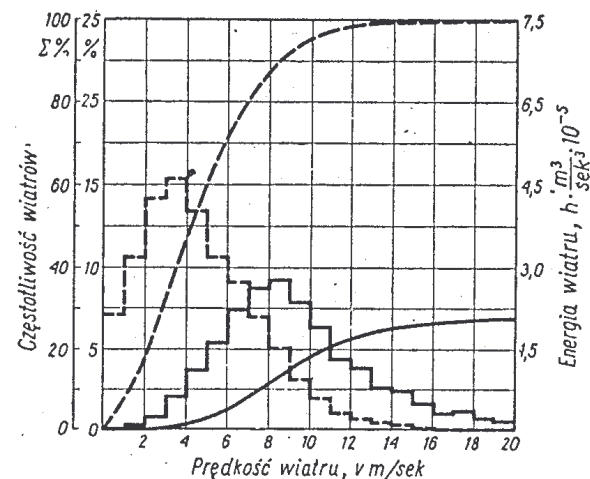
Dla ilościowego określenia energii, uzyskiwanej z 1 m² przekroju przepływu powietrza (wiatru) w danej miejscowości można wykorzystać metodę stosowaną przy określaniu mocy elektrowni wg przewidywanego wykresu jej obciążenia.

¹⁾ Według Studiengesellschaft Windkraft, Stuttgart Mitteilungen, Nr 3.

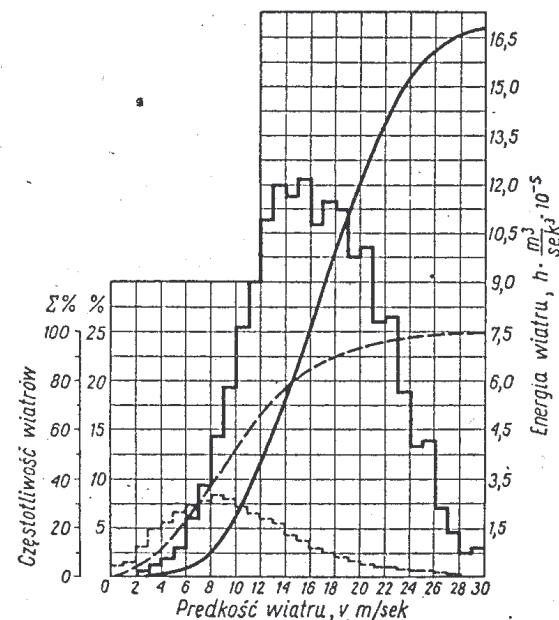
²⁾ Dla polskich warunków wiatrowych ten zakres szybkości wiatrów jest zbyt szeroki, gdyż naszym okolicom o wiatrach najsilniejszych odpowiada w tej skali już miejscowość środkowa (Helgoland). Nie zmienia to jednak ani przebiegu obliczeń, ani też ostatecznych wyników, które przedstawiono w wielkościach względnych.

x używane stare jednostki
40 kon mechaniczny AKM = 75 kG · $\frac{m}{s}$ = 735 W
siła kilogram siła niuton

Z krzywej częstotliwości występowania wiatrów należy przede wszystkim zestawić krzywą uporządkowaną częstotliwości wiatrów w zakresach różniących się o 1 m/sek (krzywa v na rys. 25 wykonanym dla stacji Helgoland), poczy-

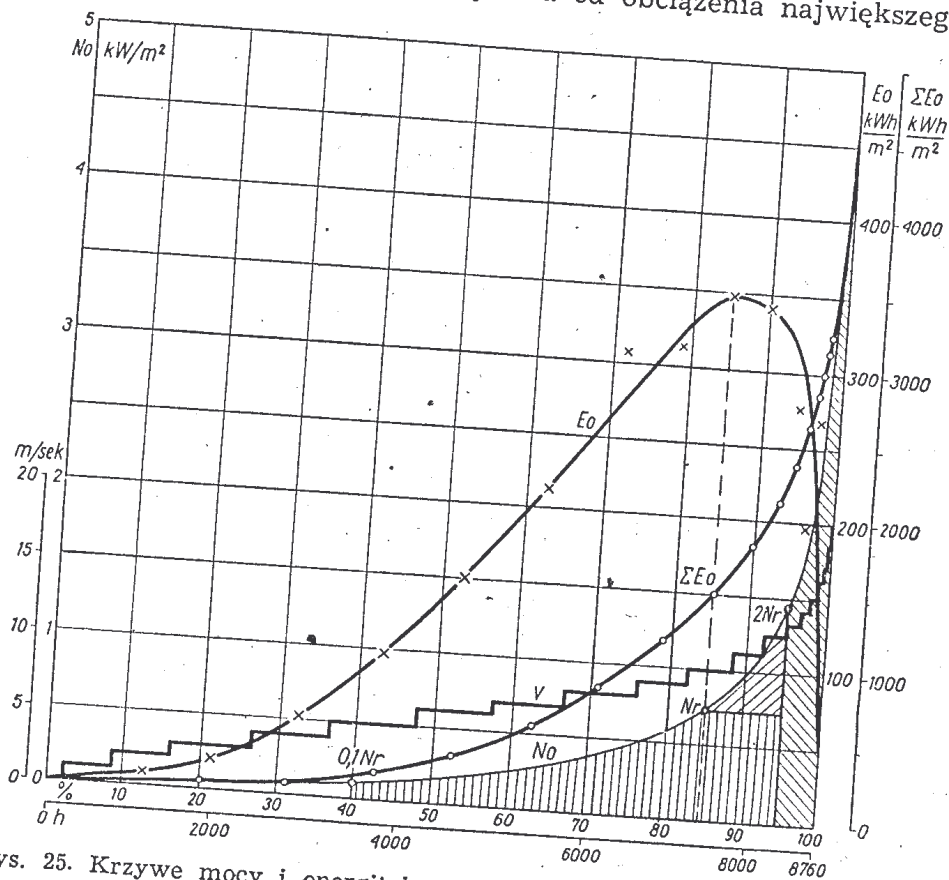


Rys. 23. Częstotliwość wiatrów w Altenwalde-Cuxhaven



Rys. 24. Częstotliwość wiatrów w Brocken

nając od szybkości najmniejszej, a kończąc na szybkości największej, czyli odwrotnie niż w krzywej uporządkowanej obciążenia elektrowni, która jest rozpoczynana od obciążenia największego.



Rys. 25. Krzywe mocy i energii brutto wiatru, przypadających na 1 m² przepływu na Helgolandzie

Korzystając z tej krzywej, można wykreślić uporządkowaną krzywą mocy wiatrów brutto, przypadającej na 1 m² przekroju przepływu (krzywa N₀ na rys. 25 wg rubryki 2 tabl. 4), obliczając poszczególne rzędne wg wzoru

$$N_0 = \frac{A \cdot F \cdot v^3 \cdot \rho}{2 \cdot 10^2} = \frac{6,14 \cdot 10^{-4} v^3}{6,46} \text{ kW}$$

[9]

$$A \cdot F = 1 \text{ m}^2, \rho = 0,125 \frac{\text{kg sek}^2}{\text{m}^4} \cdot 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tablica 4

Obliczanie rocznej mocy i energii brutto wiatru, przypadających na 1 m² przepływu na stacji Helgoland

Zakresy szybkości wiatrów m/sek	$\frac{v_n^3 + v_{n+1}^3}{2}$ $\frac{\text{m}^3}{\text{sek}^3}$	N_0 kW/m ²	$\frac{T}{h}$	E_0 kWh/m ²	ΣE_0 kWh/m ²
0—1	0,5	0,000	176	0	0
1—2	4,5	0,003	526	2	2
2—3	17,5	0,011	736	8	10
3—4	45,5	0,028	873	24	34
4—5	94,5	0,058	876	51	85
5—6	170,5	0,105	927	97	182
6—7	279,5	0,171	876	150	332
7—8	427,5	0,263	790	208	540
8—9	620,5	0,381	803	306	846
9—10	864,5	0,530	586	310	1156
10—11	1165,5	0,715	489	350	1506
11—12	1529,5	0,983	351	345	1851
12—13	1962,5	1,205	225	271	2122
13—14	2470,5	1,518	180	273	2395
14—15	3059,5	1,880	106	199	2594
15—16	3735,5	2,290	104	238	2832
16—17	4504,5	2,760	61	169	3001
17—18	5372,5	3,290	32	105	3106
18—19	6345,5	3,890	28	109	3215
19—20	7429,5	4,560	15	69	3284

oraz

$$v^3 = \frac{v_n^3 + v_{n+1}^3}{2} \frac{\text{m}^3}{\text{sek}^3}$$

Mnożąc poszczególne rzędne krzywej $N_0 = f(t)$ przez czas ich trwania w godzinach, otrzymujemy rzędne uporządkowanej krzywej energii brutto poszczególnych szybkości wiatru, jako krzywą E_0 (rys. 25), która przedstawia wielkości energii brutto uzyskiwanej z poszczególnych mocy wiatru, odpowiadających poszczególnym zakresom jego szybkości. Krzywa ta, jako iloczyn mocy i czasu jej trwania w okresie rocznym, przy pewnej wielkości mocy posiada wartość największą. Przy tej szybkości wiatru, odpowiadającej zatem największej dostarczonej ilości energii, pro-

jektowane urządzenie wiatrowe powinno rozwijać swą moc znamionową.

Po zsumowaniu poszczególnych rzędnych tej krzywej otrzymuje się uporządkowaną krzywą rocznej energii brutto, uzyskiwanej z 1 m² powierzchni od wszystkich szybkości wiatru (krzywa ΣE_0 na rys. 25, wg rubryki 6, tabl. 4) poniżej dowolnej ich wielkości.

Postępując w ten sposób, jeden z aerologów niemieckich¹⁾ dokonał obliczeń energii wiatrowej dla trzech już poprzednio przez nas obranych miejscowości Niemiec (Altenwalde — Cuxhaven, Helgoland i Brocken) i uzyskał bardzo pouczające wyniki, z którymi należy się zapoznać.

Przypomina się, że miejscowości obrane są bardzo różne pod względem wiatrowym, gdyż średnie roczne ich szybkości wiatrów wynoszą:

w Altenwalde-Cuxhaven	4,37 m/sek
w Helgolandzie	6,7 m/sek
w Brocken	10,12 m/sek

Roczne ilości energii brutto uzyskiwanej z 1 m² powierzchni dla tych miejscowości wynoszą

Altenwalde-Cuxhaven	— 2,1 · 10 ⁶ (hm ³ /sek ³)	(v = 0 do 20 m/sek)
Helgoland	— 5,5 · 10 ⁶ (hm ³ /sek ³)	(v = 0 do 25 m/sek)
Brocken	— 16,8 · 10 ⁶ (hm ³ /sek ³)	(v = 0 do 35 m/sek)

Wielkości mocy, dostarczających największe ilości energii brutto, oraz roczne ilości energii brutto wynoszą:

Altenwalde-Cuxhaven	— 0,377 kW/m ²	i 1285 kWh/m ²
Helgoland	— 0,700 kW/m ²	i 3284 kWh/m ²
Brocken	— 2,300 kW/m ²	i 10600 kWh/m ²

Przyjąwszy następnie, że urządzenie wiatrowe zaczyna pracować użytecznie, poczynając od mocy wiatru równej jednej dziesiątej mocy obliczeniowej (0,1 N_r) oraz, że podczas silniejszych wiatrów od odpowiadającego mocy obliczeniowej urządze-

¹⁾ Hans Pigge, Hameln, Elektrizitätswirtschaft 1955, Nr 20, str. 704.

nie wiatrowe pracuje do mocy wiatru równej dwukrotnej mocy obliczeniowej (dając wtedy moc obliczeniową), z całkowitego pola pod krzywą N₀ (rys. 25) wydzieliła się wielkości mocy brutto do wykorzystania w zakresie od 0,1 N_r do 2 N_r (pole zakreskowane liniami pionowymi). Reszta pola wykresu mocy pozostaje niewykorzystana (zakreskowana liniami ukośnymi) bądź to z przyczyny zbyt małych szybkości wiatru, bądź też z przyczyny zbyt dużych jego szybkości.

Oznaczając stosunek dowolnej mocy wiatru i mocy obliczeniowej przez $m = \frac{N_0}{N_r}$ w pracy urządzenia wiatrowego można wydzielić cztery zakresy

1. Postój z powodu ciszy i wiatrów bardzo słabych (0 < m < 0,1) wiatry niewykorzystane
2. Praca bez regulacji (0,1 < m < 1) wiatry wykorzystane
3. Praca z regulacją (1 < m < 2) wiatry częściowo wykorzystane
- 3a. Energia odregulowana (1 < m < 2) wiatry niewykorzystane
4. Postój z powodu wiatrów zbyt silnych (2 < m < ∞) wiatry niewykorzystane

Z dokonanych dla tych trzech stacji zestawień wynika, że w przyjętych warunkach pracy (zależnych od m) poszczególne udziały procentowe energii w wymienionych zakresach pracy urządzeń wiatrowych są prawie jednakowe, czyli niezależne od rocznej średniej szybkości wiatru.

W szczególności udziały te wynoszą: dla zakresu 1 (cisze i wiatry bardzo słabe) — 3. do 5 % całej rocznej energii wiatru brutto; dla zakresu pracy bez regulacji — 40 do 50 %, zaś dla zakresu pracy z regulacją — 15 %. Wielkość energii odregulowanej stanowi 8 % tej energii rocznej, zaś energia niewykorzystana podczas zbyt silnych wiatrów stanowi względnie duży udział, gdyż aż 30 %.

Zatem wielkość energii wiatru wykorzystywanej brutto stanowi zaledwie 60 % całkowitej rocznej energii wiatru, niezależnie od średniej rocznej szybkości wiatru. Procent ten zależy oczywiście od stosunku m, w szczególności od ograniczenia pracy urządzenia wiatrowego podczas silnych wiatrów tylko do m = 2. Niewątpli-

wie stosunek ten dla miejscowości o mniejszych średnich rocznych szybkościach wiatru (a takie miejscowości stanowią znaczną część Polski) będzie mógł być nawet znacznie powiększony, przez co i udział energii wykorzystywanej się zwiększy.

Należy przy tym zwrócić uwagę, że uzyskany wyżej udział energii wykorzystywanej dotyczy tylko takich silników wiatrowych, które przez swą dostatecznie szybką regulację mogą wykorzystywać wszystkie podmuchy wiatru odczuwane i zaliczane przez przyrządy miernicze, a za tym ujęte w wyjściowych danych meteorologicznych. Ponieważ jednak w praktyce takie możliwości występują nie często, za wielkość udziału energii wykorzystywanej brutto trzeba przyjmować tylko ok. 50% całkowitej rocznej energii wiatru.

W celu określenia wielkości uzyskanej mocy oraz ilości energii netto z 1 m² powierzchni należy osiągnięte wielkości pomnożyć przez odpowiednie współczynniki aerodynamicznego wykorzystania energii wiatru c_l ¹⁾ oraz sprawności mechanicznej η_m ¹⁾ czyli

$$N_e = c_l \cdot \eta_m \cdot N_0$$

$$E_e = c_l \cdot \eta_m \alpha \Sigma E_0$$

[10]

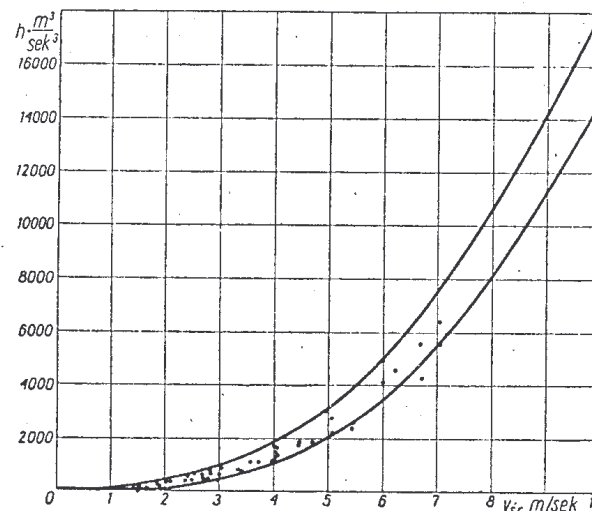
gdzie: α wynosi 0,5 — 0,6.

Dane te dotyczą pracy silników wiatrowych przy stałym i największym współczynniku c_l , a za tym przy stałym wyróżniku szybkości $z = \frac{u}{v}$ ¹⁾, czyli przy zmiennej szybkości obrotowej śmigła. W przypadkach pracy silnika wiatrowego przy stałej szybkości obrotowej, a zatem przy zmiennym wyróżniku szybkości współczynnik aerodynamiczny c_l nie zawsze jest największy, wobec czego wielkości, mocy i energii netto z 1 m² powierzchni otrzymane zgodnie ze wzorem [10] należy pomnożyć przez współczynnik $\eta_r = 0,8 — 0,9$ charakteryzujący mniej korzystną pracę silnika wiatrowego.

Zjawia się teraz pytanie, jak należałoby postąpić z tym zagadnieniem w naszych warunkach, gdzie jesteśmy dotychczas i kilka lat jeszcze będziemy pozbawieni podstawowych danych meteorologicznych, dotyczących energetyki wiatrów, co wyklucza właściwie nawet pobieżne obliczenie wyników pracy projektowanego urządzenia wiatrowego.

¹⁾ Pojęcia te będą szczegółowo wyjaśnione w rozdz. III.

Jeżeli jednak już i w okresie pionierskim mamy opierać się na obliczeniach przewidywanych wyników pracy projektowanego silnika wiatrowego, nie pozostaje nam nic innego, jak przyjęcie za podstawę danych opracowywanych dla najbliższych miejscowości przez PIHM, czyli wyniki trzykrotnego odczytu w ciągu dnia średnich minutowych szybkości wiatru. Przyjąwszy, że te średnie szybkości wiatru trwają w ciągu całych okresów czasu między pomiarami, możemy uzyskać pewną orientację, co do pewnej średniej rocznej szybkości wiatru. Na podstawie tej średniej szyb-



Rys. 26. Zależność rocznej energii brutto wiatru od jego średniej rocznej szybkości

kości rocznej można by w sposób opisany w punkcie 6 sporządzić wykres częstotliwości wiatrów, a w następstwie obliczyć ilość rocznej energii brutto. Ponieważ jednak obliczenie takie już od swej podstawy byłoby mało dokładne, a wymagałoby do swego przeprowadzenia sporo czasu, można skorzystać i z innej metody, równie przybliżonej.

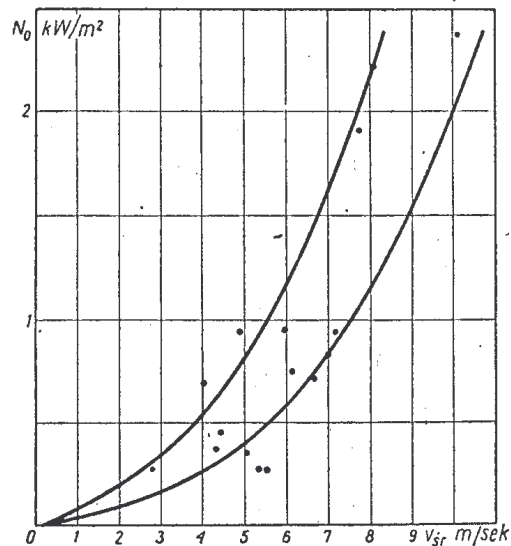
Ponieważ ilość rocznej energii brutto jest w pewnych granicach uzależniona od średniej rocznej szybkości wiatru, skorzystano z większej ilości danych¹⁾ pomiarowo-obliczeniowych 50 stacji meteorologicznych Niemiec Zachodnich i naniesiono je na wykres (rys. 26). Otrzymany w ten sposób zbiór punktów obwiedziono

¹⁾ Z pracy Studiengesellschaft Windkraft, Stuttgart, 1954. Mitteilungen Nr 3.

dwiema liniami, które ujmują cały zakres wahań wielkości energii rocznej brutto dla dowolnej średniej szybkości rocznej.

Korzystając z tego wykresu, można na podstawie uprzednio uzyskanej „średniej szybkości rocznej” oszacować wielkość rocznej energii brutto wiatrów danego miejsca.

Obliczenie dalsze, zmierzające do oszacowania wielkości energii rzeczywiście osiągalnej (netto) jest uzależnione od jakości



Rys. 27. Zależność jednostkowej mocy brutto wiatru od jego średniej rocznej szybkości

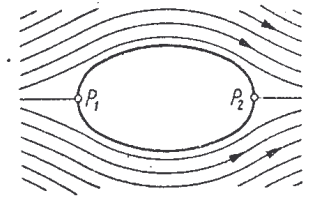
urządzenia wiatrowego projektowanego do wykorzystania energii wiatru, decydującego o przyjęciu odpowiedniej wielkości współczynników aerodynamicznych oraz sprawności.

Podobnie, korzystając z wykresu $N_0 = f(v_{sr})$ (rys. 27), sporządzonego na podstawie wyników obliczeń dokonanych dla czternastu stacyj niemieckich ¹⁾ można z pewnym przybliżeniem określić moc wiatru brutto z 1 m^2 w zależności od średniej rocznej szybkości wiatru.

¹⁾ Hans Pigge, Hameln, Elektrizitätswirtschaft, 1955, Nr 20.

1. POJĘCIA OGÓLNE

Gdy strumień powietrza napotyka na swej drodze ciało stałe (rys. 28), to na skutek konieczności jego ominięcia cząstki powietrza w bliskim jego sąsiedztwie będą posiadały inne szybkości (co do wartości i kierunku), niż cząsteczki bardziej odległe od tego ciała; cząstki powietrza natomiast dość odległe od ciała stałego, wykażą niezmienną szybkość pierwotną. Ruchy poszczególnych cząstek powietrza przedstawia się zwykle jako linie prądu. Są to linie, których styczne w każdym punkcie są zgodne z kierunkiem ruchu cząstek powietrza. Zbiór pewnej ilości linii prądu tworzy pole szybkości.



Rys. 28. Przepływ w sąsiedztwie ciała stałego

W zjawisku opływu przeszkody przez powietrze występują na jej przekroju podłużnym dwa charakterystyczne punkty: jeden P_1 (rys. 28) nazywany przednim punktem spiętrzenia i drugi P_2 — nazywany tylnym punktem spiętrzenia. Szybkości cząstek powietrza w tych punktach wynoszą zero, czyli cząstki powietrza znajdują się tam w spoczynku.

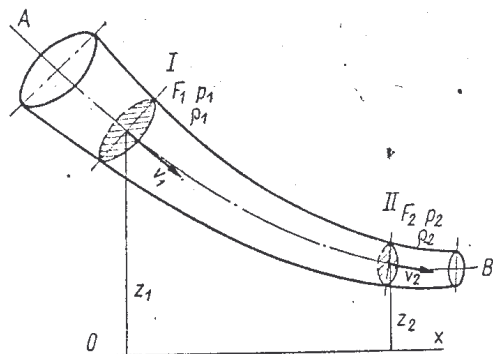
Ruchem ustalonym nazywamy ruch cząstek, podczas którego szybkość w każdym punkcie nie zmienia się z biegiem czasu. W warunkach tych obserwuje się stale ten sam obraz linii prądu powietrza, jakkolwiek jego cząstki ulegają przy tym ciągłej wymianie.

W przypadkach, gdy szybkość cząstek w pewnych punktach z biegiem czasu się zmienia otrzymujemy ruch nieustalony.

Włóknem prądu nazywamy część powietrza ograniczoną liniami prądu, poprowadzonymi przez wszystkie punkty dowolnie małego konturu zamkniętego. Przepływ powietrza w danej chwili w poszczególnych przekrojach takiego włókna prądu odbywa się tak, jak w rurce o sztywnych ściankach. Rurka utworzona przez wspomniane linie prądu nazywa się rurką prądu.

2. RÓWNANIE CIĄGŁOŚCI

W myśl zasady zachowania masy podczas przepływu powietrza jego masa nie może ani ginać, ani się zjawiać. Rozpatrując dwa poprzeczne przekroje F_1 i F_2 jednej rurki prądu (rys. 29), w których występują średnie szybkości powietrza v_1 i v_2 , obję-



Rys. 29. Rurka prądu

tości powietrza, przepływające przez te przekroje w jednostce czasu będą $v_1 F_1$ i $v_2 F_2$. Gdy gęstości powietrza w tych przekrojach oznaczymy odpowiednio przez ρ_1 i ρ_2 , masy powietrza przepływające przez oba te przekroje w jednostce czasu, będą odpowiednio $\rho_1 v_1 F_1$ i $\rho_2 v_2 F_2$.

Zgodnie z zasadą zachowania masy wielkości te muszą być sobie równe, czyli

$$\rho_1 v_1 F_1 = \rho_2 v_2 F_2 = \text{const} \quad [11]$$

Jest to równanie ciągłości

Dla przypadków szczególnych, gdy gęstość $\rho_1 = \rho_2$, czyli dla przepływów nieściśliwych, to jest takich, w których nie występują zmiany objętości właściwych równanie ciągłości przyjmie następującą postać

$$F_1 v_1 = F_2 v_2 = \text{const}$$

A więc dla przepływów nieściśliwych ($\rho_1 = \rho_2$) zarówno ustalonych jak i nieustalonych, iloczyn szybkości i poprzecznego przekroju rurki prądu jest stałym.

Oznacza to, że objętość płynu, przyływająca przez jakikolwiek przekrój poprzeczny rurki prądu w jednostce czasu, musi być równa objętości dopływającej do rurki, jak również i z niej odpływającej.

Z ostatniego równania ciągłości wynika również, że w przepływach nieściśliwych prędkość przepływu jest odwrotnie proporcjonalna do powierzchni poprzecznego przekroju rurki prądu.

3. PRAWO BERNOULLIEGO

Prawo Bernoulliego wyraża zasadę zachowania energii przystosowaną przede wszystkim do rurki prądu przepływu. Dla obu przekrojów poprzecznych rurki prądu przedstawionej na rys. 29 otrzymaliśmy

$$\rho_1 F_1 v_1 = \rho_2 F_2 v_2 = m$$

gdzie m oznacza masę powietrza przepływającą w jednostce czasu.

Przyjmąwszy, że rozpatrujemy ruch ustalony, przez poprzeczny przekrój F_1 w ciągu czasu t przepływie objętość $F_1 v_1 t$; masa zaś tego przepływu wyniesie

$$m t = \rho_1 F_1 v_1 t$$

W ciągu tego samego czasu przez przekrój F_2 przepływie taka sama masa, czyli

$$m t = \rho_2 F_2 v_2 t$$

Masa powietrza przepływająca przez przekrój F_1 posiada pewien zasób energii, na który składa się:

a) energia ruchu (kinetyczna)

$$\frac{m v_1^2}{2}$$

b) energia ciśnienia p_1 (równoważna pracy nacisku $p_1 F_1$ na drodze $v_1 t$)

$$p_1 F_1 v_1 t$$

Jeżeli pomnożymy i podzielimy energię ciśnienia przez gęstość powietrza ρ_1 , to otrzymamy

$$\frac{p_1 \rho_1 F_1 v_1 t}{\rho_1} = \frac{p_1}{\rho_1} m t$$

c) energia potencjalna wzniesienia masy mt na wysokość Z_1 względem dowolnie obranego poziomu, np. $o-x$, czyli

$$Z_1 mgt$$

gdzie g — przyspieszenie ziemskie.

Podobnie można wyrazić wielkości energii dla przekroju F_2 , a więc

a) energia ruchu $\frac{mtv_2^2}{2}$

b) energia ciśnienia p_2 $\frac{p_2}{\rho_2} mt$

c) energia wzniesienia $Z_2 mgt$

Podczas przepływu bez strat na tarcie wewnętrzne obie sumy energii muszą być równe, zatem

$$\frac{mv_1^2}{2}t + \frac{p_1}{\rho_1}mt + Z_1mgt = \frac{mv_2^2}{2}t + \frac{p_2}{\rho_2}mt + Z_2mg$$

Oznaczywszy ciężary właściwe $\rho_1 g$ przez γ_1 i $\rho_2 g$ przez γ_2 , otrzymamy następujące równanie

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma_1} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma_2} + Z_2$$

Zwrócić tutaj należy uwagę, że wyrazy otrzymanego równania posiadają wymiar długości (wysokości).

Dla przepływów nieściśliwych ciężary właściwe we wszystkich przekrojach są jednakowe, czyli

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$$

a ostatnie równanie przyjmie postać

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + Z_2 = \text{const} \quad [12]$$

Jest to równanie Bernoulliego w postaci powszechnie stosowanej.

Poszczególne człony tego równania wyrażają:

$\frac{v^2}{2g}$ — wysokość prędkości (z tej wysokości musiałoby spaść ciało,

aby w swobodnym spadku mogło uzyskać szybkość v),

$\frac{p}{\gamma}$ — wysokość ciśnienia (wysokość słupa powietrza, wywierającego swoim ciężarem ciśnienie p),

Z — wysokość geometryczną (niwelacyjną).

Zgodnie więc z równaniem Bernoulliego suma wysokości prędkości, wysokości ciśnienia i wysokości niwelacyjnej jest stałą wzdłuż danej linii prądu. Stała ta może się oczywiście zmieniać przy przejściu od jednej linii prądu do drugiej.

Jeżeli wszystkie linie prądu wychodzą z obszaru, w którym płyn znajduje się w spoczynku lub w ruchu jednostajnym i prostoliniowym, to wielkość stała równania jest jednakowa dla wszystkich linii prądu. W tym przypadku równanie Bernoulliego jest słuszne dla całego obszaru objętego przez przepływ.

Ponieważ zmiany ciśnienia powietrza w naszych rozważaniach będą bardzo małe, bardzo nieznaczne będą również i zmiany ciężaru właściwego powietrza, wobec czego powietrze będziemy uważać w tych warunkach za nieściśliwe, a równanie Bernoulliego będziemy stosować w ostatnio wyprowadzonej postaci [wzór 12].

4. CIŚNIENIE SPIĘTRZENIA PRZED PRZESZKODĄ

Chcąc zastosować prawo Bernoulliego do punktu spiętrzenia na przeszkodzie P_1 (rys. 28), znajdującej się w przepływie z szybkością v_0 , rozpatrzmy linię prądu, trafiającą do przedniego punktu spiętrzenia.

W znacznej odległości przed przeszkodą szybkość przepływu wynosi v_0 , zaś ciśnienie p_0 . Ciśnienie, panujące w punkcie spiętrzenia, oznaczmy przez p_1 ; szybkość przepływu w tym miejscu, jak to ustaliliśmy poprzednio w p. 1 wynosi 0.

Ponieważ linia prądu znajduje się stale na jednakowym poziomie ($Z_1 = Z_0$), równanie Bernoulliego przyjmie postać

$$\frac{p_1}{\gamma} + 0 = \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g}$$

Zatem ciśnienie spiętrzenia p_1 wyniesie:

$$p_1 = p_0 + \gamma \frac{v_0^2}{2g}$$

zaś przyrost ciśnienia w tym punkcie

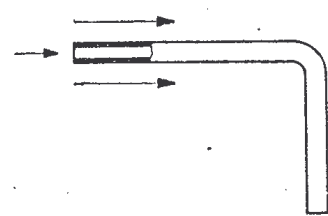
$$p_1 - p_0 = \gamma \frac{v_0^2}{2g} \quad \left[\frac{N}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2} = \rho a \right] \quad [13]$$

Ten przyrost ciśnienia nazywa się ciśnieniem prędkości, albo ciśnieniem dynamicznym przepływu.

Ciśnienie p_0 wskazywane na przykład przez przyrząd mierzniczy, poruszający się wraz z powietrzem, nazywa się ciśnieniem statycznym przepływu, zaś ciśnienie p_1 — ciśnieniem całkowitym.

Gdy w punkcie spiętrzenia wykonamy otworek, to wewnątrz niego będzie panować ciśnienie całkowite p_1 ; możemy je zmierzyć odpowiednim przyrządem.

Na tej zasadzie jest zbudowana rurka Pitota (rys. 30), służąca do pomiaru ciśnienia całkowitego w dowolnym przepływie. Jest to rurka zgięta pod kątem prostym, której jedno ramię kieruje się podczas pomiaru równoległe przeciw przepływowi, drugie zaś łączy się z manometrem lub z mikro-manometrem.



Rys. 30. Rurka Pitota

Pomiaru ciśnienia statycznego p_0 możemy dokonać podobnie, gdy otwór wykonamy prostopadłe do szybkości przepływu.

Gdy oba otwory skojarzymy w jednym przyrządzie, otrzymamy rurkę Prandtla (rys. 14), przyrząd powszechnie stosowany do pomiarów ciśnień i szybkości przepływów.

W celu zmierzenia szybkości powietrza w przepływie oba otwory rurki Prandtla łączy się odpowiednio dwiema rurkami gumowymi z obu ramionami manometru wodnego lub alkoholowego, jak to pokazano na rys. 14 i odczytuje się różnicę wysokości obu słupków cieczy h , odpowiadającej ciśnieniu dynamicznemu przepływu.

Wprowadzając do równania [13] za $\frac{\gamma}{g}$ gęstość ρ ($\frac{\gamma}{g} = \rho$) otrzymamy

$$p_1 - p_0 = \frac{\rho v^2}{2} = h \cdot d$$

gdzie:

h jest różnicą wysokości słupka manometrycznego w mm,

d jest ciężarem właściwym płynu manometru.

Z ostatniego równania wynika, że

$$v = \sqrt{\frac{2hd}{\rho}}$$

Ponieważ zależności gęstości powietrza od temperatury i ciśnienia barometrycznego wyraża się wzorem [2] zatem

$$v = \sqrt{\frac{2hd}{0,0474 \frac{B}{273+t}}} = \sqrt{\frac{42,2 hd (273+t)}{B}} = 6,49 \sqrt{\frac{hd (273+t)}{B}}$$

Ponieważ dla wody $d = 1$, a dla alkoholu $d = 0,79$, ostatnie wyrażenie przyjmie postać dla manometru wodnego

$$v = 6,49 \sqrt{\frac{h(273+t)}{B}}$$

alkoholowego

$$v = 6,49 \sqrt{\frac{0,79h(273+t)}{B}}$$

Podstawiając do tych wzorów wartości dla $t = 15^\circ\text{C}$ i dla $B = 760 \text{ mm (Hg)}$, otrzyma się dla manometru wodnego

$$v = 4\sqrt{h} \text{ m/sek}$$

alkoholowego

$$v = 3,56\sqrt{h} \text{ m/sek}$$

Przy tym pamiętać trzeba, że wysokość słupka manometrycznego należy wyrażać w milimetrach.

5. PRZEPŁYWY POTENCJALNE

Przepływy płynu idealnego (bez lepkości), rozpoczynającego swój ruch ze stanu spoczynku tylko pod wpływem różnicy ciśnień, posiadają szczególną właściwość nazywaną potencjałem szybkości. Właściwość wymieniona wyraża się pewną funkcją Φ i polega na tym, że stosunek dowolnie małego przyrostu tej funkcji i takiegoż przyrostu odległości wyznacza szybkość przepływu w danym punkcie

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta l} = v$$

Przepływy, wykazujące taką właściwość, czyli posiadające potencjał szybkości, nazywają się przepływami potencjalnymi. Przepływy potencjalne odznaczają się przede wszystkim tym, że poszczególne części płynu, biorące udział w takim ruchu, nie podlegają żadnym obrotom.

6. RUCH WIROWY. CYRKULACJA

W pewnych przepływach występują mniejsze lub większe ruchy obrotowe niektórych części płynu (powietrza) względem pewnych punktów środkowych powodując wiry; występują one często np. za przeszkodami, znajdującymi się w przepływach.

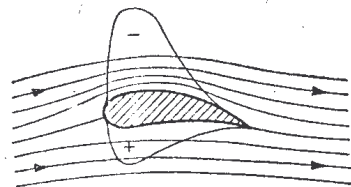
Charakterystyczną wielkością takiego ruchu płynu (powietrza) jest szybkość kątowna ω jego cząstek. Szybkość ta w przypadkach wirów może być w przeciwieństwie do obrotu ciała stałego różną dla różnych cząstek i to nie tylko co do wielkości, ale nawet i co do kierunku; często np. obserwuje się w wirach powroty cząstek płynu do punktów zajmowanych przez nie poprzednio.

Dokładniejsze ujęcie tych ciekawych, choć dość złożonych zjawisk zaprowadziłoby nas jednak zbyt daleko, wobec czego zapoznamy się tylko ze szczególną własnością wirów, mianowicie z cyrkulacją.

Cyrkulacją nazywa się wielkość wyrażoną iloczynem szybkości cząstek płynu przez drogę przebytą przez nie wzdłuż linii zamkniętej. Cyrkulacja np. części płynu, obracającej się z szybkością kątowną ω wzdłuż okręgu koła o promieniu r , wynosi

$$\Gamma = \omega \cdot r \cdot 2\pi r = 2\pi r^2 \omega \quad [14]$$

Dla ruchu potencjalnego cyrkulacja prędkości wzdłuż każdej linii zamkniętej, leżącej w obszarze przepływu, jest równa zero, a więc ruch ten jest wszędzie niewirowy.

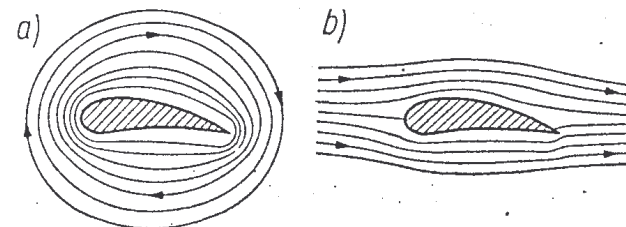


Rys. 31. Optyw dokola płata nośnego

Przykładem przepływu cyrkulacyjnego szczególnie nas obchodzącym jest optyw powietrza dokola płata nośnego (rys. 31). Przepływ bowiem w sąsiedztwie płata nośnego można

uważać za wypadkowy dwu przepływów, mianowicie jednego cyrkulacyjnego dokola płata (rys. 32a) i drugiego — zwykłego, bezcyrkulacyjnego, potencjalnego (rys. 32b).

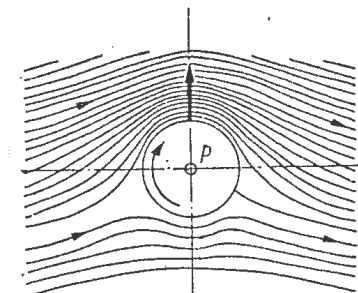
Z tym zjawiskiem cyrkulacji jest związane występowanie siły nośnej. Z przedstawionych rysunków widać od razu, że w wyniku nałożenia optywu cyrkulacyjnego na optyw zwykły



Rys. 32. Optyw cyrkulacyjny dokola płata nośnego; b) zwykły optyw potencjalny w sąsiedztwie płata nośnego

zostaje zwiększona szybkość przepływu nad płatem, zaś zmniejszona pod płatem; w pierwszym przypadku kierunki obu przepływów składowych są zgodne ze sobą, w drugim zaś — przeciwne. W myśl prawa Bernoulliego powoduje to zmniejszenie ciśnienia nad płatem, a zwiększenie ciśnienia pod płatem, w wyniku czego powstaje siła nośna, skierowana ku górze. Rozkład tych ciśnień zaznaczono schematycznie na rys. 31.

Taki sam optyw cyrkulacyjny powstaje również podczas optywu powietrza dokola obracającego się walca kołowego o osi prostopadłej do kierunku wiatru (rys. 33), w wyniku czego powstaje siła poprzeczna do wiatru, skierowana od strony, po której wiatr i obrót mają kierunki przeciwne, ku stronie, po której kierunki wiatru i obrotu są zgodne.



Rys. 33. Optyw dokola wirującego walca

Zjawisko to jest znane już od przeszło stu lat, jako zjawisko Magnusa, od nazwiska jego odkrywcy. Ze zjawiskiem tym można najłatwiej się zapoznać doświadczalnie, upuszczając kręcący się szybko walec blaszany (bąk). Walec ten nie opada pio-

nowo, ale w przypadku, gdy jego oś obrotu będzie pozioma, szybkuje lotem ślizgowym podobnie, jak płat nośny. Spadek natomiast tego samego walca, ale niekręcącego się, odbywa się wzdłuż pionu.

7. PODOBIENSTWO MECHANICZNE

Gdy dwa przepływy, których obrazy linii prądu dokoła lub wewnątrz ciał geometrycznie podobnych (posiadających wymiary liniowe proporcjonalne, a kąty jednakowe) są również geometrycznie podobne, to takie przepływy nazywamy mechanicznie podobnymi.

Korzystając z tej zasady, możemy wnioskować o właściwościach aerodynamicznych jednych ciał na podstawie właściwości ciał innych geometrycznie podobnych. Jest to szeroko praktykowane w lotnictwie, gdzie na podstawie wyników doświadczalnych, uzyskiwanych podczas odmuchiwania modeli w tunelach aerodynamicznych wnioskuje się o właściwościach przedmiotów naturalnych. Jest oczywistym, że również można tak postępować i z modelami silników wiatrowych, co niejednokrotnie ma miejsce.

Zjawia się tu jednak pytanie, jaki warunek musi być podczas takich badań zachowany, aby otrzymane wyniki były dla rzeczywistych warunków miarodajne.

Z teorii prawa podobieństwa, której tutaj przytaczać nie będziemy z braku miejsca, wynika, że warunek ten w przypadkach gdy współczynniki kinematycznej lepkości powietrza mogą być przyjęte za jednakowe, jest następujący

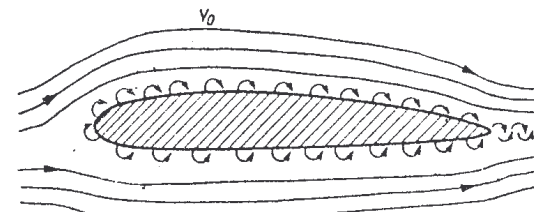
$$v_1 l_1 = v_2 l_2 = \text{const} \quad [15]$$

Z warunku tego wynika, że w celu zachowania prawa podobieństwa mechanicznego należy w tunelach aerodynamicznych stosować prędkości powietrza tyle razy większe od prędkości wiatru naturalnego, ile razy model silnika wiatrowego jest mniejszy od silnika naturalnego.

8. WARSTWA PRZYŚCIENNA. PRZEPLYWY BURZLIWE

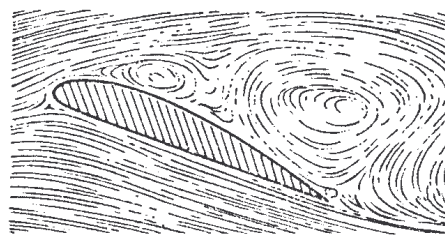
Gdy w przepływie powietrza umieścimy ciało stałe (przeszkodę), to na skutek lepkości powietrza jego warstwy, znajdujące się tuż przy powierzchni ciała stałego, będą przylegały do jego po-

wierzchni i będą zatrzymywane, tworząc tak zwaną warstwę przyścienną. Szybkość powietrza w warstwach nieco dalszych od ciała stałego wobec przyhamowywania go tylko przez warstwy pośrednie jest odpowiednio większa, a w odległości dostatecznie dużej szybkość ta jest taka sama, jak w przepływie pierwotnym. Warstwa przyścienna, skręcając się przy pewnych szybkościach przepływu w niewielkie wiry, jest unoszona przez strumień zewnętrzny powietrza (rys. 34), które ulega przy tym przemieszaniu,

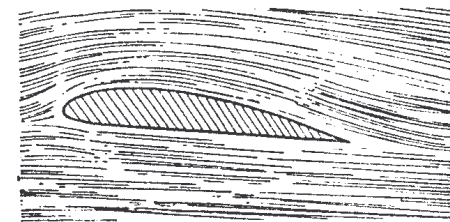


Rys. 34. Warstwa przyścienna

obejmując swym zasięgiem coraz to większy obszar. W obszarze tym następuje często oderwanie się strug przepływu od ścianki (rys. 35), tworząc jeszcze większe zaburzenia w postaci wirów. Szczególnie ostatnio wymienione zjawisko oderwania się strug powietrza od ścianki ciała stałego jest bardzo niekorzystne dla przepływu, gdyż jest związane ze stratą energii.



Rys. 35. Oderwanie się strugi od górnej powierzchni płata



Rys. 36. Przepływ uwarstwiony

Grubość warstwy przyściennej jest trudna do ustalenia, gdyż nie obserwuje się tutaj raptownego przejścia do warstw bardziej zewnętrznych; zależy ona jednak od szybkości przepływu, lepkości powietrza oraz od miejsca na przeszkodzie. Zjawiska te są trudne do ujęcia i wiele jeszcze spraw nie jest w nich wyświetlonych dostatecznie.

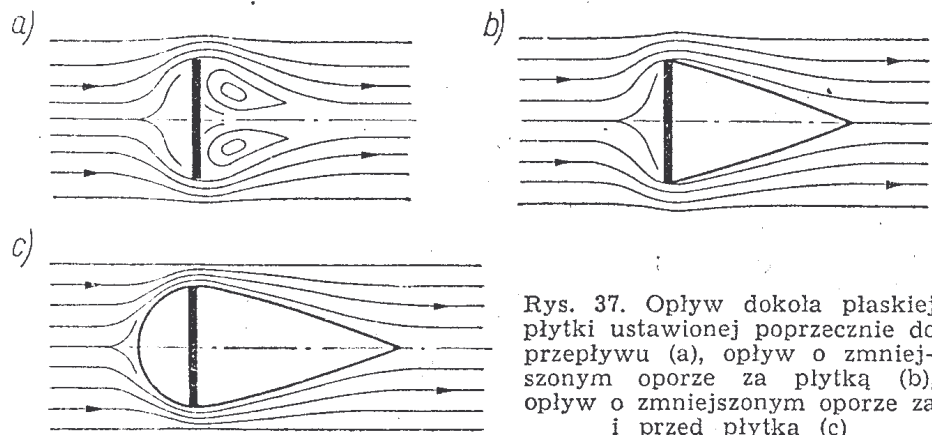
Powietrze w warstwie przyściennej oraz w warstwach z nią sąsiadujących w pewnych warunkach przepływa w postaci warstw równoległych, nie mieszających się wzajemnie (rys. 36). Taki ruch powietrza nazywamy przepływem uwarstwionym (laminarnym).

Przepływami burzliwymi (turbulencyjnymi) nazywamy natomiast przepływy zawirowane, o liniach prądu nieuporządkowanych z częstym oderwaniem się strug od powierzchni przeszkody, co obserwuje się zwłaszcza w tylnych częściach przepływu.

Przykładem przepływu burzliwego może być opływ wiatru w sąsiedztwie domu (patrz rys. 3). W przepływie tym występuje oderwanie się warstw przepływu od tylnej strony dachu związane z tworzeniem się wirów powietrznych.

9. KSZTAŁTY OPŁYWOWE

Opór napotykaną podczas równoległego przesuwania płytki ustawionej prostopadle do kierunku ruchu nawet w nieruchomym powietrzu, jest spowodowany głównie spiętrzeniem ciśnienia powietrza przed płytką oraz zjawianiem się podciśnienia za płytką;



Rys. 37. Optyw dokola płaskiej płytki ustawionej poprzecznie do przepływu (a), optyw o zmniejszonym oporze za płytką (b), optyw o zmniejszonym oporze za i przed płytką (c)

opór ten jest oporem spowodowanym zatem przede wszystkim różnicą ciśnień.

Obraz linii prądu w sąsiedztwie tej płytki przedstawiono na rys. 37a. Jeżeli linie prądu przed płytką można by jeszcze uważać

za spływające łagodnie i warstwowo, to już za płytką spostrzegamy odrywanie się od jej ścianki linii prądu i raptowne wciskanie się strug powietrza do miejsc o niższym ciśnieniu, co jest przyczyną tworzenia się znacznych wirów, a zatem i strat energii.

Znaczne zmniejszenie oporu możemy uzyskać w tym zjawisku wtedy, gdy za płytką, której kształt przyjmujemy kolisty, umieścimy ciało o kształcie obrotowym, przedstawionym na rys. 37b, umożliwiającym spływ powietrza z krawędzi płytki bez oderwania się warstw przyściennych, a za tym spływ warstwowy i bezwirowy.

Jeszcze doskonalszy przepływ uzyskamy wtedy, gdy i przed płytką umieścimy ciało o kształcie zmniejszającym przed nią spiętrzenie powietrza, jak to pokazano na rys. 37c.

W wyniku dokonanych zmian kształtu płytki przeszliśmy od typowego oporu ciśnieniowego do oporu tarcowego, czyli wywołanego zasadniczo tylko tarcem powietrza o ścianki ciała, którego kształt zmienił się, jak łatwo zauważyć, na kształt spadającej w powietrzu kropli wody.

Ponieważ spadająca kropla przyjmuje kształt właśnie taki, aby opór spadania był najmniejszy, otrzymaliśmy w rozpatrywanym zjawisku kształt ciała najkorzystniejszy pod względem jego aerodynamicznego oporu czołowego.

Kształty kropkowe znalazły jednak niewielkie zastosowanie praktyczne i wobec tego potrzeby życia spowodowały przejście na kształty mniej korzystne, zachowujące podobieństwo do kropli tylko w swych przekrojach, skierowanych wzdłuż przepływów.

Jakkolwiek takie kształty są mniej korzystne pod względem aerodynamicznym, umożliwiają one jednak dokonanie nierównie większej ilości rozwiązań technicznych i są powszechnie stosowane. Kształty takie nazywamy kształtami o profilach opływowych.

10. CZOŁOWE PARCIE WIATRU, WYWIERANE NA CIAŁA STAŁE

Wiatr, napotykając ciała stałe, jest przede wszystkim przez nie powstrzymywany, doznając pewnych oporów w swym rozprzestrzenianiu się, a ciała stałe podlegają pewnym siłom, czyli parciu. Aby utrzymać w spoczynku ciało w takim strumieniu po-

wietrza należy przyłożyć do niego siłę równą parciu wiatru i skierowaną odwrotnie. Parcie to zależy od wielkości ciała, szybkości wiatru, jego kierunku, gęstości powietrza, właściwości powierzchni ciała itp. W zjawisku tym jest istotna oczywiście szybkość powietrza względna w stosunku do ciała stałego, przy czym zupełnie obojętnym jest, czy powietrze porusza się względem nieruchomego ciała, czy też ciało porusza się względem nieruchomego powietrza.

Doświadczenia, przeprowadzone z ciałami o różnych wielkościach i kształtach wykazały, że te dość złożone zjawiska najłatwiej można ująć, gdy oddziaływanie wiatru odniesie się do pola największego przekroju ciała prostopadłego do kierunku wiatru oraz do ciśnienia dynamicznego wiatru, wprowadzając zarazem odpowiedni współczynnik nazywany współczynnikiem oporu czołowego.

Siła oddziaływania wiatru na ciała wyraża się zatem następującym wzorem

$$F_x P_x = c_x \cdot F \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad [N] \quad [16]$$

gdzie:

- $F_x P_x$ — siła wywierana przez wiatr w kG, [N]
- c_x — współczynnik oporu czołowego, [-]
- F — pole płaszczyzny w m^2 ,
- ρ — gęstość powietrza w $kg \cdot sek^3/m^4$ (przy $15^\circ C$ i 760 mm Hg $\rho = 0,125$)
- v — szybkość wiatru w m/sek. [m/s]

Znaczki x przy P i c oznaczają, że siła i współczynnik oporu dotyczą kierunku, odpowiadającego kierunkowi wiatru.

Współczynnik c_x ilościowo wyraża wielkość parcia wiatru o ciśnieniu dynamicznym równym $1 \frac{kG}{m^2}$ na ciało o przekroju poprzecznym równym $1 m^2$. zależy od kształtu

Zwrócić należy uwagę, że stosowane przez nas pojęcia parcia wiatru oraz oporu czołowego są jednoznaczne, choć zwykle przyjmuje się za parcie wiatru siłę wywieraną przez wiatr na ciała, zasadniczo znajdujące się w spoczynku, zaś za opór czołowy — siły, jakie napotyka ciało podczas swego ruchu zasadniczo w nieruchomym powietrzu.

Fizyczna istota oporu czołowego polega na tarciu powietrza o powierzchnię ciała, na tarciu jednych strug powietrza o drugie na skutek odchylenia się ich od kierunku pierwotnego oraz na wytwarzaniu wirów. Jest to zatem opór profilowy.

Ze wzoru [16] można wyrazić współczynnik oporu czołowego

$$c_x = \frac{P_x}{F \frac{\rho \cdot v^2}{2}} \quad [17]$$

Określone w ten sposób z doświadczeń współczynniki oporu czołowego dla ciał o najczęściej spotykanych kształtach podano w tabl. 5.

Z tablicy tej wynika, że największy opór aerodynamiczny (2,01) wykazuje wąska, a bardzo długa płytka, zaś najmniejszy — ciała o kształcie spadającej kropli wody oraz ciała o kształtach opływowych.

Korzystając z tablicy 5 możemy dla przykładu wyznaczyć parcie wiatru albo też opór czołowy, co jak już wiemy jest to samo, płyty ustawionej prostopadle do kierunku wiatru.

Parcie wiatru na płytę kwadratową o polu $1 m^2$ wystawionej na działanie wiatru o szybkości 8 m/sek przy $15^\circ C$ i 760 mm Hg obliczamy ze wzoru [16]

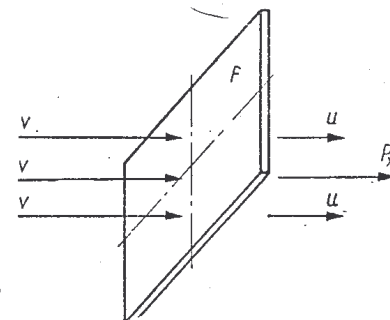
$$P_x = 1,11 \cdot 1 \cdot \frac{0,125 \cdot 8^2}{2} = 4,44 \text{ kG}$$

Gdy płaszczyzna wystawiona na działanie wiatru przesuwana się równolegle i zgodnie z kierunkiem wiatru, z szybkością u (rys. 38) parcie wiatru wyniesie

$$P_x = c_x F \cdot \frac{\rho (v - u)^2}{2} \quad [18]$$

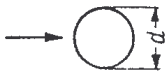
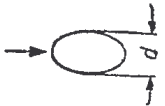
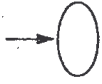
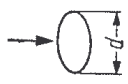
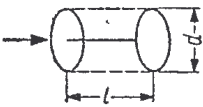
Gdy zaś płaszczyzna przesuwana się równolegle, ale przeciwnie do kierunku wiatru z szybkością u , parcie wiatru wyniesie

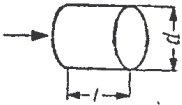
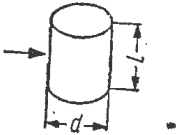
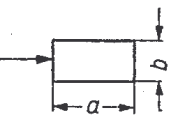
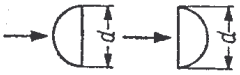


$$P_x = c_x F \cdot \frac{\rho (v + u)^2}{2} \quad [19]$$



Rys. 38. Parcie wiatru na płaszczyznę, przesuwającą się w kierunku przepływu

Aerodynamiczne współczynniki oporu czołowego c_x niektórych kształtów

Nazwa kształtu	Kształt ciała oraz kierunek przepływu	Powierzchnia przekroju poprzecznego	Stosunek głównych wymiarów lub inne charakterystyki	Współczynnik oporu czołowego c_x
Kula		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	—	0,47
Elipsoid wydłużony		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	—	0,05—0,1
Elipsoid spłaszczony		—	—	0,2—0,6
Krażek kołowy		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	—	1,11
Dwa krażki kołowe rozstawione		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	$l/d = 1$ 1,5 2 3	0,93 0,78 1,04 1,52

Walec zwrócony do wiatru podstawą		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	$l/d = 1$ 2 4 7	0,91 0,85 0,87 0,99
Walec zwrócony do wiatru powierzchnią walcową		$l \times d$	$l/d = 1$ 2 5 10 40 ∞	0,63 0,68 0,74 0,82 0,98 1,20
Płyta prostokątna		$a \times b$	$a/b = 1$ 2 4 10 18 ∞	1,10 1,15 1,19 1,29 1,40 2,01
Półkule		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	wypukła wklęsła	0,34 1,33
Stożek		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	$\alpha = 60^\circ$ $\alpha = 30^\circ$	0,51 0,34
Stożek z zaokrąglonym wierzchołkiem		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	—	0,22

11. PARCIE WIATRU NA PŁASZCZYZNY USTAWIONE SKOŚNIE

W przypadku, gdy płaszczyzna poddana działaniu wiatru, zajmuje względem jego kierunku położenie skośne (rys. 39) siła oddziaływania wiatru na płaszczyznę, nazywana siłą aerodynamiczną P_a , będzie również skierowana skośnie. Kąt α , jaki tworzy płaszczyzna z kierunkiem wiatru, nazywa się kątem natarcia, gdyż właśnie pod tym kątem wiatr naciera na płaszczyznę.

Siłę aerodynamiczną P_a możemy rozłożyć na dwie siły składowe: na jedną w kierunku wiatru P_x — będzie to siła oporu czołowego, oraz na drugą prostopadłą do wiatru P_z , nazywaną siłą nośną (wyporu).

Zatem wiatr oddziałuje na płaszczyznę, ustawioną skośnie do jego kierunku w ten sposób, że powoduje powstanie siły oporu P_x , skierowanej zgodnie z kierunkiem wiatru oraz

Rys. 39. Parcie wiatru na płaszczyznę ustawioną skośnie do przepływu

powstanie siły nośnej P_z , skierowanej prostopadle do kierunku wiatru.

Siły te określa się podobnie [wzór 16], jednak tutaj wyraża się je w zależności od pola F całkowitej powierzchni płyty (a nie, jak w przypadku poprzednim od pola przekroju płyty) i również od dynamicznego ciśnienia wiatru. Zależności te są następujące

$$P_x = c_x \cdot F \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad [20]$$

$$P_z = c_z \cdot F \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad [21]$$

gdzie c_x jest współczynnikiem oporu czołowego, a c_z — współczynnikiem siły nośnej, zaś F — polem płaszczyzny (a nie polem największego przekroju poprzecznego).

Siła wypadkowa P_a wynosi:

$$P_a = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = F \cdot \frac{\rho v^2}{2} \sqrt{c_x^2 + c_z^2} = c \cdot F \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad [22]$$

gdzie $c = \sqrt{c_x^2 + c_z^2}$

Fizyczne wyjaśnienie powstania siły nośnej zostało podane w punkcie 6 niniejszego rozdziału.

Całkowitą siłę aerodynamiczną P_a można rozłożyć również i na dwie inne siły, mianowicie: jedną prostopadłą do płaszczyzny płyty — siłę normalną P_n i drugą prostopadłą do poprzedniej P_t — siłę styczną do płyty (rys. 39).

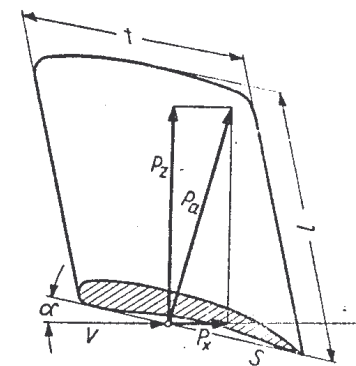
12. PARCIE WIATRU NA CIAŁA O PROFILACH OPŁYWOWYCH

Jeżeli na skośnie działanie wiatru będzie wystawiony płatek o profilu opływowym (rys. 40), to zależności między siłami są w tym przypadku takie same, jak dla skośnie ustawionej płaszczyzny (punkt 11).

W tym przypadku za kąt natarcia przyjmuje się kąt, jaki z kierunkiem wiatru tworzy cięciwa profilu, zaś za pole F — rzut płata na płaszczyznę przeprowadzoną przez cięciwę. Za punkt zaczepienia wypadkowej siły aerodynamicznej P_a przyjmuje się punkt przecięcia się tej siły z cięciwą profilu; punkt ten nazywa się środkiem parcia profilu.

Jednak bezwzględne wartości aerodynamicznych współczynników profili opływowych (c_x i c_z) są znacznie korzystniejsze od współczynników płyt płaskich. Tłumaczy się to tym, że jak to przedstawiono już poprzednio, przepływ powietrza w sąsiedztwie profilu jest warstwowy; poszczególne strugi powietrza spływają z profilu bez zaburzeń i bez tworzenia wirów. Natomiast na skutek niekorzystnego pod tym względem kształtu płaszczyzny następuje oderwanie się od niej części strug powietrza, powodując przy spływie zaburzenia i wiry, a w wyniku większe opory a mniejszą siłę nośną.

Kształty profilowe przy pewnych kątach natarcia wykazują również przepływ powietrza z oderwaniem się strug od dolnej,



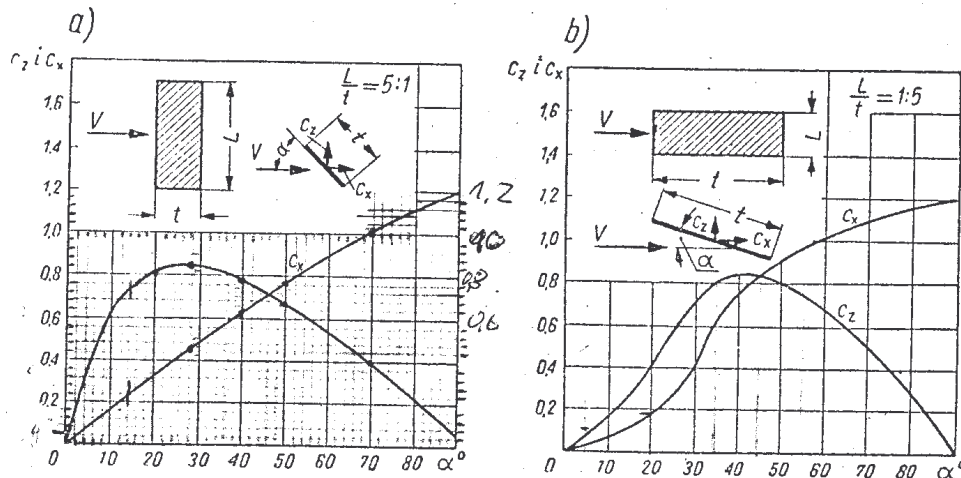
Rys. 40. Parcie wiatru na profil opływowy

albo od górnej powierzchni. Obszar pomiędzy powierzchnią płata, a oderwanymi strugami zapełnia się wirami, co powoduje zwiększenie oporu czołowego, a zmniejszenie siły nośnej.

13. WSPÓLCZYNNIKI AERODYNAMICZNE

Wielkości współczynników c_x (siły oporu) i c_z (siły nośnej) są nie tylko zależne od kształtu profilu i od kąta natarcia, ale i od stosunku długości płata do jego szerokości oraz od szybkości wiatru. Stosunek długości płata do szerokości nazywa się rozpiętością względną albo wydłużeniem, oznaczanym zwykle przez $\lambda = \frac{L}{t}$

Wartości tych współczynników wyznacza się doświadczalnie podczas odmuchiwania profili w tunelach aerodynamicznych, dokonywując tego dla różnych kątów natarcia. Uzyskane wyniki podaje się czasem w postaci wykresów w zależności od kąta natarcia α np. $c_x = f(\alpha)$ i $c_z = f(\alpha)$, (rys. 41).



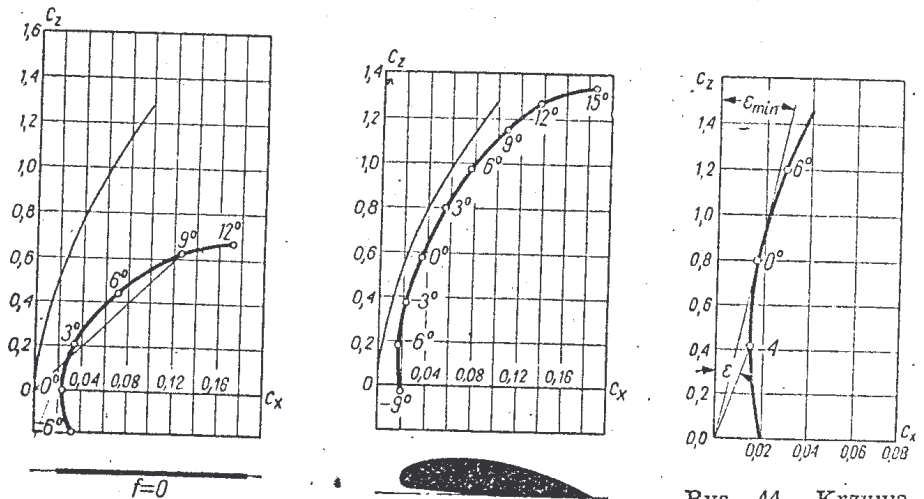
Rys. 41. Zależność współczynników c_x i c_z od kąta natarcia: a) dla płaskiego płata o wydłużeniu $\lambda = 5$, b) dla płaskiego płata o wydłużeniu $\lambda = \frac{1}{5}$

Podane na tym rysunku wykresy dotyczą płaszczyzn o dwu różnych stosunkach długości do szerokości, czyli o dwu różnych wydłużeniach.

Znacznie wygodniej jest jednak wykresy współczynników aerodynamicznych przedstawiać inaczej, mianowicie zwykle c_z w zależności od c_x . Przy poszczególnych punktach wynikowych wpisuje się wielkości kątów natarcia, a po połączeniu sąsiednich punktów linią otrzymuje się krzywą biegunową danego profilu.

Na rys. 42 podano krzywą biegunową płyty z rys. 41a, zaś na rys. 43 — profilu opływowego.

Ponieważ siła nośna P_z i siła oporu P_x są składowymi prostokątnymi całkowitej siły aerodynamicznej, to odcinek prostej, łą-



Rys. 42. Krzywa biegunowa płyty płaskiej

Rys. 43. Krzywa biegunowa profilu opływowego o wydłużeniu $\lambda = 5$

Rys. 44. Krzywa biegunowa profilu opływowego z rys. 43 o wydłużeniu $\lambda = \infty$

czący początek układu współrzędnych z dowolnym punktem biegunowej jest niczym innym, jak współczynnikiem aerodynamicznym c całkowitej siły P_a i podaje zarazem kierunek działania tej siły wypadkowej.

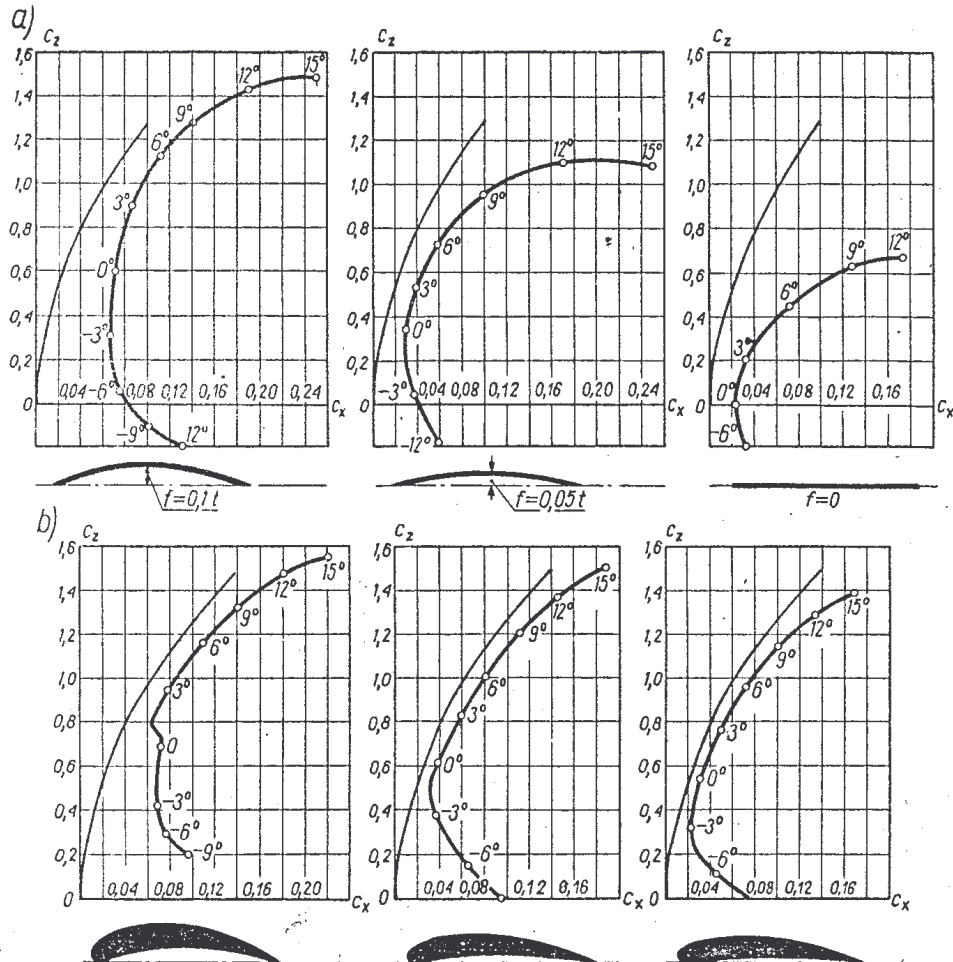
Ten sposób przedstawiania zależności c_z od c_x został zastosowany po raz pierwszy przez jednego z pionierów lotnictwa O. Lilienthala. Zwykle przyjmowany dla tych wykresów stosunek długości płata do jego szerokości (wydłużenie) wynosi $\lambda = 5$; jednak przy pomocy odpowiednich metod można przeliczyć te współczynniki dla innych prawie dowolnych stosunków wymiarowych.

Z innych wydłużeń płatów używa się często wydłużenia nieskończenie wielkiego, oznaczanego zwykle przez λ_∞ , a wyrażającego właściwie płat bez końców. Zrozumiałą jest bowiem rzeczą, że zjawiska, występujące w związku z umieszczeniem płata w przepływie powietrza, u jego końców mogą być inne, niż w jego częściach środkowych. Przez wprowadzenie zatem pojęcia płata bez końców, czyli o jego wydłużeniu nieskończenie wielkim, można wyłączyć z aerodynamicznych charakterystyk płata zjawiska, związane z istnieniem jego końców, które to zjawiska w istocie

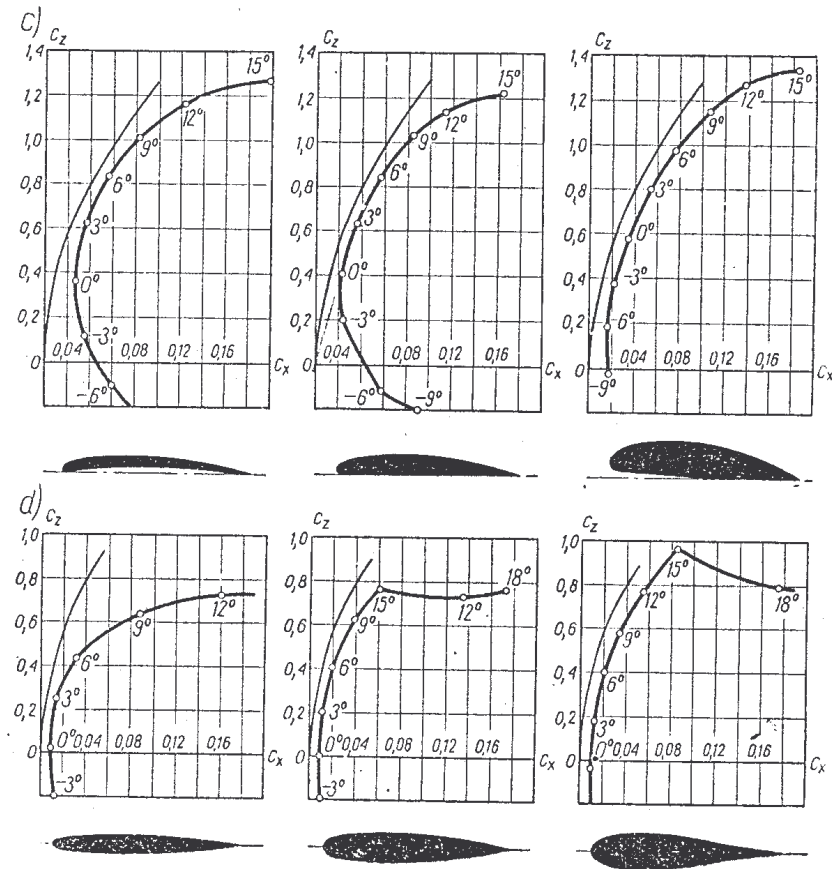
rzeczy powodują, jak to będzie przedstawione dalej, tylko dodatkowe opory (tzw. opory indukcyjne).

Na rys. 44 podano krzywą biegunową profilu z rys. 43 dla jego wydłużenia nieskończenie wielkiego, czyli po odjęciu oporów powodowanych jego końcami.

Na rys. 45 podano krzywe biegunowe dla paru typowych profili o zmiennych wielkościach charakterystycznych. Dla większej dokładności skala współczynników c_x dla tych wykresów została przyjęta 5-krotnie większa, niż dla c_z .



Rys. 45. Krzywe biegunowe



niektórych profili typowych

14. DOSKONAŁOŚĆ PROFILU

Z krzywych biegunowych poza bezwzględnymi wartościami współczynników aerodynamicznych można bardzo łatwo określić jakość, czyli doskonałość profilu, której współczynnik wyraża się stosunkiem współczynnika siły nośnej do współczynnika siły oporu

$$\nu = \frac{c_z}{c_x} \quad [23a]$$

Jednocześnie można wyznaczyć kąt natarcia, przy którym doskonałość ta występuje. Doskonałość profilu jest tym większa, im profil wykazuje większy współczynnik siły nośnej, a mniejszy współczynnik siły oporu, a zatem zależy od wydłużenia płata λ .

Również i doskonałość profili odnosi się często do wydłużenia płata nieskończenie wielkiego λ_∞ , czyli po uwzględnieniu oporów wywołanych jego końcami i oznacza się ją wtedy przez

$$\nu_\infty = \frac{c_{z\infty}}{c_{x\infty}} \quad [23b]$$

Doskonałość profilu zależy oczywiście od kąta natarcia. Kąt natarcia dla największego współczynnika doskonałości profilu znajdziemy, przeprowadzając z początku układu współrzędnych (rys. 44) styczną do krzywej biegunowej; w punkcie styczności z tą krzywą odczytuje się poszukiwany kąt natarcia.

Jak z przedstawionych wykresów wynika, największa doskonałość profili występuje przy względnie małych siłach nośnych, natomiast największe siły nośne otrzymuje się na takich kątach natarcia, po niewielkim przekroczeniu których następuje oderwanie się strug powietrza na górnej powierzchni płata.

Doskonałość prawidłowych profili lotniczych może wynosić nawet 22, co oznacza, że w profilu tym przy pewnym kącie natarcia siła nośna jest 22-krotnie większa, niż siła oporu.

Kąt zawarty między prostą poprowadzoną z początku układu współrzędnych (rys. 44) do dowolnego punktu krzywej biegunowej, a osią rzędnych oznacza się zwykle przez ε . Tangens tego kąta jest odwrotnością współczynnika doskonałości profilu, gdyż

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{c_x}{c_z} = \frac{1}{\nu} \quad [24]$$

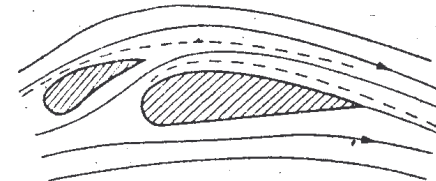
Najmniejszy kąt ε_{min} otrzymuje się dla punktu krzywej biegunowej o największej doskonałości aerodynamicznej, a zatem wielkość tego kąta jest pewną miarą największej doskonałości profilu. Zatem porównanie aerodynamicznych właściwości profili może być w wielu przypadkach ograniczone do porównania najmniejszych kątów ε_{min} . Na przykład dla płyty płaskiej (rys. 42) kąt ten wynosi $\varepsilon_{min} = 4^\circ$ (przy λ_∞) dla profilu natomiast z rys. 44 wynosi $\varepsilon_{min} = 1^\circ 1'$, czyli jest znacznie mniejszy.

15. SIŁA NOŚNA NIEKTÓRYCH PROFILÓW

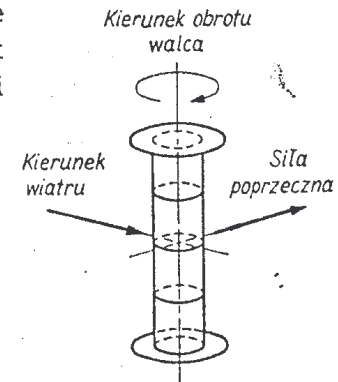
Na przedstawionych przykładowo wykresach współczynnik siły nośnej c_z wypada największy 1,55 (rys. 45b), wykazując doskonałość profilu $\nu = \frac{1,55}{0,22} = 7,05$

Przez zaopatrzenie profilu płata w odpowiednio wykonaną szparę (rys. 46) można podnieść wielkość współczynnika siły nośnej do 2.

Dodatni skutek stosowania szpar polega na ich przeciwdziałaniu odrywaniu się strug przepływu od górnej powierzchni profilu, wskutek czego szpary te umożliwiają wykorzystanie znacznie większych kątów natarcia, przy których, jak wiemy, uzyskuje się znacznie większe siły nośne. Szpary te powodują jednak zwiększenie oporu czołowego profilu, czyli zmniejszoną doskonałość profilu.



Rys. 46. Profil opływowy ze szparą

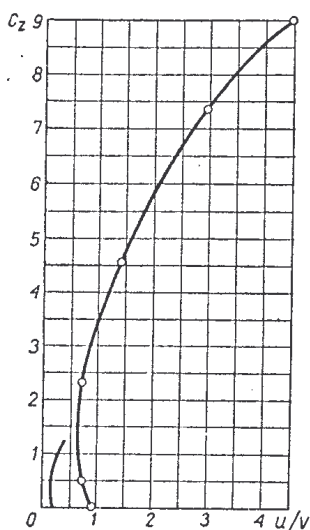


Rys. 47. Rotor Magnusa

Obracający się w strumieniu powietrza walec, powodujący zjawisko Magnusa (rys. 47), może osiągnąć współczynnik siły nośnej nawet 10. Koniecznym jest jednak dla tego zaopatrzyć końce walca w wystające ponad jego powierzchnię krążki, uniemożliwia-

jące wyrównywanie się ciśnień po obu stronach cylindra (patrz punkt 16) oraz nadanie walcowi szybkości obwodowej około czterokrotnie większej, niż szybkość wiatru.

Na rys. 48 przedstawiono krzywą biegunową takiego walca, nazywanego często rotorem Magnusa lub rotorem Flettnera,



Rys. 48. Krzywa biegunowa rotora Magnusa

przy czym zamiast wielkości kątów natarcia przyjęto tutaj za parametr stosunek obwodowej szybkości rotora do szybkości wiatru. Dla porównania tej krzywej biegunowej z biegunową profilu opływowego wykreślono na tym samym rysunku krzywą biegunową z rys. 44.

Z porównania obu krzywych wynika, że współczynnik siły nośnej rotora jest wielokrotnie większy, niż ten współczynnik profilu opływowego. Jednak współczynnik oporu jest w jeszcze znaczniejszym stopniu większy od współczynnika oporu profilu opływowego. Kąt największej doskonałości ϵ_{min} u rotora jest znacznie większy, niż u profilu opływowego, a zatem i aerodynamiczna doskonałość rotora ustępuje znacznie doskonałości profilu opływowego.

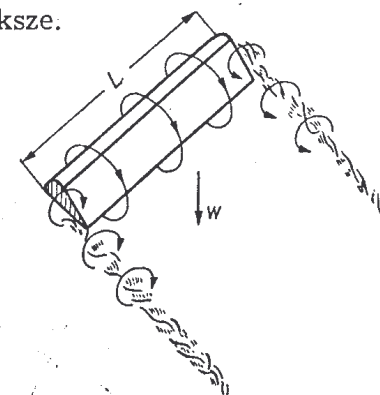
16. OPÓR INDUKCYJNY

Podczas opływu płata nośnego przez powietrze powstaje przedstawiony na rys. 31 rozkład ciśnień pod i nad płatem. Łatwo zauważyć, że na czołowej i tylnej krawędzi płata różnice tych ciśnień są nieznaczne, natomiast na jego końcach przybierają wartości równe sumie nad i podciśnienia. Na skutek tego u końców płata występuje przepływ powietrza spod jego spodu na jego wierzch. Ten ruch powietrza nakłada się na ruch powietrza w przepływie pierwotnym, a będąc do niego prawie prostopadłym, wywołuje dwa wiry rozciągające się za obu końcami płata. Energia potrzebna do wytworzenia tych wirów, może być dostarczona tylko przez płat, co ujawnia się dla niego, jako pokonywanie pewnego oporu, który, jak z powyższego wynika, występowałby również i w płynie pozbawionym lepkości.

Ponieważ opór ten powstaje w wyniku istnienia różnicy ciśnień po obu stronach płata, co znów jest istotną przyczyną występowania siły nośnej, nazywamy go oporem indukcyjnym (wzbudzonym).

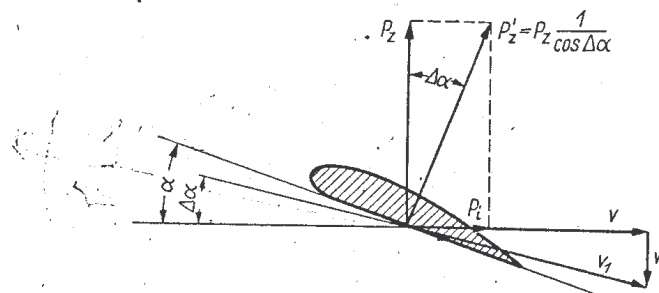
Jest zrozumiałe, że opór indukcyjny płata jest tym mniejszy, im wydłużenie płata $\lambda = \frac{L}{t}$ jest większe.

Temu bardzo uproszczonemu przedstawieniu zjawiska oporu indukcyjnego możemy nadać formę szkicową, przedstawiając schematycznie oba wiry (rys. 49), rozprzestrzeniające się za końcami płata nośnego, będącego w ruchu postępowym (skrzydło samolotu) oraz wir nośny, powodujący, jak to przedstawiono poprzednio, powstawanie siły nośnej płata.



Rys. 49. Wiry tylnie i wir nośny płata nośnego

Dla skrzydła silnika wiatrowego układ tych wirów będzie podobny, jednak ze względu na niejednakową szybkość unoszenia poszczególnych profili skrzydła oraz w związku z występującą tu-



Rys. 50. Siła oporu indukcyjnego

taj jeszcze siłą odśrodkową, wywieraną przez skrzydła na poszczególne cząstki powietrza, ten układ wirów będzie zniekształcony i zasadniczo niesymetryczny.

W celu ilościowego ujęcia samego oporu indukcyjnego oraz jego wpływu na pracę płata rozpatrzmy rys. 50, na którym zaznaczono szybkość przepływu pierwotnego przez v , zaś kąt na-

tarcia płata przez α . Poprzeczny ruch powietrza na końcach płata, wytwarzając oba wiry końcowe, powoduje wystąpienie składowej szybkości pionowej w skierowanej w dół. W wyniku wystąpienia tej szybkości pierwotna szybkość v ulega odchyleniu do kierunku v_1 , a kąt natarcia płata α zmniejsza się o kąt $\Delta\alpha$. W związku z powyższym ulega również zmianie i siła P_z , która teraz przyjmuje wartość

$$P'_z = \frac{P_z}{\cos \Delta\alpha} \quad [25]$$

Zmiana kierunku siły nośnej powoduje wystąpienie w kierunku szybkości v składowej siły P_i , skierowanej przeciwko ruchowi płata, która to siła jest właśnie oporem indukcyjnym.

Z teorii oporu indukcyjnego wynika ¹⁾, że współczynnik oporu indukcyjnego wynosi

$$c_i = \frac{c_z^2}{\pi\lambda} \quad [26]$$

Ze wzoru tego wynika, że aerodynamiczny współczynnik oporu indukcyjnego jest wprost proporcjonalny do drugiej potęgi aerodynamicznego współczynnika siły nośnej i odwrotnie proporcjonalny do wydłużenia płata.

Zatem na wykresie krzywej biegunowej płata aerodynamiczny współczynnik oporu indukcyjnego przedstawia się w postaci paraboli drugiego stopnia z wierzchołkiem, przypadającym w początku współrzędnych. Współczynnik ten jest równy zero, gdy współczynnik c_z , a zatem siła nośna płata, jest równa zero. Parabole współczynników oporów indukcyjnych zostały podane na wykresach krzywych biegunowych wybranych profili.

Całkowity aerodynamiczny współczynnik oporu czołowego profilu c_x składa się zatem z dwu współczynników

$$c_x = c_{x'} + c_i \quad [27]$$

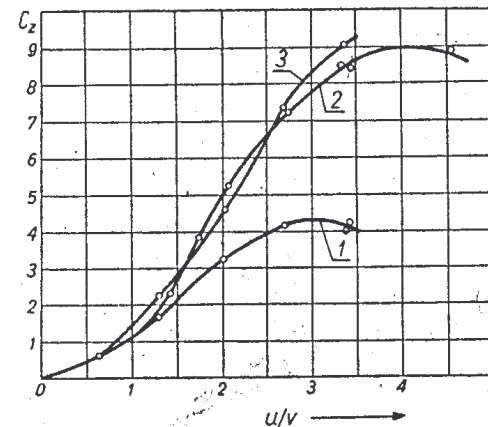
gdzie:

$c_{x'}$ — aerodynamiczny współczynnik oporu profilowego, ujmujący tylko siły tarcia powietrza o powierzchnię płata i powodowanie wirów (przy λ_∞),

c_i — współczynnik oporu indukcyjnego.

¹⁾ L. Prandtl, Dynamika przepływów.

Zwykle współczynniki oporów indukcyjnych uzyskuje się doświadczalnie łącznie ze współczynnikami oporu profilowego. W następstwie odjęcia od współczynników oporu całkowitego części, dotyczącej oporów indukcyjnych, które bardzo łatwo jest obliczyć, wyznacza się współczynniki aerodynamiczne oporu profilowego płata, który w tym przypadku może być uważany za płat, nie posiadający obu końców, czyli o wydłużeniu nieskończenie wielkim (λ_∞). W wyniku odjęcia oporów indukcyjnych krzywa biegunowa przyjmuje kształt bardziej prostopadły do osi odciętych, a kąt największej doskonałości profilu maleje.



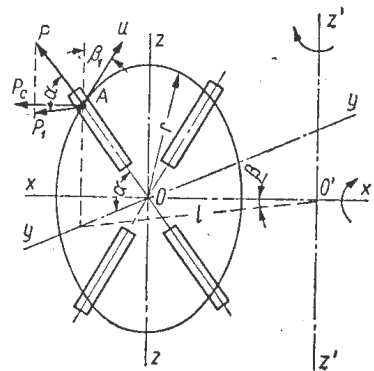
Rys. 51. Wykresy siły nośnej rotora Magnusa: 1 — bez krążków, 2 — z krążkami o średnicy 120 mm, 3 — z krążkami o średnicy 140 mm

Doświadczalnie można również uzyskać bezpośrednio współczynniki aerodynamiczne dla wydłużenia płata nieskończenie wielkiego, mianowicie wtedy, gdy długość płata będzie równa szerokości tunelu aerodynamicznego, w którym poddajemy płat próbom, albo też, gdy na obu końcach płata umieści się odpowiednie płaszczyzny, ustawione prostopadle do płata. W obu przypadkach uniemożliwia się tymi sposobami wyrównywanie ciśnień pod i nad płatem, czyli powstawanie oporów indukcyjnych.

Na rys. 51 podano przykładowo wpływ oporów indukcyjnych na właściwości aerodynamiczne rotora Magnusa. Z wykresu tego wynika, że wobec występowania oporów indukcyjnych siła nośna rotora może zmniejszyć się nawet do połowy.

17. MOMENT ŻYROSKOPOWY

Jakkolwiek zjawisko sił i momentów żyroskopowych nie należy do zjawisk aerodynamicznych, wyłącznie w niniejszym rozdziale rozpatrywanych, jednak ze względu na dość poważną rolę, odgrywaną przez nie w szybkoobrotowych silnikach wiatrowych oraz z przyczyny, że ilościowe oświetlenie tego zjawiska jest mniej znane, zostanie ono tutaj rozpatrzone w ujęciu radzieckiego aerologa Sabinina¹⁾, przy czym zostanie ono zasadniczo ograniczone tylko do wyników wniosków.



Rys. 52. Wyznaczenie momentu żyroskopowego śmigła

Siły i momenty żyroskopowe występują, gdy obracające się względem swej osi x śmigło lub koło łopatkowe, doznaje jednocześnie obrotu względem osi z' (rys. 52).

Rozpatrzmy siły, działające podczas tych obrotów, na materialny punkt A o masie m i o współrzędnych: $x = 0$, $y = r \cdot \cos \alpha$ i $z = r \cdot \sin \alpha$, gdzie r jest promieniem obrotu punktu A względem osi x , zaś α — kąt obrotu śmigła względem osi x odmierzany od osi y . Siły te są następujące.

1. Siła odśrodkowa P występująca na skutek obrotu punktu A względem osi x i działająca w kierunku promienia r ; wielkość tej siły wynosi $m\omega^2 r$, gdzie ω jest szybkością kątową punktu A względem osi x .

2. Siła odśrodkowa P_1 , występująca w wyniku obrotu punktu A względem osi z' i działająca wzdłuż promienia l ; wielkość tej siły wynosi $m\omega_1^2 l$, gdzie ω_1 jest szybkością kątową punktu A względem osi z' , l zaś — odległością punktu A od osi z' .

3. Siła od przyspieszenia Coriolisa P_c , wynosząca $2m\omega_1 u \sin(u, o'z')$, gdzie u jest szybkością obwodową punktu A względem osi x , wynosząca $u = \omega r$. Kierunek tej siły, jako równy iloczynowi dwu wektorów, jest prostopadły do płaszczyzny przeprowadzonej przez wektor szybkości u i wektor szybkości kątowej ω_1 , czyli jest równoległy do osi x i jest skierowany w stronę ujemnych wartości x .

Siły ciężkości, jako bardzo małej, nie będziemy uwzględniali.

¹⁾ G. Ch. Sabinin, Giroskopicheskiy effekt wetranych dwigatielej; Trudy C. A. G. I. 1926 r.

Rzuty wymienionych sił na poszczególne osi współrzędnych, posiadających środek układu, przypadający w środku obrotu śmigła, wynoszą

$$\left. \begin{aligned} P_x &= -P_1 \cos \beta - P_c \\ P_y &= P \cos \alpha + P_1 \sin \beta \\ P_z &= P \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad [28]$$

Po podstawieniu wartości na P , P_1 i P_c oraz uwzględnieniu, że $l = \frac{a}{\cos \beta}$, gdzie a jest odległością środka obrotu śmigła od osi z' , otrzymuje się

$$\left. \begin{aligned} P_x &= -m\omega_1^2 \frac{a}{\cos \beta} \cdot \cos \beta - 2m\omega_1 \omega r \sin \alpha \\ P_y &= m\omega^2 r \cos \alpha + m\omega_1^2 \frac{a}{\cos \beta} \cdot \sin \beta \\ P_z &= m\omega^2 r \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad [29]$$

Siły te dają względem poszczególnych osi współrzędnych odpowiednie momenty M'_x , M'_y i M'_z .

Po przeprowadzeniu w wyrażeniach tych momentów odpowiednich przekształceń (po uwzględnieniu, że $\alpha = \omega t$) oraz po zsumowaniu wszystkich momentów od poszczególnych punktów materialnych łopaty śmigła otrzymuje się momenty względem odpowiednich osi

$$\left. \begin{aligned} M_x &= -J\omega_1^2 \frac{\sin 2\omega t}{2} \\ M_y &= -J_s \omega_1^2 a \sin \omega t - 2J\omega \omega_1 \sin^2 \omega t \\ M_z &= J_s \omega_1^2 a \cos \omega t + J\omega \omega_1 \sin 2\omega t \end{aligned} \right\} \quad [30a]$$

gdzie J stanowi moment bezwładności łopaty śmigła względem osi x , zaś J_s — jej moment statyczny.

Ponieważ szybkość kątowa ω_1 obrotu silnika wiatrowego względem pionowej osi jest znacznie mniejsza od szybkości kątowej ω obrotu śmigła względem osi poziomej, zatem można przyjąć, że $\omega_1^2 \approx 0$, przez co ostatnio otrzymane wyrażenia uproszczą się następująco

$$\left. \begin{aligned} M_x &= 0 \\ M_y &= -2J\omega \omega_1 \sin^2 \omega t \\ M_z &= J\omega \omega_1 \sin 2\omega t \end{aligned} \right\} \quad [30b]$$

Wypadkowy moment żyroskopowy łopaty śmigła, zginający jej ramię u nasady, otrzymamy zsumowawszy geometrycznie te momenty składowe

$$M_z = 2J\omega \omega_1 \sin \omega t \quad [31]$$

Moment ten usiłuje obrócić łopatę około osi prostopadłej do promienia r i osi x .

Z otrzymywanego wyrażenia wynika, że moment M_z podczas każdego obrotu łopaty względem osi x staje się dwa razy równy zeru, gdy zaj-

muje położenie poziome (gdy $\alpha = 0$, lub $\alpha = 180^\circ$) oraz uzyskuje dwa razy wielkości największe o różnych znakach, gdy zajmuje położenie pionowe (gdy $\alpha = 90^\circ$, lub $\alpha = 270^\circ$).

Największa wartość momentu żyroskopowego łopaty śmigła, którą należy uwzględnić w wytrzymałościowym obliczeniu, wynosi

$$M_{z \max} = 2J\omega\omega_1 \quad [32]$$

W celu znalezienia momentu żyroskopowego całego śmigła, zginającego jego wał, należy zsumować momenty pochodzące od wszystkich jego łopat.

Po przyjęciu, że śmigło lub koło wiatrowe posiada n równomiernie rozłożonych łopat, całkowity moment żyroskopowy trój- i więcej łopatego śmigła wynosi

$$\begin{aligned} M_x &= 0 \\ M_y &= -nJ\omega\omega_1 \\ M_z &= 0 \end{aligned} \quad [33]$$

Uzyskany wynik świadczy, że przy ilości łopat w śmigle większej od dwu składowa momentu żyroskopowego względem pionowej osi z' jest równa zero, a zatem nie przeciwdziała obrotowi silnika względem osi pionowej, a cały moment żyroskopowy przejawia się tylko w momencie, usiłującym obrócić śmigło, lub koło łopatkowe około poziomej średnicy w ten sposób, aby obie osi obrotu były w jednej linii i kierunku obrotów były zgodne. W rozpatrywanym przypadku (rys. 52) koło wiatrowe usiłuje obrócić się względem osi y w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.

Ponieważ nJ jest momentem bezwładności całego koła wiatrowego względem osi obrotu, oznaczanym zwykle przez J_0 , otrzymamy moment żyroskopowy w następującej wielkości

$$M_z = J_0\omega\omega_1 \quad [34]$$

Moment ten jest stały, czyli nie zmienia swej wielkości wraz ze zmianą położenia łopat śmigła względem poziomu.

Dla śmigła dwułopatowego ($n = 2$) wynik sumowania momentów żyroskopowych poszczególnych łopat jest następujący

$$\left. \begin{aligned} M_x &= -\frac{J_0\omega_1^2 \sin 2\omega t}{2} \approx 0, & \text{gdyż } \omega_1^2 \approx 0 \\ M_y &= -J_0\omega\omega_1 [1 - \cos 2\omega t] = -2J_0\omega\omega_1 \sin^2 \omega t \\ M_z &= J_0\omega\omega_1 \sin 2\omega t \end{aligned} \right\} \quad [35]$$

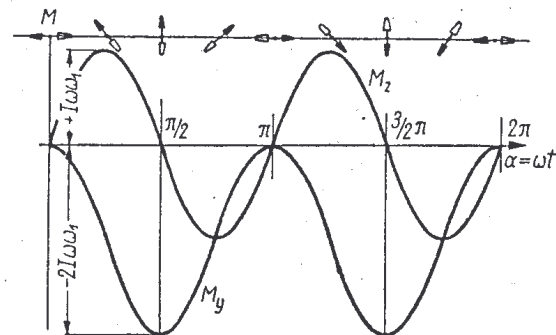
gdzie

$$J_0 = 2J$$

Porównując te wzory ze wzorami [33] łatwo spostrzec, że w śmigłach dwułopatowych w przeciwieństwie do trój- i więcej łopatowych poszczególne składowe momentu żyroskopowego nie są stałe, a zmieniają się wraz z wielkością kąta obrotu (ωt), czyli

w zależności od położenia łopat śmigła względem poziomu. Pionowa składowa momentu żyroskopowego (M_z) w przeciwieństwie do śmigła trójłopatowego przeciwstawia się obrotowi silnika wiatrowego względem pionowej osi.

Składowa pozioma momentu żyroskopowego (M_y), usiłująca obrócić śmigło około osi poziomej, przyjmuje podczas każdego obrotu śmigła dwa razy wartość największą (ujemną) w pionowym położeniu łopat, oraz dwa razy — wartość równą zero w poziomym położeniu śmigła. Te wartości największe są dwukrotnie większe, niż w śmigle trój- i więcej łopatowym (przy równych w obu przypadkach momentach bezwładności śmigieł J_0).



Rys. 53. Krzywe zmienności momentu żyroskopowego w śmigle dwułopatowym

Składowa pionowa momentu żyroskopowego (M_z) posiada szybkość zmian dwukrotnie większą, niż składowa pozioma (M_y) i podczas każdego obrotu śmigła osiąga swą wartość największą czterokrotnie w położeniach śmigła pod kątem 45° do poziomu, przy czym wartości te są dwukrotnie dodatnie i dwukrotnie ujemne. Bezwzględne wielkości tych momentów są dwukrotnie mniejsze od składowych momentów poziomych.

Podczas ruchu łopat śmigła od położenia poziomego ku położeniu pionowemu moment żyroskopowy pomaga obrotowi silnika wiatrowego względem osi pionowej, natomiast przy ruchu łopat od położenia pionowego ku położeniu poziomemu — przeciwstawia się temu obrotowi.

W celu łatwiejszego przedstawienia zmienności momentów żyroskopowych podano na rys. 53 poszczególne położenia śmigła dwułopatowego podczas jednego jego obrotu oraz narysowano linie zmienności obu składowych momentów żyroskopowych.

TEORIA SILNIKÓW WIATROWYCH

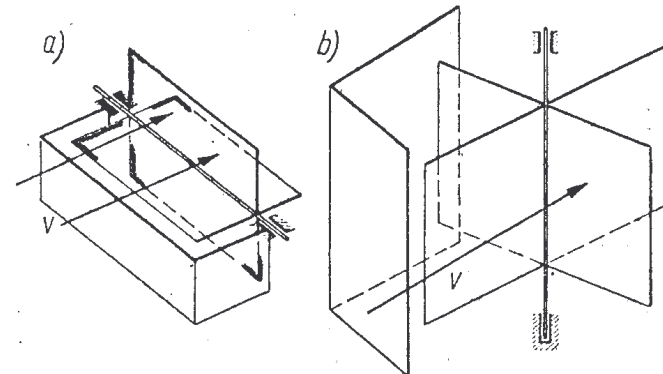
Jakkolwiek momenty żyroskopowe, występujące w śmigle dwułopatowym nie są stałe, lecz zmienne, to jednak pod względem wytrzymałości materiału są one bardzo niekorzystne, a przy tym powodują w konstrukcji silnika wiatrowego drgania. Drgania te mogą być szczególnie niebezpieczne, gdy ich częstotliwość zrówna się z częstotliwością drgań własnych konstrukcji silnika lub nawet poważniejszej jakiejś jego części.

Najkorzystniejszym zatem śmigłem dla szybkobieżnych silników wiatrowych, zwłaszcza dużej mocy, jest śmigło trójłopate, gdyż

- posiada względnie mało łopat,
- moment żyroskopowy jest stały,
- moment ten jest dwukrotnie mniejszy niż w śmigle dwułopatowym,
- moment żyroskopowy nie przeciwstawia się obrotowi silnika wiatrowego względem osi pionowej.

Teoretyczne rozpatrzenie pracy silników wiatrowych umożliwi nam wyprowadzenie zasadniczych zależności liczbowych pomiędzy głównymi wielkościami, charakteryzującymi zarówno wiatr (szybkość, kierunek), jak i silnik wiatrowy (typ, średnica koła wiatrowego itp.).

Silnik wiatrowy ma odpowiednio rozmieszczone względem osi obrotu płyty nośne, które pod działaniem wiatru mogą się prze-

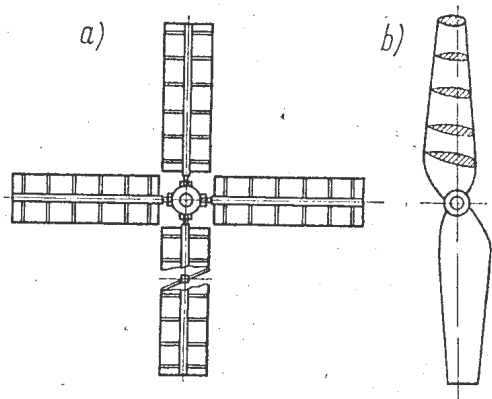


Rys. 54. Schemat wiatrowego silnika: a) bębnowego, b) karuzelowego

suwać, powodując obrót wału silnika. Płyty nośne zarówno w postaci najprostszej (deski, żagle), jak i w bardziej doskonałej (skrzydła, płyty oprofilowane) mogą być rozmieszczone w ten sposób, że pod działaniem wiatru przesuwają się w kierunku wiatru albo w kierunku prostopadłym do wiatru.

Stosownie do tych dwu zasad działania silników wiatrowych w dalszych rozważaniach rozpatrzemy oddzielnie każdą z obu ich grup. Do pierwszej grupy zalicza się silniki, wykorzystujące czołowe parcie wiatru (bębnowe, karuzelowe itp. rys. 54); w silni-

kach tych płaszczyzna obrotu jest równoległa do kierunku wiatru. Do drugiej grupy zalicza się silniki, wykorzystujące boczne oddziaływanie wiatru (skrzydłowe, śmigłowe itp. rys. 55); w sil-



Rys. 55. Schemat wiatrowego silnika: a) skrzydłowego, b) śmigłowego

nikach tych płaszczyzna obrotu jest prostopadła do kierunku wiatru. Oś obrotu silników pierwszej grupy jest skierowana poprzecznie, zaś silników drugiej grupy — równoległe do kierunku wiatru.

1. SILNIKI WYKORZYSTUJĄCE CZOŁOWE PARCIE WIATRU

Jakkolwiek płyty obracającego się koła wiatrowego tego rodzaju silnika (rys. 54) nie przesuwają się zupełnie równoległe do kierunku wiatru, to jednak dla uproszczenia rozważań przyjmiemy, że właśnie takie przesunięcia w silnikach tych występują.

Parcie wiatru o szybkości v , działające na płaszczyznę łopatki o powierzchni F , przesuwającą się w kierunku wiatru z szybkością unoszenia u , wynosi wg poprzednio wyprowadzonego wzoru [18]

$$F_x P_x = c_x F \frac{\rho (v-u)^2}{2} \quad \text{kG}$$

Praca tego parcia wiatru w ciągu sekundy, czyli moc oddawana płatowi silnika wynosi

$$P_t N_t = P_x u = c_x F \frac{\rho (v-u)^2}{2} u \quad \frac{\text{kGm}}{\text{sek}} \quad [W] \quad [36]$$

84

$$\text{moc } [W] = \left[\frac{J}{s} \right] = \left[\frac{\text{kgm}^2}{s^3} \right]$$

$$\text{praca } [J] = [N \cdot m] = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{s^2} \right]$$

Energia ruchu (kinetyczna) strumienia powietrza o poprzecznym przekroju, odpowiadającemu polu F powierzchni łopatki, poruszającego się z szybkością v wynosi

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{\text{kGm}^2}{\text{sek}^2} \quad [J] \quad [37]$$

Ponieważ m oznacza masę powietrza, przepływającą przez poprzeczny przekrój F w ciągu sekundy, więc energia kinetyczna E_k jest mocą N strumienia powietrza. Podstawiając do wzoru [37] wartość na masę m obliczoną ze wzoru $m = \rho \cdot F \cdot v \cdot t$ [kg] i przyjmując $E_k = N \cdot t$ [W], otrzymamy

$$N = \frac{\rho F \cdot v^3}{2} = \frac{\text{kGm}^2}{\text{sek}^2} \quad \text{bo } P = \frac{S A v t}{2 t} v^2 \quad [38]$$

gdzie ρ jest gęstością powietrza w $\frac{\text{kG sek}^3}{\text{m}^3} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Moc ta jest, jak widać, proporcjonalna do trzeciej potęgi szybkości wiatru.

Po podstawieniu wielkości liczbowej na $\rho = \frac{1}{8}$ i zmianie jednostek z kGm/sek na KM i kW otrzymamy

$$\left. \begin{aligned} N &= \frac{1}{8} \cdot \frac{F \cdot v^3}{2} = \frac{1}{16} F v^3 \quad \frac{\text{kGm}}{\text{sek}} \\ N &= \frac{1}{1200} F v^3 \quad \text{KM} \\ N &= \frac{1}{1631} F v^3 \quad \text{kW} \end{aligned} \right\} [39]$$

Stosunek mocy wiatru oddawanej bez strat urządzeniu wiatrowemu do całkowitej mocy wiatru nazywany jest współczynnikiem teoretycznego wykorzystania mocy wiatru. Współczynnik ten wskazuje, jaką część mocy wiatru urządzenie wiatrowe mogłoby wykorzystać, gdyby pracowało bez strat, czyli w sposób doskonały.

Ponieważ moce wiatru (wykorzystana i całkowita) dotyczą energii masy powietrza, przepływającej przez przekrój poprzeczny w ciągu 1 sek, współczynnik teoretycznego wykorzystania mocy

85

wiatru nazywa się zwykle współczynnikiem teoretycznego wykorzystania energii wiatru i oznacza się przez $\xi_t = \eta_s$

Dla naszego przypadku współczynnik ξ_t wynosi

$$\xi_t = \frac{c_x F \frac{\rho \cdot (v-u)^2}{2} \cdot u}{\rho \cdot \frac{F \cdot v^3}{2}} = \frac{c_x (v-u)^2 u}{v^3} = c_x \left(1 - \frac{u}{v}\right)^2 \cdot \frac{u}{v} \quad [40]$$

Iloraz $\frac{u}{v}$, czyli stosunek szybkości unoszenia płata silnika do szybkości wiatru, jest dla pracy silników wiatrowych bardzo charakterystycznym i bardzo często stosowanym. Stosunkowi temu nadano nazwę wyróżnika szybkobieżności; oznacza się go zwykle literą Z. Wyróżnik szybkobieżności ($Z = \frac{u}{v}$) wskazuje ile razy jest większa lub mniejsza szybkość dowolnej części płata, czy łopaty silnika wiatrowego, od szybkości wiatru.

W rozważanym przez nas przypadku najciekawszym będzie znalezienie wielkości wyróżnika szybkobieżności Z, przy której współczynnik wykorzystania energii wiatru uzyskuje wartość największą.

Znalezienia tej wartości największej dokonamy najłatwiej, obliczając wielkość $\frac{\xi_t}{c_x}$ dla kilku stosunków $\frac{u}{v}$ i wykreślając odpowiednią krzywą

$$\frac{\xi_t}{c_x} = f\left(\frac{u}{v}\right)$$

Wyniki tych obliczeń podano w tabl. 6, krzywą zaś na rys. 56.

Tablica 6

Zależność $\frac{\xi_t}{c_x} = f\left(\frac{u}{v}\right)$

dla silników wiatrowych o poprzecznej względem wiatru osi obrotów

$\frac{u}{v}$	0	0,25	0,333	0,50	0,75	1,0
$\frac{\xi_t}{c_x}$	0	0,141	0,148	0,125	0,047	0

Z otrzymanego wykresu wynika, że największą swą wartość współczynnik ξ_t uzyskuje przy wartości $\frac{u}{v}$ równej 0,333 ($Z = 0,333$); wtedy największa wartość współczynnika ξ_t wynosi $0,148 \cdot c_x$.

Wartość c_x może wynosić w praktyce od 1,1 do 1,5 (porównaj tabl. 5), czyli średnio 1,3, a więc największy współczynnik teoretycznego wykorzystania wiatru w rozpatrywanym typie silników średnio wynosi.

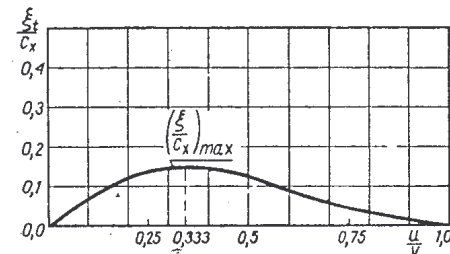
$$\xi_{t \max} = 0,148 \cdot 1,3 = 0,192 \quad [41]$$

co oznacza, że w tego rodzaju silnikach w najkorzystniejszych warunkach pracy (bez żadnych strat) można by wyzyskać tylko około 19% energii wiatru.

Jest to bardzo mało, jeśli się uwzględni, że silniki drugiej grupy (patrz punkt 2), wykorzystujące boczne oddziaływanie wiatru, wykazują współczynnik teoretycznego wykorzystania energii wiatru trzykrotnie większy.

Należy przy tym jeszcze uwzględnić, że otrzymana wielkość współczynnika teoretycznego wykorzystania energii wiatru dotyczy tylko łopatek czynnie pracujących w silniku, czyli w najkorzystniejszych przypadkach tylko połowy wszystkich jego łopatek. Ponieważ w tych silnikach druga połowa łopatek musi być w ruchu w kierunku przeciwnym do wiatru (za zasłoną, odwrotną stroną łopatek itp.) musi powodować momenty obrotowe o kierunku przeciwnym do momentów użytecznych, czyli zmniejszające moc silnika. W wyniku tego współczynnik ξ_t dla całego silnika jest znacznie mniejszy od wyżej otrzymanego. W porównaniu zatem z silnikami drugiej grupy, w których zjawisko przeciwdziałania części łopatek wcale nie występuje, silniki o osi obrotu poprzecznej do kierunku wiatru okazują się jeszcze mniej korzystnymi.

Nieuświadomienie sobie tej zasadniczej okoliczności sprowadza myśl wielu wynalazców-laików na błędne drogi, co powoduje w wyniku marnowanie ich wysiłków. Ogromna bowiem



Rys. 56. Zależność $\frac{\xi_t}{c_x} = f\left(\frac{u}{v}\right)$ dla silnika wiatrowego o poprzecznej względem wiatru osi obrotu

większość zgłaszanych w dziedzinie wykorzystania energii wiatru ulepszeń dotyczy właśnie tych, już w samej swej zasadzie znacznie niekorzystniej pracujących silników wiatrowych.

Nieco inne obliczenie przeprowadzimy jeszcze dla silnika karuzelowego szczególnego typu, składającego się z czterech czasz półkulistych, umieszczonych na skrzyżowanych ze sobą ramionach (rys. 8 i 9).

W silniku tym moment obrotowy powstaje głównie w wyniku nierównych sił wywieranych przez wiatr na obie strony czasz, mianowicie

— na stronę wklęsłą, przesuwaną się w kierunku wiatru

$$P_1 = c_1 \frac{F \cdot Q}{2} (v - u)^2$$

— na stronę wypukłą, przesuwaną się w kierunku przeciwnym do wiatru

$$P_2 = c_2 \frac{F \cdot Q}{2} (v + u)^2$$

gdzie:

v — szybkość wiatru w m/sek,

u — szybkość obrotowa środków czasz w m/sek,

$c_1 = 1,33$ (z tabl. 5),

$c_2 = 0,34$ (z tabl. 5).

Siła wypadkowa, powodująca moment obrotowy silnika, równa się różnicy obu tych sił składowych, czyli

$$\begin{aligned} P &= P_1 - P_2 = c_1 \frac{F \cdot Q}{2} (v - u)^2 - c_2 \frac{F \cdot Q}{2} (v + u)^2 = \\ &= \frac{F \cdot Q}{2} [c_1 (v - u)^2 - c_2 (v + u)^2] \end{aligned}$$

Podczas biegu luzem, czyli bez żadnego obciążenia takiego silnika, przy nieuwzględnieniu jego sił tarcia, które są znikomo małe, otrzymujemy

$$P = \frac{F \cdot Q}{2} [c_1 (v - u)^2 - c_2 (v + u)^2] = 0$$

czyli

$$c_1 (v - u)^2 = c_2 (v + u)^2$$

Podzieliwszy obie strony równania przez $c_2 (v - u)^2$, otrzymamy

$$\frac{c_1}{c_2} = \left(\frac{v + u}{v - u} \right)^2$$

Po podstawieniu wartości liczbowych na c_1 i c_2 otrzymamy

$$\frac{1,33}{0,34} = \left(\frac{v + u}{v - u} \right)^2 = 3,92$$

Stąd ostatecznie wynika

$$\frac{u}{v} = \frac{0,98}{2,98} = 0,33 \quad [42]$$

Otrzymany wyróżnik szybkobieżności będzie tak długo stałym dopóki aerodynamiczne współczynniki c_1 i c_2 pozostają stałymi. W tych warunkach szybkość obwodowa silnika przy biegu luzem, a zatem i ilość jego obrotów w jednostce czasu, jest proporcjonalna do szybkości wiatru i wynosi $\frac{1}{3}$ tej szybkości.

Z tej właściwości korzysta się, stosując takie silniki do pomiaru szybkości wiatru, jako szybkościomierze wiatrowe (patrz rozdział I punkt 4).

2. SILNIKI WYKORZYSTUJĄCE BOCZNE ODDZIAŁYWANIE WIATRU

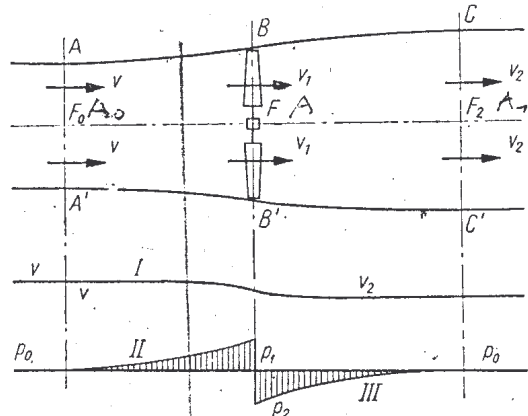
a. Teoria silnika wiatrowego

W celu lepszego uzmysłowienia sobie, a przy tym możliwie dużego uproszczenia naszych dalszych rozważań przyjmiemy, że koło wiatrowe silnika o osi obrotu równoległej do kierunku wiatru ma bardzo dużo odpowiednio wąskich łopatek, które pracują bez powodowania strat energii wiatru. Jednocześnie przyjmiemy, że strata szybkości wiatru jest jednakowa w każdym punkcie płaszczyzny zakreślonej kołem wiatrowym.

Za koło wiatrowe przyjmiemy układ, składający się z płatów nośnych odpowiednio rozmieszczonych promieniowo wokół środkowego punktu i przesuwanających się pod działaniem wiatru prostopadle do jego kierunku, powodując przez to obrót koła.

W myśl poprzednich rozważań (por. rozdz. II) koło wiatrowe może dać moc tylko przez pobranie przez nie mocy od przepływającego powietrza. Może to tylko nastąpić kosztem zmniejszenia szybkości wiatru, czyli przez częściowe jego zahamowanie przez koło wiatrowe.

Wobec tej zmiany szybkości wiatru przed i za kołem wiatrowym i wobec zachowania ciągłości przepływu, przekrój strumienia powietrza odpływającego do koła wiatrowego (rys. 57) musi być odpowiednio mniejszy (szybkość większa), zaś przekrój strumienia powietrza odpływającego za kołem wiatrowym musi być odpowiednio większy (szybkość mniejsza). Na zjawisko to ma



Rys. 57. Przekroje przepływu oraz rozkład ciśnień i szybkości w sąsiedztwie koła wiatrowego

jednak jeszcze wpływ zmiana ciśnienia powietrza w sąsiedztwie koła wiatrowego. Już na pewnej odległości przed kołem wiatrowym na skutek stopniowego zahamowywania wiatru występuje spiętrzenie ciśnienia powietrza, natomiast tuż za kołem wiatrowym występuje zmniejszenie ciśnienia powietrza, które dopiero na pewnej odległości wyrównywa się z ciśnieniem otoczenia. Te zmiany ciśnienia zostały przedstawione schematycznie na rys. 57.

Na skutek spiętrzenia ciśnienia powietrza przed kołem wiatrowym część wiatru odpływa na zewnątrz koła, nie mogąc być przez nie wykorzystaną użytecznie. Tej straty powietrza na razie jednak nie będziemy w naszych rozważaniach uwzględniali.

Zmiany szybkości wiatru odbywają się stopniowo już na pewnej odległości przed i za kołem wiatrowym, jednak dla dalszych

naszych rozważań przyjmiemy, że te zmiany szybkości występują nagle w samym kole wiatrowym.

Strumień powietrza, dopływającego do koła wiatrowego z szybkością v posiada energię kinetyczną $\frac{mv^2}{2}$, zaś strumień ten na odpływie z szybkością v_2 posiada energię kinetyczną $\frac{mv_2^2}{2}$.

Gdy koło wiatrowe ma pobierać energię wiatru bez żadnych strat, otrzymuje ją w wielkości równej różnicy obu energii, czyli

$$\Delta E_k = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2} = \frac{m}{2}(v^2 - v_2^2) \frac{\text{kGm}^2}{\text{sek}^2} \quad [43]$$

Masa powietrza m , przepływającego przez koło wiatrowe w ciągu jednej sekundy wynosi

$$m = \rho F v_1 t \quad \text{kg} \quad [44]$$

gdzie:

- ρ — gęstość powietrza,
- F — pole przekroju strumienia powietrza w kole wiatrowym,
- v_1 — szybkość powietrza, przepływającego przez koło wiatrowe.

Szybkość v_1 z jaką powietrze przepływa przez koło wiatrowe nie jest nam znana. Ponieważ jednak szybkość ta musi być jakąś pośrednią pomiędzy szybkością wiatru dolotową v i odlotową v_2 , przyjmiemy, że będzie ona średnioarytmetyczną z tych obu szybkości, czyli

$$v_1 = \frac{v + v_2}{2} \quad \text{„średnioarytmetyczna”} \quad [45a]$$

W wyniku tego założenia uzyskuje się

$$2v_1 = v + v_2$$

czyli

$$v_1 - v_2 = v - v_1$$

$$\frac{v + v_2}{2} - v_2 = v - v_1$$

Skąd ostatecznie mamy

$$v - v_1 = \frac{v - v_2}{2} \quad [45b]$$

Stąd wynika, że strata szybkości wiatru w kole wiatrowym ($v - v_1$) jest równa połowie całkowitej straty szybkości ($v - v_2$).

Podstawiając we wzorze [44] wartość na v_1 ze wzoru [45a] otrzymamy

$$m = \frac{\rho \cdot F_2(v + v_2)}{2} + \dots = \rho \cdot F \cdot v_1 \cdot t$$

a po wstawieniu tej wartości do wzoru [43], otrzymamy

$$P_t = \frac{F}{2} \Delta E_k = \frac{m}{2} (v^2 - v_2^2) = \frac{\rho \cdot F}{4} (v^2 - v_2^2) \cdot (v + v_2) \quad \frac{\text{kgm}^2}{\text{sek}^2} \quad [46]$$

Ta różnica energii, jako związana z masą powietrza przepływającego przez koło wiatrowe w ciągu jednej sekundy, jest mocą teoretyczną silnika wiatrowego N_t . $P_t = \frac{\rho}{4} F (v^2 - v_2^2) (v + v_2)$

Współczynnik teoretycznego wykorzystania mocy wiatru otrzymamy, dzieląc wyrażenie [46] przez moc wiatru, czyli przez

$$\rho \frac{Fv^3}{2}$$

$$\xi_t = \frac{\frac{\rho}{4} F (v^2 - v_2^2) \cdot (v + v_2)}{\rho \frac{Fv^3}{2}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_2^2}{v^2}\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v}\right) \quad [47]$$

Otrzymaliśmy zatem wyrażenie na współczynnik teoretycznego wykorzystania mocy (energii) wiatru ξ_t w zależności od stosunku v_2/v , czyli szybkości wiatru za i przed kołem wiatrowym.

Najciekawszym dla nas będzie znalezienie wielkości stosunku tych szybkości, przy jakiej współczynnik ξ_t będzie największy czyli, kiedy otrzymamy największe wykorzystanie energii wiatru.

Zadanie to najłatwiej rozwiążemy, obliczając wielkość dla kilku wartości stosunku $\frac{v_2}{v}$ i wykreślając odpowiednią krzywą. Wyniki tych obliczeń podano w tabl. 7, a odpowiednią krzywą na rys. 58.

Tablica 7

Zależność $\xi_t = f\left(\frac{v_2}{v}\right)$

dla silników wiatrowych o równoległej względem wiatru osi obrotów

$\frac{v_2}{v}$	0	0,25	0,333	0,50	0,75	1,0
ξ_t	0,5	0,586	0,593	0,563	0,383	0

Z krzywej tej wynika, że współczynnik ξ_t osiąga swą największą wartość przy stosunku szybkości $\frac{v_2}{v} = \frac{1}{3}$. Oznacza to, że dla uzyskania największego wykorzystania energii wiatru jego szybkość odlotowa za kołem wiatrowym musi wynosić $\frac{1}{3}$ dolotowej szybkości wiatru.

Wartość największego współczynnika teoretycznego wykorzystania energii wiatru zatem wynosi

$$\xi_{tmax} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right] \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27} = 0,593^1 \quad [48]$$

Szybkość wiatru w samym kole wiatrowym w myśl wzoru [45] dla tych warunków wynosi

$$v_1 = \frac{v + \frac{1}{3}v}{2} = \frac{2}{3}v \quad [49]$$

Zatem wszystkie trzy, przyjęte przez nas za charakterystyczne szybkości wiatru przy największym jego wykorzystaniu są względem siebie w następującym stosunku

$$v : v_1 : v_2 = 3 : 2 : 1 \quad [50]$$

Ze stosunków tych wynika, że strata szybkości wiatru w kole wiatrowym wynosi

$$v - v_1 = \frac{1}{3}v \quad [51]$$

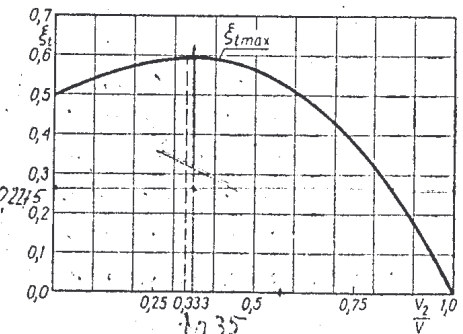
zaś całkowita strata szybkości wiatru wynosi

$$v - v_2 = \frac{2}{3}v \quad [52]$$

czyli jest dwukrotnie większa.

Dla silników wiatrowych istotna jest wartość czołowego lub osiowego parcia wiatru na koło wiatrowe. Wyraża się ono jako

¹⁾ Według bardziej poprawnej teorii G. H. Sabinina, której z braku miejsca tutaj nie będziemy rozpatrywać, największy teoretyczny współczynnik wykorzystania energii wiatru wynosi 0,687.



Rys. 58. Zależność $\xi_t = f\left(\frac{v_2}{v}\right)$ w silnikach wiatrowych o równoległej względem wiatru osi obrotu

strata pędu masy powietrza, przepływającego przez koło wiatrowe w ciągu jednej sekundy, czyli

$$P = m(v - v_2) \quad \text{Przebiegowe} \quad [53]$$

Korzystając ze wzorów [44] i [45] otrzymamy

$$P = \rho F v_1 [v - (2v_1 - v)] = \rho F v_1 \cdot 2(v - v_1) \quad [54]$$

Na podstawie wzoru [47] moc teoretyczną silnika wiatrowego w najkorzystniejszych (idealnych) warunkach jego pracy wyrazić można następująco $P_t = \eta_s P_w$

$$N_t = \xi_t \cdot \frac{\rho}{2} F v^3 = \frac{kGm^2}{sek^3} \quad [55]$$

Przypomnieć należy, że powyższe obliczenia odnoszą się tylko do silnika wiatrowego, przetwarzającego energię wiatru w sposób doskonały, czyli bez strat.

W rzeczywistym kole wiatrowym, różniącym się znacznie od teoretycznego koła, opisanego we wstępie niniejszego punktu, przy tym przetwarzaniu energii występują różnego rodzaju straty aerodynamiczne, w wyniku czego moc rzeczywistego koła wiatrowego jest znacznie mniejsza od mocy teoretycznej.

Wszystkie straty aerodynamiczne najłatwiej uwzględnia współczynnik sprawności aerodynamicznej η_a koła wiatrowego, wskazujący jaką część energii wiatru możliwej do wykorzystania w idealnych warunkach pracy jest wykorzystywana w rzeczywistości przez koło wiatrowe.

Moc rzeczywistego koła wiatrowego wyraża się zatem

$$N_k = \eta_a \cdot \xi_t \cdot \frac{\rho}{2} F v^3 = \frac{kGm^2}{sek^3} \quad [56]$$

Iloczyn współczynników $\eta_a \cdot \xi_t$ wyrażający, jaką część energii wiatru może wykorzystać rzeczywiste koło wiatrowe, oznacza się zwykle przez współczynnik c_t , nazywamy aerodynamicznym współczynnikiem wykorzystania energii wiatru przez koło wiatrowe (sprawność przepływowa η_p)

$$c_t = \eta_a \cdot \xi_t \quad [57]$$

A moc koła wiatrowego wyrazi się następująco

$$N_k = c_t \cdot \frac{\rho}{2} F \cdot v^3 = \frac{kGm^2}{sek^3} \quad [58]$$

Przeprowadzone pomiary aerodynamicznego współczynnika wykorzystania energii wiatru (c_t) w nowszych i poprawnie zbudowanych silnikach wiatrowych wykazały jego wartość w granicach 0,30 ... 0,38. Stanowi to zaledwie połowę wartości możliwej teoretycznie do osiągnięcia.

Aby otrzymać moc użyteczną silnika wiatrowego od mocy koła wiatrowego należy odjąć straty mechaniczne silnika, tzn. straty tarcia wałów w łożyskach, straty w przekładniach zębatych i pasowych itp.

W zespołach wiatrowo-elektrycznych dochodzą jeszcze straty energii w prądnicach. Wszystkie te straty najłatwiej uwzględnia się przy pomocy współczynnika sprawności mechanicznej η_m całego silnika wiatrowego albo też przy pomocy współczynnika sprawności całego zespołu wiatrowo-elektrycznego.

Zatem moc użyteczna silnika wiatrowego wyraża się następująco $P_u = \eta_m P_a = \eta_u P_w$

$$N_u = c_t \cdot \frac{\rho}{2} F v^3 \cdot \eta_m = c_t \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v^3 \eta_m \quad [59]$$

gdzież

$$F_k = \frac{\pi D^2}{4}$$

We wzorach tych oznacza

N_u — moc użyteczną silnika wiatrowego lub zespołu wiatrowo-elektrycznego w kGm^2/sek^3 ,

c_t — aerodynamiczny współczynnik wykorzystania energii wiatru,

ρ — gęstość powietrza w $kGsek^3/m^4$ (przy $15^\circ C$ i 760 mm Hg $\rho = 0,125$ $kGsek^3/m^4$),

D — średnicę koła wiatrowego w m,

v — szybkość wiatru w m/sek,

η_m — współczynnik sprawności mechanicznej silnika wiatrowego lub mechanicznej i elektrycznej zespołu wiatrowo-elektrycznego.

Po wstawieniu do tego wzoru [59] odpowiednich wartości oraz po podzieleniu przez 75 otrzymamy moc w KM.

$$N_u = \frac{0,125 \cdot \pi D^2 \cdot v^3}{8 \cdot 75} c_t \cdot \eta_m = 0,000654 D^2 v^3 c_t \cdot \eta_m \text{ KM} \quad [60]$$

Moc użyteczna
 $N_u = c_l \cdot \eta_m \cdot 0,000481 \cdot v^3 \cdot D^2 = 0,38 \cdot$

silników wiatrowych
 $0,80 \cdot 0,000481 \cdot v^3 \cdot D^2 = 0,000147 v^3 D^2 \text{ kW}$

Szybkość wiatru v , m/sec	Średnica koła wiatrowego									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,000147	0,0005	0,0013	0,00234	0,0037	0,0053	0,0072	0,00947	0,0120	0,0147
2	0,0011	0,0047	0,0106	0,018	0,029	0,042	0,058	0,0756	0,096	0,110
3	0,004	0,015	0,0360	0,063	0,099	0,143	0,195	0,255	0,324	0,400
4	0,0095	0,037	0,0851	0,149	0,237	0,339	0,464	0,606	0,768	0,950
5	0,0018	0,074	0,1665	0,292	0,463	0,663	0,905	1,181	1,500	1,800
6	0,032	0,127	0,2780	0,505	0,800	1,142	1,565	2,042	2,590	3,200
7	0,050	0,203	0,4560	0,800	1,270	1,815	2,485	3,240	4,120	5,000
8	0,075	0,300	0,6610	1,192	1,892	2,710	3,710	4,840	6,140	7,500
9	0,107	0,431	0,983	1,700	2,695	3,860	5,280	6,890	8,750	10,70
10	0,147	0,592	1,332	2,348	3,700	5,328	7,252	9,472	12,00	14,70
11	0,197	0,786	1,771	3,120	4,930	7,060	9,650	12,60	16,10	19,70
12	0,256	1,002	2,300	4,000	6,390	9,150	12,50	16,31	20,07	25,60
13	0,324	1,281	2,920	5,120	8,100	11,60	15,89	20,07	26,15	32,40
14	0,406	1,620	3,660	6,420	10,00	14,55	19,90	26,00	32,90	40,60
15	0,525	2,100	4,720	8,300	13,12	18,80	25,75	33,40	42,60	52,50
16	0,605	2,420	5,440	9,560	15,10	21,65	29,60	38,70	49,10	60,50
17	0,727	2,910	6,550	11,50	18,20	26,00	35,60	46,60	59,00	72,70
18	0,861	3,440	7,760	13,61	21,58	34,20	42,30	55,10	70,00	86,10
19	1,010	4,060	9,160	16,00	25,40	36,40	49,70	65,00	82,50	101,0
20	1,182	4,720	10,60	18,20	29,60	42,00	58,00	75,60	96,00	118,2
21	1,370	5,480	12,31	21,60	34,30	49,10	67,10	87,60	111,0	137,0
22	1,576	6,400	14,20	24,90	39,40	56,50	77,10	101,0	127,9	157,6
23	1,800	7,200	16,20	28,40	45,00	64,40	88,00	115,0	146,0	180,0
24	2,050	8,200	18,41	32,40	51,20	73,20	100,0	131,0	166,0	205,0
25	2,320	9,250	20,80	36,60	57,90	82,90	113,2	156,1	188,5	232,0
26	2,600	10,38	23,40	41,00	65,00	93,10	127,0	166,0	211,0	260,0
27	2,910	11,60	26,20	46,00	72,70	104,00	142,2	186,0	236,5	291,0
28	3,240	12,92	29,20	51,20	81,00	116,0	159,0	207,0	263,0	324,0
29	3,600	14,39	32,40	56,80	90,00	128,9	176,0	230,0	292,0	360,0
30	4,00	15,98	36,00	63,20	99,90	143,0	195,5	255,0	324,0	400,0

(średnica) D w m									
12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
0,0213	0,0290	0,038	0,047	0,059	0,070	0,085	0,100	0,116	0,133
0,170	0,232	0,302	0,384	0,470	0,565	0,682	0,800	0,929	1,060
0,575	0,782	1,028	1,291	1,500	1,910	2,210	2,700	3,130	3,600
1,361	1,885	2,430	3,060	3,700	4,520	5,440	6,400	7,420	8,510
2,660	3,620	4,750	6,000	7,400	7,850	10,60	12,50	14,50	16,65
4,600	6,260	8,200	10,70	12,70	15,29	18,35	21,60	25,10	27,80
7,300	9,940	13,00	16,40	20,30	24,25	29,20	34,30	39,80	45,60
10,90	14,80	19,45	24,50	30,00	36,20	43,50	51,20	59,40	63,10
15,50	21,10	27,70	34,85	43,10	51,50	61,90	72,90	84,50	98,30
21,30	29,00	38,00	47,95	59,20	70,80	85,20	100,0	116,0	133,2
28,40	38,60	50,60	63,90	78,60	94,20	113,2	133,1	154,5	177,1
36,80	50,00	65,60	82,70	100,2	122,0	147,0	172,8	200,0	230,0
46,60	63,50	83,30	105,00	128,1	155,0	187,0	219,7	254,0	292,0
58,50	79,50	104,0	131,0	162,0	194,0	234,0	274,4	318,0	366,0
75,60	103,0	134,9	170,0	210,0	251,0	320,0	355,7	412,0	472,0
87,00	118,5	155,2	196,0	242,0	289,0	348,0	409,6	474,0	544,0
104,5	142,5	187,0	235,0	291,0	347,0	419,0	491,3	570,0	655,0
124,0	169,0	221,5	279,0	344,0	419,0	496,0	583,2	676,0	776,0
146,0	198,5	261,5	328,0	406,0	485,0	585,0	685,9	795,0	916,0
170,0	232,0	302,0	384,0	472,0	565,0	682,0	800,0	928,0	1060,0
197,0	268,0	352,0	444,0	548,0	655,0	789,0	926,1	1075,0	1231,0
226,5	308,0	405,0	510,0	640,0	752,0	907,0	1064,0	1235,0	1420,0
258,5	352,0	461,0	581,0	720,0	860,0	1035,0	1216,0	1410,0	1620,0
295,0	400,0	526,0	662,0	820,0	980,0	1179,0	1382,0	1605,0	1841,0
333,0	453,0	594,0	749,0	925,0	1105,0	1330,0	1562,0	1815,0	2080,0
374,0	510,0	667,0	840,0	1038,0	1240,0	1496,0	1757,0	2004,0	2340,0
419,0	570,0	747,0	941,0	1160,0	1390,0	1672,0	1968,0	2280,0	2620,0
466,0	635,0	832,0	1005,0	1292,0	1550,0	1863,0	2192,0	2540,0	2920,0
518,0	705,0	924,0	1163,0	1439,0	1720,0	2070,0	2438,0	2820,0	3240,0
575,0	782,0	1028,0	1291,0	1598,0	1910,0	2210,0	2700,0	3130,0	3600,0

albo po uwzględnieniu, że $1 \text{ KM} = 0,736 \text{ kW}$

$$N_u = 0,000481 \cdot D^2 v^3 c_l \cdot \eta_m \text{ kW} \quad [61]$$

Dla nowszych szybkieźnych, bezprzekładniowych zespołów wiatrowo-elektrycznych można przyjąć $c_l = 0,38$ i $\eta_m = 0,80$ i wtedy moc użyteczna wynosi

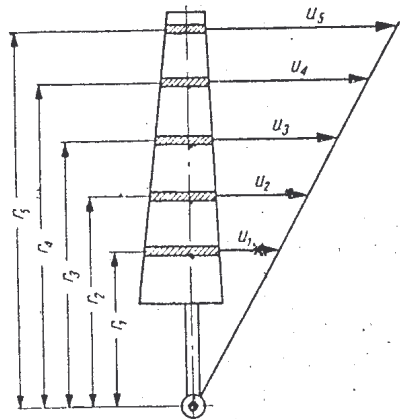
$$N_u = 0,000147 D^2 v^3 \text{ kW} \quad \text{MOC użyteczna} \quad [62]$$

Jest to przybliżony wzór powszechnie stosowany do dorywczego obliczania mocy zespołu wiatrowo-elektrycznego.

W tabl. 8 podano wyniki liczbowe uzyskane wg tego wzoru dla mocy zespołów o różnych średnicach kół wiatrowych (śmigieł) D w m przy różnych szybkościach wiatru v m/sek.

b. Zależności między charakterystycznymi wielkościami wiatru i silników wiatrowych

Wykres szybkości. W celu ujęcia zależności między charakterystycznymi cechami najważniejszego elementu silnika wiatrowego, łopatki koła wiatrowego lub łopaty śmigła a szybkością wiatru, rozpatrzmy element takiej łopatki (rys. 59), znajdujący się w odległości r od środka koła obrotu. Podczas obracania się pod wpływem wiatru koła wiatrowego z szybkością n obr/min ten element łopatki posiada szybkość obwodową:



Rys. 59. Elementy łopaty śmigła i ich szybkości obwodowe

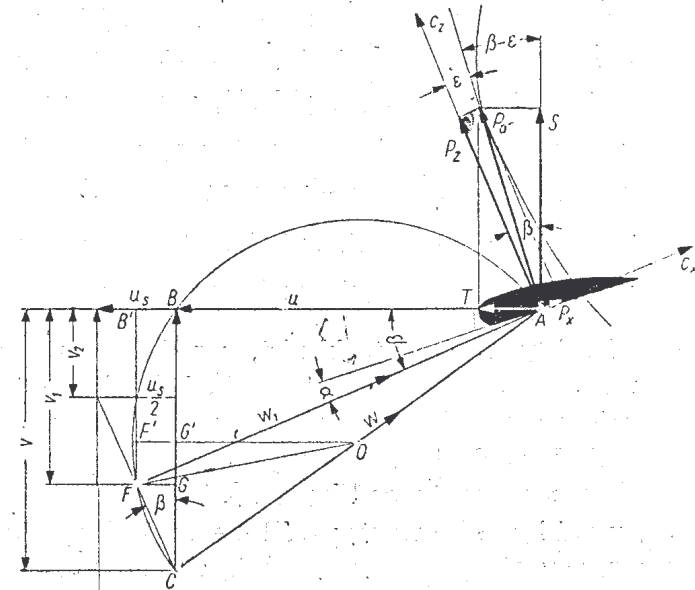
$$u = \frac{2\pi rn}{60} = \frac{\pi rn}{30} \text{ m/sek} \quad [63]$$

gdzie r jest odległością elementu łopatki od środka koła wiatrowego.

Szybkość obwodowa jest zatem różna dla różnych elementów łopatki i wyraża się na rys. 59 wektorem u .

Ponieważ szybkości przepływów, od których zostały uzależnione cechy charakterystyczne profilu śmigła (patrz rozdz. II), będą w naszym przypadku szybkościami względnymi przepływu

powietrza w sąsiedztwie łopatki, musimy zatem szybkości te określić, wychodząc z szybkości wiatru v oraz szybkości obwodowej (unoszenia) elementu łopatki u . Opierając się na podstawowym prawie mechaniki, że szybkość bezwzględna, w naszym przypadku v , jest geometryczną sumą szybkości względnej w i szybkości unoszenia, w naszym przypadku szybkości obwodowej u , można zbudować dla wydzielonego elementu łopatki trójkąt szybkości ABC (rys. 60). W tym trójkącie szybkość w będzie względną szybkością powietrza, dopływającego do czoła elementu łopatki.



Rys. 60. Wykres szybkości, występujących na elemencie łopaty śmigła

Podczas przepływu powietrza w sąsiedztwie nachylonej względem jego kierunku łopatki, poruszającej się z szybkością obwodową u , podlega ona sile nośnej P_z , zaś przepływ ulega pewnemu odchyleniu od pierwotnego swego kierunku. Odchylenie to dla całego koła wiatrowego ujawnia się, jako śrubowy ruch powietrza w kierunku odwrotnym do kierunku obrotowego koła wiatrowego i to zarówno w samym kole wiatrowym, jak i z tyłu poza nim. Składowa obwodowa tej szybkości powietrza u_s będzie

oczywiście skierowana odwrotnie do obwodowej szybkości koła wiatrowego u . Zatem szybkość obwodowa elementu łopatki w odniesieniu do przepływającego powietrza będzie powiększona o u_s , czyli będzie wynosić $u + u_s$.

Ponieważ w najkorzystniejszych warunkach pracy łopatki tylko $\frac{2}{3}$ szybkości wiatru ulega przetworzeniu na moc koła wiatrowego, zatem szybkość ta (v_1) będzie wyrażona odcinkiem BG (rys. 60). Wielkość tego odcinka będzie w myśl równania [45] połową sumy szybkości wiatru przed kołem wiatrowym v i szybkości wiatru za kołem wiatrowym v_2 . Tak samo należy uwzględnić tylko połowę sumy składowych szybkości obwodowych u_s , a ponieważ przed kołem wiatrowym składowa ta, jako wywołana samą łopatką, jest równa zero, więc składowa czynna w samym kole wyniesie $\frac{u_s}{2}$. Wypadkową szybkość, przetwarzaną w kole wiatrowym, otrzymamy, dodając geometrycznie tę szybkość do wektora BG (w punkcie G). Wielkość tej składowej $\frac{u_s}{2}$ otrzymamy, opisując na trójkącie szybkości ABC koło, którego okrąg odetnie odcinek $GF = \frac{u_s}{2}$. Po przesunięciu wektora v_1 na odcinek FB' ,

otrzymamy właściwy trójkąt szybkości, przetwarzanych w kole wiatrowym na jego moc — trójkąt AFB' . Właściwą szybkością względną powietrza w odniesieniu do elementu łopatki będzie wektor w_1 , nachylony do kierunku szybkości unoszenia, czyli do płaszczyzny obrotu elementu pod kątem β . Właśnie względem tej szybkości w_1 musi być ustawiony profil elementu łopatki pod kątem natarcia α , aby otrzymać odpowiednią siłę nośną P_z .

Kąt ustawienia profilu elementu łopatki względem płaszczyzny jej obrotu wynosi zatem

$$\varphi = \beta - \alpha \quad [64]$$

Siła nośna elementu łopatki o powierzchni jej rzutu ΔF_1 w myśl wzoru [20] wynosi

$$P_z = c_z \frac{\rho}{2} w_1^2 \Delta F_1 \quad [65]$$

Siła ta jest prostopadłą do kierunku szybkości w_1 .

Po geometrycznym dodaniu do siły P_z siły oporu czołowego profilu P_x otrzymamy wypadkową siłę aerodynamiczną P_a (patrz rozdz. II punkt 11).

Rozłożywszy tę siłę wypadkową na składowe w dwu zasadniczych kierunkach względem koła wiatrowego, otrzymamy siłę obwodową T i osiową S . Siła obwodowa pomnożona przez szybkość obwodową u , wyraża moc elementu łopatki, a siła osiowa S daje parcie osiowe wiatru na element koła wiatrowego. Ponieważ siła S jest prostopadła do kierunku u , a siła nośna P_z — prostopadła do kierunku w_1 , kąt zawarty między nimi będzie β .

Z geometrycznych zależności wykonanego wykresu (rys. 60) otrzymujemy

$$OF' = \frac{u}{2} + \frac{u_s}{2} \quad [66]$$

$$AO = OC = OF = \frac{w}{2} \quad [67]$$

$$FF' = \frac{v}{6} \quad [68]$$

Z trójkąta $OG'C$ otrzymamy

$$\left(\frac{w}{2}\right)^2 = \left(\frac{u}{2}\right)^2 + \left(\frac{v}{2}\right)^2 \quad [69]$$

a z trójkąta $OF'F$ wynika

$$\left(\frac{u}{2} + \frac{u_s}{2}\right)^2 = \left(\frac{w}{2}\right)^2 - \left(\frac{v}{6}\right)^2$$

Po podstawieniu za $\left(\frac{w}{2}\right)^2$ wartości z równania [69] otrzymamy

$$\left(\frac{u}{2} + \frac{u_s}{2}\right)^2 = \left(\frac{u}{2}\right)^2 + \frac{2v^2}{9}$$

a po przekształceniach wynika równanie

$$\left(\frac{u_s}{2}\right)^2 + 2 \frac{u}{2} \cdot \frac{u_s}{2} - \frac{2v^2}{9} = 0$$

skąd

$$u_s = 2 \sqrt{\left(\frac{u}{2}\right)^2 + \frac{2v^2}{9}} - u \quad [70]$$

gdyż u_s może być tylko dodatnie.

Poza tym z trójkątą $AB'F$ otrzymamy

$$w_1 = \sqrt{\left(u + \frac{u_s}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}v\right)^2} \quad [71]$$

Ponieważ kąt FCG jest równy β , gdyż CF jest prostopadłe do w_1 , a CG prostopadłe do u , otrzymujemy

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{GF}{GC} = \frac{\frac{u_s}{2}}{\frac{1}{3}v} = \frac{3}{2} \cdot \frac{u_s}{v} \quad [72]$$

albo też z trójkątą AFB'

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{FB'}{AB'} = \frac{\frac{2}{3}v}{u + \frac{u_s}{2}} \quad [73]$$

$$\cos \beta = \frac{AB'}{AF} = \frac{u + \frac{u_s}{2}}{w_1} \quad [74]$$

$$\sin \beta = \frac{FB'}{AF} = \frac{\frac{2}{3}v}{w_1} \quad [75]$$

Teraz mamy możność określenia dla dowolnego profilu odpowiedniego kąta jego ustawienia względem płaszczyzny obrotu.

Szerokość łopatk. Przeprowadzone wyżej rozważania opierały się na podstawowej zasadzie, że z całkowitej szybkości wiatru v jest wykorzystane w kole wiatrowym tylko $\frac{2}{3}v$, zaś z resztą szybkości $\left(\frac{1}{3}v\right)$ powietrze odpływa zza koła wiatrowego. Zatem koło łopatkowe, bądź też śmigło, musi być tak zbudowane, w szczególności musi mieć taką szerokość łopatek, aby swą pracą powodowało zmianę szybkości wiatru żadaną proporcją (wzór [50])

$$v : v_1 : v_2 = 3 : 2 : 1$$

Prawo mechaniki o równości zmiany pędu i popędu poruszającego się ciała (w naszym przypadku powietrza), jest podstawą do obliczenia szerokości łopatk. Na podstawie tego prawa różnica

pędu powietrza jest równa popędowi siły osiowej wywieranej przez wiatr na koło wiatrowe; zmniejszenie bowiem szybkości wiatru z v do v_2 musi być dokonane przez siłę wywieraną przez koło wiatrowe na wiatr w przeciwnym kierunku do siły parcia wiatru na koło.

Siła osiowa S wywierana przez wiatr na koło wiatrowe (rys. 60) jest wektorowo uzależniona od aerodynamicznej siły profilu P_a , która w zależności od jego siły nośnej P_z wyraża się następująco

$$P_z = P_a \cos \varepsilon$$

Ponieważ kąt ε jest, jak to będzie wkrótce wykazane, tak mały, że można go bez popelnienia większego błędu przyjąć za równy zeru, otrzymamy

$$P_z \approx P_a \quad [76]$$

Zatem siła osiowa

$$S = P_z \cos \beta$$

Siła osiowa wywierana przez wiatr na pierścień koła wiatrowego o szerokości Δr (rys. 61) według wzoru [65] i [76] wynosi

$$\Delta S = c_z \frac{\rho}{2} w_1^2 \cdot \Delta r \cdot t \cdot i \cdot \frac{u + \frac{u_s}{2}}{w_1} \quad [77]$$

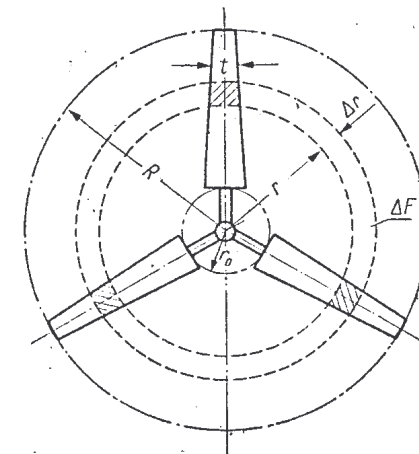
gdzie:

- t — szerokość elementu łopatk,
- i — ilość łopatek w kole wiatrowym lub łopat w śmigle.

Siła taka, ale o kierunku przeciwnym powstrzymuje strumień powietrza podczas jego przepływu w kole wiatrowym w ciągu 1 sekundy.

Zatem pęd tej siły wynosi

$$\Delta S \cdot 1 = c_z \frac{\rho}{2} w_1 \cdot \Delta r \cdot t \cdot i \left(u + \frac{u_s}{2}\right)$$



Rys. 61. Elementarny pierścień koła wiatrowego

Masa powietrza przepływającego w ciągu 1 sekundy przez przekrój pierścienia koła wiatrowego o szerokości Δr wynosi

$$2\pi r \cdot \Delta r \cdot v_1 \cdot \rho$$

Strata pędu tego powietrza w ciągu 1 sekundy wynosi

$$2\pi r \cdot \Delta r \cdot \rho \cdot v_1 (v - v_2)$$

zatem

$$c_z \frac{\rho}{2} w_1 \cdot \Delta r \cdot t \cdot i \cdot \left(u + \frac{u_s}{2}\right) = 2\pi r \cdot \Delta r \cdot \rho \cdot v_1 (v - v_2)$$

skąd

$$t = \frac{2\pi r \cdot 2 \cdot v_1 (v - v_2)}{c_z w_1 \cdot i \cdot \left(u + \frac{u_s}{2}\right)} \quad [78]$$

Ponieważ

$$v - v_2 = v_1 = \frac{2}{3} v$$

$$t = \frac{2\pi r \cdot 8}{i \cdot 9 c_z w_1} \cdot \frac{v^2}{\left(u + \frac{u_s}{2}\right)} = \frac{2\pi r \cdot 8}{i \cdot 9 c_z} \cdot \frac{v^2}{\left(u + \frac{u_s}{2}\right) \sqrt{\left(u + \frac{u_s}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{3} v\right)^2}} \quad [79]$$

a ponieważ $\frac{u}{v}$ jest wyróżnikiem szybkobieżności oznaczonym przez Z , otrzymamy

$$t = \frac{2\pi r \cdot 8}{i \cdot 9 c_z} \cdot \frac{1}{\left(Z + \frac{u_s}{2v}\right) \sqrt{\left(Z + \frac{u_s}{2v}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad [80]$$

Ze wzoru tego wynika, że szerokość łopatek powinna być tym mniejsza, im jest większa: ilość łopatek i współczynnik siły nośnej c_z oraz wyróżnik szybkobieżności Z (przy $r = \text{const}$). Ponieważ wyróżnik szybkobieżności Z jest zależny od r , uzależnienie zmian szerokości łopatek w kierunku promieniowym jest bardziej złożone.

c. Wpływ doskonałości profilu łopatek na moc silnika wiatrowego

Powróćmy jeszcze do wypadkowej aerodynamicznej siły P_a działającej na profil łopatek (rys. 60). Porównyując rozkład sił na tym rysunku z rozkładem na rys. 44 łatwo spostrzec, że siła P_a jest jedną z sił wyznaczonych krzywą biegunową profilu o wydłużeniu nieskończenie wielkim (λ_∞) z rys. 43 w zależności od kąta natarcia α wiatru na profil. Ta krzywa biegunowa została ponownie zaznaczona na rys. 60.

Już przy rozważaniu aerodynamicznych właściwości profili wprowadziliśmy pojęcie ich doskonałości $v = \frac{c_z}{c_x}$, jako tangens kąta $(90 - \epsilon)$, zależnej zatem od wartości kąta ϵ oraz wykazaliśmy, że największa doskonałość profilu występuje przy najmniejszej wielkości tego kąta (ϵ_{min}), który jest tzw. kątem największej doskonałości profilu. Wektor aerodynamicznej siły profilu jest wtedy styczny do krzywej biegunowej w punkcie wskazującym odpowiedni kąt natarcia.

Kąt ϵ odnajdujemy na wykresie rys. 60, jako kąt między siłami P_z i P_a . Zatem kąt między siłami P_a i S będzie $\beta - \epsilon$.

Zatem składowa siła obwodowa będzie się wyrażać następująco

$$T = P_a \sin(\beta - \epsilon) \quad [81]$$

Ponieważ w silnikach wiatrowych ustawia się łopatek koła łopatkowego lub łopaty śmigła, zasadniczo pod takim kątem, aby wyzyskać największą ich doskonałość aerodynamiczną, więc dla poznania wpływu aerodynamicznych właściwości łopatek na moc silnika wiatrowego wystarczy obliczyć tę moc dla kilku wielkości kąta ϵ . Obliczenie to przeprowadzimy w sposób następujący.

Moc elementu łopatek koła wiatrowego jest proporcjonalna do składowej siły obwodowej T i szybkości obwodowej u , czyli

$$N' = k' \cdot T \cdot u \quad [82]$$

Podstawiając na T wartość ze wzoru [81] otrzymamy

$$N' = k' \cdot P_a \sin(\beta - \epsilon) \cdot u \quad [83]$$

Z wykresu na rys. 60 mamy

$$P_a = \frac{P_z}{\cos \epsilon}$$

Ponieważ kąt największej doskonałości profilu łopatki ε_{min} jest bardzo mały, gdyż jego wartość największa, dotycząca najmniej korzystnego dla naszych celów profilu, mianowicie płaskiej płyty wynosi ok. 4° , więc jego cosinus jest prawie równy 1 ($\cos 4^\circ = 0,998$). Wobec tego możemy przyjąć, że $P_z \approx P_a$ i wtedy wzór [83] przekształca się następująco

$$N' = k' P_z u \sin(\beta - \varepsilon)$$

Na podstawie wzoru [65] możemy napisać

$$P_z = c_z \cdot \frac{\rho}{2} w_1^2 \cdot \Delta r \cdot t$$

a wtedy

$$N' = k'' c_z \cdot \Delta r \cdot t \cdot w_1^2 \cdot u \cdot \sin(\beta - \varepsilon)$$

Ponieważ według wzoru [79]

$$t = k''' \frac{v^2}{c_z \cdot w_1 \cdot \left(u + \frac{u_s}{2}\right)}$$

zatem

$$N' = k'''' \frac{\Delta r \cdot w_1 \cdot u \cdot v^2 \cdot \sin(\beta - \varepsilon)}{u + \frac{u_s}{2}} \quad [84]$$

Podzieliwszy tę moc przez moc wiatru, dopływającego do odpowiedniej części elementarnego pierścienia koła wiatrowego, otrzymamy teoretyczny współczynnik wykorzystania energii wiatru

$$\xi_t = \frac{k'''' \Delta r \cdot w_1 \cdot u \cdot v^2 \cdot \sin(\beta - \varepsilon)}{\left(u + \frac{u_s}{2}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \Delta r \cdot \frac{2\pi r}{i} \cdot v^3} = \frac{k \cdot w_1 \cdot \sin(\beta - \varepsilon)}{v \cdot \left(1 + \frac{u_s}{2u}\right)} \quad [85]$$

Jest to współczynnik teoretycznego wykorzystania energii wiatru przez element łopatki koła wiatrowego lub łopaty śmigła.

Na podstawie tego wzoru można obliczyć wartości ξ_t dla kilku wartości kąta największej doskonałości $\varepsilon_{min} = 0^\circ 45'$, 2° , 3° i 4° oraz wykreślić odpowiednie krzywe zmienności współczynnika wykorzystania energii wiatru w zależności od wartości wyróżnika szybkości $Z = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ i 8 . Wyniki tych obli-

czeń podano w tabl. 9, zaś krzywe $\xi_t = k f(Z)$ — na rys. 62. Krzywe te przedstawiają w pewnej skali kv^3 również i moce elementów koła wiatrowego.

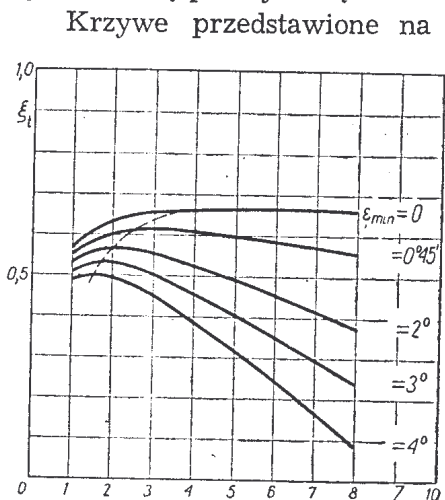
Tablica 9
Współczynnik teoretycznego wykorzystania energii wiatru w zależności od aerodynamicznej doskonałości profilu łopatki

Z	$\frac{u_s}{v}$	$\frac{w_1}{v}$	$\frac{w_1}{v \left(1 + \frac{u_s}{2u}\right)}$	$\frac{\operatorname{tg} \beta = 0,667}{Z \left(1 + \frac{u_s}{2u}\right)}$	β	$\beta - \varepsilon_{min}$			
						$\varepsilon_{min} = 0^\circ 45'$	$\varepsilon_{min} = 2^\circ$	$\varepsilon_{min} = 3^\circ$	$\varepsilon_{min} = 4^\circ$
1	0,374	1,361	1,148	0,562	29°20'	28°35'	27°20'	26°20'	25°20'
2	0,210	2,208	2,095	0,317	17°35'	16°50'	15°35'	14°35'	13°35'
3	0,144	3,143	3,070	0,217	12°15'	11°30'	10°15'	9°15'	8°15'
4	0,110	4,109	4,050	0,164	9°20'	8°35'	7°20'	6°20'	5°20'
5	0,088	5,088	5,045	0,132	7°30'	6°45'	5°30'	4°30'	3°30'
6	0,074	6,074	6,045	0,111	6°20'	5°35'	4°20'	3°20'	2°20'
8	0,056	8,056	8,020	0,083	4°45'	4° 0'	2°45'	1°45'	0°45'

Z	ξ_t				
	$\varepsilon_{min} = 0$	$\varepsilon_{min} = 0^\circ 45'$	$\varepsilon_{min} = 2^\circ$	$\varepsilon_{min} = 3^\circ$	$\varepsilon_{min} = 4^\circ$
1	0,561	0,549	0,627	0,509	0,491
2	0,632	0,606	0,565	0,530	0,495
3	0,651	0,612	0,551	0,499	0,444
4	0,657	0,605	0,517	0,447	0,376
5	0,658	0,593	0,483	0,396	0,308
6	0,667	0,588	0,457	0,351	0,246
8	0,664	0,561	0,374	0,234	0,093

Z kształtu tych krzywych wynika, że moce elementu łopatki szybko się zmniejszają w zakresie małych wyróżników szybkości w miarę ich malenia. Spowodowane to jest znacznym wpływem na wyniki obliczenia mocy składowej szybkości śrubowej u_s , której wartość jest tym większa im wyróżnik szybkości jest mniejszy.

Największe wartości krzywych są tym większe im kąt ε_{min} jest mniejszy, czyli im aerodynamiczna doskonałość profilu jest większa, przy czym w miarę pogarszania się tej doskonałości największa wartość nie tylko maleje, ale występuje przy mniejszych wyróżnikach szybkobieżności. Krzywa zmienności tych największych wartości w zależności od kąta ε_{min} jest zaznaczona na rys. 62 linią przerywaną.



Rys. 62. Wykres $\xi_t = k f(Z)$ dla różnych doskonałości profilu śmigła

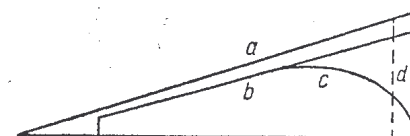
Zatem dla otrzymania większych wartości ξ_t również i przy większych wyróżnikach szybkobieżności konieczne jest stosowanie profili o możliwie dużych doskonałościach aerodynamicznych, co właśnie jest przestrzegane w silnikach szybkobieżnych. Przy małych natomiast wyróżnikach szybkobieżności różnice w wartościach ξ_t dla profili o dużej doskonałości, jak i dla profili o małej doskonałości ($\varepsilon_{min} = 4^{\circ}$), nie są duże, wobec czego w tych przypadkach nie ma potrzeby stosowania profili o dużej doskonałości aerodynamicznej. Dlatego to w silnikach wolnobieżnych (wielołopatkowych) praktyczniejszym jest stosowanie łopatek nieprofilowanych, a tylko wykonanych z wygiętej blachy stalowej, w silnikach zaś szybkobieżnych (śmigłowych) kształt śmigła musi być prawidłowo opracowany i dokładnie wykonany.

Moc łopatki. Wobec tego, że wszystkie nasze dotychczasowe rozważania dotyczyły tylko poszczególnych, promieniowo

rozieszczonych elementów łopatek koła wiatrowego, bądź też łopaty śmigła, więc aby otrzymać moc całej łopatki koła łopatkowego lub łopaty śmigła należy zsumować moce poszczególnych ich elementów.

Ponieważ jednak elementy łopatki lub łopaty posiadają różne szybkobieżności $Z = \frac{u}{v}$ proporcjonalne do odległości od środka obrotu, zatem zależnie od obranych dla początku i końca łopatki wyróżników szybkobieżności łopatka pracuje wg różnych odcinków krzywej rys. 62.

Ponieważ ilości powietrza, przepływającego przez pierścieniowe przekroje koła wiatrowego w ciągu jednostki czasu, są proporcjonalne do promieni tych pierścieni, zatem i moce wiatru, przepływającego przez poszczególne pierścienie kołowe są też proporcjonalne do promieni pierścieni. Moc te są zatem proporcjonalne i do wyróżników szybkobieżności elementów łopatki. Na wykresie (rys. 63) zmienność tej mocy w zależności od wyróżnika szybkobieżności przedstawia linia prosta *a*. Mnożąc rzędne tej prostej dla poszczególnych wyróżników szybkobieżności przez odpowiednie rzędne linii $\xi_t = k f(Z)$ z rys. 62, otrzymamy wielkości proporcjonalne do mocy elementu łopatki przedstawione na rys. 63, linią *b*. Sumując poszczególne rzędne wzdłuż całej łopatki, otrzymamy całkowitą moc łopatki.



Rys. 63. Wyznaczanie mocy łopatki śmigła

W obliczeniu tym należy jednak wnieść następujące uzupełnienie. Charakterystyki profili płatów nośnych wykorzystywane w naszym obliczeniu dotyczą profili o wydłużeniu nieskończenie wielkim, czyli bez uwzględnienia straty siły nośnej na końcach płata z powodu występowania oporów indukcyjnych. Łopatki koła łopatkowego, bądź łopaty śmigła mają jednak wymiary skończone i straty energii na opory indukcyjne w elementach łopatki, znajdujących się na ich końcach, muszą być w naszym obliczeniu uwzględnione, zwłaszcza że nie można i w silnikach wiatrowych pomijać zjawiska wyrównywania się na końcach śmigła podciśnienia powietrza na grzbiecie i ciśnienia na przodzie jego płata. Rozkład aerodynamicznego obciążenia płata śmigła musi być zatem

taki, aby to obciążenie na końcach łopat było równe zeru, natomiast dalej od końców, a bliżej środka obrotu śmigła rozkład obciążeń powinien w myśl wskazań teoretycznych przebiegać wg linii eliptycznej, jak to jest przedstawione na rys. 63 linią c.

Takie, dość zrudne, obliczenie przeprowadza się zasadniczo tylko dla silników dużej mocy, gdzie możliwie duża dokładność obliczeń ma poważniejsze znaczenie, natomiast w obliczeniach tych dla silników mniejszych opory indukcyjne uwzględnia się przez rachunkowe zmniejszenie średnicy koła wiatrowego o ok. 10 %, przyjmując, że ta najbardziej skrajna część koła wiatrowego nie daje pracy użytecznej. Takie zmniejszenie średnicy koła wiatrowego zaznaczono na rys. 63 pionową linią przerywaną d.

Dopiero zsumowanie rzędnych poprawionej krzywej mocy elementów daje prawidłowy wynik mocy całej łopatki, a w następnym i mocy całego koła wiatrowego.

Przeprowadzając takie obliczenia dla paru założonych z góry wielkości wyróżnika szybkobieżności końców łopatek, z otrzymanych wyników możemy wybrać najkorzystniejszy, wykazujący największą wartość mocy. Wtedy znanym będzie również i najkorzystniejszy wyróżnik szybkobieżności zewnętrznego obwodu koła wiatrowego.

Moment obrotowy. W celu określenia wielkości momentu obrotowego śmigła postępujemy podobnie, jak przy wyrowadzeniu wzoru na moc [82].

Moment obrotowy elementu łopaty śmigła (rys. 61) o długości Δr , znajdującego się w odległości r od środka obrotu, wynosi

$$M' = T \cdot r$$

gdzie:

T — siła styczna (obwodowa) działająca na element śmigła,
 r — odległość elementu od środka obrotu.

Podstawiając wartości ze wzorów [81] i [76] otrzymamy

$$T = P_z \sin(\beta - \epsilon) \approx c_z \cdot \frac{\rho}{2} w_1^2 \cdot \Delta r \cdot t \cdot \sin(\beta - \epsilon)$$

zatem

$$M' = c_z \cdot \frac{\rho}{2} w_1^2 \cdot \Delta r \cdot t \cdot \sin(\beta - \epsilon) \cdot r \quad [86]$$

a po podstawieniu wartości w_1 ze wzoru [71] i po małych przekształceniach wzór [86] przyjmuje postać następującą

$$M' = c_z \left[\frac{4}{9} + \left(\frac{u + \frac{u_s}{2}}{v} \right)^2 \right] \cdot \sin(\beta - \epsilon) \cdot \frac{\rho v^2}{2} \Delta F \cdot r$$

Oznaczając czynnik:

$$c_z \left[\frac{4}{9} + \left(\frac{u + \frac{u_s}{2}}{v} \right)^2 \right] \cdot \sin(\beta - \epsilon) = c'_k$$

ostatecznie otrzymamy

$$M' = c'_k \cdot \frac{\rho v^2}{2} \Delta F \cdot r \quad [87]$$

Wyrażenie uzyskane posiada zwykłą postać wzorów stosowanych dla wielkości aerodynamicznych, przy czym c'_k stanowi podobnie do innych tego rodzaju współczynników aerodynamiczny współczynnik momentu obrotowego elementu śmigła. Zwrócić należy uwagę, że jeden ze składników tego współczynnika stanowi wyróżnik szybkobieżności Z , gdyż

$$\frac{u + \frac{u_s}{2}}{v} \approx Z$$

W celu znalezienia momentu obrotowego śmigła należy zsumować momenty poszczególnych elementów łopaty oraz wynik pomnożyć przez ilość łopat śmigła.

Wtedy moment obrotowy śmigła będzie się ostatecznie wyrażać następująco

$$M_k = i \cdot \frac{\rho v^2}{2} \cdot \sum c'_k \cdot \Delta F \cdot r = c_k \cdot \frac{\rho v^2}{2} \cdot F \cdot \frac{D}{2} \quad [88]$$

gdzie:

c_k — aerodynamiczny współczynnik momentu obrotowego śmigła tak dobrany, aby ramieniem momentu był promień śmigła $\frac{D}{2}$,

F — pole koła zakreślonego przez śmigło.

Niekiedy moment obrotowy M_k wyprowadza się z mocy N następująco

$$M_k = \frac{60 \cdot 75 N}{2n} = 716,2 \frac{N}{n} \text{ kGm} \quad [89]$$

gdzie:

N — moc w KM,
 n — ilość obrotów na minutę.

$$M_o = \frac{P_u}{\omega} \quad \omega = \frac{2\pi n}{60} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

$P [W]$
 $M [Nm]$

Podstawowe wzory dla obliczeń silników wiatrowych. Podstawowymi wzorami dla najbardziej charakterystycznych wielkości silników wiatrowych są następujące:

— szybkość obrotowa

$$n = \frac{60 \cdot Z}{\pi \cdot D} \cdot v = 19,13 \frac{Z \cdot v}{D} \text{ obr/min} \quad [90]$$

— moment obrotowy

$$M = c_k \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = 0,02453 c_k D^3 v^2 \text{ kGm} \quad [91]$$

$c_k \equiv \psi$

— moc

$$N = c_l \cdot \eta_m \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \frac{v}{75} = 0,000654 \cdot c_l \eta_m \cdot D^2 v^3 \text{ KM} \quad [92]$$

$$N = 0,000481 \cdot c_l \cdot \eta_m \cdot D^2 v^3 \text{ kW} \quad [93]$$

— osiowe parcie wiatru

$$S = c_x \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = 0,049 c_x D^2 v^2 \quad [94]$$

Wzory te są słuszne dla powietrza o temperaturze $t = 15^\circ \text{C}$ i ciśnieniu $B = 760 \text{ mm Hg}$.

d. Niektóre przypadki szczególne

Na zakończenie tych rozważań teoretycznych należy rozpatrzyć jeszcze kilka zagadnień, nurtujących w umysłach dość szerokiego ogółu, zajmujących się wykorzystaniem energii wiatru, a napotykanymi w zgłaszanych wynalazkach i ulepszeniach silników wiatrowych.

Pierwszym z tych zagadnień jest sprawa umieszczenia za kołem wiatrowym drugiego koła, które by wykorzystywało energię wiatru, odpływającego z koła pierwszego.

Parokrotnie już zaznaczono, że w najkorzystniejszych warunkach pracy koła wiatrowego $\frac{1}{3}$ szybkości wiatru pozostaje niewykorzystana i ujawnia się, jako odpyw powietrza za kołem wiatrowym. Ten odpyw powietrza za silnikiem wiatrowym jest jednak konieczny dla samego działania silnika. Gdyby bowiem nie było odpływu powietrza za kołem wiatrowym, nie byłoby przecież do niego i dopływu.

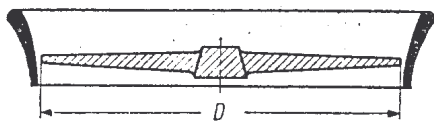
Drugie koło wiatrowe, umieszczone za pierwszym kołem mogłoby zatem wykorzystywać w najlepszych warunkach pracy obu kół tylko $\frac{2}{3}$ szybkości wiatru odlotowego z koła pierwszego, a ponieważ moc jest proporcjonalną do trzeciej potęgi szybkości wiatru, przeto moc koła drugiego o takiej samej średnicy, co i koła pierwszego, byłaby 27 razy mniejsza od mocy koła pierwszego. Wprawdzie moc ta byłaby nieco większa, gdyby drugie koło wiatrowe obracało się w kierunku odwrotnym do kierunku obrotu koła pierwszego, gdyż wtedy drugie koło wykorzystywałoby i szybkość śrubowego ruchu powietrza za kołem pierwszym, jednak uzyskany wynik zasadniczo nie zachęca do urzeczywistnienia tego rodzaju pomysłów. Pomija się przy tym okoliczność, że na skutek utrudnienia przez drugie koło odpływu powietrza z koła pierwszego moc tego koła musiałaby być odpowiednio mniejsza.

Jeśli już zależało koniecznie na uzyskaniu od silnika wiatrowego tej większej mocy, którą dawałoby koło drugie, to znacznie korzystniej byłoby ją uzyskać przez niewielkie zwiększenie średnicy koła pierwszego. Obeszłoby się wtedy nie tylko bez drugiego koła wiatrowego, ale uniknęłoby się trudności, związanych z jego umieszczeniem w tej samej głowicy silnika, z nastawianiem obu kół pod wiatr, z regulacją obrotów itp.

Taki pomysł umieszczenia dwu kół wiatrowych jednego za drugim jest urzeczywistniany tylko w jednym wyjątkowym przypadku, mianowicie do bezprzekładniowego napędu generatorów elektrycznych specjalnego typu pierścieniowego według pomysłu niemieckiego konstruktora Honnefa (patrz rozdz. V, punkt 3d).

W tym przypadku przez rzadsze rozmieszczenie łopat w pierwszym kole wiatrowym nie wyciskuje się w nim $\frac{2}{3}$ szybkości wiatru,

wskutek czego moc drugiego koła wiatrowego jest odpowiednio większa i bardziej zbliżona do mocy koła pierwszego. Pierwsze koło wiatrowe napędza wirnik generatora, drugie zaś w kierunku



Rys. 64. Koło wiatrowe w osłonie obwodowej

odwrotnym — stojan tego generatora, przez co uzyskuje się szybkość obrotową wirnika względem stojana dwa razy większą.

Drugim zagadnieniem częstokroć wysuwającym w zgłaszanych pomysłach jest umieszczanie koła wiatrowego w obwodowej osłonie nieruchomej (rys. 64), która by miała na celu zwiększenie

szybkości wiatru w samym kole wiatrowym.

Pomysłowi temu nie można odmówić słuszności, gdyż jak to było omówione poprzednio (patrz punkt 2 tego rozdziału) na skutek spiętrzenia ciśnienia powietrza przed kołem wiatrowym część powietrza odpływa przed kołem ku jego obwodowi, nie mogąc być w nim wykorzystaną. Zaopatrzenie silnika wiatrowego w umieszczoną na obwodzie jego koła osłonę, uniemożliwia w znacznej mierze ten odpływ powietrza, a przez to powinno zwiększać moc koła wiatrowego. Poza tym osłona taka, przeciwdziałając wyrównywaniu się na końcach łopat koła wiatrowego podciśnienia na ich grzbietach i ciśnienia na stronach przednich, powinna znacznie zmniejszać opory indukcyjne.

Przeprowadzone pomiary mocy takich silników wiatrowych wykazały jednak, że powiększenie mocy nie jest znaczne i w żadnym przypadku nie równoważy powiększenia zużycia materiałów na wykonanie osłony, która musi być przecież nastawialna odpowiednio do kierunku wiatru, a przy tym musi oprzeć się i huraganowi. Tę wyżkę mocy silnika znacznie łatwiej i korzystniej można osiągnąć przez niewielkie powiększenie średnicy koła wiatrowego.

Podobnie pomysł umieszczenia koła wiatrowego w dyszy w celu wykorzystania zwiększonej w jej przewężeniu szybkości wiatru nie jest racjonalny. Zwiększenie mocy silnika w tym przypadku jest niewspółmiernie małe ze zwiększonym zużyciem materiałów na wykonanie dyszy, która też musi być nastawialna

stosownie do kierunku wiatru i odpowiednio zabezpieczoną przed huraganami.

Pomysły umieszczenia na jednej wieży kilku niezależnych od siebie kół wiatrowych mogą być uznane za poprawne tylko w wyjątkowych przypadkach. W zwykłych natomiast warunkach praktyczniejsze jest zastosowanie pojedynczego koła większego niż np. dwu mniejszych. Średnica koła większego musi być tylko o 42 % większa, niż średnica każdego z dwu kół mniejszych; zużycie materiału na powiększenie koła będzie niewątpliwie znacznie mniejsze niż na wykonanie dwu kół mniejszych. Poza tym współpraca dwu lub większej ilości kół wiatrowych na wspólnej konstrukcji nośnej jest mniej korzystna, zwłaszcza podczas wiatru porywistego, gdyż poszczególne porywy wiatru nie zawsze rozkładają się równomiernie na wszystkie koła wiatrowe, wobec czego część ich niepotrzebnie jest odwracana od właściwego kierunku wiatru.

Stosowanie większej ilości kół łopatkowych, bądź też śmigieł, zamiast jednego odpowiednio większego, wykazuje tylko jedną, ale niekiedy poważną zaletę, mianowicie, że mniejsze koła wiatrowe posiadają większe szybkości obrotowe niż koła większe, wskutek czego w takich silnikach wypadają odpowiednio mniejsze przekładnie zębate.

Ze względu na brak miejsca musimy przestać na tych kilku najbardziej typowych przykładach niecelowych ulepszeń silników wiatrowych, pozostawiając inne rozważania i krytycyzmowi zainteresowanych przy wykorzystaniu przez nich przedstawionych rozważań.

3. WYRÓŻNIK SZYBKOBIEŻNOŚCI

Wszystkie silniki wiatrowe, pracujące pod wpływem wiatru, wykazują pewne szybkości obwodowe poszczególnych swych części obrotowych, jak bębnow, rotorów, kół wiatrowych itp., przy czym im części te bardziej są odległe od osi obrotu tym mają większe szybkości obwodowe, gdyż

$$u = 2\pi r \frac{n}{60}$$

[94]

gdzie:

- u — szybkość obwodowa w m/sek,
- r — odległość danego punktu od osi obrotu, czyli promień w m,
- n — szybkość obrotowa w obr/min.

Szybkości te dla rozmaitych silników wiatrowych znajdują się w różnych zasadniczych zależnościach od szybkości wiatru oraz różnie się zmieniają pod wpływem zmian tej szybkości. Do scharakteryzowania tej podstawowej, jak już o tym parokrotnie się przekonaliśmy, cechy silników wiatrowych stosuje się pojęcie wyróżnika szybkobieżności silników, który wyraża się stosunkiem szybkości obwodowej punktu najbardziej odległego od osi obrotu do szybkości wiatru, czyli

$$Z = \frac{u_{max}}{v} = \frac{R_{max} \omega}{v} \quad [95]$$

gdzie:

- Z — wyróżnik szybkobieżności,
- u_{max} — szybkość obwodowa końca skrzydła, krawędzi bębna itp.,
- ω — szybkość kątowna ($\omega = \frac{2\pi n}{60}$),
- v — szybkość wiatru.

Wyróżnik szybkobieżności jest charakterystyczną cechą silników wiatrowych, gdyż określając wielkość szybkości obwodowej w stosunku do szybkości wiatru, charakteryzuje na ogół wielkość silnika wiatrowego, potrzebnego dla danej mocy. Wiadomo jest bowiem, że moc wyraża się iloczynem szybkości i siły, albo też szybkości kątownej i momentu obrotowego, zatem im urządzenie posiada większe obroty, czyli większe szybkości obwodowe, tym dla tej samej mocy potrzebne są mniejsze siły. Ponieważ konstrukcje wszelkiego rodzaju urządzeń są pod względem wymiarowym uzależnione od wielkości sił, zatem silniki wolnobieżne muszą być ciężkie, a silniki szybkobieżne na tę samą moc, czyli o tej samej średnicy koła wiatrowego, odpowiednio lżejsze. Większe obroty silników wiatrowych są pożądane jeszcze i z tego względu, że większość maszyn przez nie napędzanych, zwłaszcza zaś maszyny elektryczne, wymagają dla napędu możliwie dużej szybkości obrotowej. Szybkość obwodowa silników wiatrowych jest jednak ograniczona wielkością wywoływanej przez nią siły odśrodkowej. Dopu-

szczalna wielkość szybkości obwodowej zależy od konstrukcji śmigła silnika wiatrowego i zasadniczo nie przekracza dotychczas 100 m/sek. Ponieważ szybkość obrotowa śmigła przy stałej szybkości obwodowej jest odwrotnie proporcjonalna do promienia śmigła ($n = \frac{60u}{2\pi R}$), otrzymuje się przez to ograniczenie szybkości obrotowej silnika wiatrowego.

Z dotychczasowych rozważań wynika, że mała szybkość obrotowa silników wiatrowych może być spowodowana albo prawami aerodynamicznymi, albo też wzrostem promienia śmigła, czyli zwiększeniem mocy silnika.

Ze względów aerodynamicznych najmniejsze wyróżniki szybkobieżności wykazują silniki wykorzystujące czołowe działanie wiatru, mianowicie silniki bębnowe, karuzelowe itp. Wyróżnik szybkobieżności tych silników wynosi ok. 0,5.

Silniki o bocznym działaniu wiatru wykazują znacznie większe wyróżniki szybkobieżności i tak na przykład silniki wielołopatkowe (turbiny wiatrowe) wykazują $Z = 1$ do 1,2; silniki cztero- lub sześciolopatkowe posiadają $Z = 2$ do 3, wiatraki — ok. 1,7.

Wyróżniki szybkobieżności silników śmigłowych o dwulopatowym śmigle mogą być znacznie większe, gdyż dochodzą do 12, a o jednołopatowym — nawet do 20.

Ze względu na wyróżnik szybkobieżności Z silniki wiatrowe można podzielić na:

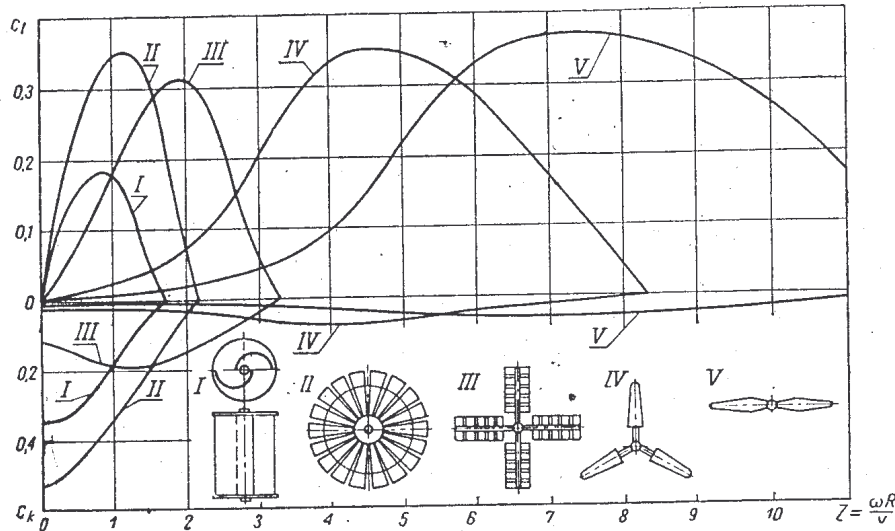
- wolnobieżne o wyróżniku Z mniejszym od 1,5,
- średnobieżne o Z większym od 1,5, ale mniejszym od 3,5,
- szybkobieżne o Z większym od 3,5.

Za dowód, że podział silników wiatrowych pod względem ich szybkobieżności nie jest podziałem tylko rachunkowym, ale że zawiera również istotną treść, mogą posłużyć wykresy podane na rys. 65 przedstawiające zmienność aerodynamicznych współczynników wykorzystania energii wiatru c_l oraz momentu obrotowego c_k w zależności od wyróżnika szybkobieżności Z dla różnych rodzajów silników wiatrowych.

Charakter tych krzywych jest dość urozmaicony i to zarówno pod względem samego ich przebiegu, jak i ich wartości największych; zwłaszcza rzucają się w oczy rozmaite miejsca występowania

nia tych wartości największych. Również charakterystycznymi są początki i końce tych krzywych, zwłaszcza momenty rozruchowe (c_k przy $Z = 0$) oraz obroty przy biegu luzem (Z przy $c_k = 0$).

Osobliwości charakterystyk poszczególnych typów silników wiatrowych będą często podawane przy omawianiu zalet i wad różnych silników.



Rys. 65. Charakterystyki $c_l = f(Z)$ i $c_k = f(Z)$ różnych typów silników wiatrowych

4. STRATY ENERGII WYSTĘPUJĄCE W SILNIKACH WIATROWYCH

Przy wyprowadzaniu podstawowych związków między wielkościami charakteryzującymi wiatr oraz silniki wiatrowe, przyjęliśmy na początku idealne warunki przetwarzania energii wiatru na mechaniczną energię śmigła, czyli nie uwzględnialiśmy żadnych strat energii. W warunkach tych uzyskaliśmy dla silników wiatrowych o płaszczyźnie obrotu prostopadłej do kierunku wiatru największy teoretyczny współczynnik wykorzystania energii wiatru $\xi_{t \max} = 0,593$.

Na skutek jednak występowania podczas przetwarzania w warunkach rzeczywistych energii wiatru na energię mechaniczną różnego rodzaju strat aerodynamicznych wielkość osiągalnego

w rzeczywistości współczynnika wykorzystania energii wiatru jest znacznie mniejsza, gdyż wynosi $c_l = 0,30 \dots 0,38$. Względna wielkość tych strat została poprzednio ujęta ogólnie współczynnikiem sprawności aerodynamicznej śmigła η_a , jako $(1 - \eta_a)$ w wyniku czego uzyskano związek

$$c_l = \eta_a \cdot \xi_t$$

Ponieważ straty aerodynamiczne obniżają prawie do połowy sprawność urządzenia wiatrowego, należy je bardziej szczegółowo rozpatrzyć głównie w tym celu, aby przez umiejętne ich zmniejszenie można było uzyskać większą sprawność urządzeń wiatrowych.

Zanim jednak przystąpimy do rozpatrzenia tych strat należy przede wszystkim dać odpowiedź na wysuwające się tutaj zasadnicze pytanie, czy w ogóle trzeba się starać o większą sprawność urządzeń wiatrowych, bo przecież energia wiatru jest wszędzie dostępna za darmo. Po cóż zatem ubiegać się o urządzenia bardziej oszczędzające tę darmową energię, zwłaszcza że urządzenia takie wymagają wkładu większych wysiłków.

Odpowiedź na to pytanie może być tylko twierdząca. Taką odpowiedź jest uzasadniona następującymi dwoma względami.

Zasadniczą potrzebą we wszystkich prawie okolicznościach jest możliwie stała i ciągła gotowość do pracy silnika wiatrowego. Natomiast okresy występowania odpowiednio silnych wiatrów są dość ograniczone, a przy tym wszędzie znacznie częściej występują wiatry słabsze, niż wiatry silne i bardzo silne. Właśnie ze względu na potrzebę uzyskania możliwie dużej mocy silnika wiatrowego podczas znacznie częściej występujących wiatrów słabszych, konieczna jest możliwie duża jego sprawność. Największa sprawność silnika wiatrowego powinna zatem występować właśnie podczas wiatrów o małych szybkościach, przy czym sprawność ta podczas wiatrów o szybkościach większych może się nawet zmniejszać, a przy wiatrach najsilniejszych jest nawet sztucznie obniżana przez urządzenia regulacyjne.

Drugim powodem dążenia do zwiększenia sprawności urządzeń wiatrowych, dość ściśle zresztą związanym z poprzednim przedstawionym, jest dążność do osiągnięcia możliwie małych na wymaganą moc wymiarów i ciężaru silników wiatrowych. Znaczenie zmniejszenia do możliwych granic wymiarów i ciężaru

śmigła lub koła łopatkowego oceni się znacznie lepiej, jeśli się uwzględni, że większe i cięższe koło wiatrowe wymaga cięższego wału i głowicy silnika oraz, że silnik musi być umieszczony na możliwie wysokiej wieży, której wymiary i ciężar są uzależnione od wielkości samego silnika wiatrowego. Jeśli się jeszcze przy tym uwzględni, że moc silnika wiatrowego wzrasta wraz z drugą potęgą jego wymiarów, zaś jego ciężar — wraz z trzecią potęgą, to uzna się w całej pełni znaczenie możliwe dużego zmniejszenia wymiarów śmigła. A to można osiągnąć tylko przez uzyskanie możliwie dużej sprawności śmigła i całego urządzenia wiatrowego. Poza tym mniejsze śmigło ma tę dodatkową zaletę, że daje się znacznie łatwiej regulować oraz pewniej ochraniać przed uszkodzeniem podczas zbyt silnych wiatrów i huraganów.

Wytyczne te nie mają zastosowania do silników o poprzecznej osi obrotu do wiatru, jak bębnowe, karuzelowe itp.

Ponieważ największy teoretyczny współczynnik wykorzystania przez nie energii wiatru jest bardzo mały, gdyż trzykrotnie mniejszy niż w silnikach śmigłowych, powierzchnia czynna dla żądanej mocy musi być trzykrotnie większa. Poza tym należy uwzględnić, że powierzchnia czynna wirnika stanowi w najkorzystniejszym przypadku połowę całkowitej jego powierzchni oraz, że nieczynna część powierzchni wirnika porusza się przeciw wiatrowi, powodując znaczne zmniejszenie mocy powierzchni czynnych. Wszystko to powoduje konieczność nadania silnikowi wymiarów kilkadziesiąt razy większych, niż np. silnikowi śmigłowemu. Zużycie materiałów jest w tym przypadku paręset razy większe, niż zużycie na silnik śmigłowy tej samej mocy.

Ponieważ ta ogromna konstrukcja wirnika, jak również i cały silnik nie mogą być ze względów wytrzymałościowych wieży odpowiednio wysoko nad powierzchnią ziemi umieszczone, występuje przez to dodatkowe zmniejszenie mocy w wyniku utrudnionego dopływu do silnika wiatru z powodu napotykanego na małej wysokości przeszkód.

Wobec wielkich wymiarów i ciężaru takiego silnika jego znaczne opory mechaniczne powodują nie tylko duże straty energii, ale również i niemożność pracy z dostateczną mocą podczas słabych wiatrów, co ze swej strony powoduje małą przydatność tego rodzaju silników do różnych potrzeb napędowych.

O innych wadach tego rodzaju silników, mianowicie o ich małej szybkobieżności, wymagającej przede wszystkim użycia dużych i drogich przekładni zębatych, obniżających przy tym znacznie sprawność urządzeń wiatrowych oraz o trudnościach ochrony ich przed zbyt silnymi wiatrami będzie mowa na innym miejscu (rozdz. V, punkt 5).

Uzasadniony w ten sposób słusność dążeń do osiągnięcia możliwie dużych sprawności urządzeń wiatrowych, zastanowimy się teraz nad poszczególnymi rodzajami strat aerodynamicznych, występujących w śmigle lub kole łopatkowym.

a. Straty wskutek tarcia powietrza o śmigło

Straty te stanowią jedne z największych strat w kole wiatrowym. Powstają one wskutek tarcia powietrza o powierzchnię śmigła lub koła łopatkowego w wyniku z jednej strony lepkości powietrza, a z drugiej strony niedoskonałej gładkości powierzchni łopat śmigła, bądź też łopatek koła. Poza tym wobec niedoskonałości profilu zwłaszcza łopatek koła wielołopatkowego występuje oderwanie się od nich strug powietrza, co w wyniku powoduje powstawanie wirów i dodatkowych strat energii.

Wszystkie te szkodliwe siły aerodynamiczne w odniesieniu do elementu śmigła, znajdującego się w odległości r od środka obrotu, i posiadającego długość Δr wynoszą

$$\Delta T = c_x \cdot i \cdot t \cdot \Delta r \frac{\rho w_1^2}{2}$$

gdzie:

- c_x — aerodynamiczny współczynnik oporu profilowego,
- i — ilość łopat w śmigle,
- t — szerokość łopaty,
- w_1 — względna szybkość powietrza.

Moc tych strat wyrazimy, mnożąc tę siłę przez szybkość wiatru, wobec czego

$$\Delta N_t = c_x \cdot i \cdot t \cdot \Delta r \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} w_1$$

Korzystając z geometrycznych zależności (rys. 60), możemy szybkość względną w_1 wyrazić w zależności od szybkości wiatru następująco

$$w_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{v}{\sin \beta}$$

Wtedy moc strat aerodynamicznych, przypadających na każdy element śmigła wyniesie

$$\Delta N_t = \frac{4}{27} c_x \cdot i \cdot t \cdot \Delta r \cdot \frac{\rho v^3}{\sin^3 \beta} \quad [96]$$

Z wyrażenia tego wynika, że wielkość rozpatrywanych strat zależy przede wszystkim od wielkości aerodynamicznego współczynnika oporu profilowego śmigła c_x . Na straty te wywiera zatem wpływ doskonałość profilu śmigła charakteryzowana stosunkiem $v = \frac{c_z}{c_x}$.

Zmniejszenie aerodynamicznego współczynnika oporu profilowego uzyskuje się przede wszystkim przez możliwie doskonale wygładzenie powierzchni śmigła. Zwłaszcza w silnikach szybkoobrotowych stan powierzchni śmigła dla wyniku jego pracy ma ogromne znaczenie. Im szybkoobrotowość silnika jest większa, tym gładsza musi być powierzchnia śmigła. Straty profilowe ulegają znacznemu zwiększeniu przez nieodpowiednie umiejscowienie na śmigle zakładek jego pokrycia, wystające części urządzeń regulacyjnych itp. Jednak nadanie śmigłu prawidłowego kształtu posiada dla tych strat mniejsze znaczenie niż gładkość powierzchni śmigła. Ważną jest przy tym również sprawa, aby nadana śmigłu gładkość była możliwie długotrwała i nie zmniejszała się pod działaniem wpływów atmosferycznych.

b. Straty indukcyjne

Stanowią one drugą pod względem wielkości grupę strat. Straty te występują przede wszystkim na zewnętrznych końcach łopatek i łopatek w wyniku wyrównywania się tam różnic ciśnień powietrza po obu ich stronach. Aerodynamicznym współczynnikiem oporu indukcyjnego jest c_i , który może być określony dla danego kąta natarcia α oraz odpowiedniego wydłużenia łopaty śmigła z krzywej biegunowej danego profilu (rozdz. II, punkt 16).

Siła oporu indukcyjnego wyrazi się zatem następująco

$$P_i = c_i \cdot F_s \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2}$$

gdzie:

F_s — całkowita powierzchnia śmigła,

w_1 — szybkość względną przepływu.

Zatem moc strat powodowanych oporami indukcyjnymi wyniesie

$$N_i = c_i \cdot F_s \cdot \frac{\rho \cdot w_1^3}{2} \quad [97]$$

Również i tutaj zmniejszenie tych strat w silnikach wiatrowych uzyskuje się przede wszystkim przez zmniejszenie aerodynamicznego współczynnika oporów indukcyjnych c_i .

c. Straty ruchu śrubowego powietrza

Następną grupą strat w silnikach wiatrowych są straty powodowane przez śrubowy ruch powietrza, odpływającego za kołem wiatrowym, w wyniku odchylenia się strug powietrza w kierunku stycznym. Straty te wyrażają się energią kinetyczną, odpowiadającą szybkości stycznej u_s powietrza, odpływającego za śmigłem. Dla poszczególnych elementów śmigła, znajdujących się w odległości r od środka obrotu i posiadających długość Δr , straty te wynoszą

$$\Delta N_s = \frac{1}{2} m \cdot u_s^2 = \frac{1}{2} \cdot 2\pi r \cdot \Delta r \cdot \rho v \cdot u_s^2 \quad [98]$$

W wyniku głębszej analizy tych strat stwierdza się, że straty te są odwrotnie proporcjonalne do drugiej potęgi wyróżnika szybkoobrotowości śmigła $Z = \frac{u}{v}$.

d. Straty w środkowej części koła wiatrowego

Ponieważ łopaty śmigła najczęściej nie sięgają samego środka obrotu śmigła, lecz są odsunięte na odległość r_0 od tego środka, więc środkowa (pusta) powierzchnia koła wiatrowego o promieniu r_0 pozostaje nie wykorzystana, w wyniku czego występują straty energii wiatru w wielkości

$$N_r = \pi r_0^2 \frac{\rho \cdot v^3}{2} \quad [99]$$

e. Straty na dopływie i odpływie powietrza

Poza tymi głównymi stratami aerodynamicznymi w silnikach wiatrowych występują jeszcze straty na dopływie powietrza do koła wiatrowego oraz na odpływie powietrza za kołem wiatrowym. Straty te na dopływie powietrza występują na skutek spiętrzenia ciśnienia przed śmigłem lub kołem wiatrowym i częściowego odpływu powietrza na boki, na zewnątrz koła wiatrowego, na odpływie zaś wskutek wirowych zaburzeń strug powietrza.

Poza tym straty energii występują wskutek niedoskonałego utrzymywania przez wszystkie elementy śmigła najkorzystniejszych stosunków dolotowych i odlotowych szybkości wiatru.

W wielołopatkowych kołach wiatrowych występują jeszcze straty powodowane wzajemnym oddziaływaniem na siebie poszczególnych łopatek, polegającym na tym, że przepływ powietrza w sąsiedztwie łopatek jest mniej lub więcej zaburzony przez obecność łopatek sąsiednich.

NASTAWIANIE SILNIKÓW WIATROWYCH POD WIATR ORAZ REGULACJA ICH OBROTÓW I MOCY

Wiatr, jako żywioł wyjątkowo niestały i kapryśny, może być wykorzystywany tylko przez urządzenia odpowiednio przystosowane do jego zmienności i zapewniające maszynom przez nie napędzanym większą lub mniejszą stałość obrotów, mocy, momentu obrotowego itp. W tym celu w silnikach wiatrowych przewiduje się urządzenia nastawiające je pod wiatr oraz urządzenia regulujące szybkość obrotową i moc.

1. URZĄDZENIA DO NASTAWIANIA SILNIKÓW WIATROWYCH POD WIATR

Silniki wiatrowe wymagają zwykle dla swej właściwej pracy odpowiedniego ustawienia względem kierunku wiatru, aby płaszczyzna obrotu koła wiatrowego zasadniczo była prostopadła do kierunku wiatru. Ponieważ kierunek wiatru nie jest stałym, a ciągle się zmienia, koniecznym jest zatem zaopatrzenie silników wiatrowych w urządzenie, umożliwiające im ciągłe zwracanie się pod wiatr. Tylko silniki prymitywne, np. bębnowe, wznoszone od dawna w miejscach o prawie stałych kierunkach wiatru, obywają się bez takich urządzeń. Z nowszych silników tylko silniki rotorowe (Savoniusa) nie potrzebują urządzeń nastawczych, gdyż pracują niezależnie od kierunku wiatru. Wszystkie inne natomiast silniki muszą być zaopatrzone w odpowiednie urządzenia nastawcze, utrzymujące koło wiatrowe w odpowiednim położeniu względem wiatru.

Ręczne nastawianie pod wiatr jest dokonywane tylko w prymitywnych konstrukcjach i to najczęściej w wiatrakach do mieleńia zboża lub do pompowania wody. Dokonuje się tego przez obrót

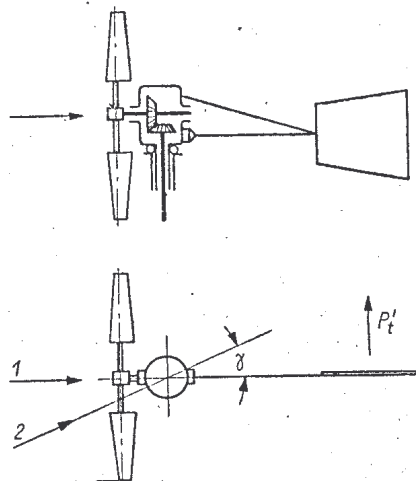
całego wiatraka lub tylko jego górnej części, względem pionowej osi przy pomocy odpowiedniej dźwigni, albo też przy pomocy przenośnego kołowrotu linowego, zaczepianego o jeden z 8 do 10 słupów rozmieszczonych wokół wiatraka. Takie nastawianie wiatraków pod wiatr jest mozolne, kłopotliwe i dalekie od doskonałości, wobec czego bardziej nowoczesne wiatraki oraz silniki wiatrowe są zaopatrzone w urządzenia do samoczynnego nastawiania ich pod wiatr.]

Stosowane dotychczas urządzenia do takiego samoczynnego nastawiania silników wiatrowych pod wiatr można podzielić na cztery grupy, których działanie odbywa się za pomocą:

- steru (tylnego),
- nastawczych (bocznych) silników wiatrowych,
- umieszczenia koła wiatrowego za wieżą,
- silnika elektrycznego.

a. Urządzenia z tylnym sterem

Urządzenia do nastawiania silników wiatrowych pod wiatr przy pomocy steru stosuje się w najmniejszych, małych i średnich silnikach wiatrowych zwłaszcza wielołopatkowych, co schematycznie jest przedstawione na rys. 66.



Rys. 66. Nastawianie silnika wiatrowego pod wiatr przy pomocy steru tylnego

Gdy koło wiatrowe zajmuje położenie prostopadłe do kierunku wiatru, to ster tylny ma położenie równoległe do tego kierunku i na niego nie działa żadna siła boczna.

Gdy jednak kierunek wiatru się zmieni, ster nie znajduje się już w kierunku równoległym do wiatru i w tym przypadku na sterze występuje siła, która powoduje odpowiedni obrót głowicy silnika wokół czopa środkowego, aż do ponownego zajęcia

przez koło wiatrowe położenia prostopadłego do kierunku wiatru.

Trudności liczbowego ujęcia pracy steru polegają na tym, że w położeniu równoległym do wiatru, czyli odpowiednim dla pracy silnika, na sterze nie występują żadne boczne siły czynne. Dla zapewnienia działania steru konieczne jest pewne, choć nieznaczne jego wychylenie się z położenia równoległego do kierunku wiatru. Właściwa wielkość kąta tego wychylania jest trudna do ustalenia, wobec czego wszelkie obliczenia wielkości steru mogą być tylko przybliżone. Zwykle dla obliczeń przyjmuje się kąt wychylenia się steru od położenia równoległego do wiatru w wielkości 10° .

Podczas wychylenia się steru od kierunku równoległego do wiatru o kąt γ na jego płacie nachylonym do kierunku przepływu powietrza pod kątem natarcia γ , występuje aerodynamiczna siła P_t' . Wartość tej siły można obliczyć w zwykły sposób, korzystając ze współczynników aerodynamicznych wziętych z krzywych biegunowych (rozdz. II, punkt 13),

$$P_t' = cF' \cdot \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} \quad [100]$$

gdzie:

$$c = \sqrt{c_x^2 + c_z^2}$$

F' — pole płata sterowego,

v_2 — odlotowa szybkość wiatru za kołem wiatrowym,

gdyż w działaniu steru jest czynna zarówno siła nośna płata, jak i siła jego oporu czołowego.

Moment obrotowy steru (tylnego) przy długości jego ramienia równej L wynosi

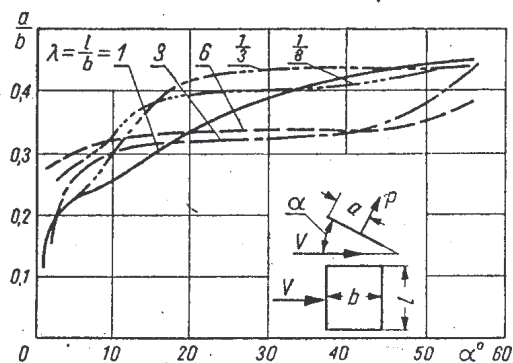
$$M_t = P_t' L \cdot \cos \psi \quad [101]$$

gdzie ψ jest kątem odchylenia siły aerodynamicznej P_t' od normalnej (prostopadłej) do powierzchni płata sterowego.

Długość ramienia steru odmierza się od osi obrotu głowicy silnika do środka parcia wiatru na płat. Środek ten zmienia swe położenie w zależności od kąta natarcia płata sterowego. Położenie tego środka parcia można znaleźć na wykresach (rys. 67), dotyczących płyt płaskich o różnych wydłużeniach λ .

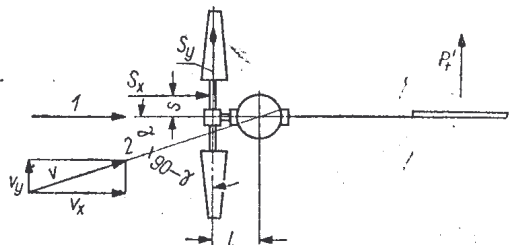
Przy sztywnym połączeniu steru z głowicą silnika wiatrowego, co jest stosowane np. w silnikach z regulacją obrotów przez przekręcanie łopat śmigła względem ich osi, każdemu wychyleniu steru z położenia równoległego do kierunku wiatru towarzyszy przekręcenie się o ten sam kąt z położenia prostopadłego do kierunku wiatru również i koła wiatrowego.

W związku z istotnym znaczeniem dla nastawiania silników pod wiatr (a jeszcze większym dla jednego ze sposobów regulacji jego obrotów) zjawisk, występujących przy ukośnym ustawieniu kół wiatrowych względem kierunku wiatru, koniecznym jest przede wszystkim bliższe zaznajomienie się z nimi.



Rys. 67. Położenie środka parcia w płytach płaskich o różnych wydłużeniach λ w zależności od kąta natarcia

Siła parcia wiatru na koło wiatrowe, na którą składają się głównie siły parcia wiatru na poszczególne jego łopatki, może być określona rachunkowo tylko dla prostopadłego położenia koła względem kierunku wiatru. Środek parcia wiatru na koło łopatkowe lub śmigło wypada w tych warunkach w ich środkach geometrycznych.



Rys. 68. Siły aerodynamiczne, występujące na kole wiatrowym odchylonym od kierunku wiatru

Przy zmianie położenia koła łopatkowego lub śmigła na ukośne względem kierunku wiatru, czyli po przekręceniu płaszczyzny ich obrotów względem położenia prostopadłego do wiatru o kąt γ (rys. 68) koło łopatkowe lub śmigło znajdzie się w przepływie powietrza pod kątem natarcia równym $(90 - \gamma)$. Kąty natarcia poszczególnych łopatek koła łopatkowego w jego położeniu prost-

padłym do kierunku wiatru ulegną zmianie, przy czym zmiana ta dla każdej łopatki, a nawet każdego jej elementu jest inna. W śmigle kąty natarcia zmieniają się w tych warunkach zależnie od chwilowego położenia śmigła względem osi obrotów.

Po takim przekręceniu koła wiatrowego przestaje ono być dla wiatru symetrycznym względem swego środka; utrzymuje ono jeszcze symetrię, z gruba biorąc, względem płaszczyzny skręceń przeprowadzonej przez środek koła.

W wyniku tego siła parcia wiatru S na koło wiatrowe nie będzie już prostopadłą do jego płaszczyzny oraz środek parcia nie będzie przypadał w środku koła, a ulegnie pewnemu przesunięciu w bok od niego. Siłę parcia wiatru S na koło wiatrowe można rozłożyć na dwie składowe: jedną prostopadłą do płaszczyzny koła, czyli osiową siłę parcia S_x , zaczepioną w środku parcia oraz drugą siłę boczną S_y , leżącą w płaszczyźnie koła wiatrowego (rys. 68).

Fizyczne znaczenie tych składowych łatwo sobie uzmysłowić, uwzględniając tę okoliczność, że przy skośnym ustawieniu koła łopatkowego względem kierunku wiatru, wiatr oddziałuje na koło właściwie jakby dwiema swymi składowymi szybkościami (rys. 68). Jedna składowa szybkość v_x jest prostopadłą do płaszczyzny koła i daje osiową siłę parcia S_x , oraz druga składowa szybkość v_y jest równoległą do płaszczyzny koła i działa na powierzchnię jego rzutu poprzecznego, dając siłę S_y , która usiłuje przesunąć koło w bok. W miarę zwiększania kąta odchylenia koła łopatkowego od kierunku prostopadłego do wiatru γ siła S_y staje się coraz to większa.

Ze względu na złożoność występujących tutaj zjawisk teoretyczne wyznaczenie wielkości osiowego parcia wiatru, siły bocznej oraz środka parcia nie jest możliwe. Dokonuje się tego doświadczalnie najłatwiej w tunelach aerodynamicznych, a uzyskane wyniki pomiarów przedstawia się w postaci krzywych w zależności od kąta γ . Zamiast jednak bezwzględnych wielkości tych sił wygodniej jest przedstawiać na tych wykresach odpowiednie współczynniki aerodynamiczne, określające w zwykły sposób wielkości tych sił, mianowicie

$$S_x = C_x F \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad [102]$$

$$S_y = C_y F \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad [103]$$

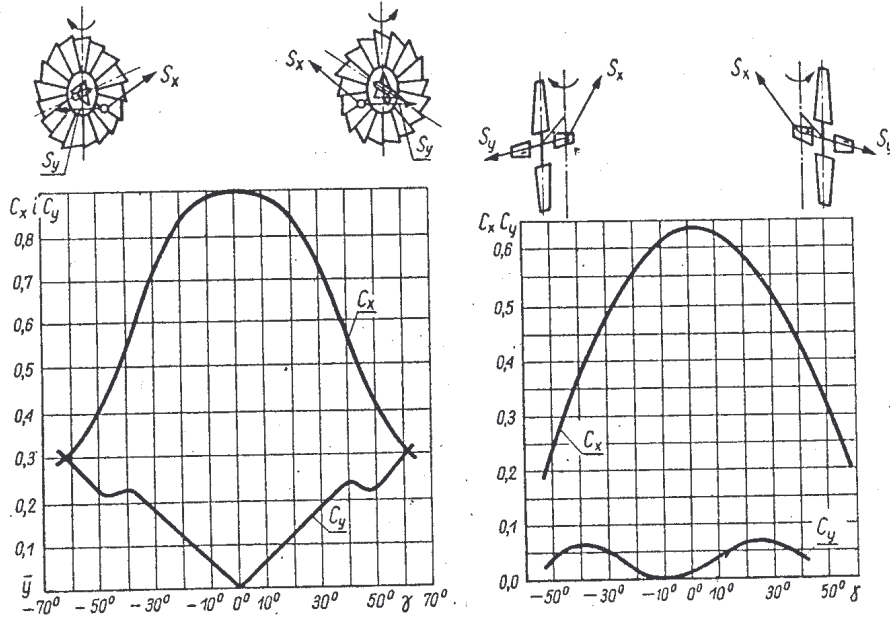
gdzie C_x i C_y oznaczają współczynniki aerodynamiczne, dotyczące całego koła łopatkowego (dla odróżnienia od poprzednio używanych oznaczono je dużymi literami), zaś $F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ — pole koła łopatkowego o średnicy D .

Wielkość bocznego przesunięcia środka parcia wynosi

$$s = a \cdot \frac{D}{2} \quad [104]$$

gdzie a — jest współczynnikiem tego przesunięcia.

Na rys. 69 podano¹⁾ współczynniki aerodynamiczne C_x i C_y w zależności od kąta γ dla silnika wielołopatkowego ($i = 18$, $n = 624$ obr/min, $Z = 1,4$, $M = \text{const}$), zaś na rys. 70 — dla sil-



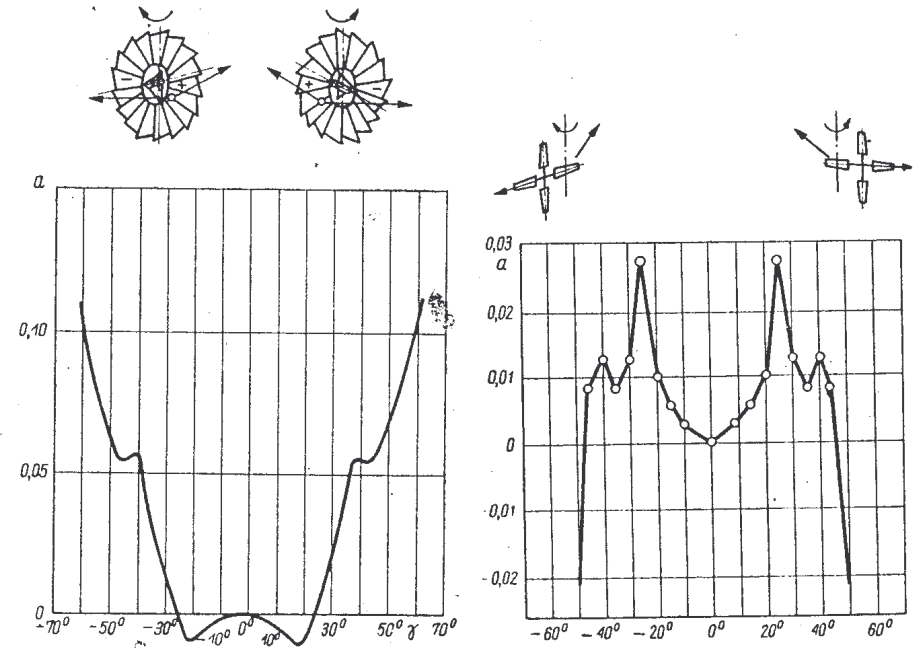
Rys. 69. Zależność aerodynamicznych współczynników C_x i C_y od wielkości γ dla silnika wielołopatkowego

Rys. 70. Zależność aerodynamicznych współczynników C_x i C_y od wielkości γ dla silnika czterołopatkowego

nika czterołopatkowego ($i = 4$, $n = 1860$ obr/min, $Z = 5$, $M = \text{const}$). Na rys. 71 i 72 podano dla obu tych silników współczynniki przesunięcia środków parcia wiatru na koło $a = f(\gamma)$.

¹⁾ Według E. M. Fatiejewa, Wietrodwigateli i Wietroustanowki.

Krzywe te są zasadniczo symetryczne względem osi rzędnych, gdyż skośne ustawienie koła względem kierunku wiatru może być dokonywane w jedną lub drugą stronę, a zatem kąt γ może być dodatni lub ujemny.



Rys. 71. Zależność współczynnika a od wielkości γ dla silnika wielołopatkowego

Rys. 72. Zależność współczynnika a od wielkości γ dla silnika czterołopatkowego

Z krzywych tych wynika, że największy współczynnik osiowego parcia wiatru występuje przy $\gamma = 0$, czyli przy prostym położeniu koła łopatkowego i w miarę zwiększania odchylenia go od tego kierunku współczynnik siły osiowego parcia maleje.

Natomiast krzywa zmienności współczynnika C_y siły bocznej $S_y = f(\gamma)$ ma przebieg bardziej złożony, ale zasadniczo współczynnik ten powiększa się wraz ze zwiększeniem kąta γ . Tylko w silniku czterołopatkowym po osiągnięciu wartości największych współczynnik ten przy dalszym powiększaniu kątów γ ponownie maleje. Poza tym krzywa ta jest nieco przesunięta (o 10°) względem osi rzędnych.

Z krzywych zmienności współczynników przesunięcia środków parcia $a = f(\gamma)$ widać bardziej odrębne zachowanie się koła wielołopatkowego od czterołopatkowego.

Dla innych kół wiatrowych krzywe zmienności wyżej opisanych współczynników w zależności od kąta odchylenia γ będą oczywiście inne, jednak dla silników podobnych do wybranych wyżej przedstawicieli typowych charakterystyki te są zbliżone do podanych na rys. 69-72. W przypadkach, gdy nie ma dla danego silnika właściwych charakterystyk, można korzystać zarówno przy obliczeniach sterów, jak i regulacji silników z krzywych tutaj podanych, jednak należy zdawać sobie w tych przypadkach sprawę, że uzyskane wyniki obliczeń są niedokładne i to tym więcej, im obliczany silnik bardziej różni się od tutaj przytoczonych.

Powracając do obliczania steru tylnego stwierdzimy, że obliczony poprzednio jego moment obrotowy [101] musi przynajmniej zrównoważyć siły występujące na kole wiatrowym odchylonym od położenia prostopadłego do kierunku wiatru o kąt γ .

Zatym

$$M_t = P'_t L \cos \psi \geq S_y l + S_x s \quad [105]$$

Podstawiając wyrażenia na P'_t , S_y i S_x ze wzorów [100, 102 i 103] mamy

$$\frac{c \cdot F' \cdot \rho \cdot v_2^2}{2} L \cos \psi \geq C_y \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} l + C_x \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot s \quad [106]$$

gdzie współczynniki C_x i C_y są uzależnione od kąta odchylenia γ .

Główne wymiary steru tylnego, jako iloczyn pola powierzchni jego płata i długości ramienia otrzymamy ze wzoru

$$F' \cdot L \geq \frac{\pi \cdot D^2 (C_y l + C_x s)}{4 \cdot c \cdot \left(\frac{v_2}{v}\right)^2 \cdot \cos \psi} \quad [107]$$

W przypadkach, gdy silnik wiatrowy posiada pionowy wał, służący do napędu maszyn, umieszczonych u podnóża wieży, przy ustalaniu wymiarów steru należy również uwzględnić moment reakcji siły międzyzębowej stożkowej przekładni zębatej (rys. 73), który obliczamy ze wzoru

$$M_r = 716,2 \frac{N}{n} \text{ kGm} * 9,80665 \quad [108]$$

gdzie

N — moc przenoszona przez pionowy wał w KM,
 n — ilość obrotów pionowego wału na minutę.

Wtedy główne wymiary steru tylnego wyniosą

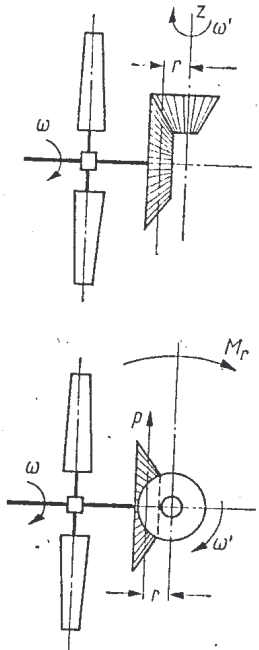
$$F' L \geq \frac{\pi \cdot D^2 (C_y l + C_x s + M_r)}{4 \cdot c \cdot \left(\frac{v_2}{v}\right)^2 \cdot \cos \psi} \quad [109]$$

Przy ustalaniu wymiarów steru wg uzyskanego z obliczenia iloczynu $F' L$ należy dążyć do stosowania możliwie małych płatów sterowych, osadzanych na możliwie długich ramionach. Uzyskuje się przez to zwiększenie momentu bezwładności steru, a w wyniku zmniejszenia szybkości kątowej obrotów głowicy silnika ω_1 , co jest pożądanym ze względu na ograniczenie, występujących podczas tych obrotów w łopatkach śmigła silnika i jego wale momentów żyroskopowych.

Zwykle przyjmuje się całkowitą długość steru przynajmniej równą średnicy koła wiatrowego, długość samego płata steru — równą długości promienia koła wiatrowego, a jego szerokość — dwa razy mniejszą niż długość.

Moment reakcji międzyzębowej w przekładni stożkowej powoduje stałe skrócenie płaszczyzny obrotu koła wiatrowego od kierunku prostopadłego do kierunku wiatru. W celu zniesienia tego wpływu, ster ustawia się skośnie pod niewielkim kątem do osi koła wiatrowego albo też zamiast płaskiego płata sterowego stosuje się płat łukowy o działaniu niesymetrycznym. Umożliwia to niekiedy zmniejszenie wymiarów płata sterowego.

Poza zniesieniem momentu reakcji przekładni stożkowej takie urządzenie steru podczas umiarkowanych wiatrów umożliwia zrównoważenie momentów obrotowych, występujących w silnikach zaopatrzonych w ster boczny (rys. 74) albo z bocznym

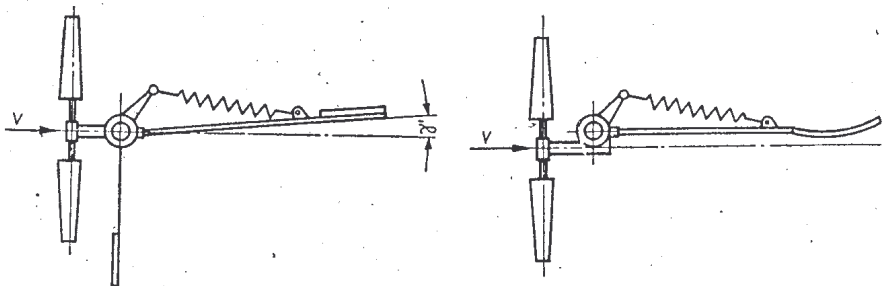


Rys. 73. Reakcja międzyzębowa stożkowej przekładni zębatej

$n/0,8 = 1,25n$

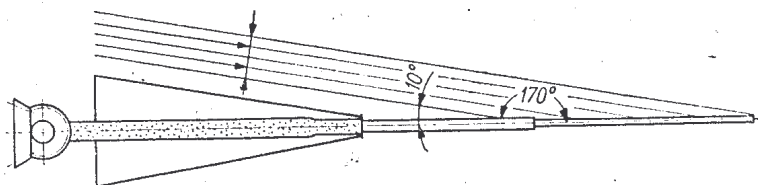
przesunięciem koła wiatrowego (rys. 75) dla celów regulacji jego obrotów (patrz punkt 2 tego rozdziału).

W wydłużaniu płata sterowego kosztem jego szerokości należy zachować właściwy umiar. Krótsze płaty, jakkolwiek cięższe, pewniej utrzymują silnik w pożądanym kierunku i nie są tak skłonne do wywoływania drgań, jak płaty bardziej wydłużone. Ramiona steru często zaopatruje się w odciągi.



Rys. 74. Skośne ustawienie steru Rys. 75. Ster tylny z płatem łukowym tylnego

Pojedynczy ster prosty posiada jednak wadę. Przekrój strumienia powietrza, działający na jego płat pod kątem 10° , jest względnie mały (rys. 76). Powiększeniu jego wielkości przez zwiększenie płata steru stoi na przeszkodzie to, że przy bocznych podmuchach wiatru szybkość kątowna obrotów głowicy ω_1 wpa-

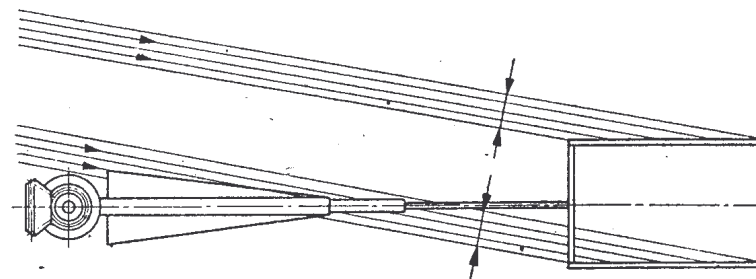


Rys. 76. Płat steru tylnego ustawiony pod kątem 10° względem kierunku wiatru

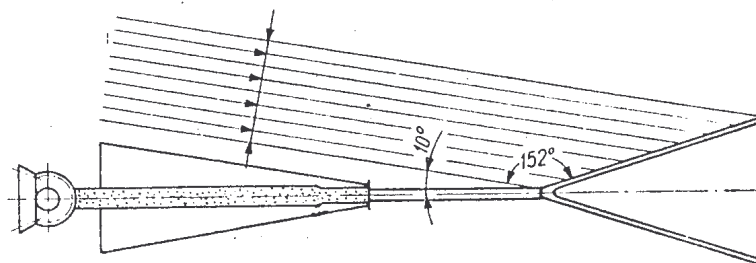
dają zbyt duże. Dlatego też stosuje się niekiedy stery dwupłatowe (rys. 77), przy czym poszczególne płaty sterowe muszą być rozstawione na odpowiednio dużej odległości. Wtedy dla wiatru o małym odchyleniu od kierunku pierwotnego działanie obu płatów sterowych dodaje się, natomiast dla wiatrów o dużych odchyleniach od kierunku osi silnika jeden płat zastawia (cieniuje) dru-

gi, wskutek czego szybkość kątowna obrotów głowicy ω_1 uzyskuje się mniejsza.

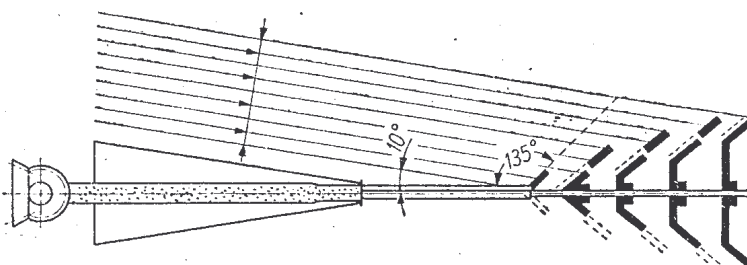
Innym sposobem, wiodącym do tego samego celu, jest zastosowanie w sterze tylnym płata z bocznymi płaszczyznami rozwidlonymi (rys. 78). Dzięki temu rozwidleniu przekrój czynnego strumienia powietrza, napływającego pod kątem 10° , jest znacz-



Rys. 77. Tylny ster dwupłatowy



Rys. 78. Ster tylny z płatami rozwidlonymi



Rys. 79. Ster tylny z płatami załamanymi

nie powiększony. Konstrukcja taka powoduje jednak powstawanie wirów i zaburzeń powietrza, utrudniających jego odpływ za silnikiem wiatrowym.

Jeszcze mniej korzystna pod tym względem jest konstrukcja steru, przedstawiona na rys. 79. W konstrukcji tej kąt nachylenia

poszczególnych części płatów sterowych względem przepływu powietrza jest większy pomimo, że nachylenie całości płata jest takie samo, jak w przypadku poprzednim. Konstrukcja ta jest jednak bardziej złożona, a pod względem skutku działania jest tylko nieznacznie korzystniejsza od konstrukcji poprzednio opisanej.)

Zaletą nastawiania silników wiatrowych pod wiatr przy pomocy steru jest prostota jego konstrukcji oraz duża podatność tego urządzenia na szybkie zmiany kierunku wiatru. Za wadę tego systemu należy uważać zbyt dużą szybkość kątową obrotów głowicy silnika, co wywołuje w kole wiatrowym względnie duże momenty żyroskopowe.

Do wielkich zalet tego systemu nastawiania silników wiatrowych pod wiatr również należy zaliczyć możliwość łatwego i pewnego odstawiania silnika spod wiatru, co jest niekiedy konieczne podczas zbyt silnych wiatrów oraz podczas dokonywania przeglądów silnika, napraw itp. Wystarczy bowiem w tym celu osadzić ramię steru w głowicy silnika na przegubie, umożliwiającym przekręcenie steru w położenie równoległe do płaszczyzny koła wiatrowego (rys. 90), a będzie ono się ustawiać równoległe do kierunku wiatru.

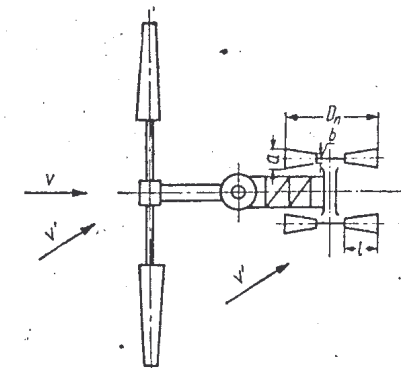
b. Urządzenia z nastawczymi silnikami wiatrowymi

Nastawianie silników wiatrowych pod wiatr przy pomocy nastawczych silników wiatrowych było stosowane od dawna już w wiatrakach holenderskich.

W systemie tym (rys. 80) za kołem wiatrowym, na odpowiedniej odległości za wieżą są umieszczone dwa (lub niekiedy jedno) koła wiatrowe nastawcze w ten sposób, że ich płaszczyzny obrotu są prostopadłe do koła głównego. Koła nastawcze są osadzone na wspólnym wale, który zwykle za pośrednictwem przekładni stożkowej i ślimakowej jest sprzężony z zębatym kołem czołowym, zazębiającym się z wieńcem zębatym, umieszczonym nieruchomo na konstrukcji wieży lub na budynku silnika wiatrowego.

Gdy wiatr jest skierowany prostopadłe do głównego koła wiatrowego silnika, czyli równoległe do płaszczyzn obrotu silników nastawczych, to koła nastawcze znajdują się w spoczynku. Gdy natomiast kierunek wiatru się zmienia, to pewna jego skła-

dowa będzie prostopadła do płaszczyzny obrotu kół nastawczych, co spowoduje ich obracanie się w jednym lub drugim kierunku, w wyniku czego głowica silnika zostaje odpowiednio obrócona względem osi pionowej, aż do zajęcia przez silniki nastawcze położenia równoległego do kierunku wiatru. Spowoduje to ponowne przyjęcie przez główne koło wiatrowe położenia prostopadłego do kierunku wiatru. Przez dobranie właściwej wielkości przekładni zębatej można łatwo uzyskać odpowiednią szybkość obrotu głowicy ω_1 względem osi pionowej, która by nie zagrażała bezpieczeństwu silnika ze względu na moment żyroskopowy. Zwykle wystarcza do tego celu szybkość kątowa $\omega_1 = 0,5$ 1/sek.



Rys. 80. Silnik wiatrowy z wiatrakami nastawczymi (schemat)

Szybkość kątową kół nastawczych oblicza się ze wzoru

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot Z_0 \cdot v_2}{D_n} \quad [11C]$$

gdzie

- Z_0 — wyróżnik szybkobieżności silników nastawczych odpowiednio dobrany z ich charakterystyk,
- v_2 — szybkość odlotowa wiatru za kołem wiatrowym,
- D_n — średnica kół nastawczych.

Na silniki nastawcze stosuje się silniki wielołopatkowe, których łopatki w ilości 4 do 8 są wykonane z odpowiednio wygiętej blachy i są ustawione pod względnie dużym kątem (20° do 30°). Średnica kół wiatraków nastawczych D_n wynosi zwykle $\frac{1}{4}$ do $\frac{1}{5}$ średnicy koła głównego, a wymiary łopatek są następujące:

$$l = \frac{D_n}{3}, \text{ szerokość zewnętrzna } a = \frac{D_n}{3}, \text{ szerokość wewnętrzna } b = \frac{D_n}{6} \text{ (rys. 80).}$$

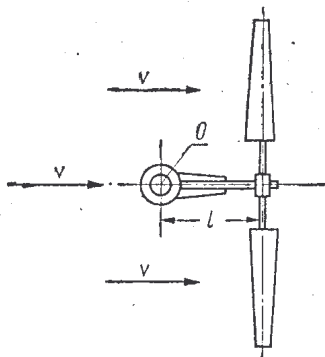
Urządzenia nastawcze tego typu są bardziej złożone, niż urządzenia sterowe, jednak ze względu na możliwość prawie dowolnego ograniczania szybkości kątowej obrotu głowicy ω_1 są dość często

stosowane i w silnikach nowoczesnych i to nawet o mniejszych mocach.

c. Urządzenia z kołami wiatrowymi za wieżą

Nastawianie silników wiatrowych pod wiatr przez umieszczenie koła wiatrowego za wieżą przedstawia się, jako system najprostszy, gdyż rolę elementu nastawczego spełnia w nim samo koło wiatrowe.

Koło to jest w tym celu umieszczone z tyłu wieży, a będąc dość daleko od niej odsunięte, jest samoczynnie i stale nastawiane prostopadłe do wiatru. Wielkość momentu nastawczego jest proporcjonalna do odległości l koła wiatrowego od pionowej osi obrotu (rys. 81).



Rys. 81. Silnik wiatrowy ze śmigłem, pracującym za wieżą (schemat)

Zaznacza się przy tym, że w systemie tym, w przeciwieństwie do systemu poprzednio opisanego nie ma możliwości dowolnego dobrania wielkości szybkości kątowej obrotów głowicy ω_1 . Poza tym przez znaczne przesunięcie koła wiatrowego na jedną stronę oraz przez brak przeciwważaru powodowanego brakiem steru tylnego powstaje tutaj trudność w opanowaniu znacznych sił w oporowych łożyskach głowicy.

d. Urządzenia z silnikiem elektrycznym

Ostatni system nastawiania silników wiatrowych pod wiatr przy pomocy silnika elektrycznego jest stosowany wyłącznie w silnikach dużej mocy o kołach wiatrowych ponad 30 m średnicy.

Urządzenie tego typu polega na zastosowaniu chorągiewki nastawczej, umieszczonej na głowicy silnika wiatrowego, która odpowiednio do położenia względem swej podstawy włącza lub wyłącza silnik elektryczny, dokonywujący obrotu głowicy silnika wiatrowego względem pionowej osi.

Podczas wiatru o kierunku prostopadłym do koła wiatrowego chorągiewka nastawcza zajmuje położenie równoległe do osi głowicy silnika wiatrowego i silnik elektryczny nie pracuje. Gdy natomiast wiatr zmieni swój kierunek, chorągiewka nastawcza odchylna wówczas od położenia równoległego do osi głowicy zamyka przez ruchomy styk obwód odpowiedniego przełącznika. Przełącznik ten włącza na odpowiedni kierunek obrotów silnik elektryczny, który za pośrednictwem przekładni ślimakowej przekręca głowicę, aż do ponownego zajęcia przez koło wiatrowe położenia prostopadłego do wiatru, a przez chorągiewkę nastawczą — położenia równoległego do osi głowicy i otwarcia przez styk obwodu przełącznika.

Samo obracanie głowicy może się odbywać przy pomocy takiego samego urządzenia, jakie stosuje się przy nastawianiu silników przy pomocy nastawczych kół wiatrowych, czyli przy użyciu wieńca zębatego umieszczonego na wierzchołku wieży. Może być to dokonywane również przy pomocy odpowiedniego wózka (toczącego się po szynie ułożonej na powierzchni ziemi wokół wieży), na którym jest wsparta tylna podpora głowicy silnika wiatrowego, jak to było wykonane w silniku wiatrowym pod Bałakławą na Krymie (rys. 179).

Zaletą tego systemu nastawiania silników wiatrowych pod wiatr jest przede wszystkim obywanie się bez steru tylnego, który w silnikach dużej mocy musiałby być odpowiednio dużym, a zatem i ciężkim. Obracanie wielkich mas dużego silnika wiatrowego może być najłatwiej i najlepiej dokonywane przez silnik elektryczny. Poza tym łatwo jest w tym systemie dokonywać odstawiania silnika spod wiatru; osiąga się to przez odpowiednie przekręcenie podstawy ze stałymi stykami chorągiewki nastawczej dokonywane zwykle zdalnie.

System ten jest jednak bardziej złożony oraz wymaga do napędu silnika nastawczego dodatkowego źródła energii, które musi mu dostarczać energię również i podczas słabych wiatrów.

2. REGULACJA Szybkości obrotowej i mocy silników wiatrowych

W związku z ogromnie zmienną szybkością wiatru oraz potrzebą napędzania maszyn produkcyjnych zasadniczo z jednakową szybkością obrotową, wyłania się konieczność zaopatrzenia silników wiatrowych w urządzenia, które by dozwalały im obracać się podczas zmiennego wiatru z jednakową szybkością obrotową. Poza tym niekiedy wymaga się od silnika wiatrowego oddawania stałej mocy, a zawsze — ograniczenia ze względów konstrukcyjnych mocy silnika podczas zbyt silnych wiatrów. Poza tym urządzenia regulacyjne powinny zabezpieczać silnik wiatrowy przed rozbieganiem się w przypadkach jego odciążenia.

Bez urządzeń regulacyjnych już trzykrotny wzrost szybkości wiatru grozi zniszczeniem silnika nawet przy jego znamionowym obciążeniu. Dobre urządzenia regulacyjne powinny umożliwiać pracę silnika podczas wiatrów o szybkości do 20 m/sek oraz muszą go zabezpieczać przed skutkami huraganów o szybkości 40 — 50 m/sek.

Dla regulacji silników wiatrowych wykorzystuje się różne zasady przystosowywania się ich konstrukcji na wpływy zmienności wiatru, np. zmianę czynnej powierzchni koła wiatrowego, zmianę położenia koła wiatrowego względem kierunku wiatru, zmianę kąta natarcia łopat śmigieł, czyli przekręcanie łopat śmigieł względem ich osi, zmianę aerodynamicznych oporów śmigieł, zmianę obciążenia użytecznego itp. W celu otrzymania tych zmian w odpowiednim kierunku i czasie stosuje się różne urządzenia regulacyjne, które można podzielić na trzy następujące grupy.

Do jednej z nich, najliczniejszej, należą urządzenia, wykorzystujące dla swego działania siłę odśrodkową, do drugiej — urządzenia, wykorzystujące parcie wiatru, do trzeciej zaś urządzenia (nadające się wyłącznie do zespołów wiatrowo-elektrycznych) oparte w swym działaniu na zmianach wielkości elektrycznych (napięcia, częstotliwości itp.) wytwarzanego prądu elektrycznego.

Ponieważ różne urządzenia regulacyjne niejednakowo odpowiadają poszczególnym wymaganiom pracy silników wiatrowych, często stosuje się w jednym silniku parę ich systemów, np. jeden

system do regulacji szybkości obrotowej, inny do ograniczenia mocy, a jeszcze inny do zabezpieczenia silnika podczas huraganu albo jeden system do regulacji szybkości obrotowej i ograniczenia mocy, a drugi do zabezpieczenia od huraganu.

Wszystkie te urządzenia regulacyjne posiadają różne rozwiązania konstrukcyjne i niektóre z nich rozpatrzemy szczegółowiej.

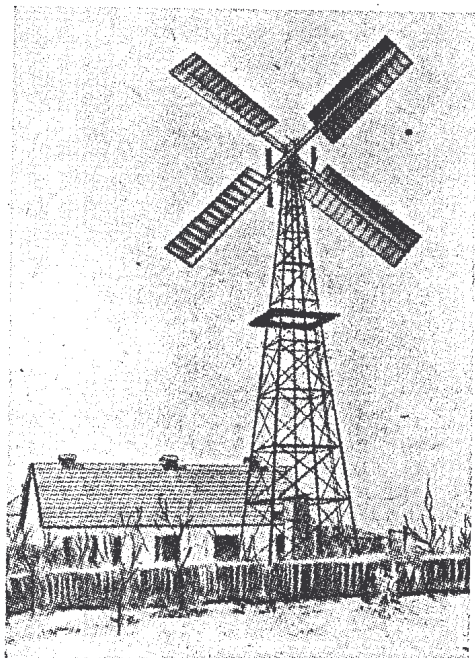
a. Regulacja przez zmianę powierzchni czynnych skrzydeł

Ten sposób regulacji jest najstarszym ze wszystkich innych i jest powszechnie stosowanym w wiatrakach wiejskich. Podczas umiarkowanego wiatru skrzydła wiatraka pracują całą swą powierzchnią, natomiast podczas wiatru silniejszego, gdy szybkość obrotowa skrzydeł wiatraka mogłaby być zbyt duża, powierzchnię czynną skrzydeł odpowiednio się zmniejsza. W wiatrakach dokonuje się tego zwykle ręcznie przez wyjęcie (podczas czterokrotnego zatrzymania na ten czas skrzydeł) części ich-deskowego poszycia. Podobnie postępuje się i z wiatrakami o skrzydłach z poszyciem płóciennym, w których na czas silniejszego wiatru zwija się część płótna.

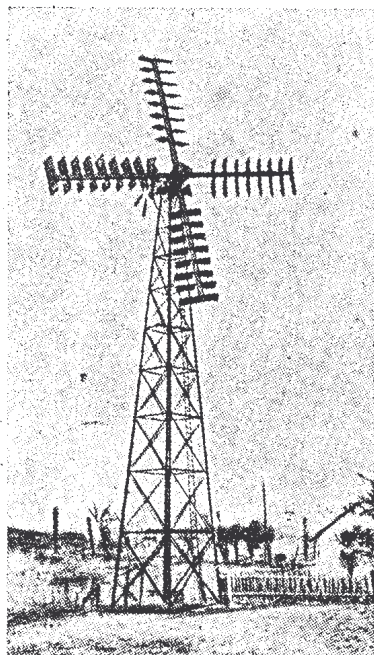
Postępowanie takie trudno nawet nazwać regulacją szybkości obrotowej, gdyż jest to raczej tylko przystosowanie wiatraka do pracy podczas spodziewanego wiatru; jest ono kłopotliwe i uciążliwe, a wobec nagle wzmagającego się wiatru, z czynnością tą można nie zdążyć, co grozi, dość często zresztą obserwowanym, połamaniem skrzydeł wiatraka.

W nowszych konstrukcjach silników wiatrowych regulowanych przez zmniejszenie powierzchni skrzydeł, np. w budowanych przez Lykkegaard Windmill Co w Danii, powierzchnia każdego z czterech skrzydeł jest podzielona na znaczną ilość sekcji, mogących się przekręcać względem osi poprzecznych do ramion skrzydeł. W przypadku zbyt dużej szybkości obrotowej skrzydeł poszczególne ich sekcje odpowiednio się przekręcają, w wyniku czego zmniejsza się powierzchnia czynna skrzydeł. Wiatr wówczas przepływa częściowo przez skrzydła niewykorzystany, a w wyniku obroty silnika się zmniejszają. Na rys. 82 przedstawiono taki silnik wiatrowy przystosowany do pracy w czasie słabego wiatru, zaś na rys. 83 — podczas wiatru bardzo silnego.

Przekręcanie sekcji skrzydeł dokonuje się samoczynnie pod wpływem odpowiednich ciężarków regulacyjnych umieszczonych na skrzydłach lub też przy pomocy specjalnego regulatora odśrodkowego. Sekcje te można przekręcać i ręcznie z dołu przy pomocy odpowiedniej linki, z czego się korzysta dla całkowitego zatrzymania silnika.



Rys. 82. Silnik wiatrowy regulowany przez zmianę wielkości czynnej powierzchni skrzydeł; powierzchnia skrzydeł — największa



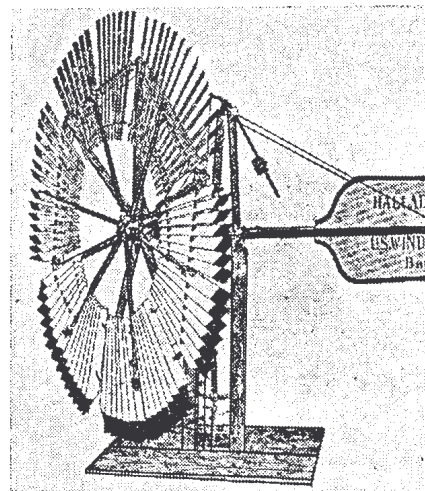
Rys. 83. Ten sam silnik z powierzchnią czynną najmniejszą

Zasadniczą wadą tego rodzaju regulacji silników wiatrowych jest niemożność nadania skrzydłom profili opływowych, co powoduje duże ich opory i straty aerodynamiczne. Za wadę również należy przyjąć bardzo złożoną budowę skrzydeł, posiadających znaczną ilość części ruchomych z łożyskami, osiami, dźwigniami itp.

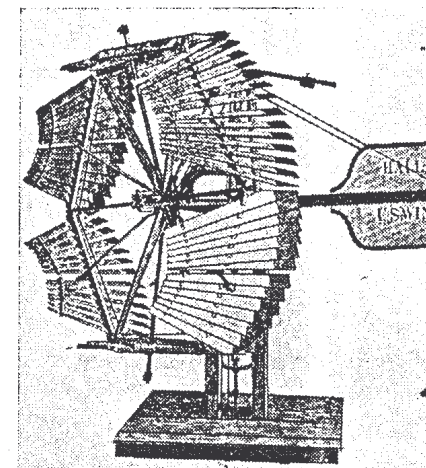
Do tej samej grupy można zaliczyć również regulację wielołopatkowego silnika wiatrowego systemu Halladaya, przedstawio-

nego na rys. 84 w przystosowaniu go do pracy podczas wiatru umiarkowanego, zaś na rys. 85 podczas wiatru bardzo silnego. Koło łopatkowe tego silnika jest podzielone na sześć sekcji, z których każda obejmuje kilka łopatek i może się przekręcać w całości na osi osadzonej w dwu łożyskach na końcach sąsiednich ramion koła łopatkowego.

Podczas umiarkowanego wiatru poszczególne sekcje łopatkowe w wyniku oddziaływania na nie odpowiednio urządzonego ciężaru znajdują się w jednej płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiatru. Podczas wiatru silnego jego parcie na zewnętrzne większe części sekcji powoduje przewyciężenie ciężaru i przekręcenie



Rys. 84. Silnik wiatrowy Halladaya z największą czynną powierzchnią koła łopatkowego



Rys. 85. Ten sam silnik z najmniejszą czynną powierzchnią koła łopatkowego

sekcji w położenie bardziej równoległe do kierunku wiatru. W wyniku tego zostaje zmniejszona powierzchnia koła wiatrowego, wskutek czego silnik zmniejsza swą szybkość obrotową. Przy największym przekręceniu się sekcji łopatkowych czynna powierzchnia koła zmniejsza się do jednej piątej.

Ten system regulacji nadaje się tylko dla silników wolnobieżnych i nie daje ograniczenia szybkości obrotowej koła wiatrowego; zmniejsza podczas zwiększenia się szybkości wiatru moment

obrotowy oraz osiowe parcie wiatru, ale nie zabezpiecza silnika przed rozbieganiem się w przypadku jego odciążenia.

Wadą takiej regulacji silników wiatrowych jest bardzo złożona budowa koła łopatkowego oraz krótki okres jego pracy (5—8 lat) z powodu znacznego zużycia się osi, dźwigni i sworzni urządzenia regulacyjnego.

b. Regulacja przez zmianę położenia koła wiatrowego względem kierunku wiatru

Regulacja ta polega na tym, że podczas zbyt silnego wiatru koło wiatrowemu nadaje się położenie skośne względem kierunku wiatru, wskutek czego przez koło przepływa mniejsza ilość powietrza; poza tym koło wiatrowe wykazuje w takim położeniu dodatkowe opory aerodynamiczne, powstałe na skutek zmiany kątów natarcia poszczególnych łopatek, a powodujące w wyniku odpowiednie zmniejszenie obrotów silnika wiatrowego.

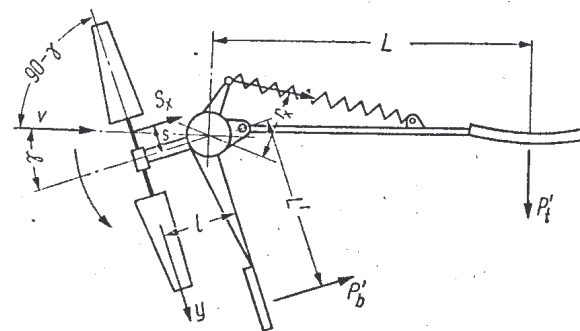
Ten rodzaj regulacji jest jednym z prostszych i bywa często stosowany w silnikach wiatrowych wielołopatkowych małej i średniej mocy oraz w wiatrakach wiejskich. W tych ostatnich ukośne ustawianie płaszczyzny obrotu skrzydeł względem wiatru jest dokonywane ręcznie przez odpowiednie przekręcanie całego wiatraka lub tylko górnej jego części. Czynność ta jest jednak uciążliwa i kłopotliwa, a przy tym jest tak niedoskonała, że trudno ją nawet nazwać regulacją.

W silnikach bardziej nowoczesnych regulacji szybkości obrotowej dokonuje się samoczynnie, przy czym stosowane są w tym celu dwa różne sposoby. Sposób pierwszy polega na użyciu steru bocznego, umieszczonego tuż za kołem łopatkowym równolegle do niego z prawej lub lewej strony i sztywno połączonej z głowicą silnika (rys. 86). Sposób drugi polega na bocznym przesunięciu osi koła łopatkowego względem pionowej osi obrotu głowicy silnika (rys. 87).

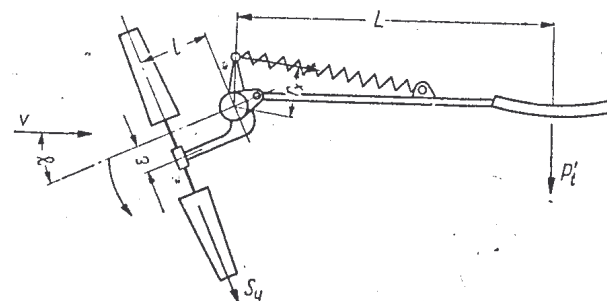
Działanie pod wpływem wiatru steru bocznego jest zupełnie podobne do działania steru tylnego, jednak zakres nachyleń jego płata do kierunku wiatru jest znacznie większy (od 90° do 0°), niż steru tylnego ($\pm 10^\circ$). Powierzchnia steru bocznego wynosi zwykle 0,02 do 0,04 powierzchni koła wiatrowego. Ster tylny w obu przypadkach jest osadzony w głowicy silnika przegubowo i jest utrzy-

mywany we właściwym położeniu względem koła wiatrowego naciągiem odpowiednio założonej sprężyny.

Moment regulacyjny w pierwszym przypadku uzyskuje się od parcia wiatru na ster boczny, w drugim zaś — od parcia wiatru na samo koło łopatkowe, przy czym ramię momentu jest w tym przypadku równe wielkości przesunięcia ϵ osi koła łopatkowego względem osi obrotu głowicy.



Rys. 86. Silnik wiatrowy regulowany przy pomocy steru bocznego



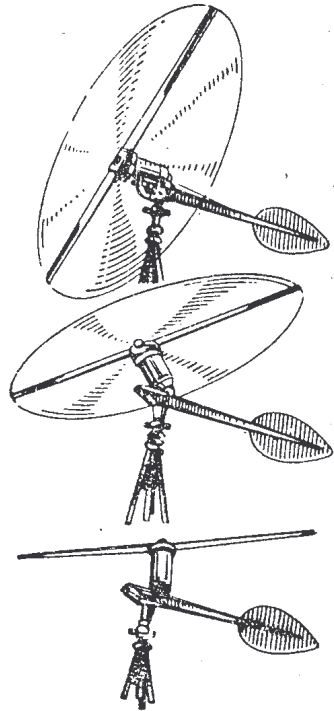
Rys. 87. Silnik wiatrowy regulowany przy pomocy bocznego przesunięcia osi koła wiatrowego

Regulacja wg tego systemu polega na coraz to większym odchyleniu koła łopatkowego od jego położenia prostopadłego do kierunku wiatru w miarę wzrastania jego szybkości, poczynając od szybkości obliczeniowej. Przy szybkości tej koło łopatkowe daje znamionową moc jeszcze w swym położeniu prostopadłym do kierunku wiatru.

Zmiany skośnego względem wiatru położenia kół łopatkowych przedstawione na rys. 86 i 87 odbywają się w płaszczyźnie poziomej; w innych konstrukcjach (rys. 88) skośne nastawianie koła

łopatkowego może być dokonywane w płaszczyźnie pionowej. Ten sposób zmiany położenia koła łopatkowego względem wiatru może być stosowany również i w silnikach największych mocy.

Podczas umiarkowanego wiatru silnik pracuje, wykorzystując wiatr całkowitą powierzchnią koła łopatkowego, zwróconego wtedy prostopadle do kierunku wiatru (rys. 89a i 90a). Podczas silniejszego wiatru jego parcie na ster boczny powoduje przewyciężenie naciągu sprężyny, w wyniku czego koło łopatkowe zostaje przekręcone w położenie skośne względem kierunku wiatru (rys. 89b). Podobnie i w typie drugim znaczniejsze parcie wiatru na koło łopatkowe powoduje przewyciężenie naciągu sprężyny i ustawienie się go skośnie do kierunku wiatru (rys. 90b).



Rys. 88. Skośne nastawienie się koła wiatrowego w płaszczyźnie pionowej

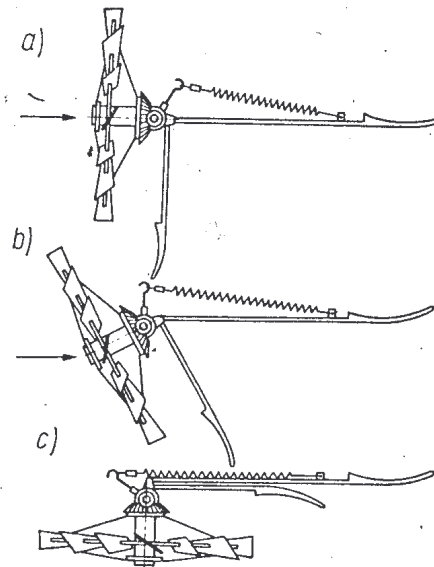
Położenia przedstawione na rys. 89c i 90c silnik przyjmuje podczas bardzo silnego wiatru lub przy ręcznym ściąganiu do siebie przy pomocy linki obu sterów dla całkowitego zatrzymania silnika.

Dzięki dużej prostocie urządzenia tego rodzaju regulacji znalazło ono szerokie zastosowanie w małych i średnich silnikach wielołopatkowych (wolnobieżnych). Dla silników śmigłowych (szybkobieżnych) ten rodzaj regulacji

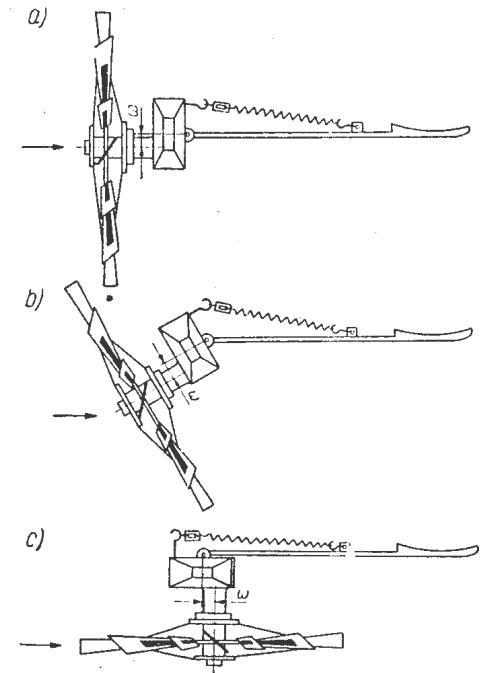
nie jest odpowiednim ze względu na występowanie w nim zbyt dużych szybkości kątowych obrotu głowicy względem pionowej osi, co powoduje zbyt duże momenty żyroskopowe, zależne od iloczynu oby szybkości kątowych $\omega \cdot \omega_1$. Przy takim bowiem regulowaniu obrotów silnika wiatrowego jego głowica znajduje się w ciągłym ruchu obrotowym względem pionowej osi powodowanym nie tylko zmianami kierunku wiatru, ale również i zmianami jego szybkości. Występujące w tych warunkach momenty żyroskopowe osiągają znośne wielkości tylko w silnikach wolnobież-

nych (o małych ω) natomiast w silnikach szybkobieżnych, o znacznie większych ω , wielkości tych momentów mogą już być niebezpieczne dla konstrukcji śmigła, zwłaszcza że konstrukcja śmigieł jest mniej sztywna od konstrukcji koła łopatkowego.

Jakkolwiek spotyka się niekiedy przypadki stosowania tego systemu regulacji i w silnikach śmigłowych, to jednak są one wyjątkowymi i przy tym dotyczą silników o względnie małej szybkokości.



Rys. 89. Schemat regulacji obrotów w silniku wiatrowym ze sterem bocznym



Rys. 90. Schemat regulacji obrotów w silniku z bocznym przesunięciem osi koła wiatrowego

Stan równowagi tego rodzaju układu regulacyjnego wyznacza się przy przyjęciu, że wymiary steru tylnego są tak duże, że pomimo naciągu sprężyny ster nie odchyła się od kierunku wiatru więcej niż na 10° . Dlatego koniecznym jest, aby dla silników wiatrowych ze sterami bocznymi (rys. 86 i 89) oraz z pionowymi wałami była zachowana następująca nierówność

$$P'_i \cdot L \cos \psi \geq P_b \cdot L' \cos \psi' + S_y l + S_x s - M_r \quad [111]$$

a dla silników z bocznym przesunięciem koła wiatrowego (rys: 87 i 90)

$$P'_t L \cos \psi \geq S_y l + S_x \varepsilon + S_x s \quad [112]$$

gdzie: P'_t — siła aerodynamiczna występująca na płacie steru tylnego,

L — ramię steru tylnego (do środka parcia wiatru),

P_b — siła aerodynamiczna występująca na płacie steru bocznego,

L' — ramię steru bocznego (do środka parcia wiatru),

ψ i ψ' — kąty nachylenia sił P'_t i P_b względem normalnej do powierzchni płatów sterowych,

S_y — aerodynamiczna siła boczna występująca na kole łopatkowym,

S_x — aerodynamiczna siła osiowego parcia wiatru,

l i s — ramiona działania odpowiednich sił (rys. 86),

M_r — moment reakcji siły międzyzębowej w przekładni stożkowej.

(Ster boczny umieszcza się zwykle z tej strony koła łopatkowego, aby kierunek reakcji momentu obrotowego był przeciwnie skierowany względem momentu steru bocznego),

ε — wielkość bocznego przesunięcia koła wiatrowego (zwykle $\varepsilon = 0,02D$ do $0,04D$).

Nadmienia się przy tym, że silniki wiatrowe, posiadające wały pionowe, muszą być zaopatrzone w stery boczne, gdyż nie mogą mieć przesuniętych w bok kół wiatrowych.

Stan równowagi układu regulacyjnego uzależniony od naciągu sprężyny P_{sp} wyrazi się dla silnika ze sterem bocznym i wałem pionowym następująco

$$P_{sp} r_x = P_b L' \cos \psi' + S_y \cdot l + S_x \cdot s - M_r \quad [113]$$

zaś dla silnika z bocznym przesunięciem koła wiatrowego

$$P_{sp} r_x = S_y l + S_x \varepsilon + S_x \cdot s \quad [114]$$

Te warunki równowagi są uzależnione od kąta γ , czyli od kąta odchylenia koła łopatkowego od położenia prostopadłego do kierunku wiatru i dla prawidłowej regulacji silnika muszą być zachowane dla każdej wielkości tego kąta.

Zaznacza się, że w zestawionych równaniach nie zostały

uwzględnione momenty sił tarcia, występujące w łożyskach i przegubach układu regulacyjnego, gdyż momenty te w porównaniu z momentami sił głównych są niewielkie. Jednak i te niewielkie momenty sił tarcia w stanach układu bliskich równowagi zyskują na znaczeniu i powodują pogorszenie regulacji silników wiatrowych, ujawniając się przede wszystkim w opóźnianiu właściwego nastawiania koła względem kierunku wiatru i to zarówno podczas zwiększania się szybkości wiatru, jak i podczas zmniejszania się. Dla prawidłowej regulacji silników wiatrowych konieczne jest zatem możliwie największe ograniczenie wielkości sił tarcia we wszystkich łożyskach i przegubach. Dotyczy to w mniejszym lub większym stopniu wszystkich systemów regulacyjnych.

W wyniku regulacji silników wiatrowych odchyleniem kół łopatkowych od kierunku wiatru uzyskuje się następujące zależności ich charakterystycznych wielkości

dla mocy

$$N_n = N \cdot \cos^3 \gamma \quad [115]$$

dla szybkości obrotowej

$$n_n = n \cdot \cos \gamma \quad [116]$$

gdzie N_n i n_n jest mocą i szybkością obrotową kół łopatkowych przy obliczeniowej szybkości wiatru v_r .

Z tych doświadczalnie uzyskanych zależności wynika, że zarówno moc silnika wiatrowego, jak i jego szybkość obrotowa przy stałym obciążeniu w ukośnym położeniu jego koła względem wiatru są takie, jak gdyby były uzyskiwane tylko przez składową szybkość wiatru, prostopadłą do płaszczyzny koła łopatkowego (rys. 68). Łatwo to bowiem stwierdzić, przedstawiając wzór [55] na moc koła wiatrowego w postaci

$$N = k v^3 \quad [117]$$

Zatem wzór [115] przyjmie postać

$$N_n = k v^3 \cos^3 \gamma = k (v \cdot \cos \gamma)^3 = k \cdot v_r^3 \quad [118]$$

skąd otrzymuje się równość

$$v \cdot \cos \gamma = v_r \quad [119]$$

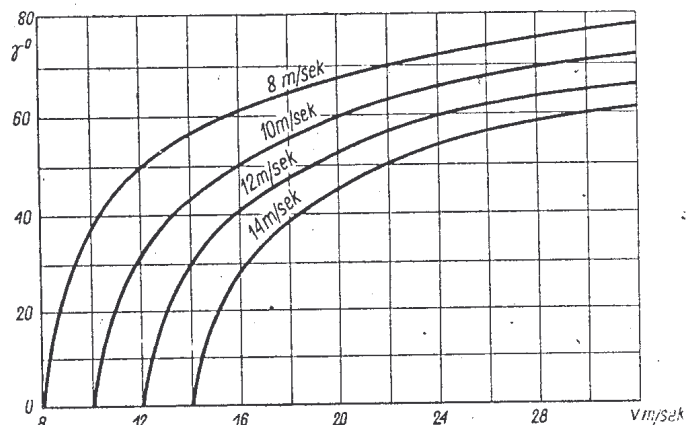
Z tego bardzo prostego związku można uzyskać zależność kąta odchylenia γ od szybkości wiatru dla warunków, aby przy do-

wolnych jego szybkościach otrzymywać stałą moc i stałą szybkość obrotową silnika wiatrowego. Zależność ta jest następująca

$$\cos \gamma = \frac{v_r}{v} \quad [120]$$

gdzie v_r jest szybkością wiatru obliczeniową, czyli największą jego szybkością, przy której koło łopatkowe pracuje jeszcze w położeniu prostopadłym do wiatru, dając znamionową moc. Zatem dla stałości mocy i szybkości obrotowej koła łopatkowego przy większych szybkościach wiatru koniecznym jest, aby kąt odchylenia γ był zawsze taki, aby $\cos \gamma$ był stosunkiem szybkości obliczeniowej do szybkości dolatowej wiatru.

Na rys. 91 przedstawiono zależność kąta odchylenia γ od szybkości wiatru dla kilku szybkości obliczeniowych (8, 10, 12, 14 m/sek).



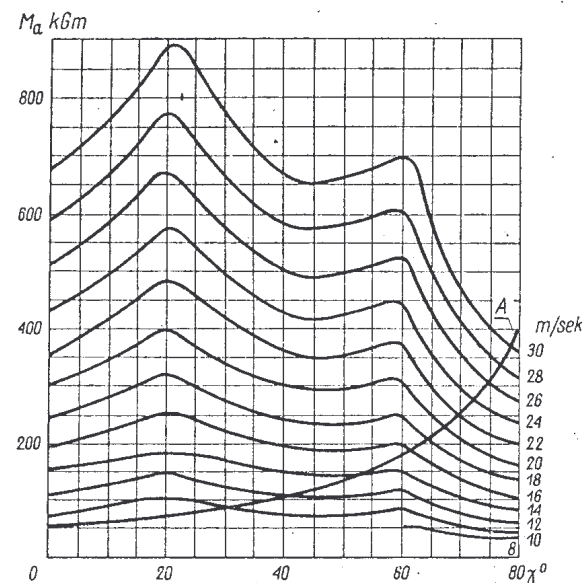
Rys. 91. Zależność kąta odchylenia γ od szybkości wiatru

Dla osiągnięcia w silniku wiatrowym tych zmian wartości kąta odchylenia γ przy dowolnych szybkościach wiatru musi być odpowiednio dobrany naciąg sprężyny regulacyjnej, utrzymującej w określonym położeniu względem steru tylnego cały układ regulacyjny.

W celu określenia właściwego naciągu sprężyny należy przede wszystkim obliczyć wg wzoru [113] lub [114] wypadkowy moment aerodynamicznych sił występujących w układzie regulacyjnym przy różnych szybkościach wiatru oraz przy różnych kątach od-

chylenia γ koła łopatkowego względem kierunku wiatru. Otrzymany w ten sposób dla jednego z silników wiatrowych pęk krzywych przedstawiono na rys. 92.

Korzystając z krzywych (rys. 91), przedstawiających wielkości kąta odchylenia γ konieczne dla utrzymania podczas wiatrów o różnych szybkościach stałej mocy i stałej szybkości obrotowej silnika wiatrowego (N_n i n_n), można wyznaczyć na odpowiednich krzywych rys. 92 punkty, odpowiadające tym kątom γ . Po połączeniu poszczególnych punktów otrzymuje się linię zmienności momentów naciagowych sprężyny M_{sp} , potrzebnych dla utrzymania przy dowolnych szybkościach wiatru stałej mocy i szybkości obrotowej koła łopatkowego (linia A na rys. 92).



Rys. 92. Zależność wypadkowego momentu aerodynamicznego od szybkości wiatru w silniku TB-8

Ponieważ naciąg sprężyny zmienia się wraz z jej wydłużeniem według linii prostej, konieczne jest dla jej pracy wg otrzymanej charakterystyki momentów dokonywanie odpowiednich zmian wielkości ramienia jej działania r_x .

Długość tego ramienia wyraża się następująco

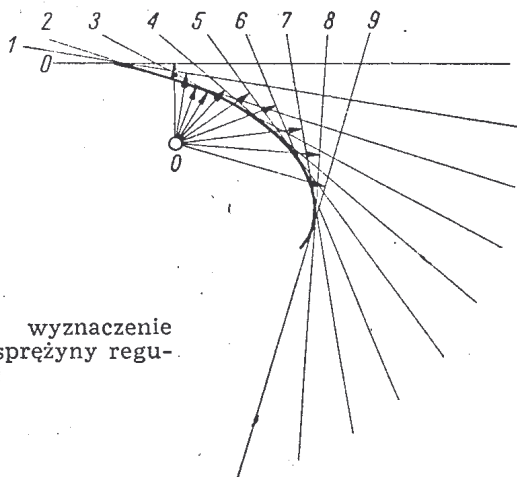
$$r_x = \frac{M_{sp}}{P_{sp}} \quad [121]$$

gdzie M_{sp} i P_{sp} są zależne od kąta odchylenia γ , czyli od szybkości wiatru v .

Właściwą zmienność ramienia momentu sprężyny r_x uzyskamy, gdy koniec jej zaczepienia będzie się przesuwał po odpowiednio ukształtowanej krzywej.

Kształt tej krzywej najłatwiej znaleźć wykreślnie w sposób następujący.

Wyznaczone z równania [121] wartości ramion momentów r_x (w zależności od kątów odchylenia γ), wykreślamy pod odpowiednimi kątami γ w obranej podziałce wokół punktu O (rys. 93). Kreśląc w końcach tych promieni linie prostopadłe, wyznaczamy kierunki działania naciągów sprężyny. Obwiednia tych kierunków wyznacza poszukiwany kształt krzywej, po której powinien się przesuwać koniec zaczepienia sprężyny, aby uzyskać odpowiednią regulację silnika wiatrowego.



Rys. 93. Wykreślne wyznaczenie kształtu krzywej dla sprężyny regulacyjnej

Regulacja tego systemu nie daje jednak określonego, niezależnego od obciążenia, ograniczenia szybkości obrotowej, a zasadniczo podczas większych od obliczeniowej szybkości wiatru utrzymuje tylko stały moment obrotowy. Regulacja ta zabezpiecza silnik przed osiowym przeciążeniem od parcia wiatru oraz może go chronić przed przeciążeniem w przypadkach napędu maszyn o wzrastającym wraz z szybkością obrotową momencie obrotowym, np. pomp odśrodkowych.

c. - Regulacja przez przekręcanie łopat śmigła względem ich osi

Ten sposób regulacji silników wiatrowych z uwagi na jego zalety jest obecnie stosowany coraz częściej. Działa on dobrze i pewnie nawet podczas najsilniejszych wiatrów i może być stosowany w silnikach wiatrowych małopłatowych (śmigłowych) wszystkich mocy.

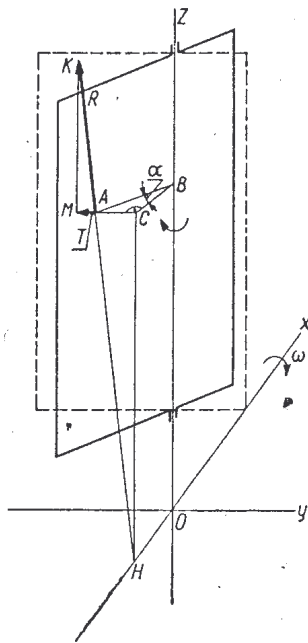
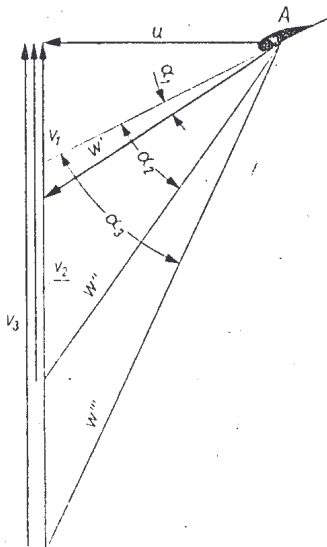
Regulacja ta polega na odpowiednim przekręcaniu płatów śmigła względem ich osi, na skutek czego uzyskuje się zmianę kąta natarcia profilu śmigła. Zmiana ta może polegać na zwiększaniu w miarę wzrostu szybkości wiatru tego kąta natarcia albo też, co jest stosowane znacznie częściej, na jego zmniejszaniu. W wyniku zmiany kąta natarcia podlega pożądanej zmianie siła nośna profilu, a zatem i jej składowa obwodowa P_t , istotna dla pracy silnika.

Nasuwa się tu natychmiast pytanie, czy nie można by wykorzystać do wymienionych celów śmigła o takim profilu, aby przy stałym jego zamocowaniu uzyskiwać, pomimo zmienności szybkości wiatru, prawie stałą szybkość obrotową silnika wiatrowego. Znane są bowiem profile o charakterystyce raptownie opadającej po przekroczeniu pewnego kąta natarcia, przy czym ten kąt natarcia w silnikach wiatrowych odnosi się do szybkości względnej przepływu (w_1 — na rys. 60). Na rys. 94 przedstawiono zmiany kąta natarcia profilu A w miarę powiększania się szybkości wiatru, napływającego do jego czoła, przy zachowaniu stałym jego kierunku oraz szybkości obrotowej śmigła. Kąty te zwiększają się, jak to widać na rysunku, w miarę zwiększania się szybkości wiatru.

Metoda ta istotnie prowadzi do celu, ale wobec bardzo szybkiego wzrostu mocy wiatru wraz z jego szybkością jest ona niewystarczająca do opanowania większych, a jednak w rzeczywistości występujących szybkości wiatru. Dlatego to w celu uzyskania całkowitej regulacji szybkości obrotowej śmigła przy wszystkich szybkościach wiatru konieczne jest dokonywanie zmian kąta natarcia profilu przez przekręcanie łopat śmigła względem ich osi.

Zaznaczyć tu należy, że ze względów konstrukcyjnych jest znacznie korzystniej uzyskiwać regulację silnika wiatrowego przez zmniejszenie kąta natarcia profilu w miarę wzrastania

szybkości wiatru, niż przez jego zwiększanie. W pierwszym przypadku bowiem śmigło zwraca się podczas silnego wiatru swą grubością do wiatru, w drugim natomiast swą szerokością, co powoduje konieczność ujęcia przez konstrukcję silnika znacznie większego osiowego parcia wiatru.



Rys. 94. Zmiany kąta natarcia α przy zwiększeniu się szybkości wiatru ($u = \text{const}$)

Rys. 95. Siły dynamiczne, występujące na obracającym się płacie

Do przekręcania łopat śmigła stosuje się różne urządzenia, oparte w swym działaniu najczęściej na wykorzystaniu siły odśrodkowej odpowiednio rozmieszczonych ciężarów, lub samych śmigieł, albo też na wykorzystaniu parcia wiatru na płaty śmigła.

Obliczenie zmian sił dynamicznych, działających na płat śmigła. Ponieważ wszelkie przekręcanie łopat śmigła względem ich osi powoduje podczas obrotu śmigła wokół osi obrotów zmiany sił odśrodkowych, działających na łopaty śmigła, należy przede wszystkim rozpatrzyć szczegółowiej zjawisko zmian tych sił dynamicznych, gdyż występują one w każdym tego rodzaju systemie regulacji.

Wyróżnijmy zatem punkt materialny A (rys. 95), należący do płaskiego (dla uproszczenia rozważań) płata śmigła, mogącego się przekręcać wokół osi z, a obracającego się z szybkością kątową ω względem osi x. Rzutem odległości punktu A od osi z na płaszczyznę przeprowadzoną przez oś z i oś x jest odcinek BC. Ponieważ promieniem szybkości obwodowej punktu A jest AH, siła odśrodkowa tego punktu materialnego wyniesie

$$R = m \cdot \omega^2 \cdot AH \quad [122]$$

Siła ta jest przedstawiona na rys. 95 jako wektor R, a jej składowa obwodowa jako wektor T.

Moment usiłujący obrócić punkt A względem osi z, wynosi

$$M_A = T \cdot BC \quad [123]$$

Z podobieństwa trójkątów AMK i CAH wynika, że

$$\frac{T}{R} = \frac{AC}{AH}$$

skąd:

$$T = R \frac{AC}{AH} = m \cdot \omega^2 \cdot AC$$

lecz

$$AC = AB \sin \alpha$$

$$BC = AB \cos \alpha$$

Po podstawieniu tych wielkości w wyrażenie [123] otrzymamy

$$M_A = m \cdot \omega^2 \cdot AC \cdot BC = m \cdot \omega^2 AB^2 \sin \alpha \cos \alpha \quad [124]$$

Ale iloczyn masy punktu materialnego przez drugą potęgę jego odległości od osi z ($m \cdot AB^2$) jest masowym momentem bezwładności tego punktu względem osi z, a suma takich iloczynów, obejmująca wszystkie punkty materialne całego śmigła, jest masowym momentem bezwładności całego śmigła względem osi z i oznacza się zwykle przez I, zatem

$$I = \sum m_i \cdot AB^2 \quad [125]$$

Moment, usiłujący obrócić cały płat śmigła względem jego osi, wynosi

$$M = \omega^2 \cdot I \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \omega^2 I \frac{\sin 2\alpha}{2} \quad [126]$$

Moment ten powoduje obrót płata śmigła w takie położenia, w których staje się zerem, czyli gdy $\alpha = 0$, lub $\alpha = 90$. W jednym z tych położen płat śmigła ustawia się równolegle do osi x , w drugim zaś prostopadłe do tej osi (linia przerywana na rys. 96), czyli leży w płaszczyźnie obrotu śmigła. W położeniu tym śmigło znajduje się w równowadze stałej w przeciwieństwie do położenia pierwszego — niestatecznego.

Moment skracający śmigło jest największy w położeniu średnim między obu wyżej wymienionymi, czyli przy kącie $\alpha = 45^\circ$, gdyż wtedy $\sin 2\alpha = 1$. Moment ten wynosi wtedy

$$M = \frac{1}{2} \omega^2 I \quad [127]$$

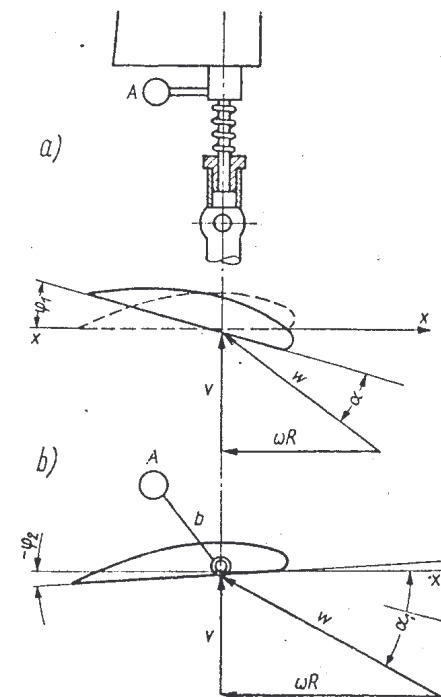
Regulacja obrotów śmigła przez zwiększenie kąta natarcia jego łopaty. Przystępując do rozpatrzenia różnych systemów regulacji obrotów silnika wiatrowego przez przekręcanie łopat śmigła względem ich osi w kierunku zwiększania kąta natarcia, łatwo zauważyć, że mogą być do tego wykorzystane rozpatrzone przed chwilą siły dynamiczne, występujące na łopatach śmigła. Dla uzyskania poprawnej regulacji śmigła kąta natarcia jego łopat podczas zwykłej pracy śmigła powinien od-

powiadać najwyższemu punktowi krzywej biegunowej profilu (rozd. II punkt 13), aby już po niewielkim powiększeniu tego kąta uzyskać znaczny spadek wielkości siły nośnej profilu.

Przekręcanie bowiem łopat śmigła od najmniejszego kąta natarcia przy rozruchu silnika do kąta największego podczas huraganu odbywa się w jednym kierunku i może być bardzo prosto przeprowadzone nie tylko przez siły dynamiczne płatów śmigła,

W miarę zwiększania się jednak szybkości wiatru, a zatem szybkości katowej śmigła, następuje przekręcenie się pod wpływem wzrastających sił dynamicznych łopat śmigła w położenie bardziej równoległe do płaszczyzny obrotów. Powoduje to zwiększenie kąta natarcia profilu śmigła, a zatem zmniejszenie jego siły nośnej i jej składowej obwodowej. Najmniejszą siłą obwodową w wyniku działania sił dynamicznych uzyskuje się w położeniu łopat śmigła przedstawionym na rys. 96a linią przerywaną, co jednak dla regulacji śmigła podczas silniejszych wiatrów jest jeszcze niewystarczające. W celu zmniejszenia szybkości obrotowej śmigła i podczas tych silniejszych wiatrów do dalszego przekręcania jego łopat należy użyć siły dynamicznej dodatkowego ciężaru A umieszczonego na ramieniu łopaty śmigła na pręcie b . Ciężar ten, będąc umieszczonym prawie prostopadłe do płata śmigła zmienia jego moment bezwładności w ten sposób, że łopata śmigła może się przekręcać również za położenie równoległe do płaszczyzny obrotu śmigła, zwiększając w dalszym ciągu swój kąt natarcia, a tym samym zmniejszając szybkość obrotową śmigła (rys. 96b).

Ten system regulacji odznacza się dużą prostotą urządzenia, gdyż przekręcania łopat śmigła dla celów regulacyjnych jest bardzo małe. Główna wada tego systemu regulacji polega na zwracaniu się łopat śmigła podczas silnych wiatrów ich szerokością do wiatru (przy mniejszych silnikach wiatrowych nie odgrywa to dużej roli). Natomiast ten system regulacji (przez przekręcanie łopat śmigła w kierunku zwiększania ich kątów natarcia) wykazuje poważną zaletę, że umożliwia łatwe zwiększanie momentu rozruchowego śmigła przez samoczynne zmniejszenie kąta natarcia łopat śmigła w stanie spoczynku.

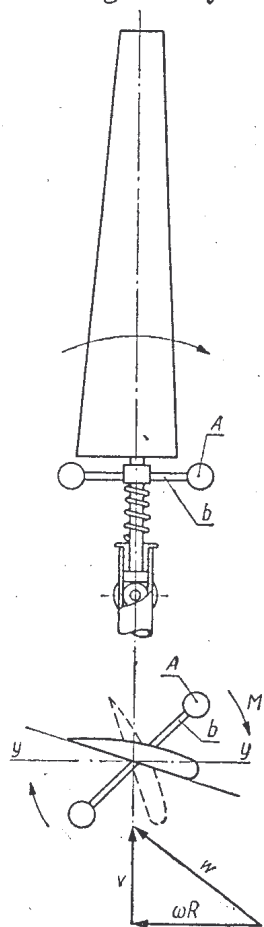


Rys. 96. Zasada działania regulacji syst. Fatiejewa-Peczowskiego

W systemie tego rodzaju regulacji (Fatiejewa — Peczowskiego, rys. 96) do odpowiedniego przekręcania łopat śmigła w miarę wzrastania szybkości wiatru została wykorzystana natu-

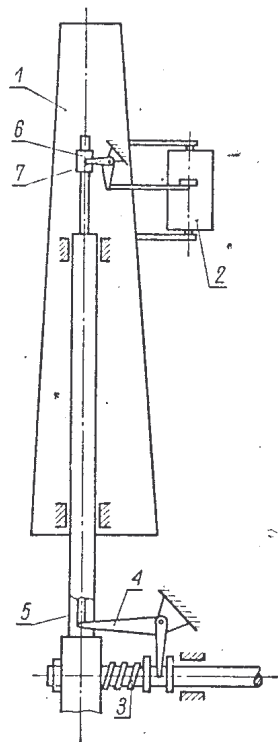
ale również i pod wpływem regulatora odśrodkowego umieszczonego na wale śmigła.

Ten system regulacji został zastosowany w zespole wiatrowo-elektrycznym (ВИМ Д-3,5) mocy 1 kW, którego konstrukcję opisano szczegółowiej w rozdz. VII.



Rys. 97. Zasada działania regulacji syst. Szamanina

Regulacja przez zmniejszanie kąta natarcia łopatek śmigła. Jednym z systemów regulacji szybkości obrotowej śmigła przez zmniejszanie kąta natarcia jego łopat w miarę zwiększania się szybkości wiatru jest system radzieckiego inżyniera W. Szamanina, przedstawiony schematycznie na rys. 97.



Rys. 98. Zasada działania regulacji syst. Sabinina: 1 — płatek łopaty śmigła, 2 — stabilizator, 3 — sprężyna odciągowa, 4 — dźwignia kątowa dolna, 5 — drążek pośredniczący, 6 — ciężarek regulacyjny, 7 — dźwignia górna

Do przekręcania płatów śmigła w pożądanym kierunku zostały w tym systemie wykorzystane siły dynamiczne łopat zaopatrzonych w odpowiednie ciężary, umieszczone u nasad płatów na prawie prostopadłych do nich ramionach. Ciężary *A*, umieszczone na końcach ramion *b* podczas obrotu śmigła usuwają pod wpływem sił dynamicznych tak przekręcić płaty śmigła, aby ciężary zajęły położenie bardziej zbliżone do płaszczyzny obrotów śmigła, czyli do osi *y* (rys. 97). Siłom tym przeciwdziała napięcie sprężyny nansuniętej na ramię łopaty śmigła.

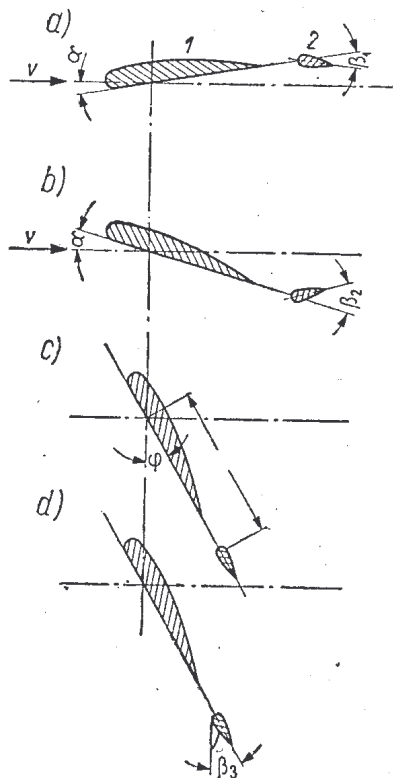
Dla uzyskania dostatecznej regulacji szybkości obrotowej śmigła wystarczają ciężary, których moment bezwładności przewyższa o ok. 30% moment bezwładności płatów śmigła.

W systemie regulacji szybkości obrotowej silników radzieckiego aerologa Sabinina (rys. 98) do przekręcania łopat śmigła pod wpływem sił odśrodkowych, występujących na ciężarkach regulacyjnych umieszczonych w płatach śmigła, użyto pośrednictwa dodatkowych płatów nazywanych stabilizatorami, a spełniających rolę aerodynamicznych siłowników. Stabilizator taki, posiadający zwykle powierzchnię czterokrotnie mniejszą od powierzchni nastawianego przez niego płata, jest umieszczony na odpowiednich wysięgach z tyłu łopaty śmigła w ten sposób, że może się przekręcać względem swej podłużnej osi. Odległość między osiami łopaty i stabilizatora stanowi zwykle 1,5-krotną szerokość łopaty śmigła.

Zastosowanie stabilizatorów umożliwi znaczne, bo ok. sześciokrotne, zmniejszenie wielkości ciężarków i sprężyn, a zatem i występujących tutaj sił, w stosunku do wielkości potrzebnych do bezpośredniego przekręcania płatów śmigła. Dzieje się to na skutek tego, że zmiany siły odśrodkowej występujące na ciężarku regulacyjnym, oddziałują za pośrednictwem dźwigni i cięgieł tylko na względnie niewielki, dokładnie zrównoważony stabilizator, zmieniając jego kąt nastawienia β względem płata śmigła. Na skutek działania na właściwie ustawiony stabilizator wiatru zostaje on względem osi łopaty obrócony, przez co zostaje przekręcona w pożądanym kierunku również i sama łopata śmigła.

W stanie spoczynku silnika płatek śmigła i stabilizator tworzą kąt β_1 , w wyniku czego łopata śmigła zajmuje takie położenie

względem kierunku wiatru, że nie występuje na niej żaden moment obrotowy (rys. 99). W celu uruchomienia silnika zwalnia się naciąg naprężonej do tego czasu sprężyny 3, przez co za pośrednictwem dźwigni 4 i 7 i drążka 5 przekręca się stabilizator o pewien kąt β_2 względem płata śmigła (rys. 99b). Pod działaniem wiatru stabilizator przekręca płat śmigła względem jego osi, aż do stanu równowagi między momentami sił aerodynamicznych,



Rys. 99. Schemat pracy stabilizatora

występujących na płatach łopaty śmigła i stabilizatora. W tym stanie równowagi płaty śmigła tworzą z kierunkiem wiatru kąt natarcia α , dzięki czemu śmigło może się obracać. W wyniku wystąpienia na śmigle szybkości obwodowej ($u = \omega R$) kąt β utworzony z kierunkiem względnej szybkości przyplwy staje się większy i stabilizator w dalszym ciągu przekręca łopate śmigła do nowego położenia równowagi, nadając łopacie odpowiedni kąt natarcia (rys. 99c).

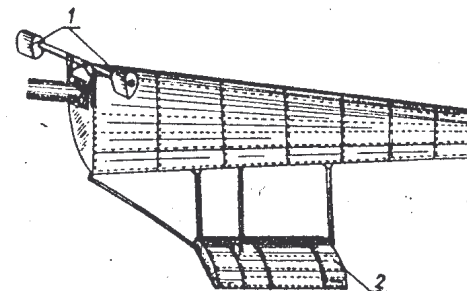
W momencie zwiększania się szybkości wiatru ponad szybkość obliczeniową, na skutek zwiększania się siły odśrodkowej ciężarka regulacyjnego 6 umieszczonego w płacie śmigła, przesuwa się on bardziej na zewnątrz, wskutek czego za pośrednictwem ramion i dźwigni przekręca stabilizator o pewien kąt β_3 (rys. 99d). Parcie wiatru wy-

wierane teraz na stabilizator, przewyciężając siły działające na płat śmigła przekręca go tak, że zmniejsza się kąt natarcia α , a szybkość obrotowa śmigła maleje.

Dla zniesienia wpływu sił dynamicznych śmigła, które są tutaj nie tylko zupełnie zbędne, ale nawet szkodliwe, gdyż przeciwdziałają pracy stabilizatora, zaopatruje się płat śmigła u jego nasady w odpowiednio umieszczone ciężary wyrównawcze

(rys. 100). Ciężary te swym momentem bezwładności równoważą moment bezwładności płata śmigła wraz ze stabilizatorem.

Urządzenie tego rodzaju regulacji szybkości obrotowej silników wiatrowych jest bardzo złożone i drogie oraz wymaga odpowiedniego doglądu, jednak daje regulację prawie doskonałą. Wahania szybkości obrotowej stwierdzone w normalnych warunkach pracy silnika nie przekraczają 3%, i to niezależnie od obciążenia silnika i szybkości wiatru, dochodzącej nawet do 40—50 m/sek.



Rys. 100. Płat śmigła ze stabilizatorem i ciężarami wyrównawczymi: 1 — ciężary wyrównawcze, 2 — stabilizator

Zastosowanie jednak stabilizatorów powoduje powiększenie oporów aerodynamicznych śmigła, w wyniku czego następuje obniżenie jego sprawności ($c_f = 0,23$ zamiast 0,36) oraz szybkobieżności ($Z = 4$ zamiast 6). Poza tym zastosowanie stabilizatorów odkształca niekorzystnie charakterystykę silnika oraz wymaga znacznego odsunięcia śmigła od osi wieży. Prócz tego podczas odstawienia silnika spod wiatru śmigło ze stabilizatorami znajduje się w ciągłym ruchu — to w jednym, to w drugim kierunku; poza tym rozruch takich silników jest utrudniony.

Ze względu na złożoną budowę i znaczny koszt urządzenia regulacyjnego opartego na przekręcaniu całej łopaty śmigła, stosowano je tylko w silnikach o średnicy powyżej 8 m, obecnie zaś system ten wcale nie jest stosowany.

W nowszych konstrukcjach syst. Sabinina-Krasowskiego w celu zmniejszenia wymiarów stabilizatorów, ciężarów wyrównawczych, sprężyn itp. skręcaniu względem osi śmigła poddaje się nie cały płat śmigła, a tylko jego część końcową, stanowiącą ok. jedną czwartą część płata (rys. 101).

Rozwiązanie takie jest tańsze od poprzedniego, a działa zupełnie zadowalająco. Stosuje się je w silnikach o średnicach ponad 12 m (w mniejszych tylko wyjątkowo). Wahania szybkości obrotowej obserwuje się do 10%. Pogorszenie przez stabilizatory sprawności silnika jest mniejsze, gdyż wynosi tylko 10%.

Jednak i ten system regulacji ma wady systemu poprzedniego: — ogromną złożoność budowy, wymagającą licznych przegubów, łożysk, dźwigni itp. wymagających dużej dokładności wykonania oraz starannego utrzymania,

— półtorakrotnie większy koszt silnika w stosunku do silników tej samej mocy, ale regulowanych bez stabilizatorów,

— utrudniony rozruch,

— niejednoczesne działanie mechanizmów regulacyjnych na poszczególnych łopatach śmigła (z powodu braku kinematycznego ich ze sobą powiązania), powodujące zachwianie równowagi dynamicznej śmigła oraz nierównomierny rozkład sił aerodynamicznych, powodujący drgania śmigła, a w wyniku tych drgań dość częste jego złamania,

— wrażliwość regulacji na zużycie się poszczególnych części mechanizmu regulacyjnego,

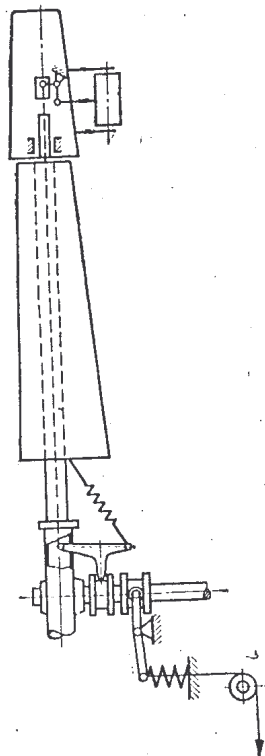
— zawrodozenie regulacji w przypadkach sadzi i oblodzenia, grożące zniszczeniem silnika.

Poza tym ze względu na stałe zamocowanie znacznie większych części płatów śmigła i wystawienie ich na działanie nawet

bardzo silnych wiatrów, konstrukcja śmigła musi być szczególnie mocna.

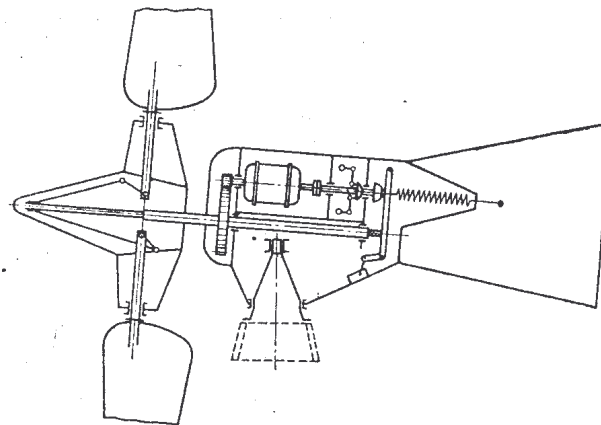
Szczegóły konstrukcyjne tego systemu regulacji są opisane w rozdz. VII.

System regulacji szybkości obrotowej silnika wiatrowego (Königa), wykorzystujący pracę typowego regulatora odśrodkowego jest przedstawiony na rys. 102.



Rys. 101. Zasada działania regulacji syst. Sabinina-Krasowskiego

W celu zwiększenia czułości regulacji oraz dla zmniejszenia ciężaru regulatora jest on umieszczony na przedłużeniu wału prądnicy, aby pracował przy możliwie dużej szybkości kątowej. Zmiany jego siły odśrodkowej w wyniku zmian szybkości wiatru, a zatem szybkości obracania się śmigła są przenoszone za pośrednictwem dźwigni ramion itp. poprzez wydrążony wał główny silnika na płaty śmigła osadzone obrotowo w swych ramionach.



Rys. 102. System regulacji Königa

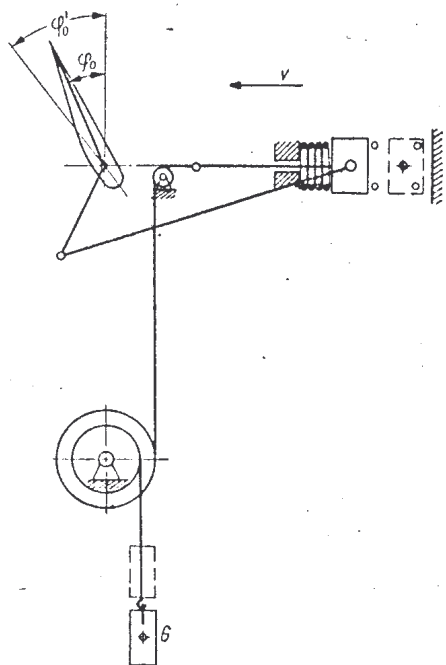
System ten jest jednak złożony i drogi.

W systemie regulacji Ufimcewa-Wietczinkina do obrotu płatów śmigła jest wykorzystywana siła parcia na nie wiatru. Ta zasada regulacji wydaje się najprostszą, a przez to najbardziej zachęcającą, jednak jej urzeczywistnienie jest bodajże najtrudniejsze, a działanie regulacji na tej zasadzie opartej — chyba najbardziej kapryśne spośród wszystkich innych rodzajów regulacji silników wiatrowych.

Osi obrotu łopat śmigła o profilu opływowym są położone bardzo blisko czołowych części profilu (rys. 103), wobec czego osiowe parcie wiatru na płaty usiłuje je przekrócić w położenie równoległe do kierunku wiatru. Temu przekręcaniu się płatów przeciwdziałają siły dynamiczne łopat, starające się ustawić je w płaszczyźnie ich obrotu, oraz naciąg ciężaru G lub sprężyny, za pośrednictwem odpowiednich dźwigni i cięgien. W wyniku współdziałania tych sił płaty śmigłowe powinny ustawiać się zawsze pod takimi kątami natarcia względem wiatru, aby szybkości obro-

towe śmigła oraz rozwijany przez nie moment obrotowy nie przekraczały określonych wielkości.

Regulacja ta wymaga dla zapewnienia poprawnego jej działania, aby moment obrotowy wywoływany siłami dynamicznymi był mniejszy od momentu sił aerodynamicznych oraz aby moment obrotowy, działający na łopaty śmigła był większy od momentu ciężaru G .



Rys. 103. Schemat regulacji syst. Ufimcewa i Wietczinkina

Pierwszy z tych warunków zmusza do stosowania tutaj śmigieł o możliwie lekkiej konstrukcji.

Trudności przy obliczaniu tego rodzaju regulacji polegają na tym, że trzeba w nim uwzględniać moment obciążeniowy śmigła. Moment ten przy ciągłej zmienności szybkości wiatru oraz obciążenia, a poza tym przy występującym zawsze w poszczególnych częściach urządzenia regulacyjnego tarczu, uniemożliwia wyznaczenie momentu wypadkowego, który by dał się skutecznie i zawsze zrównoważyć ciężarem lub naciągiem sprężyny. Pociąga to za sobą niemożność uzyskania dostatecznie określonego ograniczenia, szybkości obrotowej śmigła.

W związku z tymi trudnościami oraz ze znacznie droższym wykonaniem dość lekkich śmigieł z łopatkami, obracającymi się wokół swych osi, regulacja ta nie znalazła szerszego zastosowania.

Silniki wiatrowe, regulowane przez przekręcanie płatów śmigła względem ich osi w celu zmniejszenia kątów natarcia łopat, wykazują jednak utrudniony rozruch, a niektóre z nich łatwo ulegają uszkodzeniom w przypadkach zawiedzenia odśrodkowych regulatorów.

W silnikach tych konieczne jest ze względu na utrzymanie

właściwego dynamicznego wyrównoważenia przy wszystkich położeniach łopat jednocześnie i jednakowe przekręcanie się wszystkich płatów śmigłowych.

Nowy system regulacji silników wiatrowych zastosowany przez firmę Nordwind jest ciekawy z dwóch względów:

— regulacji mocy silnika dokonuje się przez uchylanie koła wiatrowego względem kierunku wiatru, zaś regulacji szybkości obrotowej — przez przekręcanie części płatów śmigła względem ich osi,

— do zmiany położenia koła wiatrowego względem kierunku wiatru dla celów regulacyjnych jest użyty ten sam nastawczy silnik wiatrowy (boczny), który jest przeznaczony do nastawiania głównego koła wiatrowego pod wiatr.

Urządzenie do regulowania mocy jest sterowane bezpośrednio przez wiatr i powoduje odwracanie koła wiatrowego od wiatru, poczynając od szybkości 8 m/sek, utrzymując jego moc na stałym poziomie aż do szybkości wiatru 18 m/sek; przy tej bowiem szybkości wiatru koło wiatrowe jest już całkowicie przekręcone w położenie równoległe do wiatru.

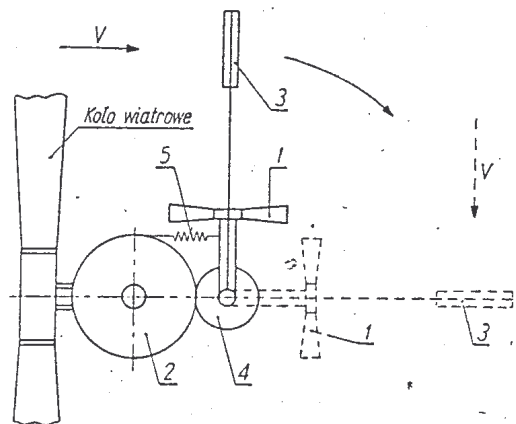
Urządzenie to przedstawione na rys. 104, działa następująco.

Nastawianie koła wiatrowego pod wiatr jest dokonywane w zwykły sposób przez nastawczy silnik boczny 1. Ten silnik nastawczy nie jest jednak sztywno związany z głowicą silnika wiatrowego 2, ale jest osadzony na dodatkowej głowicy regulacyjnej 4, która jest zaopatrzona w tarczę nastawczą 3. Tarcza ta jest umieszczona prostopadle do płaszczyzny obrotu wiatraka nastawczego i może się wraz z nim przekręcać o 90° . Obie głowice regulacyjna 4 i silnikowa 2 są wzajemnie sprzężone przy pomocy sprężyny 5, która podczas umiarkowanego wiatru utrzymuje tarczę nastawczą w położeniu prostopadłym do kierunku wiatru.

Gdy szybkość wiatru przekroczy 8 m/sek jego parcie na tarczę nastawczą przewycięża naciąg sprężyny i wiatrak nastawczy będąc przez to zwróconym częściowo pod wiatr, obraca się i przekręca nieco względem kierunku wiatru główne koło wiatrowe, ograniczając przez to jego moc. Podczas wiatru o szybkości ponad 18 m/sek tarcza nastawcza zostaje odchylona, aż do położenia prostopadłego do płaszczyzny obrotu głównego koła wiatrowego; koło to zostaje przez wiatrak nastawczy obrócone w położenie

równoległe do kierunku wiatru i wtedy zatrzymuje się, będąc w ten sposób całkowicie zabezpieczone przed zbyt silnym wiatrem.

Regulacja obrotów tego silnika jest dokonywana niezależnie od regulacji jego mocy w ten sposób, że pod wpływem siły odśrodkowej, występującej na skrajnych częściach płatów śmigła, części te odpowiednio się przekręcają względem swych osi. Ruchome części płatów stanowią ok. jednej trzeciej całkowitej powierzchni



Rys. 104. Schemat regulacji syst. Nordwind: 1 — silnik nastawczy (boczny), 2 — głowica silnika głównego, 3 — tarcza nastawcza, 4 — głowica silnika nastawczego, 5 — sprężyna sprzęgająca głowice silnika głównego, z głowicą silnika nastawczego

łopat, i w swym położeniu przekręconym powodują moment obrotowy przeciwnie skierowany względem momentu nieruchomych części płatów, w wyniku czego szybkość obrotowa silnika zmniejsza się. Silnik zatem nie może się rozbiegać, ani podczas huraganu, ani też w przypadkach całkowitego nawet jego odciążenia.

d. Regulacja hamowaniem aerodynamicznym

Regulacja szybkości obrotowej silników wiatrowych przy pomocy hamowania aerodynamicznego polega na sztucznym zwiększaniu oporów aerodynamicznych śmigieł w miarę zwiększania się ich szybkości obrotowej pod wpływem wzmagającego się wiatru.

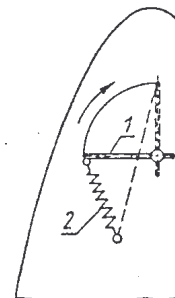
Zasadę tę urzeczywistnia się w wielu systemach regulacji kilkoma sposobami, z których tutaj zostaną opisane następujące.

Na rys. 105 przedstawiono system regulacji podany przez niemieckiego konstruktora Bilau'a, polegający na tym, że w odpo-

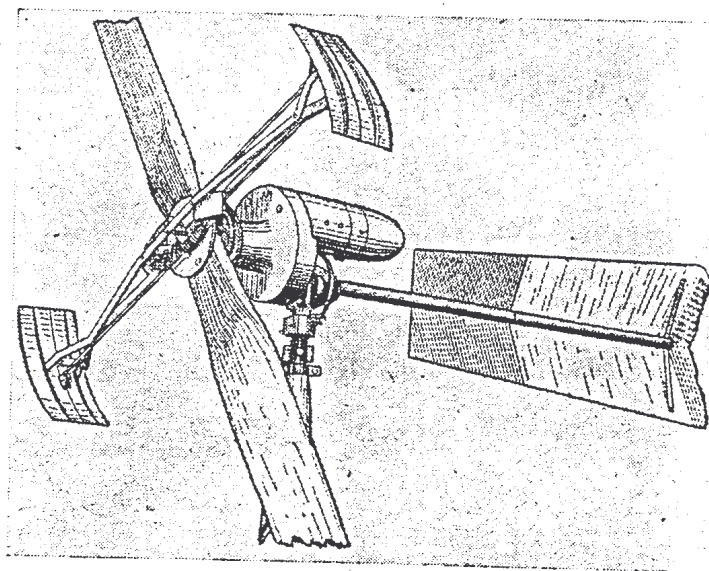
wiednim miejscu na płatach śmigła są umieszczone łukowe klapy, mogące się przekręcać w płaszczyźnie równoległej do płata śmigła, a utrzymywane w równowadze z siłą odśrodkową przez naciąg odpowiednich sprężyn.

Podczas umiarkowanego wiatru i normalnej szybkości obrotowej śmigła klapy regulacyjne napotykały w swym ruchu po obwodzie koła niewielkie opory aerodynamiczne. W miarę jednak wzrastania szybkości wiatru i zwiększania się szybkości obrotowej silnika naciąg sprężyn jest przewyżniany przez siłę odśrodkową klap, które odchylając się jednymi krawędziami nieco na zewnątrz, zwracają się w kierunku obwodowym większą powierzchnią, powodując odpowiednio zwiększony opór aerodynamiczny, a przez to hamowanie śmigła.

Podobną regulację szybkości obrotowej spotykamy w amerykańskich silnikach wiatrowych „Windcharger” (rys. 106) z tą tylko różnicą, że klapy regulacyjne są w nich umieszczone nie na samych płatach śmigła, ale na oddzielnych ra-



Rys. 105. Schemat regulacji syst. Bilaua: 1 — klapa regulacyjna, 2 — sprężyna naciągowa

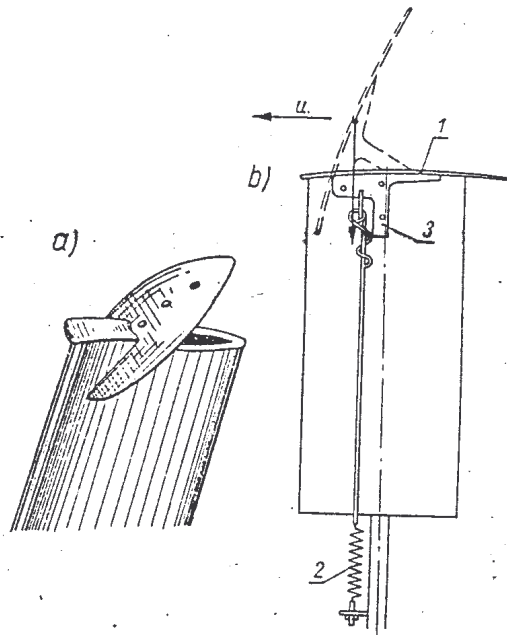


Rys. 106. Regulacja syst. Windcharger

mionach, znajdujących się w płaszczyźnie obrotowej śmigła, jednak do niego prostopadłych.

Również i w jednym z najnowszych silników szybkoobrotowych (Bauera) został zastosowany ten system regulacji, ale jest on tutaj inaczej urzeczywistniony.

W silniku tym do płata jednołopatowego śmigła przylega wąskie skrzydełko dodatkowe, które w tym położeniu uzupełnia profil śmigła zasadniczego w ten sposób, że całość wykazuje możliwie najkorzystniejsze właściwości aerodynamiczne. Po przekroczeniu pewnej szybkości obrotowej śmigła dodatkowe skrzydełko odpowiednio się przekręca, powodując zwiększenie oporów aerodynamicznych, a zatem zmniejszenie szybkości obrotowej śmigła.



Rys. 107. Regulacja syst. Perli: 1 — klapa regulacyjna, 2 — sprężyna naciągowa, 3 — ciężarek wyrównawczy kłapy

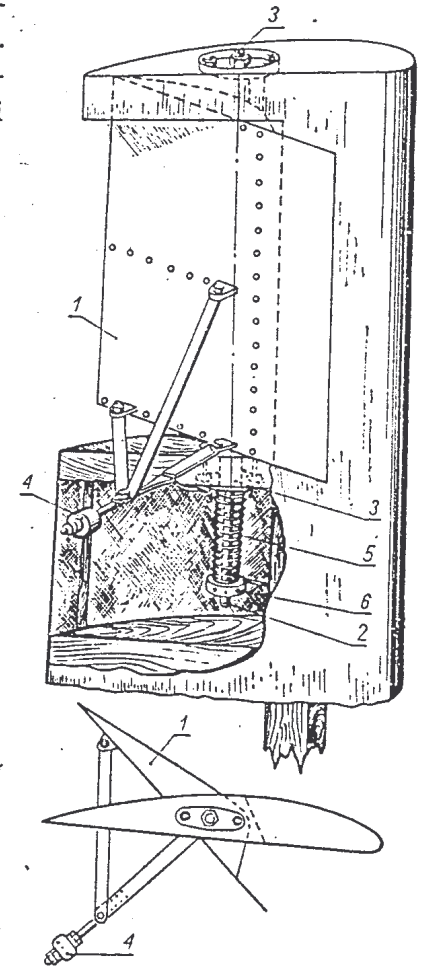
Zupełnie podobnie jest urządzona regulacja szybkości obrotowej silników wiatrowych systemu radzieckiego konstruktora Perli, stosowana do silników dwu- i trójłopatowych o średnicach do 10 m.

Urządzenia tego systemu wymagają jednak dokładnego i sta-

rannego wykonania i są dość drogie, ograniczają wzrost szybkości obrotowej śmigła do 15 % i zabezpieczają silnik przed rozbieganiem się do szybkości wiatru 20 m/sek. Ze względu jednak na szczeliny, w płacie śmigła sprawność silnika jest zmniejszona o ok. 3%. Urządzenie to jednak niezadowolająco pracuje podczas sady i oblodzenia.

Znacznie tańsza i lepsza od poprzedniej jest regulacja (tego samego konstruktora) dokonywana przez kłapy regulacyjne, umieszczone na końcach śmigła (rys. 107a); kłapy te odchylają się pod wpływem siły odśrodkowej po przekroczeniu określonej szybkości obrotowej śmigła prostopadle do jego szybkości obwodowej. W celu zmniejszenia w stanie spoczynku kłap ich oporów aerodynamicznych są one odpowiednio wygięte wg promienia, po którym krążą. Po osiągnięciu przez śmigło określonej szybkości obrotowej siła odśrodkowa, działająca na kłapę 1, rozciąga sprężynę 2, w wyniku czego kłapa się odchyła (rys. 107b linią przerywaną) i hamuje ruch śmigła. W celu zrównoważenia wpływu zmniejszania się w miarę odchylania kłapy ramienia momentu siły odśrodkowej kłapa jest zaopatrzona w odpowiedniego kształtu ciężarek 3.

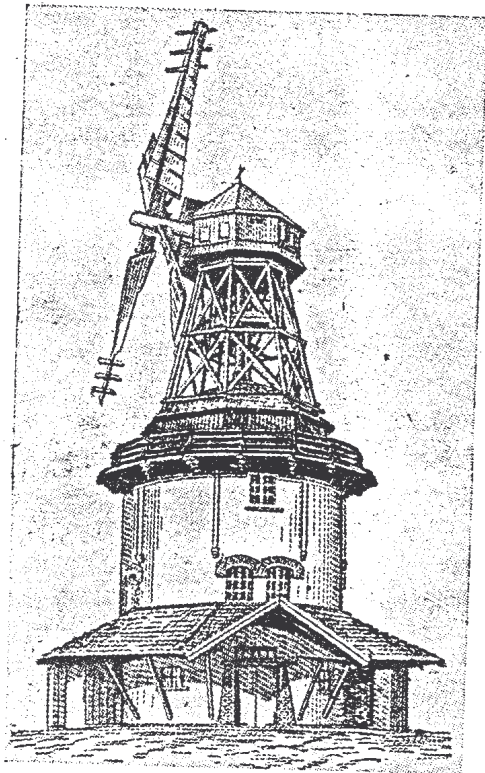
Urządzenie to nie wymaga specjalnie dokładnej obróbki poszczególnych części składowych, a utrzymuje stałą szybkość obrotową w granicach do 5 — 12 %. Ponieważ kłapy regulacyjne



Rys. 108. Regulacja syst. Kazynskiego-Szamanina: 1 — kłapa regulacyjna, 2 — oś kłapy, 3 — łożyska do osadzenia kłapy, 4 — ciężar regulacyjny, 5 — sprężyna naciągowa, 6 — nakrętka regulacyjna

zmniejszają opory indukcyjne śmigła, zwiększają przez to sprawność silnika przy mniejszych szybkościach wiatru.

Ten system regulacji stosuje się w silnikach o średnicach do 7 m i o wyróżnikach szybkobieżności ponad 4,5. Urządzenie to zabezpiecza w znacznej mierze silnik wiatrowy przed osiowymi przeciążeniami od parcia wiatru oraz przed rozbieganiem się do szyb-



Rys. 109. Wiatrak (ВИМЭ Д-16) z klapami regulacyjnymi

kości wiatru 15 m/sek. Poza tym system ten nie dopuszcza do przeciążeń silnika wiatrowego przy napędzie przez niego prądnicy prądu stałego albo też pompy odśrodkowej; wymaga jednak dodatkowego zabezpieczenia przed huraganami przez odwracanie w tych przypadkach jego płaszczyzny obrotów w położenie równoległe do wiatru (np. sterem bocznym).

W silnikach o średnicy śmigła większych od 7 m kłapy regulacyjne wypadają zbyt duże, aby mogły być płaskie i w związku z tym okazało się konieczne umieszczenie ich w odpowiednio wykonanych wycięciach płatów śmigła podobnie do lotek w płatach samolotowych (rys. 108). Do wychylania kłap w zależności od szybkości obrotowej śmigła użyto urządzenia, które zostało zastosowane przez Szamanina do obrotu całego płata śmigła (punkt 2c tego rozdziału) i w ten sposób powstał system regulacji Każyńskiego-Szamanina.

Kłapa 1 obraca się wraz ze swą osią 2 w łożyskach 3 umieszczonych w żebrach płata. Ciężar regulacyjny 4 został umieszczony na ramieniu prostopadłym do powierzchni kłapy. Wewnątrz płata znajduje się sprężyna 5, której jeden koniec zaczepia o ramię ciężaru, a drugi jest przymocowany do regulacyjnej nakrętki 6.

Do ochrony silnika przed huraganem konieczny jest ster boczny, powodujący odwracanie w tych warunkach płaszczyzny obrotu śmigła od wiatru.

To urządzenie regulacyjne jest dostatecznie proste w wykonaniu, a w pracy okazało się bardzo pewne.

Nadmienić tutaj jeszcze należy, że regulacja szybkości obrotowej przy pomocy kłap może znaleźć zastosowanie również i w wiatrakach wiejskich, jak to zostało urzeczywistnione w radzieckim wiatraku ВИМЭ Д-16 (rys. 109)

c. Regulacja obciążeniem użytecznym

Regulacja szybkości obrotowej silnika wiatrowego przy pomocy obciążenia użytecznego polega na tym, że w miarę wzrastania szybkości wiatru i zwiększania się szybkości obrotowej silnika powiększa się samoczynnie w odpowiedniej mierze jego obciążenie, powodując przyhamowanie śmigła.

Najprostszym systemem tego rodzaju regulacji szybkości obrotowej, bo obywatycznym się bez jakichkolwiek urządzeń regulacyjnych, jest praca zespołu wiatrowo-elektrycznego na odpowiednio dużą baterię akumulatorów elektrycznych.

Na skutek zwiększania się podczas silniejszego wiatru szybkości obrotowej prądnicy wzrasta napięcie ładowania akumulatorów; następuje przez to znaczny wzrost prądu ładowania, a w wy-

niku i momentu obciążeniowego, powodującego przyhamowanie zespołu wiatrowo-elektrycznego. Po zaniku silniejszego wiatru na skutek zmniejszenia się szybkości obrotowej zespołu napięcie prądnicy maleje, a przez to maleje i prąd ładowania oraz moment obciążeniowy zespołu, na skutek czego zespół zwiększa swą szybkość obrotową.

Ze względu na występujące przy takiej regulacji znaczne wahania napięcia na odbiornikach energii, które są w tych przypadkach przyłączane bezpośrednio do zacisków baterii akumulatorów, ten system regulacji stosuje się tylko w zespołach mniejszej mocy. Znaczne wahania niższego napięcia baterii akumulatorów (np. 6 V) nie jest bowiem tak przykre dla odbiorników, jak znaczne wahania napięcia wyższego (np. 110 V).

Do ograniczenia mocy zespołu podczas zbyt silnych wiatrów musi być stosowana w tym systemie dodatkowa regulacja zespołu np. przez przekręcanie łopat śmigła względem ich osi.

Ten system regulacji obrotów zespołów wiatrowo-elektrycznych może być urzeczywistniany nie tylko przez użycie akumulatorów elektrycznych, ale również (choć w mniejszym stopniu) przez zastosowanie kół zamachowych, które mają na celu wyrównywanie wahań mocy wiatru w pewnych niewielkich zakresach.

Znacznie doskonalszą tego rodzaju regulację szybkości obrotowej zespołów wiatrowo-elektrycznych i to dużych mocy, uzyskuje się przez równoległą współpracę tych zespołów z siecią elektryczną.

W zasadzie regulację taką można osiągnąć w zespołach zarówno prądu stałego, jak i zmiennego, a w tym ostatnim przypadku z prądnicą (generatorem) synchroniczną albo też z asynchroniczną. W związku jednak z rozpowszechnianiem się tylko sieci elektrycznych prądu zmiennego praktyczne zastosowanie mogą znaleźć tylko urządzenia prądu zmiennego.

Z teorii elektrotechniki wiemy, że do tego, aby generator synchroniczny mógł oddawać swą moc na sieć, zasilaną przez inne generatory, jest konieczne, aby szybkość kątowna jego siły elektromotorycznej wyprzedzała nieco szybkość kątowną napięcia sieci, co osiąga się przez zwiększenie obrotowego momentu napędowego. Wtedy generator przejmuje część obciążenia sieci na siebie, odciążając

zając oczywiście inne generatory, pracujące na tę sieć. Obroty zespołu wiatrowego mogą być w tych warunkach przy dowolnych szybkościach wiatru prawie jednakowe, gdyż generator jest utrzymywany w synchronizmie z częstotliwością sieci. W chwilach znacznego zmniejszenia się szybkości wiatru i zmniejszenia się wskutek tego momentu obrotowego silnika wiatrowego szybkość kątowna siły elektromotorycznej prądnicy opóźnia się względem napięcia sieci i w wyniku tego prądnicą pobierałaby moc z sieci elektrycznej. Aby do tego nie dopuścić odłącza się samoczynnie na ten okres czasu prądnicę od sieci.

Przy zastosowaniu w zespole wiatrowo-elektrycznym prądnicy asynchronicznej do oddawania mocy na sieć jest konieczne, aby jej szybkość obrotowa była nieco większa od szybkości synchronicznej (o ujemną wielkość „poślizgu”), przy czym moc oddawana szybko wzrasta wraz ze zwiększaniem się poślizgu. I w tym przypadku przy znacznym zmniejszeniu się szybkości wiatru jego moc może nie wystarczać do napędu zespołu, wobec czego jego obroty się zmniejszają, poślizg staje się dodatni, a prądnicą zmienia się na silnik napędzany energią z sieci elektrycznej. Aby do tego nie dopuścić odłącza się zespół wiatrowy na ten okres czasu od sieci.

Ten system regulacji szybkości obrotowej był już od dość dawna zastosowany i wypróbowany z pomyślnym wynikiem w największych silnikach wiatrowych (Bałakława).

TYPY SILNIKÓW WIATROWYCH

1. KLASYFIKACJA SILNIKÓW WIATROWYCH

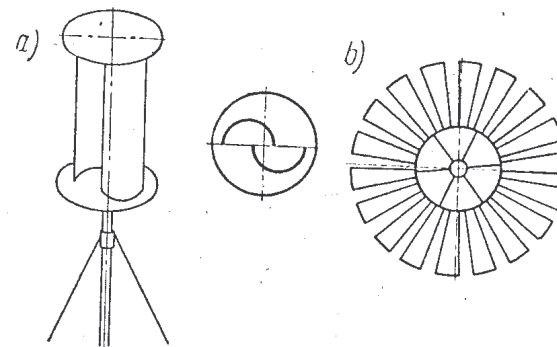
Wykorzystanie energii wiatru może być dokonywane tylko przy pomocy odpowiednich urządzeń, jak żagli, szybowców, wiatraków, turbin i silników wiatrowych itp., przy czym przedmiotem naszych rozważań są wyłącznie silniki wiatrowe w możliwie szerokim ich ujęciu, czyli łącznie z wiatrakami i turbinami wiatrowymi. Zależnie od zasady działania wiatru na istotne części tych urządzeń dzieli się je na dwie odrębne grupy: jedną wykorzystującą czołowe parcie wiatru i drugą wykorzystującą jego oddziaływanie boczne. Osi obrotu silników pierwszej grupy są ustawione poprzecznie do kierunku wiatru, zaś osi obrotu silników drugiej grupy są równoległe do tego kierunku. Wprawdzie nieliczna grupa silników rotorowych nie wykorzystuje w swym działaniu czołowego parcia wiatru, jednak ze względu na ich osi obrotu ustawione poprzecznie do kierunku wiatru zalicza się je do grupy pierwszej.

W grupie pierwszej o czołowym oddziaływaniu wiatru różnią się następujące silniki wiatrowe.

a. Silniki bębnowe o sztywnych lub składających się skrzydłach i o poziomej osi obrotu, pokazane schematycznie na rys. 54a. W silnikach tych wykorzystuje się czołowe parcie wiatru na skrzydła, których jedna połowa, w przypadku płaskich skrzydeł sztywnych, jest zasłonięta przed wiatrem odpowiednio ustawioną zasłoną. W innej odmianie tych silników pracę uzyskuje się na zasadzie różnicy sił wywieranych przez wiatr na obie strony odpowiednio ukształtowanych skrzydeł. Zarówno w tym ostatnim przypadku, jak i przy użyciu skrzydeł składanych zasłony są zbędne.

b. Silniki karuzelowe zupełnie podobne do poprzednio opisanych, ale o pionowej osi obrotu; przedstawiono je schematycznie na rys. 54b.

c. Silniki rotorowe systemu Savoniusa, przedstawione schematycznie na rys. 110a, oparte w swym działaniu na oddziaływaniu wiatru na czynne powierzchnie rotora przy dwukrotnej zmianie kierunku względnego przepływu powietrza.



Rys. 110. Schemat wiatrowego silnika: a) rotorowego; b) wielołopatkowego

W grupie drugiej o bocznym oddziaływaniu wiatru rozróżnia się następujące silniki wiatrowe.

a. Wiatraki, przedstawione schematycznie na rys. 55a, charakteryzujące się czterema skrzydłami zarówno o pierwotnej konstrukcji drewnianej, jak i konstrukcji bardziej poprawnej. Do tej grupy należałoby zaliczyć również i wiatraki z rotorami Flettnera.

b. Silniki wielołopatkowe (wolnobieżne), inaczej zwane turbinami wiatrowymi, przedstawione schematycznie na rys. 110b, w których konstrukcyjna część obrotowa, czyli koło łopatkowe jest zaopatrzone w większą ilość skrzydeł w postaci odpowiednio ukształtowanych łopatek z blachy lub desek. Płaszczyzna koła wiatrowego wymaga dla swej pracy ustawienia prostopadłego do kierunku wiatru, wobec czego oś obrotu koła jest równoległa do tego kierunku.

c. Silniki śmigłowe (szybkobieżne), przedstawione schematycznie na rys. 55b, posiadają śmigło dwu- lub trójłopatkowe podobne w swym kształcie do śmigieł samolotowych o możliwie małych oporach aerodynamicznych.

2. SILNIKI WIATROWE O POPRZECZNEJ DO KIERUNKU WIATRU OSI OBROTU

Silniki tego typu, ustępujące znacznie już ze względów teoretycznych silnikom o osi obrotu równoległej do kierunku wiatru, będą tutaj opisane tylko dla ujęcia całości zagadnienia wykorzystania energii wiatru i to tylko niektóre z nich, a przytem możliwie krótko oraz dla uświadomienia wynalazców—laików, że w przytłaczającej większości silniki ich pomysłu były już od dawna znane, ale wobec wymagań życia nie mogły się utrzymać i zostały zastąpione przez urządzenia lepsze.

Silniki tego typu mogły odgrywać pewną rolę w starożytności, ale w następstwie rozpowszechnienia się wiatraków skrzydłowych straciły swe znaczenie i dopiero w połowie XIX wieku ponownie odżyła myśl ich wykorzystania, jednak tylko na krótko wobec stwierdzenia ich wad. Zalety tych silników — prosta wykonania oraz w większości przypadków zbędność nastawiania ich pod wiatr są okupione tak wielkim ich ciężarem, że nie można nawet myśleć o większym ich rozpowszechnieniu.

a. Silniki bębnowe (o poziomej osi obrotu)

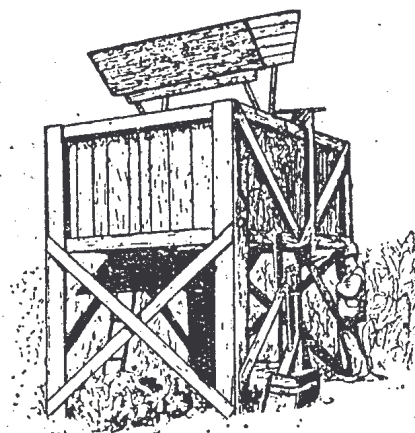
Silniki bębnowe przedstawione na rys. 111 były budowane na dużych obszarach stepowych Ameryki, gdzie występowały wiatry zasadniczo jednokierunkowe. Silniki takie odznaczają się nadzwyczajną prostotą budowy, ale są ciężkie, niesprawne i posiadają niewielką moc. Stosowane były one przede wszystkim do pompowania wody.

Ilość łopatek w takim silniku wynosi 4 do 8. Szerokość łopatek (promieniowa) nie powinna być większa od połowy długości ramienia, a to w celu ułatwienia odpływu powietrza z silnika po wykonaniu pracy.

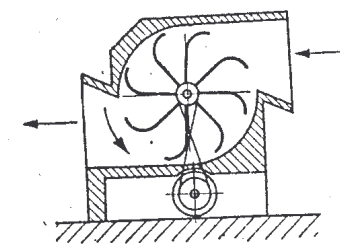
Do regulacji mocy takiego silnika, jak również do jego zatrzymywania stosuje się odpowiednie zasłony górne albo też otwierane ścianki przednią i tylną w jego skrzyni.

Silnik przedstawiony na rys. 112 wielokrotnie zgłaszany jako nowy pomysł, jest znany od dawna i został wykonany przez Motza.

Silnik ten odróżnia się od poprzedniego tym, że przy obu kierunkach wiatru utrzymuje ten sam kierunek obrotu. Jednak sprawność tego silnika pomimo bardziej skomplikowanej budowy jest również niewielka.



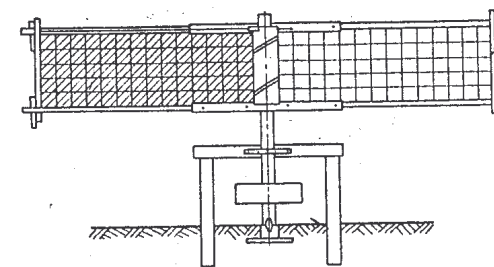
Rys. 111. Wiatrowy silnik bębnowy



Rys. 112. Silnik bębnowy Motza

b. Silniki karuzelowe (o pionowej osi obrotu)

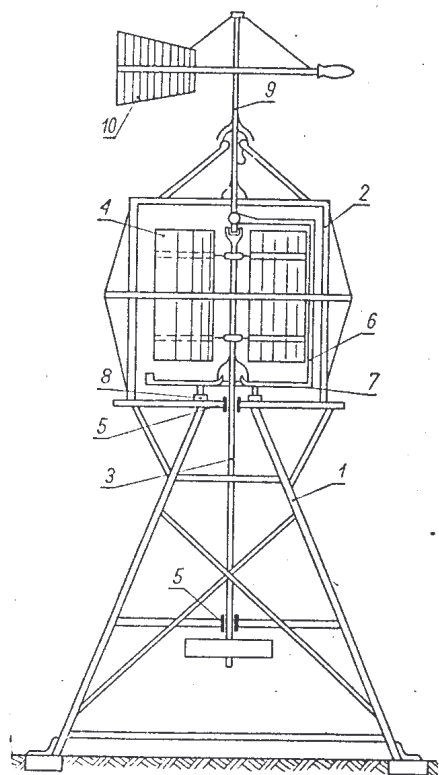
Najprostszym z tego rodzaju silników jest silnik pomysłu Nuchowa (rys. 113), posiadający szkielet w postaci dwu skrzyżowanych ze sobą ram drewnianych o przekroju prostokątnym i tworzących cztery ramiona silnika. Na ramach tych są rozpięte siatki



Rys. 113. Karuzelowy silnik wiatrowy Nuchowa

druciane lub sznurowe, zaś do górnych belek ram są przymocowane pręty żelazne, na których zawieszają się płócienne zasłony w ten sposób, aby wiatr mógł je przyciskać do siatki z jednej strony silnika, a odrzucać je od niej po stronie przeciwnej. Aby zasłona odrzucona mogła zajmować położenie możliwie poziome

oraz aby nie mogła być przez wiatr przerzucana przez górną krawędź ramy, jest do jej dołu przymocowany pręt żelazny, uwiązany do dolnej krawędzi ramy sznurkami odpowiedniej długości.



Rys. 114. Wiatrowy silnik Rollanstona: 1 — wieża silnika, 2 — szkielet silnika, 3 — wał silnika, 4 — skrzydła silnika, 5 — łożyska wału, 6 — zasłona, 7 — beleczki poziome, 8 — wałki toczne, 9 — oś steru, 10 — ster silnika

Bardziej udoskonalonym wiatrowym silnikiem karuzelowym jest silnik Rollanstona, przedstawiony na rys. 114.

Na wieży 1 znajduje się pomost, na którym jest umieszczony szkielet silnika 2. W osi tego szkieletu znajduje się pionowy wał 3 z umieszczonymi na nim sześcioma wygiętymi skrzydłami 4; wał 3 obraca się w łożyskach kulkowych 5.

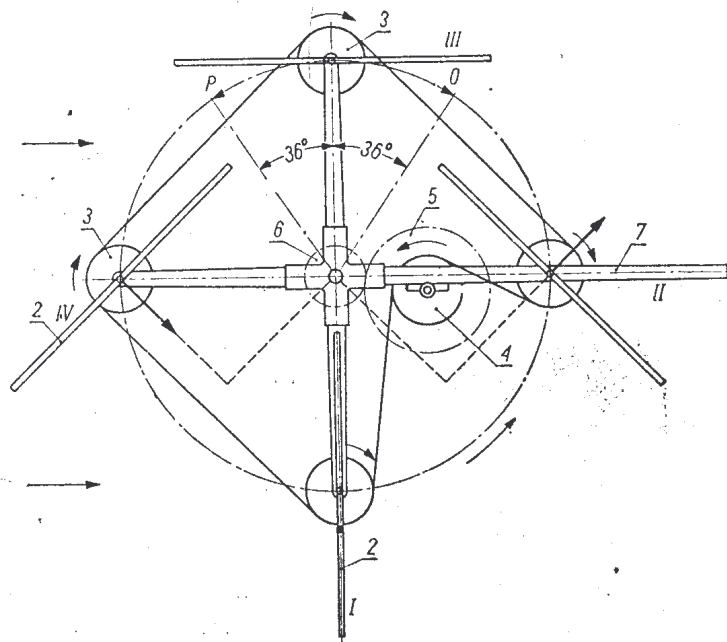
Do zakrycia przed wiatrem połowy skrzydeł silnika służy zasłona 6, powierzchni półwałkowej 6, przymocowana do ułożonych promieniowo beleczek poziomych 7, mogących się obracać wokół osi 3.

Do beleczek 7 są przymocowane wałki 8, toczące się po pomoście. Zasłona jest sztywno połączona u góry z pionową osią 9 steru 10, która jest podparta w łożysku stopowym wbudowanym w zakończenie wału 3. Ster 10, zajmując stałe

położenie równoległe do kierunku wiatru, ustawia zasłonę 6 w ten sposób że odpowiednia połowa skrzydeł wirnika jest dla wiatru odsłonięta, druga zaś połowa jest zasłonięta, wskutek czego silnik może się obracać.

Myśl jednoczesnego wykorzystania dla pracy silnika wiatrowego możliwie dużej ilości jego skrzydeł, bądź łopatek została urzeczywistniona w silniku pomysłu Jacsona (rys. 115). Na czterech ułożonych poziomo i skrzyżowanych ze sobą podwójnych

ramionach 1, mogących się obracać wokół środkowej osi pionowej silnika, są osadzone na osiach pionowych cztery skrzydła 2 mające postać płaszczyzn. Każde skrzydło jest zaopatrzone w przymocowane doń nieruchomo i obracające się wraz z nim koło zębate 3. Łańcuch Galla, opasowując wszystkie cztery koła 3, zazębia się z kołem 4 o takiej samej średnicy, osadzonym na osi obrotu, przy-



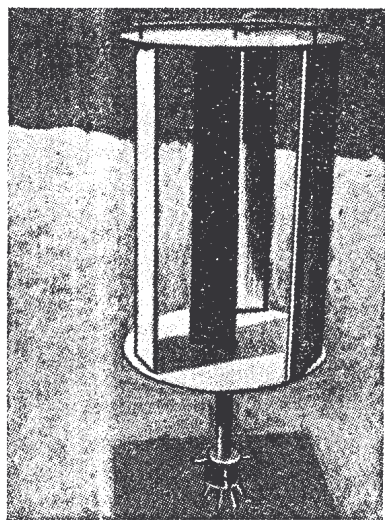
Rys. 115. Wiatrowy silnik Jacsona: 1 — ramiona silnika, 2 — skrzydła silnika, 3 — koło zębate skrzydłowe, 4 — koło zębate umieszczone na ramieniu silnika, 5 — koło zębate redukcyjne, 6 — koło zębate stałe, 7 — ster silnika

mocowanej do jednego z ramion 1. Z kołem 4 jest złączone wspólnie koło zębate 5, zazębiające się z osadzonym na środkowej osi silnika i mogącym się na niej obracać kołem 6, związanym zasadniczo nieruchomo ze sterem silnika 7. Koło 6 posiada średnicę dwa razy mniejszą od średnicy koła 5.

Podczas obrotu skrzydeł koło 5 toczy się po utrzymywanym w spoczynku przez ster 7 kole 6 w kierunku odwrotnym do obrotu wirnika i z prędkością dwa razy mniejszą. Wraz z kołem 5 obraca się również i koło 4 połączone łańcuchem Galla z kołami 3, po-

wodując przy całkowitym obrocie wirnika dokoła osi głównej pół obrotu skrzydeł dokoła ich osi również w kierunku odwrotnym do obrotu ramion wirnika.

Kierunek wiatru oraz kierunki obrotów poszczególnych części silnika są zaznaczone na rysunku strzałkami. Działanie całego urządzenia jest takie, że każde skrzydło w położeniu I ma całą swą płaszczyznę skierowaną prostopadle do kierunku wiatru, zaś w położeniu III — równoległe do kierunku wiatru. W położeniach II i IV płaszczyzny skrzydeł ustawiają się pod kątem 45° do kierunku wiatru i również są wykorzystywane dla zwiększenia mocy silnika. Poszczególne skrzydła silnika ustawiają się kolejno w ten sposób, że podczas całkowitego obrotu wirnika każde z nich pod działaniem wiatru pracuje użytecznie na 0,8 części swej drogi (288°), a tylko na 0,2 części tej drogi (72°), to jest od punktu O do P, powoduje moment obrotowy hamujący.



Rys. 116. Wiatrowy silnik Justa (widok)

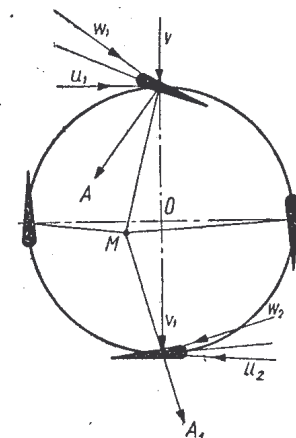
Ustawiania silnika odpowiednio do kierunku wiatru dokonuje ster 7, zaś zatrzymywanie silnika osiąga się przez ręczne przekręcenie koła zębatego 6 względem ramienia steru 7 o 90° i unieruchomienie go w tym położeniu. W wyniku tego osiąga się symetryczne położenie obu połów wirnika względem kierunku wiatru. Stan taki uzyskamy na rys. 115 gdy kierunek wiatru zmienimy o kąt 90° .

Podobny w działaniu silnik wiatrowy Justa (rys. 116) jest

wzorowany na okrętowym pędniku systemu Schneider-Voitha. W silniku tym skrzydła są ustawione równoległe do osi obrotowej silnika. Skrzydła te są względem swych osi przechylne w płaszczyźnie poziomej. Działanie silnika jest przedstawione schematycznie na rys. 117, na którym pokazano poszczególne położenia skrzydeł w różnych miejscach obwodu wirnika. Dla prawidłowej pracy wirnika położenia skrzydeł muszą być takie, aby prostopadle

poprowadzone do cięciw wszystkich profili przecinały się zawsze w pewnym punkcie M, odległym nieco od środka wirnika O.

Szybkość wiatru, działająca na przednie skrzydło wirnika, jest v , zaś na skrzydło tylne od strony wewnętrznej wirnika, po oddaniu części swej energii skrzydłu przedniemu — v_1 . Szybkości względne otrzymane z geometrycznego dodania szybkości wiatru do ujemnych szybkości obwodowych wirnika wynoszą (w_1 i w_2). Siły nośne profilu skrzydła prostopadle do tych szybkości względnych będą wynosić (A i A_1), przy czym, jak widać na rysunku, składowe obwodowe tych sił jakkolwiek nierówne, dają momenty obrotowe skierowane zgodnie.



Rys. 117. Schemat działania silnika Justa

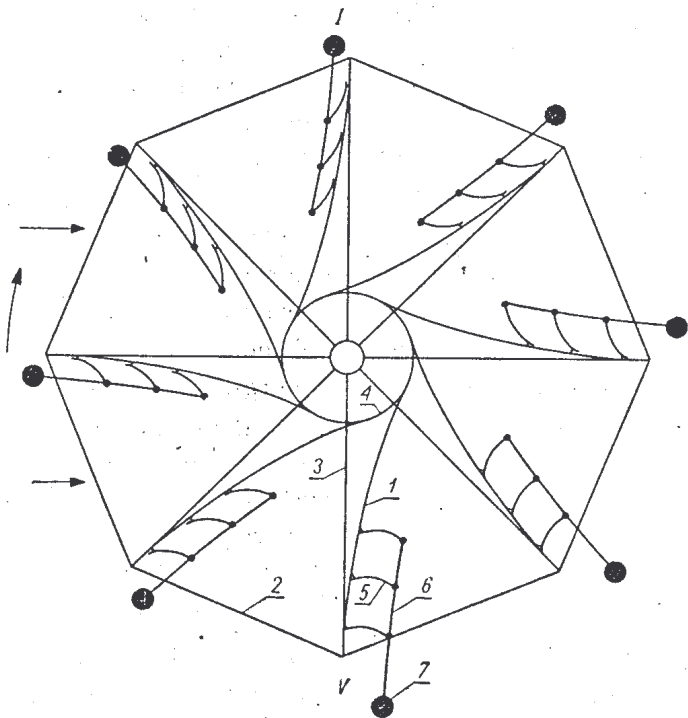
Wykorzystanie energii wiatru w tym silniku nie może być jednak duże, sprawność jego jest niewielka, a konieczność przechylania skrzydeł powoduje złożoność jego budowy oraz zużywanie na to energii.

Silnik pomysłu Rychłowskiego przedstawiony w rzucie poziomym na rys. 118 pracuje jeszcze na innej, korzystniejszej zasadzie, niż poprzednio opisane. Jego skrzydła są tak ukształtowane oraz tak rozmieszczone, że powodują z jednej strony mniejsze opory aerodynamiczne, z drugiej zaś strony większe wykorzystanie energii wiatru.

Liczba skrzydeł w tym silniku może być różna, a każde z nich składa się z odpowiednio zakrzywionej listwy stalowej 1. Zewnętrzne końce listew są ze sobą powiązane cienkimi prętami 2, a oprócz tego za pośrednictwem prętów 3 są połączone z pierścieniem 4. Do wklęsłej powierzchni listew są przymocowane za pośrednictwem sprężyn odpowiednio wygięte łopatki 5, których zewnętrzne krawędzie są połączone przegubowo cięgnami 6, zaopatrzonymi na zewnętrznych końcach w ciężary 7. Sprężyny są tak dobrane, że podczas umiarkowanego wiatru skrzydła ustawiają się względem wiatru w położenie najkorzystniejsze (położenie I na (118), natomiast podczas silniejszego wiatru na skutek zwiększenia

szania się szybkości obrotowej silnika, a przez to i siły odśrodkowej ciężarów 7, ciągną 6 naciągają sprężynowe połączenia skrzydeł, nadając im położenie względem wiatru mniej korzystne (np. położenie V na rys. 118).

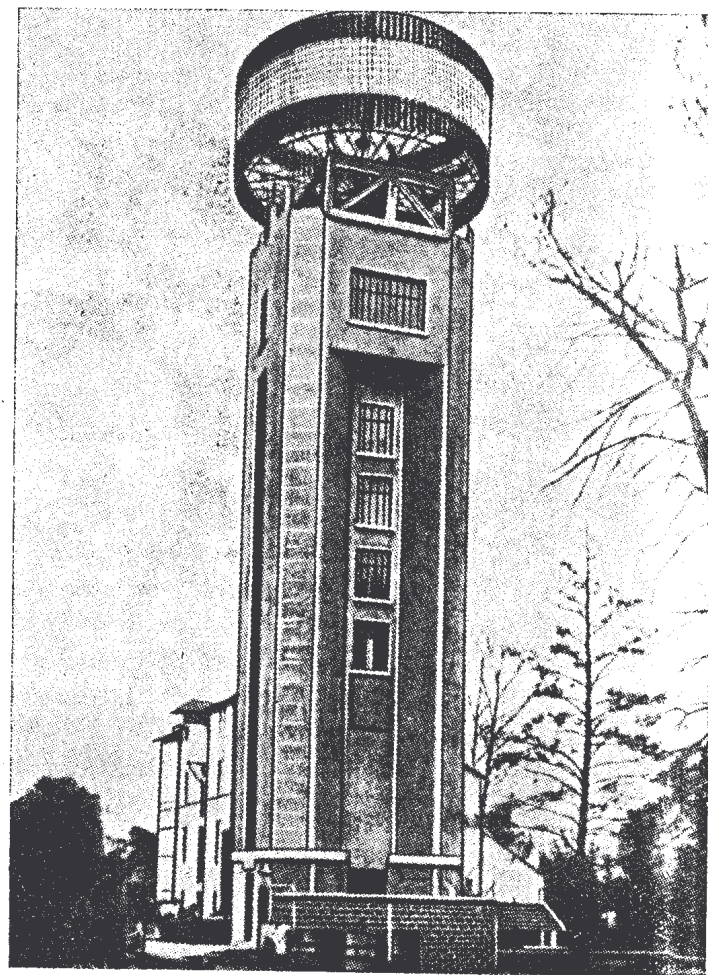
Przedstawiony na rys. 119 silnik wiatrowy pomysłu francuskiego konstruktora Benoist, zbudowany w r. 1935, daje świadectwo o tym, jakie wymiary mogą osiągać w rzeczywistości nieracjonalne pod tym względem wykorzystania energii wiatru urządzenia.



Rys. 118. Wiatrowy silnik Rychłowskiego

Silnik ten jest zaopatrzone w 120 łopatek blaszanych odpowiednio wygiętych i ustawionych na obwodzie wirnika pod pewnym kątem. Wysokość silnika wynosi 4 m, a jego średnica — 10 m. Ciężar części metalowych wynosi 4 t. Silnik został umieszczony na wieży wysokości 30 m i napędza za pośrednictwem przekładni zębato-pasowej o stosunku 1:125 wentylator do przewietrzania magazynu zbożowego.

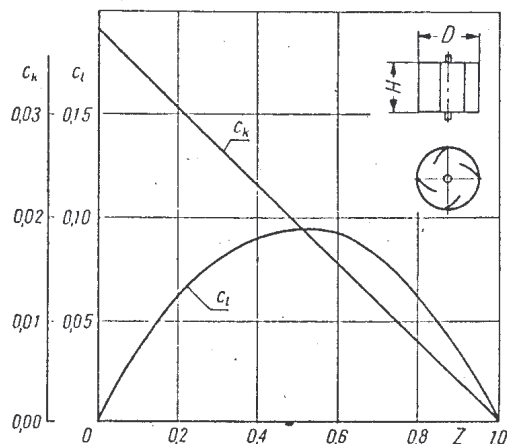
Moc tego silnika przy szybkości wiatru 4 m/sek wynosi 3 KM przy 6 obr/min, natomiast przy szybkości wiatru 8 m/sek — 12 KM przy 12 obr/min. Przy najsilniejszym wietrze silnik ten nie osiągał większej szybkości obrotowej niż 15 obr/min. Przez wykonawcę



Rys. 119. Wiatrowy silnik Benoista

uważane to jest za wielką zaletę silnika, a jednak świadczy to o wielkich w nim stratach energii wiatru. Poza tym na tę regulację silnika wywiera wpływ wentylator, który przy wzroście szybkości obrotowej zużywa znacznie większą moc.

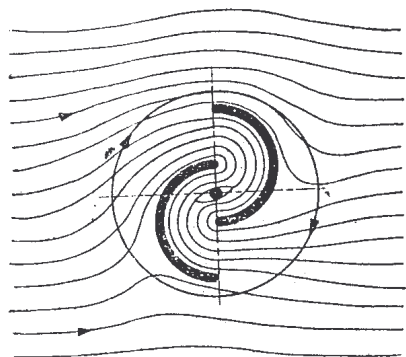
Na rys. 120 podano charakterystyki współczynnika momentu obrotowego c_k , oraz współczynnika wykorzystania energii wiatru c_l , dotyczących podobnego silnika wiatrowego, lecz o znacznie mniejszej ilości łopatek.



Rys. 120. Charakterystyka silnika karuzelowego

c. Silniki rotorowe

Silnik wiatrowy Savoniusa, zwany inaczej rotorem Savoniusa, którego przekrój poziomy przedstawiono schematycznie na rys. 121, składa się w zasadzie z dwu osłon o powierzchniach



Rys. 121. Przekrój poprzeczny rotora Savoniusa

półwalcowych ustawionych względem siebie w ten sposób, aby można uzyskać między nimi przepływ powietrza z dwukrotną zmianą jego kierunku o 180° . Powierzchnie półwalcowe są od dołu i od góry przykryte okrągłymi tarczami płaskimi.

Jakkolwiek wygląda pozornie, że i w takim rotorze jest wykorzystywane tylko czołowe parcie wiatru, to jednak w istocie rzeczy zjawisko to jest zupełnie inne.

Ponieważ moment obrotowy takiego rotora, zwłaszcza przy mniejszych jego szybkościach obrotowych, nie jest stały, umiesz-

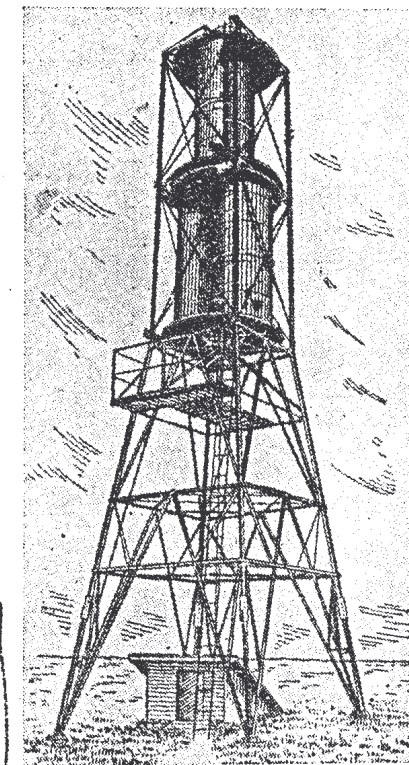
cza się zwykle na jednym wale dwa rotory przekręcone jeden względem drugiego o 90° . Na rys. 122 przedstawiono taki silnik z rotorami Savoniusa, zaś na rys. 123 podano charakterystykę współczynnika momentu obrotowego c_k oraz współczynnika wykorzystania energii wiatru c_l . Z wykresu tego wynika, że współczynnik c_l dla tego rodzaju rotorów wynosi w najkorzystniejszym przypadku ok. 0,18.

Oczywiste jest, że zamiast powierzchni półwalcowych (o przekroju półkolistym) można by w rotorach zastosować i inne powierzchnie np. o przekroju kątowym (rys. 124a), eliptycznym (rys. 124b), lub wg krzywej spłaszczonej (rys. 124c); również można by zastosować i powierzchnie opłoflowane (rys. 124d), zaś każda z powierzchni wymienionych mogłaby mieć różne stosunki wymiarowe i inaczej mogłaby być umieszczona.

Wiele tego rodzaju rotorów zostało zbadanych doświadczalnie, jednak najkorzystniejsze wskaźniki ruchowe posiadają rotory z płaszczyznami półwalcowymi.

Na rys. 125 podano np. charakterystyki współczynnika momentu obrotowego c_k oraz współczynnika wykorzystania energii wiatru c_l rotora z powierzchniami wg krzywej spłaszczonej (rys. 124c).

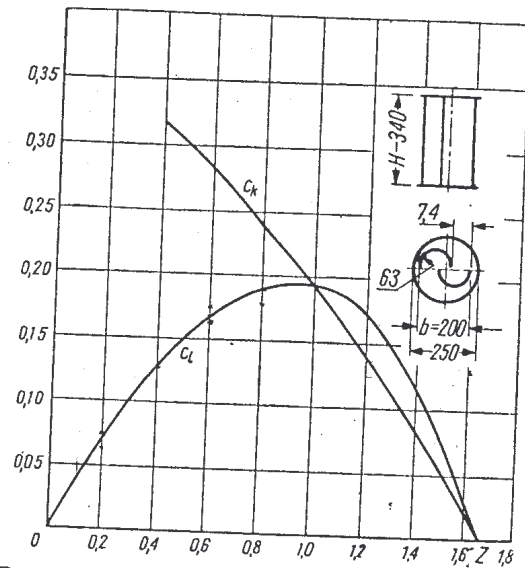
Porównując te charakterystyki z charakterystykami podanymi na rys. 123 łatwo zauważyć, że wprawdzie wyróżniki szybkości obu rotorów są jednakowe, to jednak wielkość momentu obrotowego rotora z powierzchniami spłaszczonymi jest znacznie



Rys. 122. Silnik wiatrowy z dwoma rotorami Savoniusa

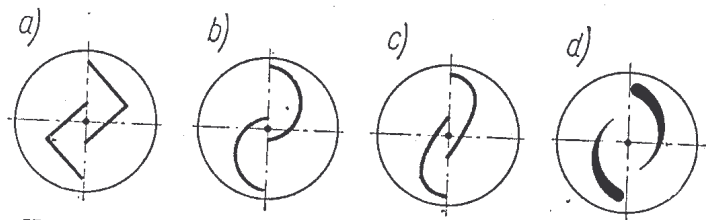
mniejsza. Współczynnik wykorzystania energii wiatru c_i jest jednak tutaj znacznie większy, gdyż osiąga wielkość $c_{i_{max}} = 0,23$.

Już z tego względu, że wyróżnik szybkobieżności dla tego rodzaju rotorów może być większy od 1, można sądzić, że rotor taki



Rys. 123. Charakterystyka rotora Savoniusa

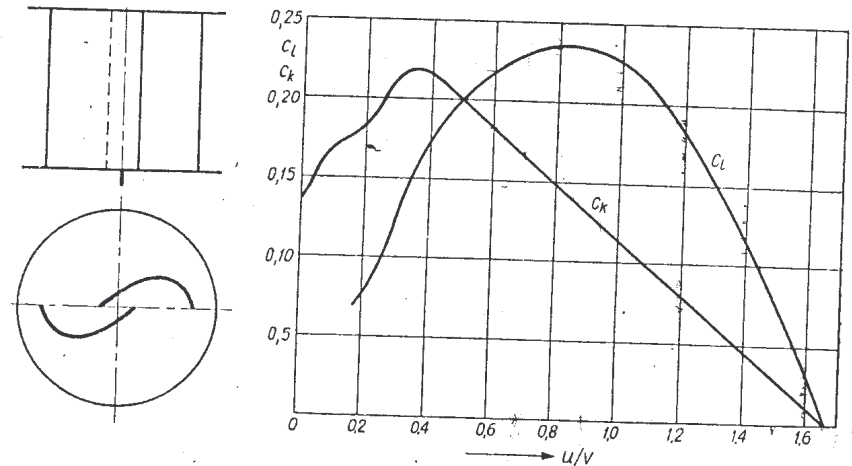
działa na innej zasadzie, niż silniki wykorzystujące czołowe parcie wiatru. Zaznaczyć należy, że rotor Savoniusa podczas swego wirowania ujawnia również zjawisko Magnusa (patrz rozdz. II, punkt 6), czyli podlega działaniu siły poprzecznej do jego osi obrotu.



Rys. 124. Kształty próbowanych powierzchni czynnych rotorów Savoniusa

Uzyskiwany przez rotory Savoniusa współczynnik wykorzystania energii wiatru w wysokości 0,18, a nawet 0,23 jest znacznie korzystniejszy od takich samych współczynników osiąganych w silnikach bębnowych i karuzelowych (rys. 120). Dlatego też ro-

tory Savoniusa pod względem wykorzystania energii wiatru, jak to zobaczymy w następstwie, są na równi korzystne z kołami wiatrowymi wielołopatkowymi. W porównaniu jednak z szybkobieżnymi silnikami śmigłowymi rotory Savoniusa dają gorsze wskaźniki ruchowe.



Rys. 125. Charakterystyka rotora Savoniusa z powierzchniami spłaszczonymi

Zaznaczone na wykresie (rys. 125) zagięcie ku dołowi charakterystyki momentu obrotowego przy małych wartościach wyróżnika szybkobieżności tłumaczy się chwiejnym w tym zakresie obrotów stanem ruchu rotora, gdyż przepływ powietrza przez rotor jest wtedy nie ciągły, a wielkość momentu rozruchowego rotora (przy $Z = \frac{u}{v} = 0$) zależy od jego położenia względem kierunku wiatru.

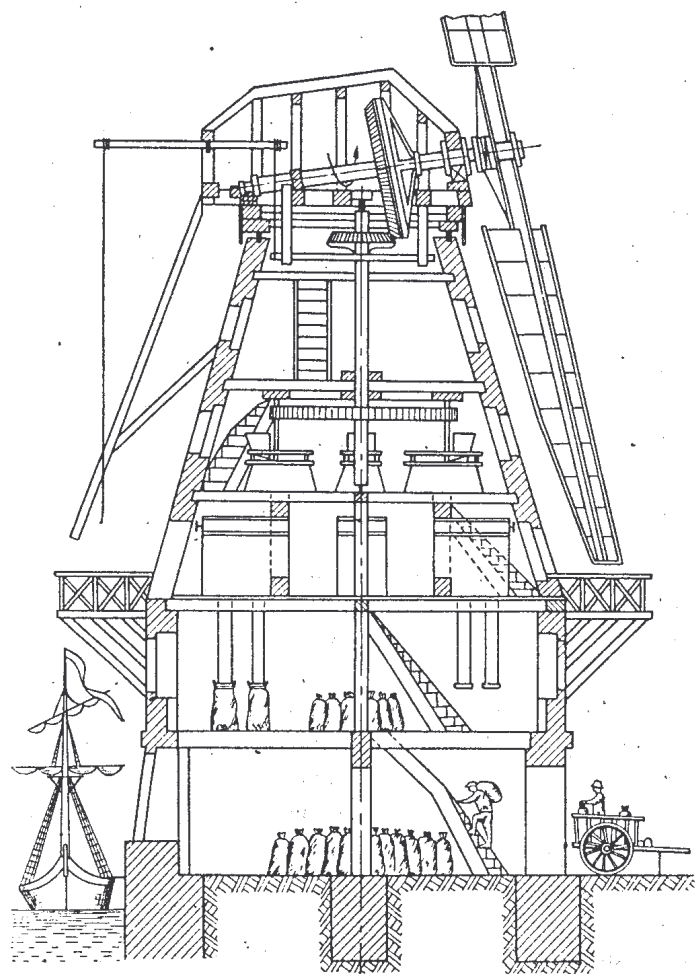
3. SILNIKI WIATROWE O RÓWNOLEGŁEJ DO KIERUNKU WIATRU OSI OBROTU

a. Wiatraki

Wiatraki wiejskie (rys. 126) jeszcze dotychczas są stosowane w wielu miejscowościach przede wszystkim do prymitywnego mielenia zboża. Stanowią one produkcję wytwórczości właściwie chałupniczej o bardzo niskim poziomie technicznym.

Urządzenia młyna są umieszczone w budynku, służącym jednocześnie do osadzenia głównego wału poziomego wiatraką wraz

ruchomym łożu obwodowym umieszczonym na wierzchu konstrukcji budynku. Pokręcanie głowicy wiatraka może być dokonywane w prostszych wykonaniach ręcznie za pośrednictwem dźwigni albo też w wykonaniach bardziej udoskonalonych — samoczyn-



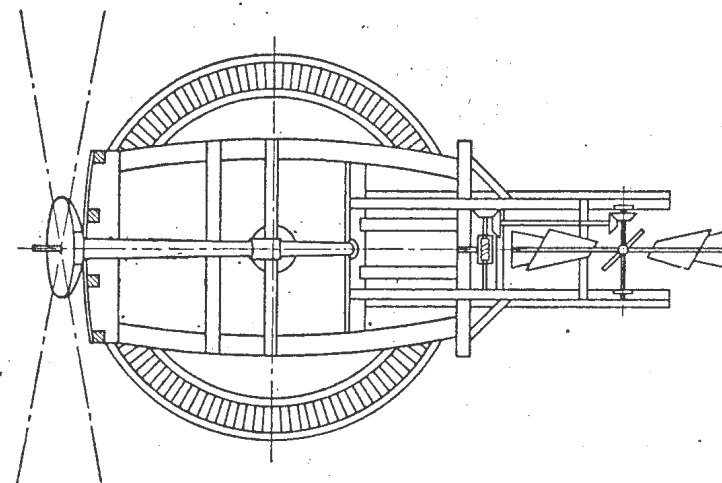
Rys. 128. Wiatrak typu holenderskiego (przekrój)

nie przy pomocy dodatkowego silnika nastawczego (porównaj rozdz. IV, punkt 1) przedstawionego na rys. 129.

Pionowy wał wiatraka musi być umieszczony w osi obrotu głowicy. Skrzydła wiatraka holenderskiego są wykonane zupełnie podobnie do skrzydeł poprzednio opisanych wiatraków koźlowych.

Również i regulacja szybkości obrotowej przez zmianę wielkości powierzchni czynnej skrzydeł lub przez częściowe ich odwrócenie od wiatru jest taka sama, jak w wiatrakach koźlowych.

Kąty zamocowania żeber w ramionach skrzydeł dobiera się zwykle wg danych praktycznych w ten sposób, że kąt dla żebra najbliższego od wału wynosi 20° do 30° , a dla żebra ostatniego, najbardziej skrajnego — 0° , a niekiedy i — 5°



Rys. 129. Silnik nastawczy w wiatraku holenderskim

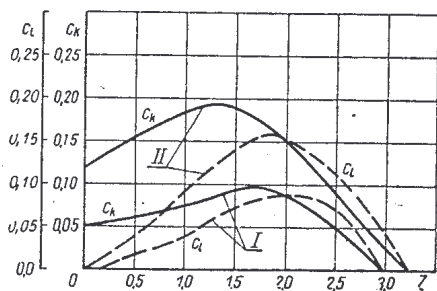
Z podanych na rys. 130 charakterystyk współczynników wykorzystania energii wiatru c_l oraz momentu obrotowego c_k , dotyczących czteroskrzydłowych wiatraków holenderskich, widać wyższość skrzydeł ze zmiennym kątem ustawienia żeber (krzywe II) nad skrzydłami o stałym kącie ustawienia żeber (krzywe I). Wielkość kąta ustawienia żeber w przypadku I wynosiła $\varphi = 14^\circ$, zaś wielkość tych kątów w przypadku II podano w tablicy 10.

Tablica 10

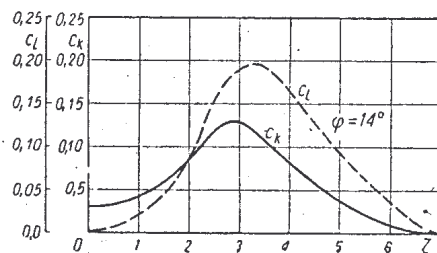
Kąty ustawienia żeber w skrzydłach badanego wiatraka holenderskiego

Względna odległość żebra od osi obrotu r/R	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Kąt ustawienia żebra φ	$29^\circ 15'$	$25^\circ 57'$	$22^\circ 23'$	$18^\circ 11'$	$15^\circ 15'$

Największy współczynnik wykorzystania energii wiatru c_{lmax} w wiatraku ze skrzydłami o zmiennych kątach ustawienia żeber jest prawie dwukrotnie większy, niż w wiatraku o stałym kącie ustawienia żeber ($c_l=0,16$ w wiatraku II wobec $c_l=0,085$ w wiatraku I). Również i moment obrotowy jest prawie dwukrotnie większy w wiatraku II niż w wiatraku I.

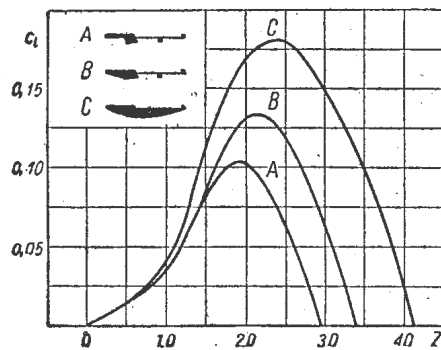


Rys. 130. Charakterystyki wiatraków holenderskich ze stałymi i zmiennymi kątami ustawienia żeber w skrzydłach.



Rys. 131. Charakterystyka wiatraka ze skrzydłami oprofilowanymi i ze stałym kątem ustawienia w nich żeber

Jednak na współczynnik wykorzystania energii wiatru większy wpływ, niż zmienność kąta ustawienia żeber, wywiera prawidłowy pod względem aerodynamicznym profil skrzydeł. Doskonale



Rys. 132. Charakterystyki $c_l = f(Z)$ dla skrzydeł częściowo oprofilowanych

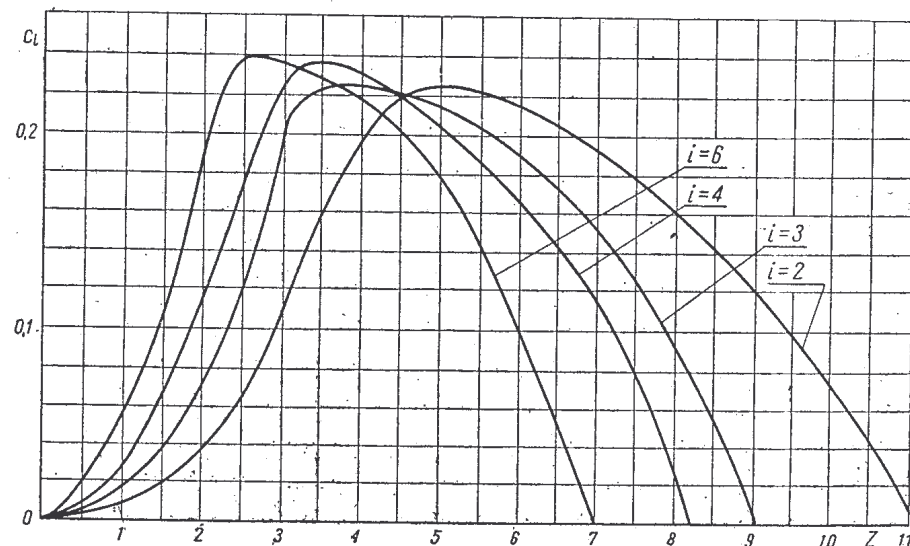
wiatru (c_l) w wiatraku z opływowym profilem skrzydeł jest 2,3 raza większy, a wyróżnik szybkobieżności przy c_{lmax} jest 1,7 raza większy niż w wiatrakach o skrzydłach zwykłych, o nieodpowied-

to widać na rys. 131, na którym podano obie charakterystyki (c_l i c_k) dla czteroskrzydłowego wiatraka ze skrzydłami o profilu opływowym, ale ze stałym kątem ustawienia żeber ($\varphi = 14^\circ$).

Z porównania tych charakterystyk z charakterystykami na rys. 130 dla wiatraka I (ze skrzydłami o stałym kącie ustawienia żeber) wynika, że współczynnik wykorzystania energii

nim profilu. Nawet częściowe oprofilowanie skrzydeł zwykłego wiatraka wiejskiego, mianowicie tylko tylnych ich stron, powoduje już znaczne zwiększenie współczynnika wykorzystania wiatru, jak to wynika z charakterystyk, przedstawionych na rys. 132.

W celu wykazania wpływu ilości skrzydeł wiatraka na jego charakterystykę podano na rys. 133 charakterystyki współczyn-



Rys. 133. Charakterystyka $c_l = f(Z)$ dla skrzydeł o różnej ilości łopatek

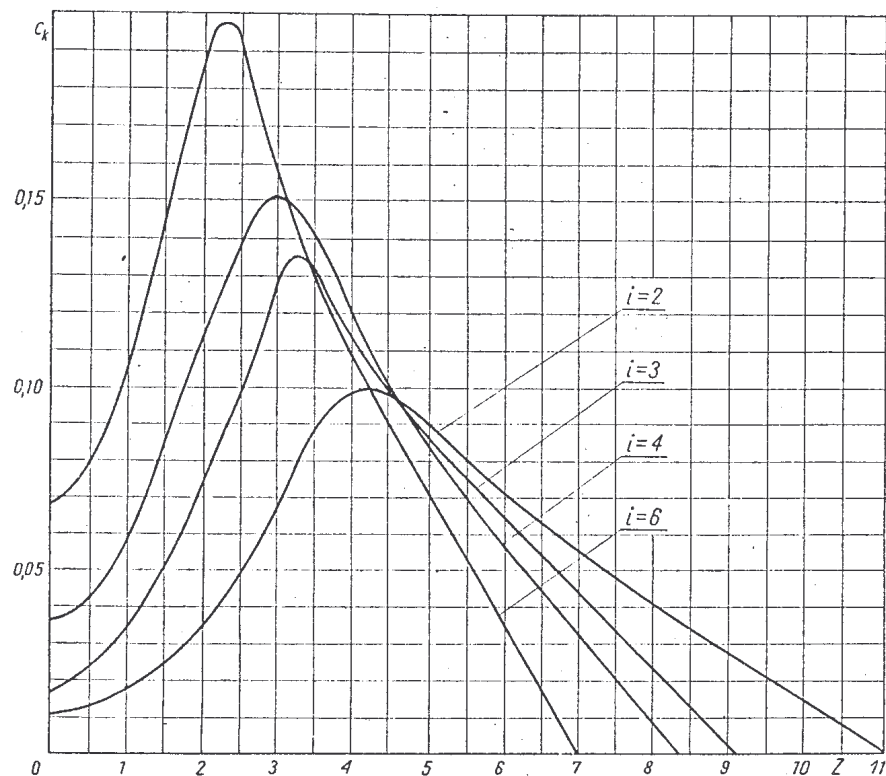
ników wykorzystania energii wiatru, a na rys. 134 charakterystyki współczynników momentów obrotowych dla czterech wiatraków ze skrzydłami o profilach opływowych z różną ilością łopatek (dwu, trzech, czterech i sześciu) zdjęte w jednym z radzieckich tuneli aerodynamicznych¹⁾.

Z wykresów tych wynika, że na wielkość współczynnika wykorzystania wiatru c_l ilość łopatek w wiatrakach wpływa w bardzo niewielkim stopniu, natomiast wpływ ten jest znaczny na wielkość współczynnika momentu obrotowego c_k oraz na wyróżnik szybkobieżności Z .

Z charakterystyk tych bowiem wynika, że największy współczynnik momentu obrotowego w wiatraku sześciolopatowym jest

¹⁾ E. M. Fatejew, Wetrodwigatieli.

prawie dwukrotnie większy, niż w wiatraku dwułopatowym. Znacznie większe jednak różnice występują w wielkościach współczynnika momentów rozruchowych c_{k0} (przy $Z = 0$), gdyż współczynnik ten w wiatraku dwułopatowym wynosi ok. 0,010, zaś w wiatraku sześciopłatowym — 0,068, czyli prawie siedmiokrotnie więcej.



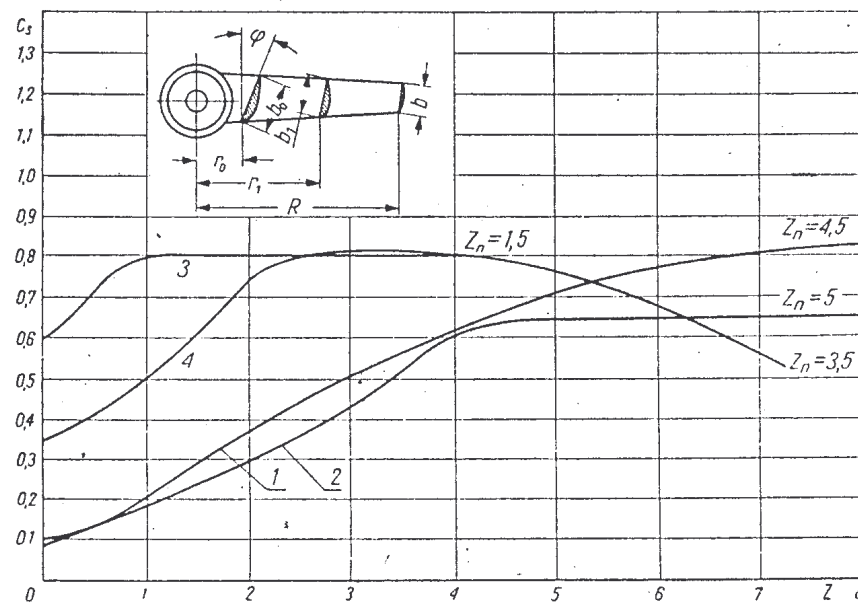
Rys. 134. Charakterystyka $c_k = f(Z)$ dla skrzydeł o różnej ilości łopat

Wyróżnik szybkobieżności przy największym momencie obrotowym w wiatraku sześciopłatowym wynosi $Z = 2,3$, zaś w wiatraku dwułopatowym — $4,3$, czyli że jest prawie dwukrotnie większy.

Ciekawe są również i charakterystyki osiowego parcia wiatru na skrzydła wiatraków istotne dla wytrzymałościowych ich właściwości. Na rys. 135 przedstawiono tę charakterystykę dla dwu wiatraków o skrzydłach dwułopatowych (krzywe 1, 2) oraz dla dwu —

o skrzydłach sześciopłatowych (krzywe 3, 4), a otrzymane wg pomiarów w tunelu aerodynamicznym w Getyndze.

Z wykresów tych wynika, że największe osiowe parcie wiatru na skrzydła w wiatrakach dwułopatowych występuje przy większych szybkościach, a w wiatrakach sześciopłatowych — przy znacznie mniejszych. Podczas rozruchu obu rodzajów wiatraków parcie to jest mniejsze.

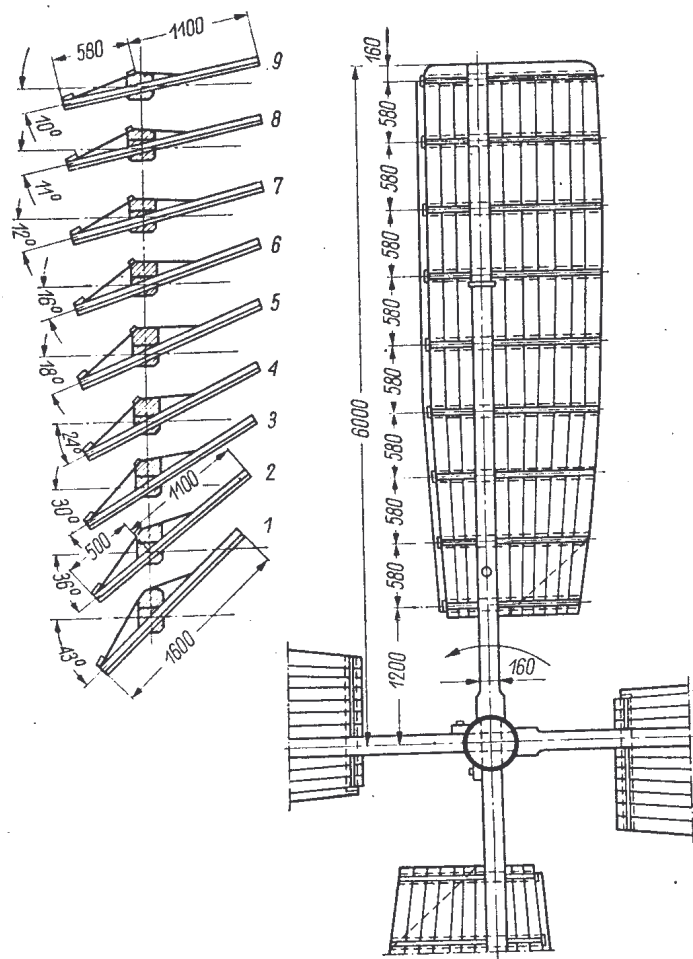


Rys. 135. Charakterystyka osiowego parcia wiatru na skrzydła dwu i sześciopłatowe

Główną zaletą wiatraków wiejskich jest możliwość ich wykonywania w każdej miejscowości, a to ze względu na prostotę ich konstrukcji, jak również i ze względu na wszędzie dostępne drewno. Zalety te tak istotne dla samego zjawienia się oraz wielowiekowego istnienia wiatraków w przeszłych czasach również i dzisiaj wysuwają się w pewnych warunkach na plan pierwszy.

Jednak wiatraki te posiadają szereg poważnych wad, a przede wszystkim bardzo małą sprawność ogólną, spowodowaną niekorzystnym współczynnikiem wykorzystania energii wiatru (c_l) oraz stratami energii z powodu pierwotnego, a często wadliwego wy-

konania przede wszystkim skrzydeł. Mała sprawność powoduje konieczność budowy dla żądanych mocy wielkich i o znacznym ciężarze skrzydeł, zamocowanych na grubym i ciężkim wale, osadzonym w odpowiednio wytrzymałym i ciężkim budynku. Znacz-

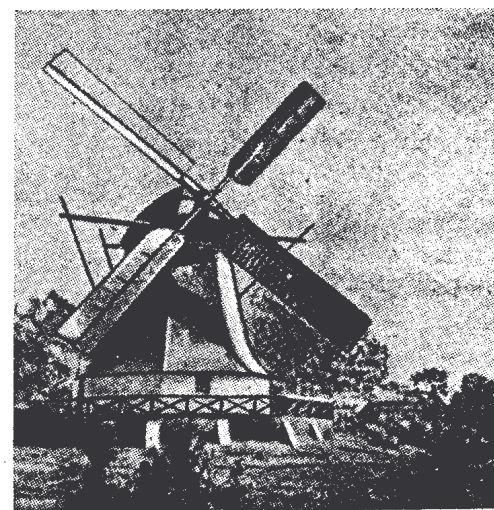


Rys. 136. Skrzydło wiatraka osłonięte z tyłu płaszczyznami załamanymi

ny ciężar wiatraka powoduje trudności z jego nastawianiem pod wiatr, wskutek czego nastawianie to nie zawsze jest prawidłowe, co znow pociąga za sobą niezupełne wykorzystanie wszystkich możliwych szybkości wiatru, a zatem powoduje małą wydajność wiatraka.

Wobec znacznej ilości pracujących od dawna wiatraków wiejskich, często z budynkami murowanymi i znajdującymi się w dobrym stanie, starano się w różnych krajach, zwłaszcza w Związku Radzieckim i Niemczech, ulepszyć je w taki sposób, aby uzyskać od nich większą moc, a przez to ochronić je przed rozbiórkami.

W Związku Radzieckim np. zwiększono moc użyteczną skrzydeł przez osłonięcie tylnej strony ich ramion odpowiednio załamanymi płaszczyznami (rys. 136), co znacznie zmniejszyło opory aerodynamiczne skrzydeł. To ulepszenie wraz z zastosowaniem zmiennego kąta zamocowania żeber płatów skrzydłowych zwiększyło moc dwukrotnie, a w niektórych przypadkach nawet trzykrotnie.



Rys. 137. Wiatrak ze skrzydłami zaopatrzonymi w podłużne tarcze zabezpieczające

Poza tym w celu samoczynnego ograniczenia szybkości obrotowej podczas silnych wiatrów skrzydła wiatraka zostały zaopatrzone w odpowiednie kłapy regulacyjne (rys. 109), powodujące samoczynne zwiększanie oporów aerodynamicznych skrzydeł przez zwracanie się w miarę zwiększania się ich szybkości obrotowej większą częścią powierzchni w stronę szybkości obwodowej.

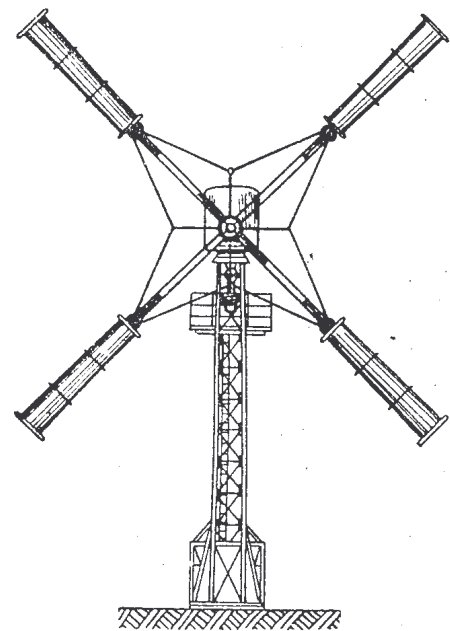
W Niemczech zaś przez samo obłożenie skrzydeł blachą o kształcie opływowym K. Bilau uzyskał w starych wiatrakach powiększenie mocy o ok. 60%, a wyróżnika szybkoobrotowości

o 100 % (z 1,7 do 3,5). Bardziej ostro zarysowujące się w tych warunkach zagadnienie zabezpieczenia wiatraka przed nadmiernymi szybkościami obrotowymi zostało po wielu wysiłkach rozwiązane przez zastosowanie w skrzydłach odpowiednich tarcz obrotowych, obracających się względem podłużnych osi skrzydeł (rys. 137).

Do tego samego typu wiatraków, lecz znacznie od nich doskonalszych, należy zaliczyć i nowoczesne samoregulujące się

duńskie silniki wiatrowe budowane przez firmę Lykkegaard Windmill, przedstawione na rys. 82, 83 (patrz rozdz. IV punkt 2). Silniki te są budowane o średnicy skrzydeł 7, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20 m i o mocy od 3,5 do 23 KM przy szybkości wiatru 8 m/sek. Nastawianie tych silników pod wiatr jest dokonywane przez dwa boczne silniki nastawcze.

W zakończeniu tego ustępu należy wspomnieć o wiatraku niemieckiego konstruktora Flettnera (rys. 138), który jest oparty w swym działaniu na zjawisku Magnusa (patrz rozdz. II, punkt 6) i został zbudowany w r. 1926.



Rys. 138. Wiatrak Flettnera

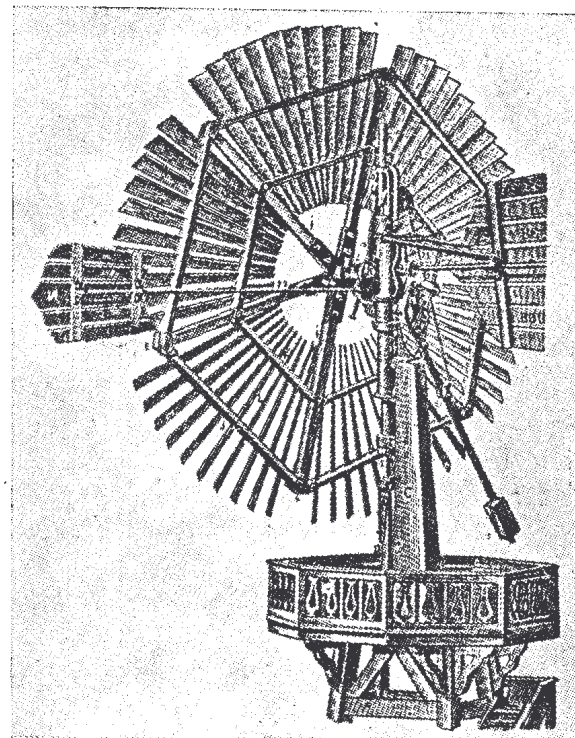
W wiatraku tym zamiast zwykłych skrzydeł umieszczono na jego ramionach odpowiednio wykonane z blachy stożki ścięte, mogące się wokół nich obracać. Do obrotu tych stożków użyto odpowiednich silników elektrycznych. Średnica tego rodzaju koła wiatrowego wynosiła 20 m; długość zaś każdego stożka 5 m, a jego średnica po stronie wewnętrznej koła wiatrowego 72 cm, zaś po stronie zewnętrznej 90 cm.

Wyniki pracy takiego wiatraka nie mogły być pomyślne, gdyż rotory w porównaniu ze skrzydłami oprofilowanymi posiadają znacznie (prawie trzykrotnie) gorsze właściwości aerodynamiczne,

a poza tym konieczność ich obracania się powoduje złożoność ich budowy oraz potrzebę dodatkowego źródła energii elektrycznej. Poza tym skuteczna i pewna ochrona przed huraganem tego rodzaju wiatraków jest prawie niemożliwa do osiągnięcia.

b. Silniki wielołopatkowe (turbiny wiatrowe)

Silniki tego typu wyróżniają się wśród innych silników typowym kołem wiatrowym (wirnikiem), składającym się z większej ilości łopatek drewnianych lub blaszanych. Silniki te odznaczają

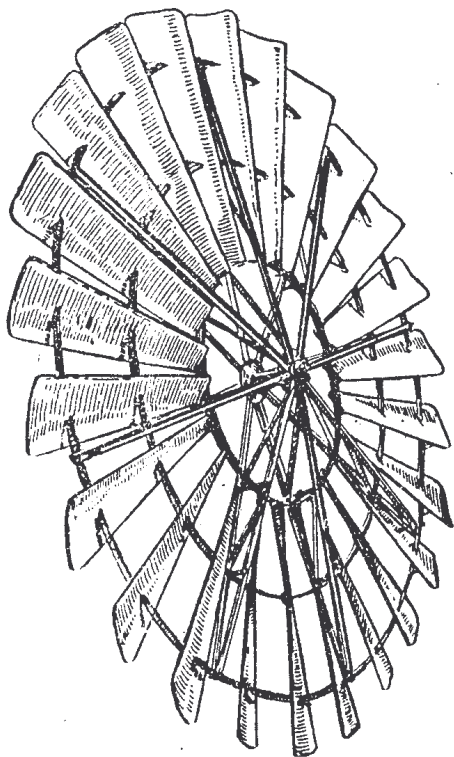


Rys. 139. Silnik wiatrowy Corcorana

się dużym momentem rozruchowym oraz względnie niewielką szybkobieżnością (stąd wzięta nazwa silniki wolnobieżne). Ze względu na duży moment rozruchowy silniki te nadają się do napędu maszyn o znacznym momencie obrotowym, jak np. pompy tłokowe.

Przedstawicielem tego typu silników wiatrowych w wykonaniu z drewna jest silnik przedstawiony na rys. 84 i 85 (rozd. IV, punkt 2), jako przykład regulacji szybkości obrotowej przez zmniejszanie wielkości powierzchni czynnej koła wiatrowego. Nastawianie silnika pod wiatr jest dokonywane przez ster tylny wykonany również z drewna. Silnik ten jest znany, jako amerykański silnik wiatrowy systemu Halladaya.

Na rys. 139 przedstawiono podobny silnik amerykański, lecz systemu Corcorana, odróżniający się od poprzedniego innym sposobem regulacji szybkości obrotowej. Regulacja ta dokonywana jest tutaj przez odchylenie płaszczyzny koła wiatrowego względem kierunku wiatru przy pomocy steru bocznego.



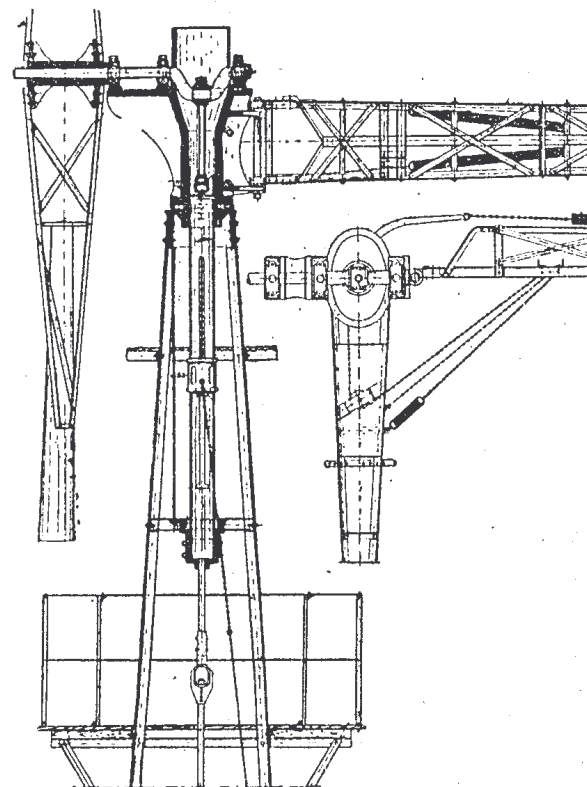
Rys. 140. Stalowe koło wielołopatkowe

Znacznie trwalsze od drewnianych są turbiny wiatrowe stalowe z wirnikami (rys. 140) o znacznej (18 do 40) ilości łopatek wykonanych z blachy stalowej ocynkowanej połączonych konstrukcyjnie w jedną sztywną całość. Kąt nachylenia łopatek względem płaszczyzny obrotu zwykle jest zmienny i wynosi ok. 45° na krawędzi wewnętrznej łopatki i ok. 15° na krawędzi zewnętrznej. Spotyka się również i wirniki o stałym kącie ustawienia łopatek, który wynosi w tym przypadku ok. 30° . Średnica wirników wynosi zwykle 4 do 8 m i tylko wy-

jątkowo spotyka się silniki tego typu jeszcze większe. Ogólny widok takiego silnika produkcji radzieckiej TB-8 jest przedstawiony na rys. 196.

Wirnik silnika jest osadzony na wale obracającym się w dwu łożyskach kulkowych (rys. 141) albo też osadzony obrotowo na

trzcieniu (rys. 197) wraz z przymocowanym do niego kołem zębatym. Pierwszy sposób stosuje się np. do bezprzekładniowego napędu pomp wodnych, których tłoki otrzymują ruch posuwisto-zwrotny od wykorbionego wału głównego silnika wiatrowego za pośrednictwem pionowego drąga. Drugie rozwiązanie jest stoso-



Rys. 141. Osadzenie koła wielołopatkowego na wale głównym

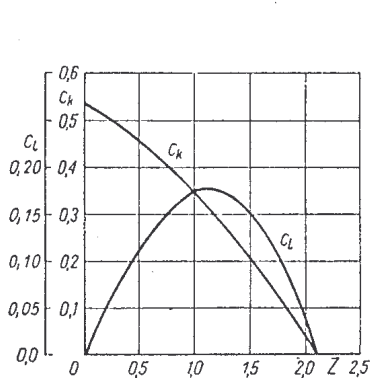
wane w przypadkach potrzeby otrzymania obrotowego ruchu pionowego wału silnika. Spotyka się również i rozwiązania pośrednie, w których stosuje się przekładnię zębatą między wirnikiem silnika wiatrowego a korbą, nadającą ruch posuwisto-zwrotny drągowi pionowemu.

Nastawianie koła wiatrowego pod wiatr dokonywa się sternem tylnym, wykonanym z kątowników i blachy stalowej. Do regulowania szybkości obrotowej silnika wiatrowego stosuje się zwykle odchylenie wirnika od kierunku wiatru przy pomocy steru bocznego (patrz rozdz. IV).

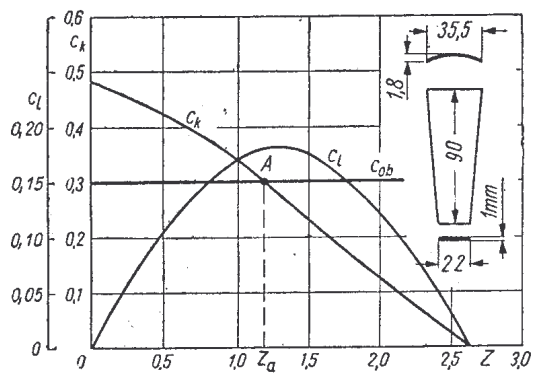
Zatrzymywanie silników wiatrowych tego typu jest dokonywane przez ściągnięcie ku sobie obu sterów, tylnego i bocznego, co przeprowadza się z dołu przy pomocy odpowiedniej linki, nawijanej na kołowrót.

Na rys. 142 przedstawiono charakterystyki współczynnika wykorzystania energii wiatru c_l oraz współczynnika momentu obrotowego c_k dla amerykańskiego silnika „Aeromotor” o następujących danych: ilość łopatek $i = 18$, kąt ustawienia łopatek względem płaszczyzny obrotu $\varphi = 30^\circ$ (stały), stosunek skrajnych szerokości łopatki $b_1/b_2 = 0,412$, stosunek promieni pierścienia łopatkowego $r/R = 0,392$.

Dla porównania z konstrukcją wirnika o zmiennym kącie ustawienia łopatek podano na rys. 143 charakterystyki podobnej



Rys. 142. Charakterystyki silnika wielołopatkowego „Aeromotor”



Rys. 143. Charakterystyki silnika wielołopatkowego lecz ze zmiennym kątem ustawienia łopatek

turbiny wiatrowej o następujących danych: ilość łopatek $i = 18$, kąt ustawienia łopatek na krawędzi zewnętrznej $\varphi_z = 17^\circ$, w środku łopatki $\varphi_{sr} = 26^\circ$, a na krawędzi wewnętrznej $\varphi_w = 45^\circ$; stosunek skrajnych szerokości łopatki $b_1/b_2 = 0,62$, stosunek promieni pierścienia łopatkowego $r/R = 0,33$.

Z porównania charakterystyk obu silników wiatrowych wynika, że wpływ ustawienia łopatek wirników jest tutaj nieznaczny. Również nieznaczny jest, co stwierdzono podobnymi pomiarami, wpływ prawidłowego pod względem aerodynamicznym opprofilowania w tego rodzaju silnikach ich łopatek.

Krzywe współczynników momentów obrotowych $c_k = f(Z)$ odcinają na osi rzędnych wielkości współczynników momentów rozruchowych c_{k_0} (przy $Z = 0$), zaś na osi odciętych — wyróżniki szybkobieżności Z przy momentach obrotowych równych zeru, czyli przy biegu luzem silników wiatrowych.

Zaznaczywszy na wykresie (rys. 143) wielkość stałego momentu obciążeniowego w postaci linii prostej równoległej do osi odciętych, łatwo można ustalić, że punkt pracy silnika wiatrowego wypadnie na przecięciu się obu linii, czyli w punkcie A. Szybkości obrotowej silnika dla tego stanu pracy odpowiada wielkość odciętej tego punktu, czyli Z_a . Należy sobie przy tym uprzytomnić, że wartości wyróżnika szybkobieżności Z (często zwanego wprost szybkobieżnością) są przy stałej szybkości wiatru odpowiednikami szybkości obrotowej silnika.

Jeśli na skutek wzrostu szybkości wiatru moment silnika wiatrowego się powiększy, to ten wzrost jego mocy ujawni się przede wszystkim w zwiększeniu się jego szybkości obrotowej. Ponieważ zaś w miarę zwiększania się szybkości obrotowej silnika (Z) jego moment obrotowy, jak to widać z charakterystyki, maleje, to silnik zwiększy swe szybkości obrotowe aż do zrównoważenia swego momentu obrotowego z momentem obciążeniowym.

Gdy natomiast z jakichkolwiek przyczyn zwiększy się moment obciążeniowy, albo też, co na jedno wychodzi, moment obrotowy silnika się zmniejszy, to silnik wiatrowy zmniejszy przede wszystkim swą szybkość obrotową. Ponieważ w miarę zmniejszania szybkości silnika jego moment obrotowy wzrasta, to silnik będzie zmniejszał szybkość obrotową, aż jego moment obrotowy zrównoważy się z momentem obciążeniowym.

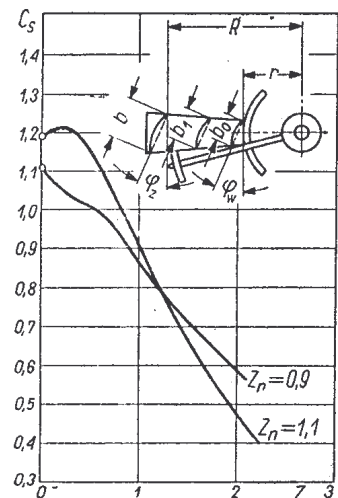
Ponieważ takie warunki pracy istnieją we wszystkich punktach przedstawionej charakterystyki, możemy stwierdzić, że praca wielołopatkowego silnika wiatrowego z maszyną produkcyjną o stałym momencie obciążeniowym jest stateczna. Wielołopatkowy silnik wiatrowy nawet przeciążony będzie w dalszym ciągu pracował, zmniejszając tylko swą szybkość obrotową oraz współczynnik wykorzystania energii wiatru, czyli swą sprawność.

Zaznaczyć należy, że przy rozpatrywaniu warunków pracy silników wiatrowych pojęcie powiększenia momentu obciążenio-

wego jest w swych następstwach równoznaczne ze zmniejszeniem się momentu obrotowego silnika, a zatem zmniejszeniu się szybkości wiatru i odwrotnie zmniejszenia się momentu obciążeniowego jest równoznaczne ze zwiększeniem się szybkości wiatru.

Charakterystyki osiowego parcia wiatru na wirniki turbin wiatrowych przedstawiono na rys. 144 dla turbiny 24-łopatkowej i dla 16-łopatkowej.

Z charakterystyk tych wynika, że osiowe parcie wiatru w wiatrowych silnikach wielołopatkowych jest największe podczas rozruchu i w miarę zwiększania szybkości obrotowej prędko maleje.



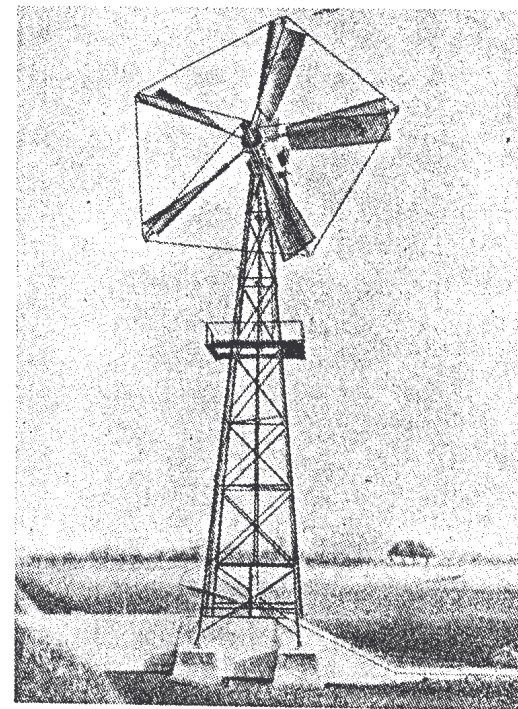
Rys. 144. Charakterystyka osiowego parcia wiatru w silnikach wielołopatkowych

Pojawienie się silników wiatrowych wielołopatkowych trzeba uznać, jeśli nie za cofnięcie, to przynajmniej za wstrzymanie przez nie postępu technicznego. Z bojaźni przed zagadnieniami wytrzymałościowymi odstąpiono od słusznej zasady budowy skrzydeł możliwie dużych, wysmukłych i lekkich, zakreślających znaczne powierzchnie przekrojowe (250 do 450 m²) mało zwichrzonego przepływu powietrza. Zwrócono się natomiast do konstrukcji skupionych, wytrzymałościowo bardziej sztywnych, ale względnie ciężkich, o małych (6 do 30 m²) przekrojach bardzo zwichrzonego przepływu powietrza, a przy tym pracujących przy mniejszych wyróżnikach szybkobieżności.

Poza typowymi silnikami wielołopatkowymi (o ilości łopatek 12 do 40) są budowane niekiedy silniki wiatrowe łopatkowe, ale o znacznie mniejszej ilości łopatek, najczęściej 5—7. Silniki te stanowią już typ przejściowy do silników śmigłowych. Łopatkki tych silników są wykonane niekiedy z odpowiednio wygiętej bla-

chy stalowej, ale częściej są one prawidłowo oprofilowane (rys. 145).

Dla zwiększenia sztywności konstrukcji poszczególne łopatkki są między sobą powiązane cięgłami, a od przodu są wzmocnione odciągami zaczepionymi u podpory, stanowiącej przedłuże-



Rys. 145. Silnik wiatrowy pięćłopatkowy

nie wału koła wiatrowego. Nastawianie tych silników pod wiatr jest dokonywane jednym z wielu sposobów stosowanych w silnikach innych typów.

Tego rodzaju konstrukcja kół wiatrowych, zwłaszcza z łopatkami nieoprofilowanymi, powoduje dość duże opory aerodynamiczne, wobec czego silniki te nie wykazują dużej szybkobieżności, jakkolwiek szybkobieżność przez nie osiągnana jest większa, niż silników wielołopatkowych. Moment rozruchowy tych silników jest nieco mniejszy od momentu silników wielołopatkowych.

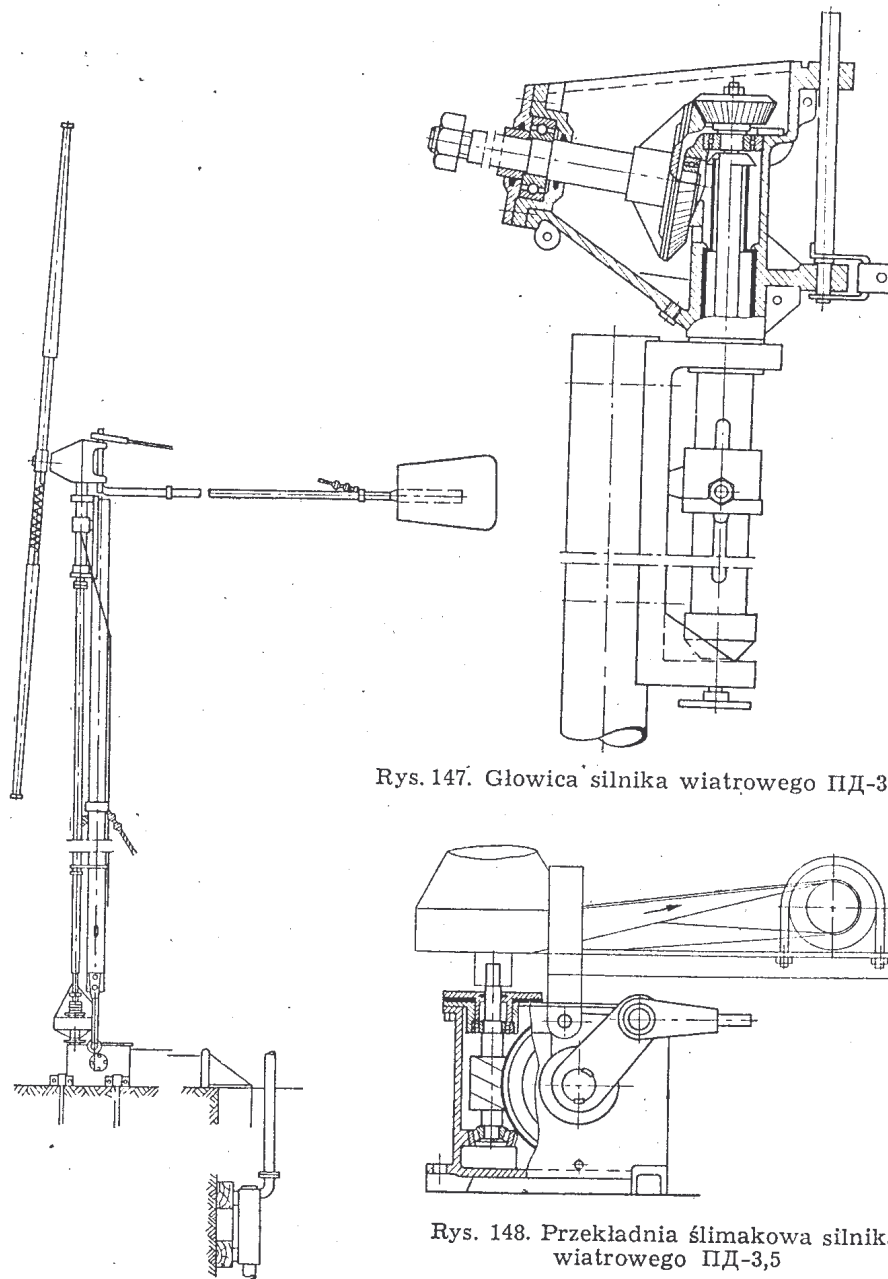
c. Silniki śmigłowe (szybkobieżne)

Charakterystyczną cechą tego rodzaju silników wiatrowych są ich śmigła podobne do śmigieł samolotowych o małej ilości łopat i o kształtach opływowych. W wyniku niewielkiej ilości łopat, wykazujących małe opory aerodynamiczne, silniki te posiadają dużą szybkość obrotową i z tego względu nadają się do napędu maszyn szybkoobrotowych zwłaszcza prądnic elektrycznych o mocach od najmniejszych do względnie największych.

Silniki śmigłowe mogą napędzać prądnice elektryczne umieszczone w głowicach silników wiatrowych albo też po sprowadzeniu napędu za pośrednictwem pionowego wału na dół, mogą napędzać poza prądnicami również i inne maszyny produkcyjne, jak obrabiarki, pompy, młyny itp. Ze względu na bardziej wszechstronne wykorzystanie silników wiatrowych w tym ostatnim przypadku opiszemy tutaj przede wszystkim silniki tego rodzaju, natomiast silniki wiatrowe wymienione w pierwszej grupie, stanowiące wraz z prądnicami zespoły wiatrowo-elektryczne, rozpatrzemy w następnym oddzielnym punkcie.

Jednym z najmniejszych tego rodzaju silników wiatrowych jest radziecki silnik ПД-3,5 (rys. 146) o mocy ok. 1,3 KM przy szybkości wiatru $v = 8$ m/sek.

Dwułopatowe śmigło tego silnika o średnicy 3,5 m i konstrukcji stalowej jest zaopatrzone na końcach łopat w kłapy regulacyjne (Perli), ograniczające szybkość obrotową śmigła do 240 obr/min (patrz rozdz. IV punkt 2d). Konstrukcja głowicy (rys. 147) oraz całego silnika jest wykonana z myślą o umożliwieniu mu długotrwałej pracy bez fachowej obsługi. Pionowy wał silnika, którego największa szybkość obrotowa wynosi 500 obr/min, napędza za pośrednictwem samoczynnego sprzęgła cierne przekładnię ślimakową (rys. 148), zmieniającą nie tylko wielkość momentu obrotowego, ale również i ruch obrotowy na ruch posuwisto-zwrotny, potrzebny do napędu tłokowej pompy wodnej. Sprzęgło cierne umożliwia dokonywanie rozruchu silnika bez obciążenia, a zatem już przy znacznie mniejszej szybkości wiatru. Zewnętrzna obudowa sprzęgła jest wykorzystana jako koło pasowe, od którego można napędzać prądnicę elektryczną o mocy 300 W.



Rys. 146. Silnik wiatrowy ПД-3,5

Rys. 147. Głowica silnika wiatrowego ПД-3,5

Rys. 148. Przekładnia ślimakowa silnika wiatrowego ПД-3,5

Górna część silnika jest umieszczona na rurowym słupie stalowym wysokości 7,5 m wspartym przegubowo na korpusie przekładni ślimakowej i zaopatrzonym w odpowiednie odciągi. Korpus przekładni ślimakowej stanowi zarazem podstawę całego silnika. Konstrukcja łożysk i sprzęgieł pionowego wału umożliwia prawidłową jego pracę nawet przy odchyleniu jego osi od linii prostej o 3° .

Nastawianie śmigła pod wiatr dokonywa się przy pomocy steru tylnego z ramieniem rurowym zaopatrzonym w odciąg, zaś regulację szybkości obrotowej — za pomocą klap regulacyjnych, zwiększających podczas silniejszego wiatru opory aerodynamiczne.

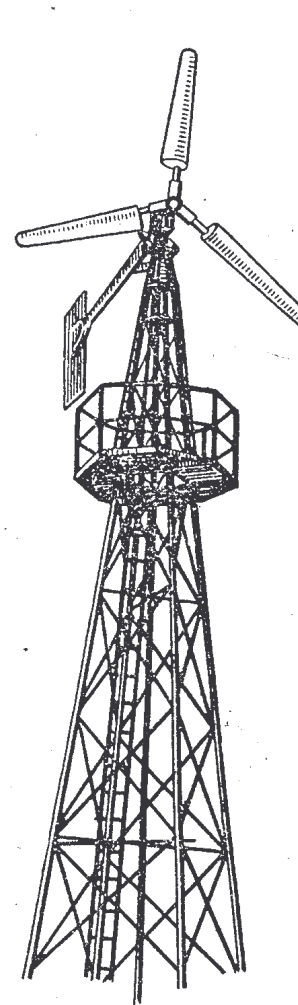
Całe urządzenie może być łatwo przewożone z jednego miejsca pracy na inne, gdyż ciężar jego wynosi 220 kG.

Drugim silnikiem o większej mocy (2,7 KM przy szybkości wiatru 8 m/sek) jest silnik radziecki (ВІМЭ Д-5) o trzyłopatowym śmigle (rys. 149), średnicy 5 m, wykonującym 180 obr/min. Nastawianie silnika pod wiatr jest dokonywane przez ster tylny. Regulacja zaś szybkości obrotowej dokonuje się przez obrót łopat śmigła względem ich osi. Wał pionowy napędzany przez wał główny za pośrednictwem stożkowej przekładni zębatej napędza zestaw przekładniowy umieszczony u podnóża wieży, od którego można napędzać różne maszyny.

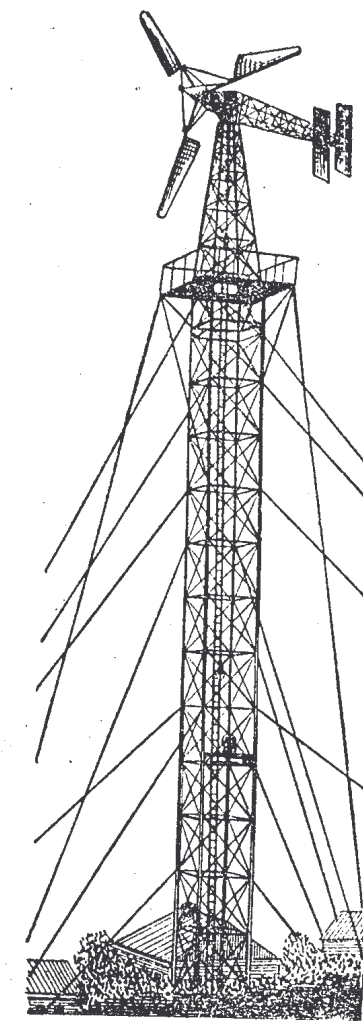
Innym radzieckim silnikiem tego typu, pomysłu Ufimcewa-Weczinkina, jest silnik o średnicy śmigła 10 m (rys. 150). Trzyłopatowe śmigło o odpowiednim kształcie opływowym jest wykonane częściowo ze stali, a częściowo z drewna. Łopaty są umieszczone na stałe na ramionach wykonanych ze stalowych rur, osadzonych w łożyskach kulkowych w odpowiednim stalowym trójkątnym nasadzone na główny wał silnika. Nastawianie silnika pod wiatr jest dokonywane przez dwupłatowy ster tylny. Regulowanie szybkości obrotowej silnika dokonywa się przez obrót łopat śmigła względem ich osi pod wpływem parcia wiatru wg systemu regulacji Ufimcewa i Weczinkina (rozd. IV punkt 2).

Ruch obrotowy wału głównego jest przenoszony na wał pionowy za pośrednictwem stożkowej przekładni zębatej o przełożeniu 1 : 3,5. Od tego wału pionowego za pośrednictwem przekładni pasowej o przełożeniu 1 : 10 jest napędzana prądnica. Mniejsze koło pasowe jest osadzone na wale prądnicy w ten sposób, że może

przenosić moment napędowy tylko od silnika wiatrowego do prądnicy, ale nie odwrotnie. Na przedłużeniu osi prądnicy jest umieszczone koło zamachowe (patrz. rozdz. VI), mogące przy znacznie-



Rys. 149. Silnik wiatrowy
ВІМЭ Д-5



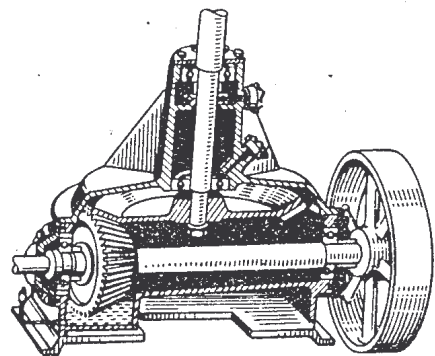
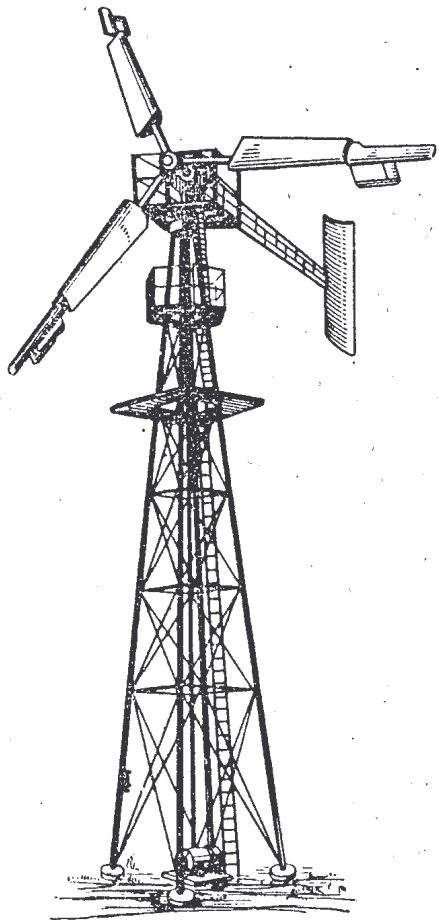
Rys. 150. Silnik wiatrowy Ufimce-
wa-Weczinkina Д-10

szym zmniejszeniu szybkości wiatru napędzać prądnicę w ciągu 2—3 minut.

Moc prądnicy wynosi 3,5 kW, a wysokość wieży w postaci kratowego słupa zaopatrzonego w liczne odciągi — 40 m.

Zastosowanie koła zamachowego uniemożliwia zbyt szybkie zmiany obciążenia prądnicy, wobec czego regulacja szybkości obrotowej silnika może być dokonywana ręcznie jednym z następujących trzech sposobów:

- przez zmianę kąta nastawienia łopat śmigła przy pomocy cięgiła, służącego do zatrzymywania silnika,
- przez zmianę wzbudzenia prądnicy bocznikowej,
- przez zmianę obciążenia użytecznego.



Rys. 151. Silnik wiatrowy ВИМЭ Д-12 Rys. 152. Zestaw przekładniowy silnika ВИМЭ Д-12

Trochę większym silnikiem tego typu, też produkcji radzieckiej, jest silnik (ВИМЭ Д-12) o średnicy śmigła 12 m (rys. 151). Trzy łopaty śmigła o profilach opływowych wykonane częściowo ze stali, a częściowo z drewna są osadzone na ramionach wykonanych ze stalowych rur. Nastawianie silnika pod wiatr jest dokonywane przez ster tylny. Regulacja szybkości obrotowej jest do-

konywana przez obrót części łopat względem ich osi przy pomocy stabilizatorów (patrz rozdz. IV).

Wał pionowy napędzany przez wał główny za pośrednictwem stożkowej przekładni zębatej napędza zestaw przekładniowy (rys. 152) umieszczony u podnóża wieży.

Podany na rys. 199 przekrój tego silnika umożliwia rozpatrzenie dość złożonej jego budowy.

Dzięki utrzymywaniu przez te silniki prawie jednakowej szybkości obrotowej nadają się one do napędu różnego rodzaju obrabiarek, maszyn rolniczych, a zwłaszcza prądnic elektrycznych.

Moc silnika przy szybkości wiatru 8 m/sek wynosi 15 KM, a śmigło wykonuje 55 — 60 obr/min.

Podobny do wymienionych wyżej silników radzieckich jest silnik produkcji niemieckiej (Nordwind G. M. B. H. Porta Westfalica) o średnicy śmigła 15 m i wyróżniku szybkobieżności $Z = 6$ (rys. 153). Trzy łopaty śmigła mają profile opływowe. Dla regulacji szybkości obrotowej jest wykorzystany obrót zewnętrznych części łopat (stanowiących ok. $\frac{1}{3}$ całkowitej ich długości) względem ich osi, co jest dokonywane pod wpływem odpowiedniego regulatora odśrodkowego. Regulacja mocy natomiast jest dokonywana przez odchylenie płaszczyzny obrotu śmigła względem kierunku wiatru, do czego służy urządzenie opisane w rozdz. IV punkt 2.

Regulacja przez obrót części łopat śmigła jest regulacją szybką i zabezpiecza silnik przed zbyt dużą szybkością obrotową, przede wszystkim podczas burz oraz przy nagłym odciążeniu silnika. Regulacja natomiast przez obrót głowicy silnika, działająca z opóźnieniem i powolnie, jest uzależniona od średniej szybkości wiatru w pewnym okresie czasu.

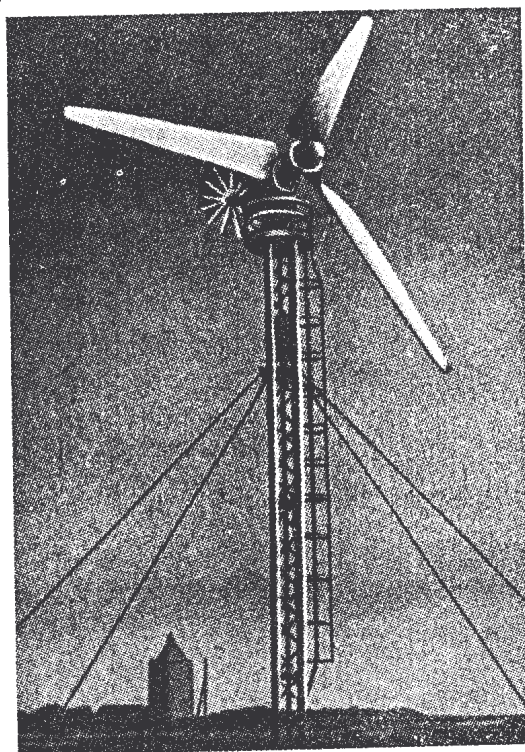
Wał pionowy silnika uzyskuje ruch obrotowy od wału głównego za pośrednictwem stożkowej przekładni zębatej o przełożeniu 1 : 4 i za pośrednictwem drugiej przekładni stożkowej o przełożeniu 1 : 2, znajdującej się u podnóża wieży, napędza koło przekładni o pasach klinowych, służącej do napędu prądnicy, pompy itp.

Moc prądnicy wynosi 20 kW, szybkość obrotowa 1500 obr/min, a wysokość wieży w postaci słupa kratowego z odpowiednimi odciągami — 20 m.

Jeden z pierwszych tych silników został ustawiony na wyspie

Neuwert na Morzu Północnym, gdzie w ciągu czterech lat dla tamtejszych potrzeb dostarczył 180 000 kWh. Silniki te zastosowano również w oazach pustyni Sahary do pompowania wody, używanej do zraszania ogrodów, plantacji itp.

Największe silniki wiatrowe tego typu (szybkobieżne z napędem maszyn u podnóża wież) są budowane w Związku Radzieckim o średnicy śmigła 18 m. Silniki te są dwu typów, jeden (ВМЭ

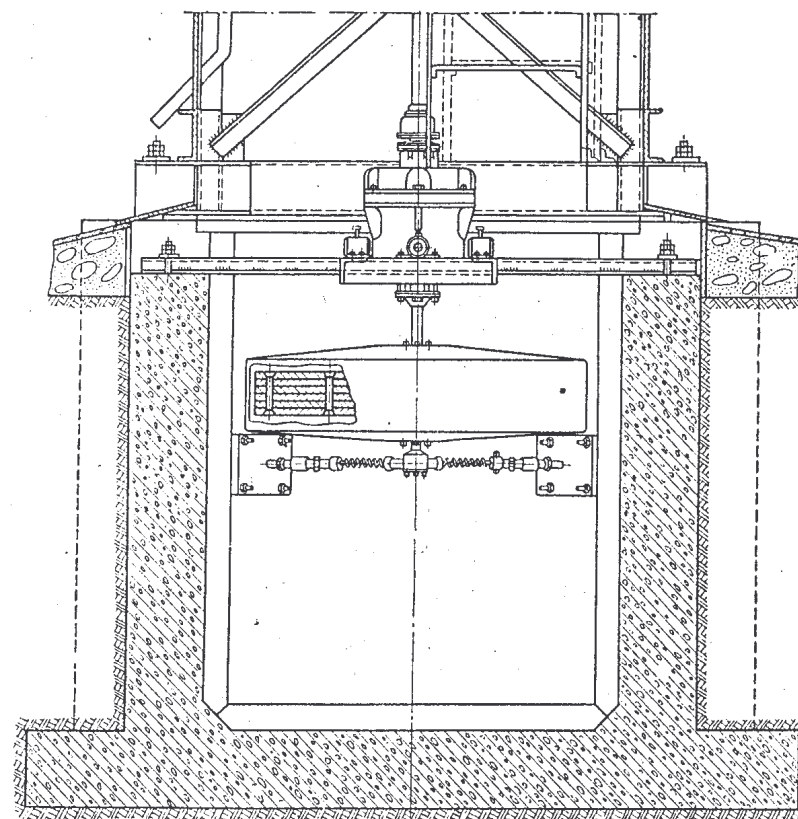


Rys. 153. Silnik wiatrowy Nordwind

ГУСМП Д-18) zupełnie podobny do opisanego poprzednio o średnicy śmigła 12 m, ale o mocy 38 KM i drugi (ЦАГИ Д-18) zupełnie podobny do silnika Ufimcewa-Wetczinkina z kołem zamachowym (rys. 154).

Koło zamachowe o ciężarze 1,25 tony, pracując przy szybkościach obrotowych 2500 do 3500 obr/min, może napędzać prądnice w ciągu 10 minut.

Jakkolwiek przedstawione przykłady silników śmigłowych dowodzą możliwości ich stosowania do napędu różnych maszyn roboczych jako to pomp wodnych, młynów zbożowych (zwłaszcza w Związku Radzieckim), to jednak główną dziedziną ich zastosowania jest napęd prądnic elektrycznych (patrz punkt 3d tego rozdziału).

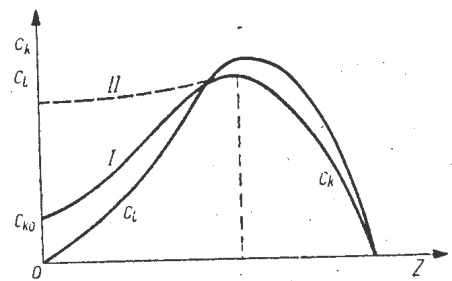


Rys. 154. Akumulator bezwładnościowy (koło zamachowe) silnika wiatrowego ЦАГИ Д-18

Przed przystąpieniem jednak do opisu poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych zespołów wiatrowo-elektrycznych rozpatrzmy przede wszystkim charakterystyki silników śmigłowych zwłaszcza, że już się z nimi spotkaliśmy przy omawianiu wpływu na ich właściwości ilości łopat w kole wiatrowym (rozd. V punkt 3a).

Właśnie rozpatrywane tam porównawczo silniki wiatrowe o śmigłach dwu lub trójłopatowych są niczym innym, jak silnikami śmigłowymi szybkoobrotowymi.

Na rys. 155 przedstawiono charakterystyki współczynnika wykorzystania energii wiatru c_l oraz współczynnika momentu obrotowego c_k silnika o śmigle dwułopatowym. Jeżeli charakterystyka $c_l = f(Z)$ nie wyróżnia się poza swym przesunięciem w stronę



Rys. 155. Charakterystyki $c_k = f(Z)$ silników dwułopatowych: I — o łopatach stałych, II — o łopatach przekreślanych dla ułatwienia rozruchu

większych wartości Z niczym szczególnym od takich samych charakterystyk dla silników wielołopatkowych, to charakterystyka momentu obrotowego posiada kształt szczególny, wybitnie różny od charakterystyki momentu tamtych silników wiatrowych. Kształt ten jest bardziej podobny do kształtu charakterystyki skrzydeł wiatraków wiejskich.

W krzywej współczynnika momentów obrotowych silników śmigłowych wyróżnia się przede wszystkim wielkość współczynnika największego momentu $c_{k\max}$, występującego przy względnie dużych wyróżnikach szybkobieżności Z oraz opadanie charakterystyki również i w lewej jej części, w wyniku czego moment rozruchowy silnika śmigłowego jest mniejszy i to niekiedy znacznie, od największego momentu obrotowego M_{\max} .

Poprzednie nasze rozważania, dotyczące warunków pracy statycznej silnika wiatrowego, mogą się odnosić tylko do prawej gałęzi charakterystyki, czyli do zakresu od największego momentu obrotowego M_{\max} do momentu równego zero, czyli do biegu luzem silnika. Co się zaś tyczy lewej gałęzi charakterystyki, to punkt przecięcia się jej z prostą równoległą do osi odciętych, a przedstawiającą stały moment obciążeniowy, jest punktem pracy chwiejnej, niestatecznej, gdyż najmniejsze nawet zwiększenie momentu obciążeniowego powoduje zatrzymanie się silnika. Dzieje się to dlatego, że zwiększanie momentu obciążeniowego powoduje przede wszystkim zmniejszanie szybkości obrotowej silnika wiatrowego; ponieważ, jak to wynika z tej części krzywej, w miarę

zmniejszania się szybkości obrotowej moment silnika maleje, wzrastać musi coraz bardziej różnica między momentem obciążeniowym i momentem obrotowym silnika, aż do całkowitego jego zatrzymania się. Praca zatem silnika śmigłowego na lewej gałęzi charakterystyki jest niestateczna, chwiejna i zasadniczo nie może mieć w rzeczywistości miejsca. W wyniku przeciążenia silnik śmigłowy, w przeciwieństwie do silnika wielołopatkowego, zatrzymuje się. Gdy moment obciążeniowy jest zmienny, praca silnika śmigłowego na lewej gałęzi charakterystyki jest możliwa, gdy krzywizna charakterystyki momentu obrotowego silnika wiatrowego jest większa, niż krzywizna charakterystyki momentu obciążeniowego.

Wobec niewielkiego momentu rozruchowego silników śmigłowych, znacznie mniejszego od największego momentu obrotowego M_{\max} , silniki te nie mogą ruszać pod znacznie większym obciążeniem. Ta właściwość silników śmigłowych stanowi ich poważną wadę, gdyż powoduje znaczną stratę w niewykorzystywaniu mniejszych szybkości wiatru. Gdy np. moment obciążeniowy jest dwukrotnie większy, niż rozruchowy moment silnika wiatrowego, to silnik, będąc już w ruchu, będzie łatwo pracował nawet przy względnie słabym wietrze na prawej gałęzi charakterystyki, a jednak przy takim samym wietrze nie będzie mógł ze stanu spoczynku ruszyć, dopiero przy znacznie większej szybkości wiatru nastąpi to. Niekiedy szybkość ta musi być nawet pięciokrotnie większa niż szybkość robocza.

Należy tutaj sobie uprzytomnić, że ten mały moment rozruchowy szybkobieżnego silnika wiatrowego jest spowodowany tą właśnie jego szybkobieżnością. Dla uzyskania dużej szybkobieżności śmigła, jego łopaty muszą być ustawione pod bardzo małym kątem względem płaszczyzny obrotu, gdyż tylko w tych warunkach można uzyskać znaczną szybkość unoszenia u , która ze znakiem ujemnym daje zasadniczo z szybkością wiatru v szybkość względną w , tak skierowaną, że uzyskuje ona odpowiedni kąt natarcia profilu śmigła. Dla tak ustawionego śmigła, będącego w spoczynku, z powodu braku szybkości unoszenia szybkość wiatru jest zarazem szybkością względną, a będąc zupełnie nieodpowiednio skierowaną względem profilu śmigła, nie może dać odpowiedniej siły nośnej, a zatem i jej składowej obwodowej, istotnej dla momentu obro-

towego. Niedostateczny dla rozruchu wiatr wywołuje na śmigle tylko parcie osiowe.

Ten mały moment rozruchowy silników śmigłowych ma jednak mniejsze znaczenie przy użyciu ich do napędu prądnic elektrycznych oraz pomp odśrodkowych, gdyż i one przy rozruchu oraz przy mniejszych szybkościach obrotowych dają niewielki moment obciążeniowy.

W przypadkach zastosowania silników śmigłowych do napędu maszyn o znacznym podczas rozruchu momencie obciążeniowym należy przejściowo zwiększać sztucznie moment rozruchowy silnika albo też włączać obciążenie na silnik dopiero po uzyskaniu przez niego odpowiedniej szybkości obrotowej.

Sztuczne zwiększenie momentu rozruchowego uzyskuje się przez odpowiednie przekręcenie łopat śmigła podczas jego spoczynku, aby uzyskać odpowiedni kąt natarcia profilu, który umożliwiłoby powstanie odpowiednio większej siły nośnej, a zatem i momentu obrotowego. Zrozumiałym jest, że kąt ustawienia łopat śmigła względem płaszczyzny obrotu powinien być wtedy większy, niż podczas jego pracy normalnej.

W praktyce uzyskuje się to paroma sposobami, o których będzie jeszcze mowa, a tutaj zwrócimy uwagę tylko na kształt typowej charakterystyki tego rodzaju silnika śmigłowego, przedstawionej na rys. 155 linią przerywaną.

Samoczynne włączanie obciążenia na silnik wiatrowy po uzyskaniu przez niego odpowiedniej szybkości obrotowej dokonywa się przy pomocy różnego rodzaju sprzęgieł, najczęściej ciernych. Sprzęgła te włączają obciążenie pod działaniem siły odśrodkowej po przekroczeniu odpowiedniej szybkości obrotowej oraz odłączają to obciążenie przy odpowiednim zmniejszeniu się szybkości obrotowej. Sprzęgła te są zarazem wykorzystywane do ograniczania wielkości momentu obrotowego podczas zbyt silnych wiatrów.

Aby sprzęgła tarciove mogły prawidłowo spełniać swe zadania, muszą być przede wszystkim samoczynne, gdyż ilość włączeń i wyłączeń obciążenia przy dość nierównomiernych wiatrach dochodzi do kilku w ciągu jednej minuty. Poza tym szybkość obrotowa n_2 , przy której sprzęgło włącza obciążenie powinna być większa od

szybkości obrotowej n_1 , przy której sprzęgło obciążenie to wyłącza.

W celu osiągnięcia możliwie dużej sprawności sprzęgła, jego część włączana powinna mieć możliwie mały moment bezwładności, a regulator odśrodkowy sprzęgła, sterujący jego działaniem, powinien być astateczny, to jest musi umożliwiać momentalne i pełne załączenie obciążenia po osiągnięciu szybkości obrotowej n_2 oraz momentalne i pełne jego wyłączenie po spadku szybkości obrotowej do n_1 .

Ze względu na potrzebę ograniczenia momentu obrotowego silnika sprzęgło to powinno w zakresie szybkości obrotowej od n_2 do n_1 przenosić stały moment o określonej wielkości.

Sprzęgło takie o możliwie prostej konstrukcji udało się zbudować radzieckiemu konstruktorowi S. B. Perli (rys. 156).

W silnikach śmigłowych wielki wpływ na moc wywiera właściwy kształt oraz jakość powierzchni samego śmigła. Śmigła muszą być odpowiednio oprofilowane już w silnikach o wyróżniku szybkobieżności większym od 2,5. Im większa jest szybkobieżność silnika wiatrowego, tym dokładniejsze powinno być oprofilowanie jego śmigła oraz gładza powierzchnia jego łopat, a przy tym śmigło takie powinno być możliwie dokładnie zrównoważone.

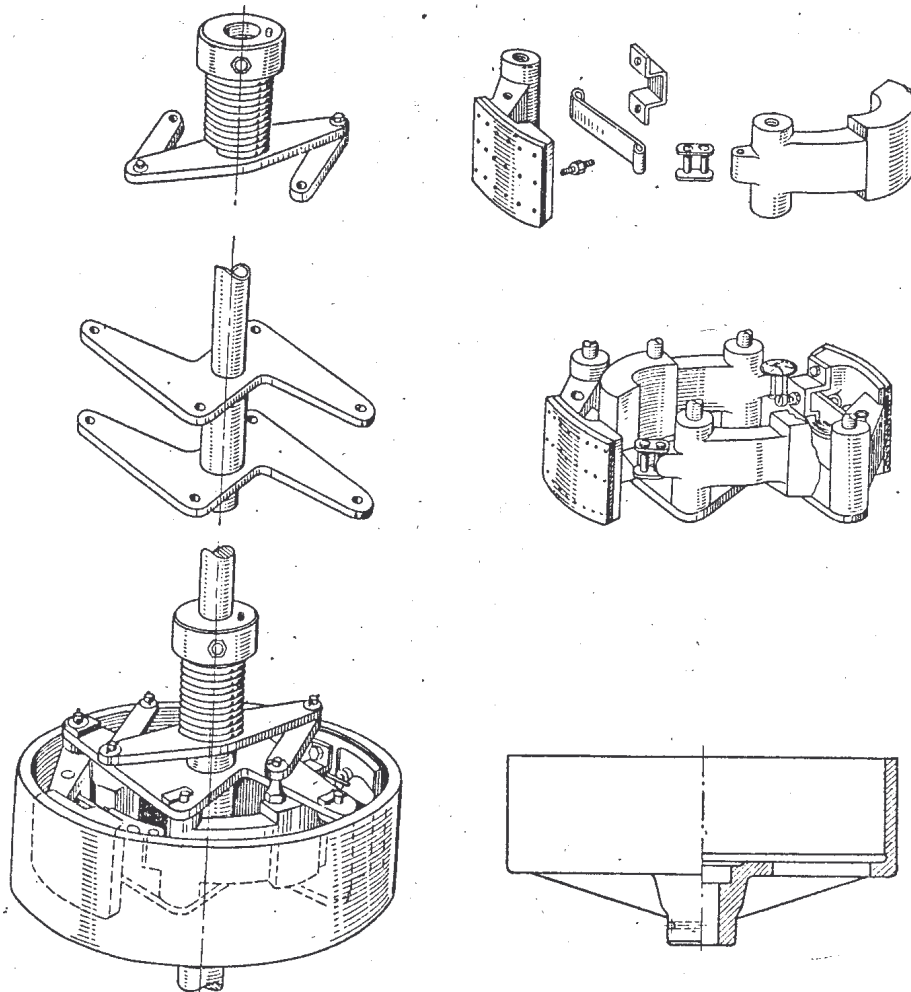
d. Zespoły wiatrowo-elektryczne

Zespołami wiatrowo-elektrycznymi nazywają się urządzenia, składające się z silnika wiatrowego szybkobieżnego sprzężonego bezpośrednio lub za pośrednictwem przekładni (zwykle zębatej) z prądnicą elektryczną, znajdującą się tuż przy kole wiatrowym, czyli w odpowiednio przystosowanej do tego głowicy silnika wiatrowego. Urządzeń wiatrowych natomiast, w których moc mechaniczna jest przenoszona do maszyn roboczych za pośrednictwem pionowego wału, czyli do maszyn znajdujących się u podnóża wieży, do zespołów wiatrowo-elektrycznych zaliczać nie będziemy, choćby nawet służyły do wyłącznego napędu prądnic elektrycznych; urządzenia te zostały opisane w punkcie 3c tego rozdziału.

Opis zespołów wiatrowo-elektrycznych został wyłączony do odrębnego działu dlatego, że zespoły te stanowią bardzo osobliwą grupę urządzeń wiatrowych, ze wszystkich urządzeń wiatrowych

stanowią grupę najliczniejszą oraz dla wykorzystania energii wiatru posiadają największe znaczenie i roszą największe możliwości rozwojowe.

Prądnicę elektryczną. Przed przystąpieniem do opisu poszczególnych zespołów wiatrowo-elektrycznych należy

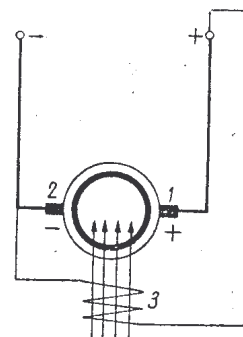


Rys. 156. Samoczynne sprzęgło cierne

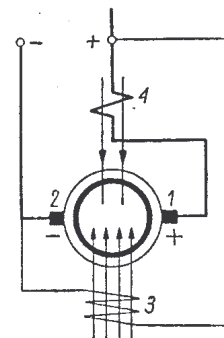
przede wszystkim zapoznać się z budową maszyn elektrycznych, zwłaszcza pod względem możliwości ich zastosowania w zespołach wiatrowo-elektrycznych. Ograniczymy się jednak tutaj tylko do

najważniejszych, a przy tym szczególnie nas interesujących zagadnień, co się zaś tyczy teorii i budowy maszyn elektrycznych, odsyłamy czytelnika do książek specjalnych, w których ten temat jest rozpatrzony szczegółowo. W tym dziale będą również rozpatrzone schematy układów połączeń elektrycznych oraz poszczególne ich charakterystyczne części składowe.

Silniki wiatrowe pracują zwykle przy znacznych zmianach szybkości obrotowych, które zależnie od zastosowanego systemu regulacyjnego obniżają się niekiedy do 30% szybkości znamionowych. Do takich warunków pracy, zwłaszcza dla mniejszych mocy,



Rys. 157. Schemat prądnicy z bocznikowym uzwojeniem magnesującym



Rys. 158. Schemat prądnicy z bocznikowo-szeregowym (różnicowym) uzwojeniem magnesującym

nadają się najlepiej prądnicę prądu stałego, które mogą względnie łatwo utrzymywać swe napięcie na prawie stałym poziomie. Prądnicę prądu zmiennego dawałyby w tych warunkach niedopuszczalnie dla zwykłych celów wahającą się częstotliwość. Tylko w szczególnych przypadkach prąd elektryczny o tak zmiennej częstotliwości może być wykorzystywany.

Z prądnic prądu stałego dla naszych celów mogą być zastosowane przede wszystkim prądnicę bocznikowe (rys. 157). Cechą charakterystyczną tych prądnic jest zasilanie ich uzwojenia magnesującego 3 zasadniczo całkowitym napięciem prądnicy. Niekiedy stosuje się również i prądnicę bocznikowo-szeregową, o magnesowaniu różnicowym (rys. 158), które oprócz magnesującego uzwojenia bocznikowego 3 posiadają dodatkowe uzwojenie 4 włączone szeregowo w zewnętrzny obwód obciążeniowy, a przeciw-

działające uzwojeniu bocznikowemu. Tym zewnętrznym obwodem obciążeniowym jest zwykle bateria akumulatorów.

Wpływ szeregowego uzwojenia na magnesowanie prądnicy jest taki, że, gdy na skutek zwiększania się jej szybkości obrotowej wzrasta jej napięcie, wzrasta również i natężenie prądu, pobierane z prądnicy. Prąd ten przepływa przez uzwojenie szeregowo w kierunku przeciwnym do prądu, płynącego w uzwojeniu bocznikowym, osłabiając jego działanie. Przy odpowiednim stosunku ilości zwojów obu uzwojeń magnesujących można uzyskać względnie stałe napięcie prądnicy w dość dużym zakresie jej szybkości obrotowej oraz niewielkie zmiany natężenia prądu, ładującego baterię akumulatorów.

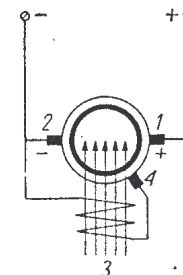
Dla zespołów wiatrowo-elektrycznych mniejszej mocy (do 1 kW) stosuje się zwykle prądnice używane w samochodach, ciągnikach, rzadziej prądnice używane w wagonach kolejowych itp. Warunki pracy tych prądnic są zupełnie podobne do warunków pracy silników wiatrowych, gdyż i one pracują w szerokim zakresie zmienności szybkości obrotowej. W celu utrzymania w tych warunkach możliwie stałego napięcia prądnice te pracują przy dużym nasyceniu magnetycznym i niekiedy są zaopatrzone we względnie proste regulatory napięcia.

Zupełnie bez regulatora napięcia mogą pracować prądnice z tak zwaną trzecią szczotką (rys. 159). Są to prądnice bocznikowe, których uzwojenie magnesujące 3 jest zasilane napięciem, pobieranym z twornika prądnicy przy pomocy dodatkowej szczotki 4, ustawionej na komutatorze między szczotkami głównymi, wyzyskujące do regulacji napięcia zmiany reakcji twornika, zależnej od natężenia prądu obciążeniowego. W działaniu swym regulacja ta jest zupełnie podobną do działania różnicowego magnesowania prądnic bocznikowo-szeregowych. Dzięki takiemu zasilaniu uzwojenia magnesującego uzyskuje się względnie niewielkie zmiany napięcia w szerokim zakresie szybkości obrotowej prądnicy, wynoszącym nawet od 700 do 4500 obr/min. Prądnice te wykazują jednak swe właściwości tylko przy stałym obciążeniu, gdyż przy częściowym obciążeniu reakcja twornika jest niedostateczna do przeciwdziałania wzrostowi napięcia. W przypadkach biegu luzem takich prądnic, jak i w ogóle wszystkich prądnic bocznikowych występuje, często obserwowane ich uszkodzenie, polegające na

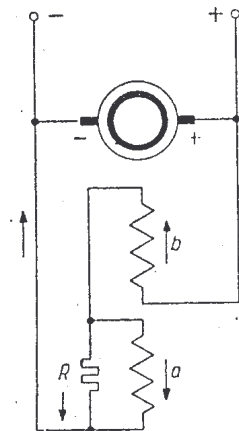
przegrzaniu izolacji uzwojenia magnesującego, stanowiące w tych warunkach jedyne „obciążenie” twornika prądnicy i oczywiście potęgujące wzrost jego napięcia.

Również bez regulatorów, mogłyby w tych warunkach pracować i prądnice systemu Rosenberga, jednak w urządzeniach wiatrowych nie są one stosowane ze względu na bardziej złożoną budowę, znacznie większy ciężar, mniejszą sprawność oraz znacznie większy koszt.

W Związku Radzieckim stosuje się do tych samych celów szczególny sposób zasilania uzwojeń magnesujących zwykłej prądnicy bocznikowej, schemat której przedstawiono na rys. 160.



Rys. 159. Schemat prądnicy z trzecią szczotką



Rys. 160. Schemat magnesowania prądnicy bocznikowej systemu radzieckiego

Bocznikowe uzwojenie magnesujące tej prądnicy składa się z dwu części (a i b), połączonych ze sobą szeregowo, przy czym część a stanowi zasadnicze uzwojenie magnesujące, zaś część b — uzwojenie przeciwdziałające uzwojeniu zasadniczemu. Równolegle do uzwojenia zasadniczego jest przyłączony opornik R o nieliniowej charakterystyce spadku na nim napięcia. Oporność bowiem tego opornika zależy w wysokim stopniu od natężenia prądu przez niego przepływającego i jest tym mniejsza im prąd ten jest większy.

Gdy napięcie twornika na skutek zwiększania szybkości obrotowej zaczyna wzrastać, zwiększa się również i prąd w uzwoje-

niach magnesujących, jednak w uzwojeniu *a* znacznie mniej niż w oporniku *R*. Ponieważ suma obu tych prądów przepływa przez uzwojenie *b*, zatem przez to ostatnie przepływa znacznie większy prąd, niż poprzednio i niż to wypadaloby z wielkości wzrostu napięcia prądnicy. Wskutek tego nieznaczny wzrost napięcia prądnicy powoduje duże działanie odmagnesowujące ją, co w wyniku daje stałość napięcia prądnicy.

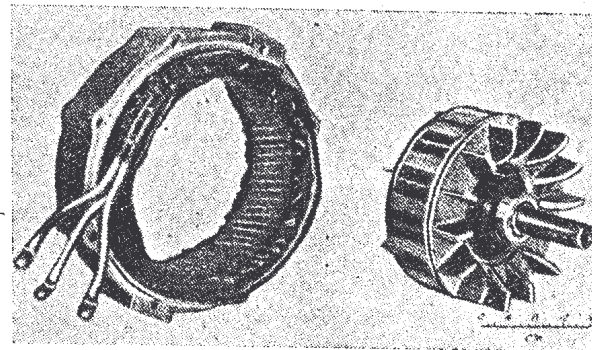
Prądnice w ten sposób magnesowane są w stanie utrzymywać prawie stałe napięcie przy wahaniami się szybkości obrotowej $\pm 25\%$. Ze względu na mniejszą sprawność takiej prądnicy może być ona stosowana tylko do niewielkich urządzeń wiatrowo-elektrycznych. Ponieważ dla prawidłowego działania prądnicy jej obwód magnetyczny musi być nienasycony, jej ciężar, a zatem i koszt jest większy od prądnic zwykle stosowanych.

Słabą stroną wszystkich prądnic prądu stałego jest ich komutator oraz pracujące na nim szczotki węglowe, wymagające pewnego, choć dorywczego doglądu, dokonywanego jednak w dość uciążliwych warunkach.

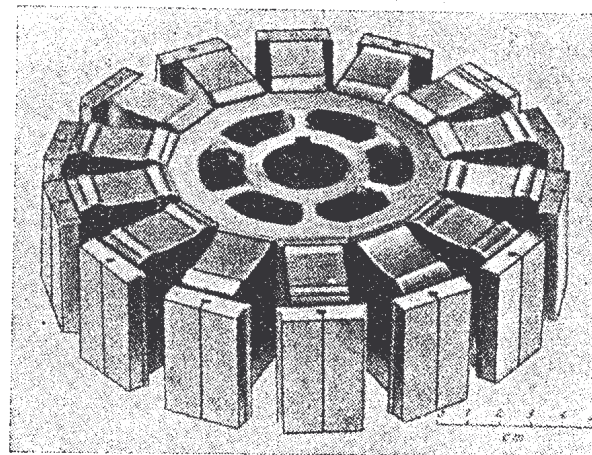
Prądnice synchroniczne prądu zmiennego nie posiadają wprawdzie komutatora, jednak do zasilania swego uzwojenia magnesującego (co może być dokonywane tylko prądem stałym) wymagają zasadniczo wzbudnicy, posiadającej komutator. Dopiero ostatnio uzyskane postępy w budowie prostowników stykowych dozwoliły na dokonywanie zasilania uzwojenia magnesującego prądnic synchronicznych ich własnym napięciem prostowanym przez prostowniki selenowe. Wprawdzie do doprowadzenia do wirnika tego prądu magnesującego muszą być użyte pierścienie ślizgowe i szczotki, jednak praca ich jest znacznie łatwiejsza i pewniejsza, niż praca szczotek na komutatorze, a przez to wymagają znacznie mniejszego doglądu.

Jeszcze prostszy układ magnetyczny posiada wirnik, którego bieguny magnetyczne są wykonane ze stałych magnesów, a zatem nie wymagających dla swego magnesowania prądu elektrycznego. Wobec osiągniętych ostatnio znacznych postępów w otrzymywaniu stali magnetycznych, umożliwiających wykonanie magnesów o dużej energii magnetycznej oraz o znacznej odporności na odmagnesowanie się ich pod wpływem reakcji twornika, można wykonać takie wirniki generatorów dla względnie dużych mocy

(500 kVA). Przedstawiony na rys. 161 czternastobiegunowy wirnik z magnesami wykonanymi ze stopu Alnico V oraz stojan należący do generatora typu amerykańskiego o mocy 3,13 kVA (400 Hz). Na rys. 162 przedstawiono ten sam wirnik przed zalaniem go metalicznym glinem oraz przed ostateczną obróbką.



Rys. 161. Wirnik i stojan prądnicy synchronicznej ze stałymi biegunami



Rys. 162. Wirnik tej prądnicy przed zalaniem go glinem i przed obróbką

Otrzymany z tych prądnic prąd zmienny jedno- lub trójfazowy o dowolnej, a przy zmiennych szybkościach obrotowych o zmiennej częstotliwości daje znacznie większe niż prąd stały, możliwości regulacji napięcia bez użycia jakichkolwiek regulatorów o ruchomych stykach, a więc wymagających doglądu i niepewnych w pracy. Ze względu na prawie całkowitą swobodę

obioru w takich urządzeniach częstotliwości prądu zmiennego można ją obrać znacznie wyższą od częstotliwości przemysłowej (50 Hz,) np. 400 Hz, przez co uzyskuje się znaczne zmniejszenie wymiarów i ciężarów generatorów, dławików, kondensatorów itp., potrzebnych dla żądanych mocy.

Do regulacji napięcia przy zmiennych szybkościach obrotowych prądnicy oraz przy zmiennym ich obciążeniu wykorzystuje się odpowiednio zestawione obwody elektryczne, oddziałujące albo na główny prąd obciążeniowy albo na prąd magnesowania prądnicy, albo też na jeden i na drugi równocześnie.

W obwodach tych wykorzystuje się w zasadzie albo kompensację sił elektromotorycznych, występujących na pozornych opornościach indukcyjnych odbiorników, przez siły elektromotoryczne, występujące na opornościach pojemnościowych obwodów regulacyjnych, albo też — własności dławików włączonych w obwody prądów zmiennych, a podmagnesowywanych prądem stałym.

Działanie tych dławików polega w zasadzie na uzyskiwaniu przez nie znacznych zmian ich oporności pozornej pod wpływem niewielkich zmian prądu podmagnesowującego.

Prąd zmienny, otrzymywany z tego rodzaju prądnic (generatorów) jest następnie wyprostowywany w odpowiednim zespole prostowników stykowych, zwykle selenowych i jest użyty do ładowania baterii akumulatorów, na którą włącza się odbiorniki.

Przez zastosowanie dodatkowych dławików odpowiednio podmagnesowywanych napięciem ładowanych akumulatorów można „bezstykowo” przerwać prawie całkowicie prąd ładowania po uzyskaniu przez baterię przepisowego stanu naładowania; przez to unika się tak niebezpiecznych dla trwałości akumulatorów ołowionych ich przeładowywań.

Głębsze rozważania w tej tak szeroko w ostatnich czasach rozbudowanej dziedzinie samoregulacji napięcia przy pomocy dławików podmagnesowywanych prądem stałym wyprowadziłyby nas jednak już poza ramy właściwego tematu.

Opisane układy pracy zespołów wiatrowo-elektrycznych z prądnicami prądu zmiennego i nieruchomymi obwodami regulacyjnymi, wytwarzającymi prąd zmienny przetwarzany w następstwie na prąd stały przy pomocy prostowników stykowych, odznaczają się wielką pewnością pracy, a przy tym obywają się

bez jakiegokolwiek obsługi. Układy te wymagają jednak urządzeń specjalnych, trudno dostępnych, a za tym drogich, wobec tego ich stosowanie może mieć rację bytu tylko w wyjątkowych warunkach wykorzystywania energii wiatru. Do powszechnego natomiast użytku, zwłaszcza w urządzeniach mniejszej mocy, mogą znaleźć zastosowanie tylko prądnice prądu stałego, typu samochodowego prawie zawsze i wszędzie dostępne, zatem tanie, a przy niewielkim doглядzie również pracujące pewnie i poprawnie.

Na zakończenie ustępu o prądnicach elektrycznych stosowanych w zespołach wiatrowo-elektrycznych, a właściwie o regulacji ich napięcia, należy jeszcze wspomnieć o układzie pracy prądnicy z baterią akumulatorów, wykorzystywaną właściwie tylko jako element regulacyjny dla napięcia sieci odbiornikowej, a opracowanym w Związku Radzieckim i niekiedy tam stosowanym.

W układzie tym napięcie baterii akumulatorów wynosi tylko około 10% napięcia prądnicy; bateria jest zatem niewielka i nie jest włączana równolegle do prądnicy, jak zwykle, ale szeregowo.

Podczas słabego wiatru, gdy napięcie prądnicy jest niewystarczające do zasilania odbiorników, bateria akumulatorów jest włączana w ten sposób, że jej napięcie dodaje się do napięcia prądnicy i akumulatory są wtedy wyładowywane (rys. 163a). Podczas wystarczająco silnego wiatru, kiedy napięcie prądnicy jest wystarczające do zasilania odbiorników bateria akumulatorów jest wyłączona z pracy, a prądnica pracuje sama bezpośrednio na odbiorniki.

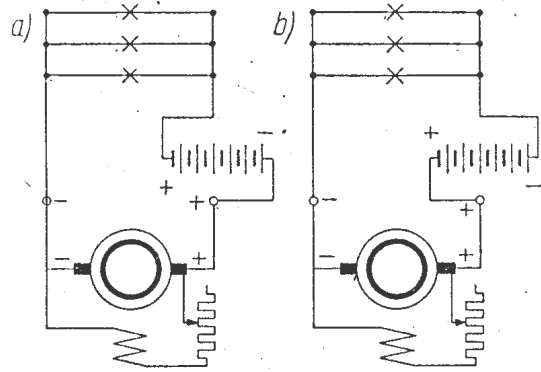
Podczas wiatru silnego, kiedy napięcie prądnicy jest wyższe od napięcia wymaganego przez odbiorniki, bateria akumulatorów zostaje włączona do obwodu w ten sposób, że jej napięcie odejmuje się od napięcia prądnicy, a same akumulatory podlegają ładowaniu (rys. 163b).

Podczas niedostatecznego wiatru oraz podczas ciszy, kiedy zespół wiatrowy nie może być w ruchu, bateria akumulatorów jest włączana na odrębną sieć oświetleniową, traktowaną głównie jako sieć oświetlenia „bezpieczeństwa”.

Wszystkie te włączania i wyłączania baterii akumulatorów są dokonywane samoczynnie przez odpowiedni przełącznik.

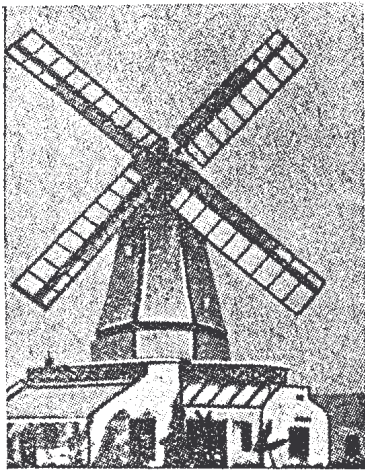
Co się tyczy prądnic (generatorów) prądu zmiennego synchronicznych i asynchronicznych oraz prądnic komutatorowych, sto-

sowanych w zespołach wiatrowo-elektrycznych, wytwarzających prąd zmienny 50 Hz, który jest w następstwie w tej postaci wykorzystywany, to maszyny te zostaną w niezbędnym zakresie opisane przy rozpatrywaniu samych zespołów wiatrowo-elektrycznych.



Rys. 163. Schemat pracy prądnicy z regulacyjną baterią akumulatorów

Urządzenia wiatrowo-elektryczne. Jednym z pierwszych urządzeń, wykorzystujących energię wiatru do produkcji energii elektrycznej, było urządzenie zbudowane w końcu ubiegłego wieku przez duńskiego profesora La Coura, głośnego pioniera tej dziedziny techniki w Askov. Ponieważ urządzenie to było pierwszym urządzeniem udanym, zasługuje na bardziej szczegółowe opisanie.

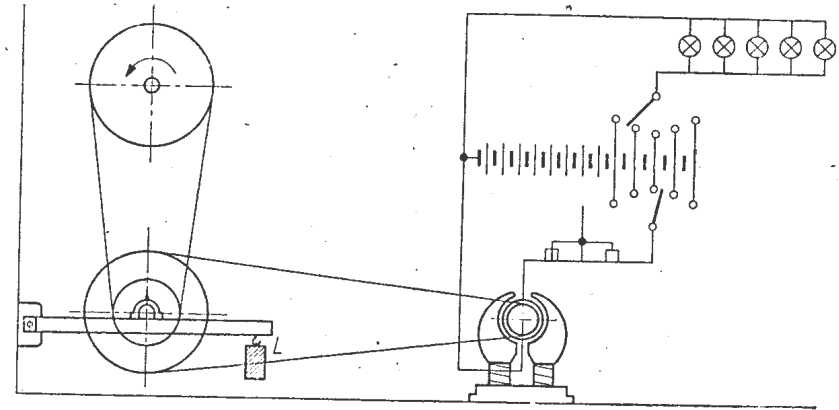


Rys. 164. Wiatrak La Coura

Do wytwarzania energii elektrycznej prof. La Cour użył czteroskrzydłowego wiatraka (rys. 164). W urządzeniu swym zastosował ówczesne zdobycze techniczne, umożliwiające utrzymywanie stałego napięcia prądnicy oraz jej ochronę przed przeciążeniami. Szybkość obrotowa

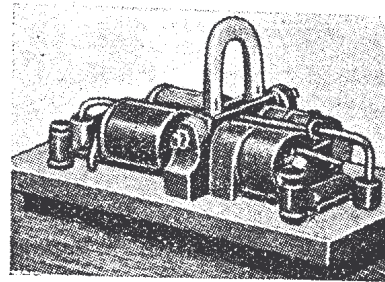
skrzydeł wiatraka była regulowana przy pomocy samoczynnie nastawialnych klap, zaś przed przeciążeniem prądnica była chroniona przez odpowiednio urządzoną przekładnię pasową, której schemat

przedstawiono na rys. 165. W przekładni tej elementem zabezpieczającym był poślizg pasa, występujący w przypadku przekroczenia określonej wielkości momentu obrotowego, regulowanego ciężarem (L). Za pośrednictwem tej przekładni były napędzane dwie prądnice prądu stałego o mocy po 12 KM (8,8 kW), z których jedna służyła głównie do ładowania baterii akumulatorów o napięciu

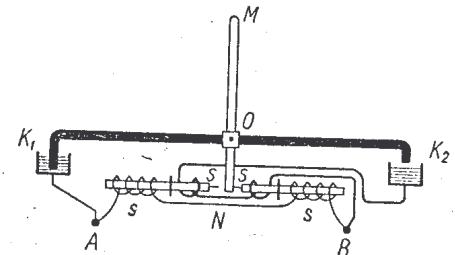


Rys. 165. Schemat przekładni i układ połączeń urządzenia La Coura

150 V i 50 A, druga zaś o napięciu 30 V dostarczała prąd o natężeniu 250 A urządzeniu do elektrolitycznego rozkładu wody na jej składniki tlen i wodór.



Rys. 166. Wyłącznik elektromechaniczny La Coura



Rys. 167. Schemat elektromechanicznego wyłącznika La Coura

W instalacji tej La Cour zastosował samoczynny wyłącznik elektromechaniczny swego pomysłu (rys. 166 i 167), mający za zadanie przerywanie głównego obwodu elektrycznego w chwili od-

wrócenia się w nim kierunku prądu elektrycznego w celu niedopuszczenia do wyładowywania się akumulatorów przez napędzaną przez nie wtedy prądnicę.

Główną częścią tego wyłącznika jest magnes stały M w postaci podkowy, mogący się wahać w obie strony na osi O . Naprzeciw biegunów magnesu znajdują się odpowiednio rozmieszczone bieguny elektromagnesów, zaopatrzone w cztery cewki o dwu uzwojeniach, przy czym jedno z nich $s-s$ jest wykonane z cienkiego drutu o dużej ilości zwojów, drugie zaś $S-S$ o małej ilości zwojów, ale z drutu grubego. Prostopadle do płaszczyzny magnesu jest odpowiednio umieszczony pręt metalowy, który swymi zagiętymi ku dołowi końcami może się zanurzać w dwu naczyniach napełnionych rtęcią, stanowiących styki elektryczne K_1 i K_2 . Koniec pręta K_1 jest zanurzony w rtęci stale (w obu położeniach magnesu M), zaś koniec K_2 jest zanurzony tylko w położeniu przyciągniętych biegunów magnesu na lewą stronę wyłącznika; natomiast w położeniu przyciągniętych biegunów magnesu na prawą stronę koniec pręta K_2 jest z rtęci wyciągnięty.

Wielozwojowa cewka wyłącznika jest włączona (rys. 165) w szereg z prądnicą i baterią akumulatorów połączonych napięciowo przeciw sobie, wobec czego może przez nią przepływać prąd w obu kierunkach zależnie od różnicy napięć pomiędzy prądnicą a baterią akumulatorów.

Podczas postoju lub niedostatecznej szybkości obrotowej prądnicy przez wielozwojową cewkę wyłącznika $s-s$ przepływa prąd elektryczny o takim kierunku, że bieguny magnesu stałego M są przyciągnięte na prawą stronę, wskutek czego styk K_2 jest rozwarthy. Z chwilą jednak zwiększenia się szybkości obrotowej prądnicy i odpowiedniego wzrostu jej siły elektromotorycznej do wielkości, przekraczającej nieco napięcie baterii akumulatorów, przez wielozwojową cewkę wyłącznika $s-s$ przepływa prąd w kierunku przeciwnym do poprzedniego, wskutek czego bieguny magnesu M są odepchnięte z prawej strony, a przyciągnięte na lewą stronę, w wyniku czego następuje zamknięcie głównego obwodu przez styk K_2 , umożliwiające popłynięcie prądu z prądnicy do akumulatorów. Prąd ten będzie przy tym przepływał również i przez małowojową cewkę $S-S$ wyłącznika, zastępując działanie wielozwojowej cewki $s-s$, które na skutek zwarcia obu jej końcówek

przez pręt wyłącznika prawie zanika. Stan ten trwa tak długo, jak długo prąd, przepływający przez uzwojenie $S-S$, zachowuje swój kierunek.

W miarę zmniejszania się szybkości obrotowej prądnicy i obniżania się jej siły elektromotorycznej do wielkości napięcia baterii akumulatorów prąd ładowania, a za tym i przepływający przez uzwojenie $S-S$ wyłącznika, maleje do zera, ale poprzedni stan styków wyłącznika utrzymuje się nadal.

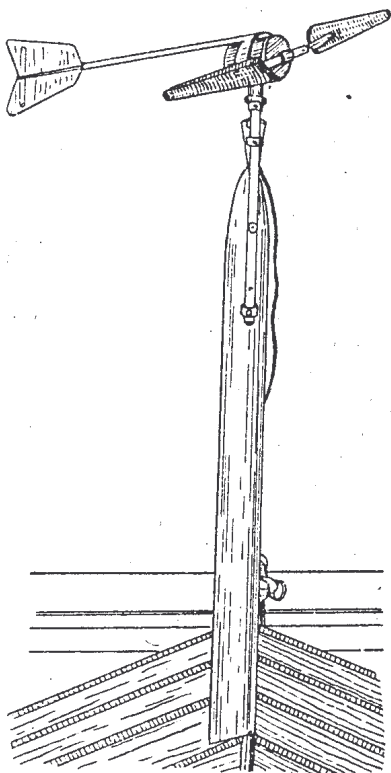
Dopiero, gdy szybkości obrotowe prądnicy, a zatem i jej siła elektromotoryczna zmniejszą się jeszcze bardziej, przez małowojową cewkę wyłącznika zacznie płynąć prąd od baterii akumulatorów do prądnicy, czyli w kierunku odwrotnym do poprzedniego. Na skutek tego bieguny magnesu M zostaną odepchnięte z lewej strony, a przyciągnięte na stronę prawą, co spowoduje wyciągnięcie z rtęci końca pręta K_2 , a za tym i przerwę w obwodzie głównym. Uniemożliwia to płynięcie prądu z baterii akumulatorów do prądnicy, co powodowałoby jej zamianę na silnik, napędzający wiatrak, oraz niepotrzebne wyładowania akumulatorów.

Oczywiste jest, że po rozwarciu się styku K_2 przez uzwojenie $s-s$ wyłącznika płynie prąd, utrzymujący go w tym położeniu dopóki nie nastąpi ponowny wzrost napięcia prądnicy i zamknięcie obwodu głównego przez styk K_2 .

Po tym dość szczegółowym opisie działania pierwszego urządzenia wiatrowo-elektrycznego przejdziemy teraz do przeglądu urządzeń obecnie używanych, bądź też projektowanych.

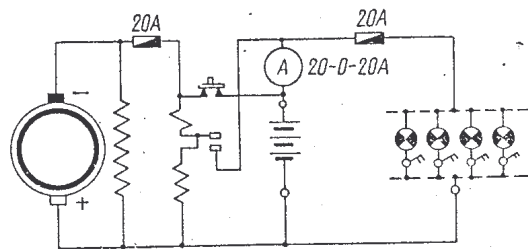
Najprostszymi zespołami wiatrowo-elektrycznymi, wykorzystującymi w pełni szybkobieżność silników śmigłowych, są zespoły względnie małej mocy (do ok. 0,5 kW) o prądnicach prądu stałego napędzanych bezpośrednio dwułopatowymi śmigłami (zwykle drewnianymi) o średnicy 1,5—2 m, osiągającymi szybkość obwodową swych końców 30—50 m/sek. Nastawiania śmigła pod wiatr dokonuje ster tylny, a regulowanie szybkości obrotowej osiąga się przez odchylenie płaszczyzny obrotu śmigła od kierunku wiatru przy pomocy steru boczny albo też przez przekręcanie płatów śmigła pod wpływem siły odśrodkowej. Zespoły takie są używane w miejscowościach pozbawionych dogodnych źródeł energii, przede wszystkim do ładowania akumulatorów radiowych oraz do skromnego oświetlenia izb. Zespoły te są wykonywane zarówno fabrycz-

nie jak i chałupniczo, często przez samych użytkowników przy wykorzystywaniu do tego celu prądnic samochodowych oraz wyłączników samoczynnych. Na rys. 168 przedstawiono taki zespół produkcji radzieckiej (ВІСХОМ РД-1,5) o średnicy śmigła 1,5 m, mocy 100 W i napięciu 6 V, regulowany według systemu Szamani-
na (patrz rozdz. IV, p. 2).



Rys. 168. Zespół wiatrowo-elektryczny

prądnicy, która by, pracując wtedy, jako silnik obracający śmigło, wyładowywała akumulator.

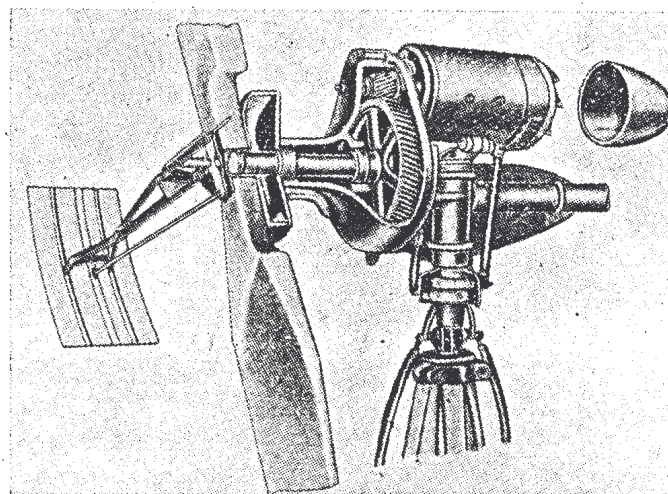


Rys. 169. Schemat połączeń zespołu wiatrowo-elektrycznego ВІСХОМ РД-1,5

Na rys. 169 przedstawiono schemat układu pracy takiego urządzenia wiatrowego.

Zespoły takie, pracując równolegle z baterią akumulatorów, są dodatkowo regulowane obciążeniem użytecznym jednak wahania napięcia elektrycznego na odbiornikach podczas słabego i nierównomiernego wiatru bywają znaczne. Tych wahań napięcia na odbiornikach można uniknąć prawie całkowicie, gdy podczas pobierania energii elektrycznej z akumulatora nie jest on ładowany, a ładowaniu w tym czasie podlega drugi akumulator. Samoczynny wyłącznik służy do odłączania w chwilach zaniku odpowiedniego wiatru baterii akumulatorów od

Urządzenia wiatrowo-elektryczne z przekładnią mechaniczną. Ponieważ dla większej mocy zespołu wiatrowo-elektrycznego potrzeba zwiększyć odpowiednio wielkość jego śmigła (przy zachowaniu tej samej dopuszczalnej szybkości obwodowej jego końców), więc dla bezpośredniego napędu prądnicy musi być ona wolnobrotowa. Prądnica taka jest cięższa oraz znacznie droższa. Tylko w szczególnych przypadkach przez odpowiednie przezwojenie oraz przełączenia wewnętrzne kosztem obni-



Rys. 170. Zespół wiatrowo-elektryczny syst. Windcharger

żenia napięcia oraz mocy można przystosować do tego celu niektóre prądnice lub silniki rozruchowe używane w samochodach. Postępowanie to jest jednak kłopotliwe, uciążliwe i dość kosztowne, wobec czego w zespołach większej mocy (ponad 0,5 kW) stosuje się odpowiednie przekładnie, najczęściej zębate, a niekiedy pasowe (klinowe).

Najprostszym zespołem wiatrowo-elektrycznym tego typu jest amerykański zespół firmy Windcharger Co przedstawiony na rys. 170.

Zespół ten posiada dwułopatowe śmigło o konstrukcji metalowo-drewnianej o wyróżniku szybkobieżności równym 6, z klapami regulacyjnymi, umieszczonymi na oddzielnych ramionach prostopadłych do śmigła.

Zespół ten zaczyna ładować akumulatory już przy wietrze o szybkości 3 m/sek. Prądnicą prądu stałego jest umieszczona na wierzchu głowicy zespołu i jest napędzana za pośrednictwem przekładni zębatej o skośnych zębach, pracującej w szczelnej osłonie. Moc prądnic wynosi 500, 650 i 1000 W, napięcie zaś 6, 12, 32 i 110 V.

Ten układ głównego wału przekładni i prądnicy umożliwia najszersze rozpowszechnienie wiatrowych zespołów małej mocy przy wykorzystaniu w nich prawie wszystkich typów prądnic samochodowych, ciągnikowych itp. o różnych szybkościach obrotowych, które jest łatwo przez użycie odpowiedniej przekładni przystosować do szybkości obrotowej śmigła.

Wiatrowa część napędna takiego zespołu może być wykonana w różny sposób zwłaszcza pod względem regulacji szybkości obrotowej śmigła. Najwłaściwszym jednak wydaje się użycie tutaj śmigła z przekraczającymi się względem swych osi łopatom z najprostszą regulacją systemu Szamanina, Fatiejewa-Peczковского (rozd. IV punkt 2c). Konstrukcja takiego zespołu została szczegółowiej opisana w rozdz. VII. -

Ale i śmigłom sztywnym zaopatrzonym w kłapy regulacyjne na końcach łopat lub na oddzielnych ramionach nie można odmówić celowości zastosowania w tych przypadkach, zwłaszcza że setki tysięcy takich zespołów pracuje poprawnie już od szeregu lat.

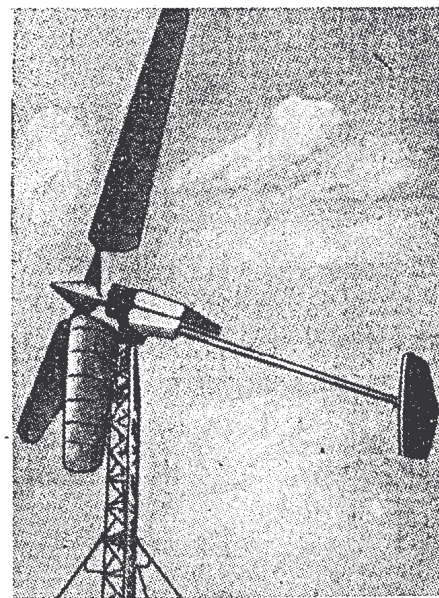
Zupełnie podobnym zespołem wiatrowo-elektrycznym, lecz bardziej złożonym, a przez to droższym, ale bardziej przystosowanym do większych mocy, jest zespół systemu Königa (rys. 171).

Zespół ten posiada trójłopatowe śmigło o średnicy 10 m, którego łopaty dla celów regulacyjnych przekraczają się względem swych osi pod wpływem zwykłego regulatora odśrodkowego (patrz rozdz. IV p. 2c).

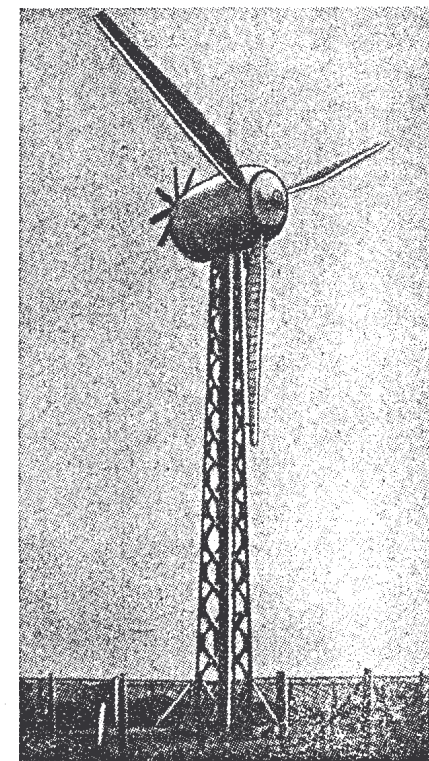
Pomyślnie wyniki pracy tego zespołu zachęciły do wzniesienia podobnego zespołu o średnicy 20 m i mocy prądnicy 25 kW. Dla umożliwienia współpracy tego zespołu z siecią elektryczną przewidziano w nim trójfazową prądnicę asynchroniczną.

Te typy zespołów wiatrowo-elektrycznych zwłaszcza o większych mocach (10 do 100 kW), posiadające często przekładnie dwustopniowe, stanowią właściwy trzon energetyki wiatrowej. Właśnie takie zespoły o mniejszych mocach (do 20 kW) są w stanie za-

opatrywać w energię elektryczną osiedla odległe od elektrycznych linii dosyłowych, a pozbawione własnych dogodniejszych źródeł energii lub posiadające je w niewystarczającej ilości. Zespoły zaś większej mocy (100 kW), pracując równolegle z siecią elektryczną, mogą przyczynić się do oszczędności węgla w elektrowniach cieplnych. Zadania te jednak będą mogły być przez ener-



Rys. 171. Zespół wiatrowo-elektryczny syst. Königa



Rys. 172. Zespół wiatrowo-elektryczny syst. Teubert

tykę wiatrową rozwiązane tylko przez dalsze ulepszenie konstrukcji urządzeń wiatrowych w celu usprawnienia ich pracy i obniżenia kosztów. Ponieważ zaś prawie cała przyszłość energetyki wiatrowej spoczywa przed wszystkim na tym dziale urządzeń wiatrowych, zostaną tutaj rozpatrzone liczniejsze przykłady ich wykonania.

Na rys. 172 przedstawiono zespół wiatrowo-elektryczny sy-

stemu Teubert o trójłopatowym śmigle średnicy 15 m i wyróżniku szybkoobrotowości równym 6, pracujący na 15-metrowej wieży. Łopaty śmigła o profilu opływowym są wykonane z blachy stalowej i posiadają kształt trapezowy. Płaty śmigła mogą się przekreślać względem swych osi, co jest wykorzystane nie tylko dla regulacji szybkości obrotowej śmigła i jego mocy, ale również i dla ułatwienia rozruchu oraz ochrony podczas huraganów. Śmigło zespołu pracuje z tyłu wieży. Ponieważ jednak siła, zwracająca głowicę zespołu, okazała się niewystarczającą, głowicę zaopatrzone w dwa boczne koła wiatrowe, nastawiające ją za pośrednictwem przekładni ślimakowej odpowiednio do kierunku wiatru.

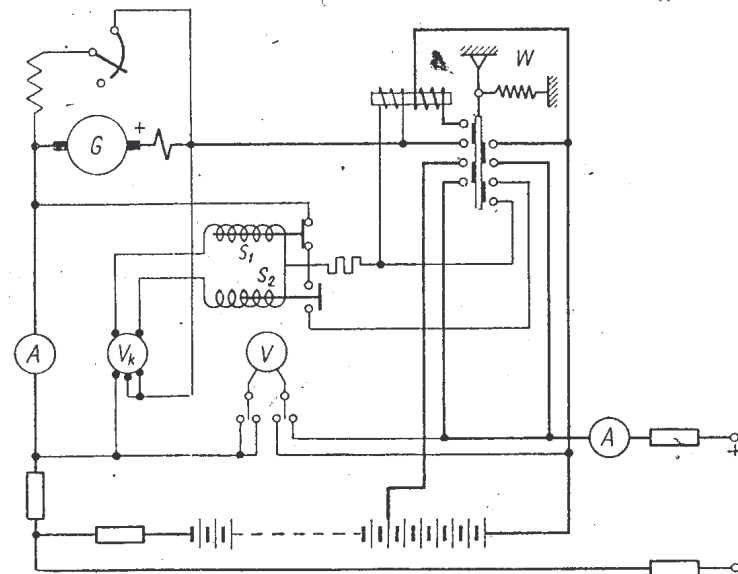
Głowica zespołu jest ukształtowana w postaci gondoli, której czop jest osadzony w wieży w dwu łożyskach kulkowych. Łożyska te są tak duże, że umożliwiają przejście z wieży do gondoli przez swe wnętrza. We wnętrzu gondoli mieszczą się łożyska wału głównego zespołu, dwustopniowa przekładnia zębato-pasowa o przełożeniu 1 : 34, prądnica oraz urządzenie regulacyjne. Urządzenie regulacyjne jest dość złożone i w zasadzie polega na oddziaływaniu regulatora odśrodkowego na dźwignie, przekreślające płaty śmigła względem ich osi.

Do wytwarzania prądu elektrycznego została użyta zwykła prądnica bocznikowa z biegunami zwrotnymi na napięciu 115 V/150 V, pracująca na baterię akumulatorów 110 V wg schematu połączeń przedstawionego na rys. 173.

Odbiorniki są włączone na baterię akumulatorów, która w celu zmniejszenia wahań napięcia podczas ładowania i wyładowania posiada dodatkowy zaczepek na szóstym ogniwie akumulatorowym. Samoczynny przełącznik *W* nastawiany przez dwustykowy woltomierz V_k za pośrednictwem dwu przekaźników S_1 i S_2 (S_1 — zamykający, S_2 — otwierający) posiada dwa położenia: jedno zajmowane przy odpowiednio wysokim napięciu prądnicy, mogącej wtedy ładować akumulatory, oraz drugie zajmowane przy niedostatecznym dla ładowania akumulatorów jej napięciu. W tym ostatnim położeniu zasilanie odbiorników jest dokonywane wyłącznie przez baterię akumulatorów.

Zespół rusza już przy wietrze o szybkości 2 m/sek, a zastosowane urządzenia regulacyjne utrzymują jego szybkości obrotowe praktycznie na stałym poziomie.

Zespoły wiatrowe duńskiej firmy F. L. Smith wyróżniają się od dawna swą dużą szybkoobrotowością, której wyróżnik osiągał już na początku wojny wielkość 12,5. Przedstawiony na rys. 174 zespół wiatrowy tej firmy posiada trójłopatowe śmigło o profilu opływowym i pracuje na betonowej wieży. W innych i to nawet częściej spotykanych, wykonaniach są stosowane śmigła dwułopatowe, a wieże o konstrukcji kratowej. Głowica zespołu jest nastawiana



Rys. 173. Schemat połączeń urządzenia syst. Teubert

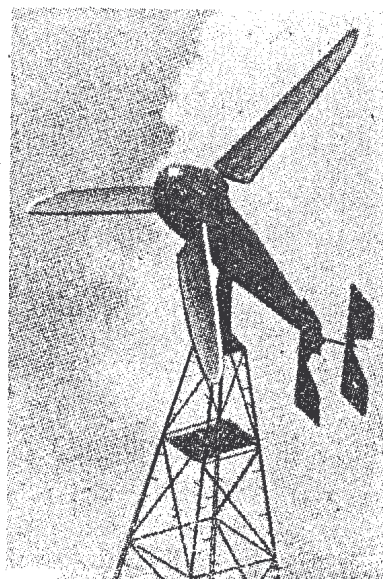
wiana odpowiednio do kierunku wiatru przy pomocy bocznych kół wiatrowych. Regulacja szybkości obrotowej jest dokonywana przy pomocy zwiększania oporów aerodynamicznych śmigła. Dokonywa się to przez umieszczenie na każdym z płatów śmigła dodatkowego skrzydła, które przy mniejszych szybkościach obrotowych śmigła jest przyciskane odpowiednią sprężyną do powierzchni płata, nie pogarszając prawie jego doskonałości aerodynamicznej. W chwili jednak przekroczenia pewnej szybkości obrotowej śmigła dodatkowe skrzydła odsuwają się od płatów, powodując zwiększenie ich oporów aerodynamicznych, a przez to przyhamowanie śmigła. Do całkowitego zatrzymania zespołu służy odpowiednio urządzony na wale głównym hamulec. Hamulec ten, jak również i regulacyjne skrzydła na płatach śmigła można uru-

chamiać z powierzchni ziemi przy pomocy linki. Prądnicą prądu stałego lub zmiennego jest umieszczona w głowicy zespołu i jest napędzana przez śmigło za pośrednictwem przekładni.

Wobec dużej szybkobieżności śmigła i utrudnionego przez to jego rozruchu zespół musi być przy odpowiednim wietrze wprawiony w ruch przy pomocy dodatkowego silnika elektrycznego albo też przy pomocy własnej prądnicy, pracującej wtedy jako silnik. Bez tego bowiem znaczne ilości energii słabszych wiatrów nie mogłyby być odpowiednio wykorzystywane.



Rys. 174. Zespół wiatrowo-elektryczny syst. Smitha

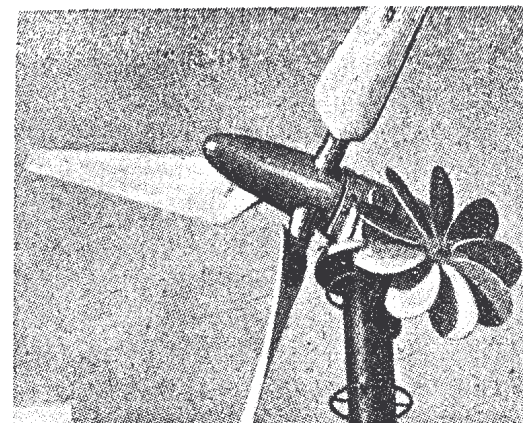


Rys. 175. Zespół wiatrowo-elektryczny syst. Porsche

Przedstawiony na rys. 175 zespół wiatrowo-elektryczny niemieckiej firmy Porsche został zbudowany pod koniec drugiej wojny światowej i był przygotowany do produkcji seryjnej. Zespół ten o mocy 10 kW, o średnicy trójłopatowego śmigła 9,2 m i wyróżniku szybkobieżności równym 7 pracował na wieży wysokości 19,6 m. Zespół ten był wyposażony w prądnicę prądu stałego na napięcie 110 V o różnicowym, bocznikowo-szeregowym zasilaniu uzwojenia magnesującego, napędzaną przez śmigło za pośrednictwem dwustopniowej przekładni zębatej. Płaty śmigła

były wykonane z blachy stalowej odpowiednio wytłaczanej i punktowo zespawanej. Ciężar całego zespołu wynosił 2 tony.

Podobną lecz bardziej nowoczesną konstrukcję śmigła posiadają zespoły wiatrowo-elektryczne niemieckich zakładów Allgaier w Ugingen. Zespoły te można uznać za najdoskonalsze z budowanych dotychczas urządzeń tego rodzaju.



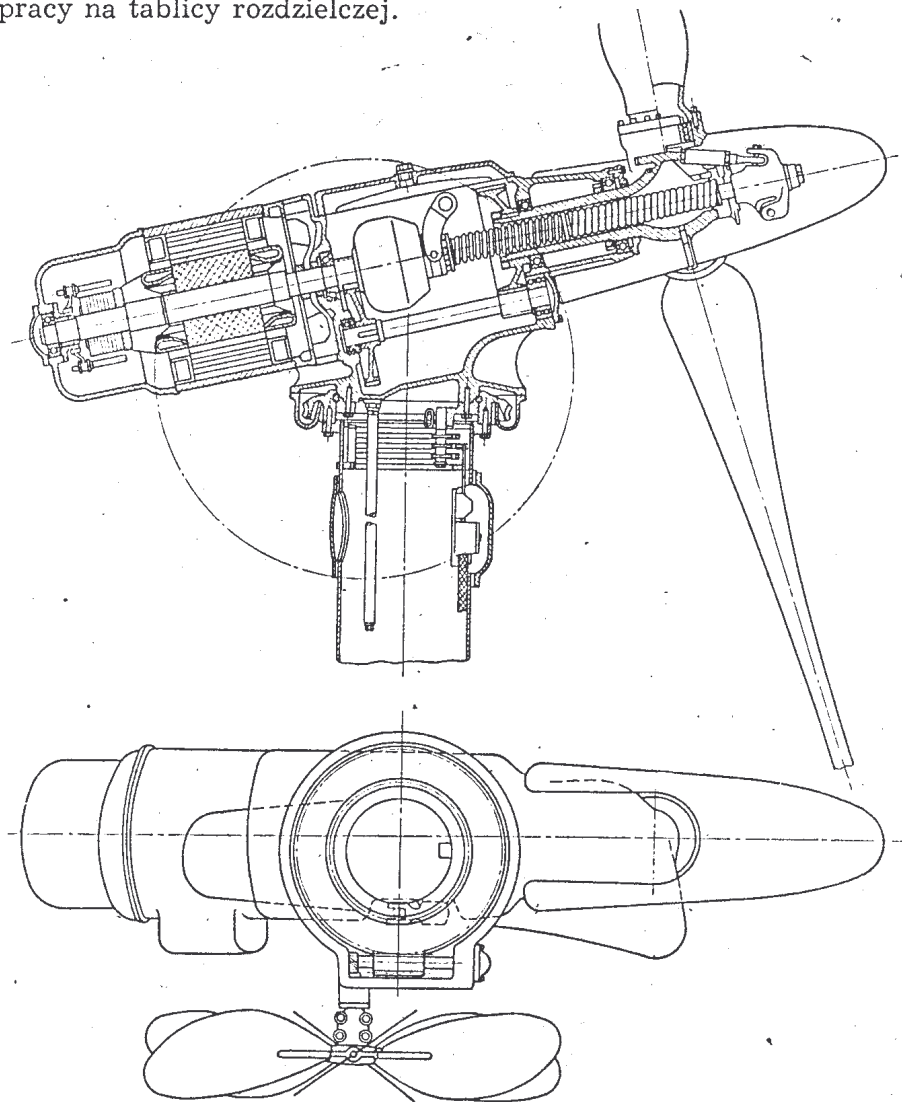
Rys. 176. Zespół wiatrowo-elektryczny syst. Allgaier

Zespół przedstawiony na rys. 176 posiada trójłopatowe śmigło o średnicy 10 m i o wyróżniku szybkobieżności równym 8, a jest umieszczony na rurowym słupie stalowym, zaopatrzone w odpowiednio rozmieszczone odciaży. Głowicę zespołu stanowi odpowiednio ukształtowany odlew stalowy, przedstawiony w przekroju na rys. 177, w którym mieszczą się łożyska wału głównego, dwustopniowa przekładnia zębata, urządzenia regulacyjne, prądnicą itp.

Łopaty śmigła o kształtach opływowych wykonane z wytłaczanej i pospawanej blachy stalowej są osadzone w piaście śmigła w ten sposób, że mogą się przekręcać względem swych osi. Przekręcanie to może być dokonywane przez następujące, niezależne od siebie urządzenia:

- naciąg linki nawijanej na ręczny, samohamowny kołowrót umieszczony u podnóża wieży,
- regulator odśrodkowy, działający bezpośrednio na pręt nastawiający łopaty śmigła,

— samoczynne urządzenie hydrauliczne, działające zależnie od warunków wiatrowych albo też od nastawienia warunków pracy na tablicy rozdzielczej.



Rys. 177. Głowica zespołu Allgaier (przekrój)

Ręcznym naciągnięciem linki można przez odpowiednie przekreślenie łopat śmigła zupełnie zatrzymać zespół, uruchomić go (po zwolnieniu naciągu), albo też nastawić zespół na pracę z określo-

ną szybkością obrotową, bez uzależnienia jej od regulatora odśrodkowego.

Po całkowitym zwolnieniu naciągu linki łopaty śmigła pod działaniem odpowiednich sprężyn ustawiają się pod zmniejszonymi kątami natarcia dla ułatwienia rozruchu. Zespół rusza już przy tak słabych wiatrach, przy których nie może być jeszcze mowy o uzyskiwaniu energii użytecznej. Taki ruch silnika umożliwia jednak wykorzystanie już wszystkich silniejszych podmuchów wiatru, wówczas występujących.

Podczas obracania się śmigła jest jednocześnie napędzana przez wał przekładniowy mimośrodowa pompa olejowa tłocząca olej do cylindra zamkniętego tłokiem obciążonym sprężyną, a sprzężonym z prętym nastawiającym łopaty śmigła.

Utrzymywanie stałej szybkości obrotowej śmigła na poziomie 86 obr/min jest dokonywane przez regulator odśrodkowy, który działa na odpowiednią tarczę ciśnieniową, powodującą za pośrednictwem dźwigni i pręta nastawczego zmiany położenia łopat śmigła.

Po nastąpieniu rozruchu zespołu wobec zwiększania się ciśnienia oleju w cylindrze łopaty śmigła zostają przekreścone w odpowiednie położenie robocze. Tłoczony olej stale odpływa spod tłoka przez odpowiedni kanał przepływowy. Przy odpowiedniej równowadze dopływu i odpływu oleju tłok zachowuje swe stałe położenie i nie powoduje zmian w położeniu łopat śmigła. W przypadku natomiast zmian dopływu oleju na skutek zmiany szybkości obrotowej pompy olejowej następuje odpowiednie przekreślenie łopat śmigła, powodujące zwiększenie lub zmniejszenie obrotów zespołu.

W tym urządzeniu regulacyjnym przewidziane jest również zabezpieczenie śmigła przed nagłymi i silnymi podmuchami wiatru, a polegające na uchyłaniu się w tych przypadkach pod parciem wiatru odpowiedniej tarczki, która przez otwarcie zaworu powoduje raptowny spadek ciśnienia oleju pod tłokiem i przekreślenie przez to łopat śmigła w położenie równoległe do kierunku wiatru. Dzięki temu urządzeniu następuje bardzo szybkie, gdyż już po 1 do 2 sek zmniejszenie szybkości obrotowej śmigła do prawie jednej trzeciej wielkości znamionowej. W wyniku tego wszystkie siły bezwładnościowe oraz siły parcia wiatru obniżają

się do 12—15% wielkości sił, występujących podczas normalnej pracy zespołu. Po minięciu podmuchu silnego wiatru łopaty śmigła nastawiają się pod działaniem sprężyn w położenie rozruchowe, a w następstwie wzrostu ciśnienia oleju w krótkim czasie zespół rozwija znowu swą pełną moc.

Urządzenie hydrauliczne umożliwia również dokonywanie regulacji i innych wielkości, charakteryzujących pracę zespołu, np. napięcia ładowania akumulatorów. Przez zastosowanie pomiarowego układu mostkowego, oddziaływującego na odpowiedni elektromagnetyczny zawór regulacyjny, uzyskuje się bardzo dokładną i czułą regulację szybkości obrotowej silnika, a za tym i napięcia prądnicy. Wartość graniczną napięcia można ustalić z punktu nastawczego przez proste przekręcanie odpowiedniej gałki.

Nastawianie silnika pod wiatr jest dokonywane przy pomocy bocznego koła wiatrowego i odpowiednio urządzonej przekładni ślimakowej, którą widać na poziomym rzucie zespołu na rys. 177. Prądnica jest wbudowana w zespół w ten sposób, że będąc pozbawioną przedniej tarczy łożyskowej, koniec swojego wału opiera bezpośrednio w łożysku przekładni zębatej. Wszelkie dodatkowe osłony zespołu są zbędne. Moc zespołu wynosi 6 kW.

Rurowy słup jest złożony z rur o różnych średnicach, przy czym podczas przewozu rury są wsunięte jedna w drugą.

Zespoły tego typu pracują od 1951 roku w wielu krajach Afryki i Południowej Ameryki oraz w Niemczech w gospodarstwach hodowlanych i rolnych, w winnicach, osiedlach, latarniach sygnalowych, hotelach górskich, radiowych stacjach przekaźnikowych itp. Zespoły te złożyły dobrze egzamin swej pracy i dowiodły wysokiego stopnia swej doskonałości pracując w różnych warunkach klimatycznych zarówno w strefach burz piaskowych, jak i rejonach o zamieciach śnieżnych, w wilgotnym powietrzu morskim, jak i w upale strefy tropikalnej.

Jednym z najnowszych silników wiatrowych o największym wyróżniku szybkobieżności, wynoszącym (zależnie od wielkości śmigła) 12,6 do 20, jest zespół Bauera, przedstawiony na rys. 178.

Zespół ten posiada śmigło jednołopatowe, a dla przewyciężenia trudności występujących przy niedoskonałym zrównoważeniu tak niesymetrycznego wirnika zespołu, jak również spowodowanych niesymetrycznym działaniem sił, umożliwiono śmigłu

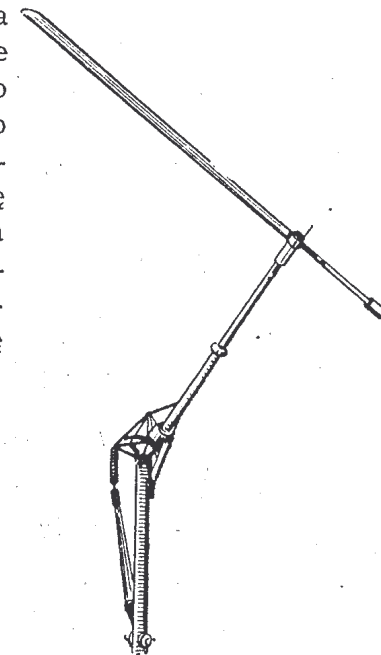
wraz z jego przeciwcieżarem wirowanie względem osi dynamicznej jego równowagi. Dla osiągnięcia tego wał zespołu jest wykonany jako giętki (odpowiednio cienki a długi) i podobnie, jak w turbinach Laval'a, wiruje on z szybkością ponad krytyczną. Wał ten jest tak długi, że pod wpływem wiatru śmigło ustawia się swą płaszczyzną obrotu prostopadle do kierunku wiatru bez jakichkolwiek dodatkowych urządzeń.

Dla regulacji szybkości obrotowej zostało zastosowane dodatkowe wąskie skrzydełko, które podczas mniejszej szybkości obrotowej śmigła przylega do jego powierzchni w ten sposób, że zapewnia całości płata możliwie doskonałe właściwości aerodynamiczne. Po przekroczeniu jednak przez śmigło pewnej, określonej szybkości obrotowej skrzydełko to odpowiednio się przekręca i w wyniku zwiększenia oporów aerodynamicznych działa hamująco na śmigło. W celu całkowitego zatrzymania zespołu przekręca się całą głowicę zespołu w ten sposób, że jego wał ustawia się pionowo, a śmigło zajmuje położenie równoległe do kierunku wiatru.

Zespół Bauera (rys. 178) ma promień śmigła równy 4,3 m i przy wyróżniku szybkobieżności równym 16 posiada moc 3 kW. Na podstawie uzyskanych wyników projektuje się zespół tego typu o promieniu śmigła 19 m i o mocy 100 kW.

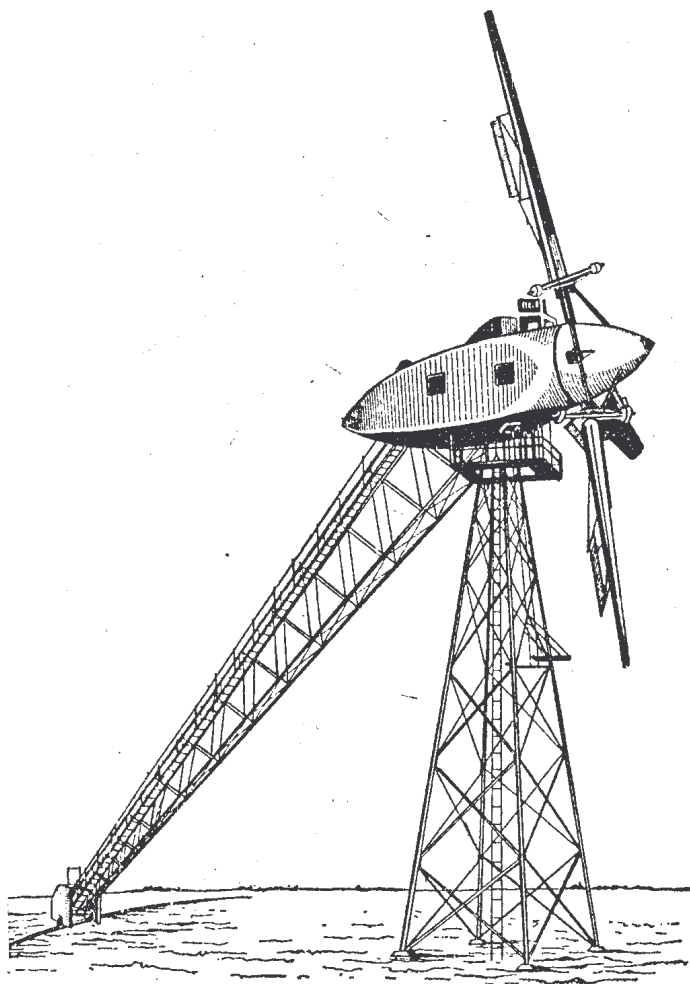
Pierwszy zespół wiatrowo-elektryczny o mocy 100 kW został wzniesiony w ZSRR pod Bałakławą na Krymie już w roku 1931 (rys. 179). Zespół ten został wybudowany jako doświadczalny na wzniesieniu 266 m nad powierzchnią morza i był przeznaczony do współpracy z siecią elektryczną. Uległ on zniszczeniu podczas Drugiej Wojny Światowej i nie został już odbudowany.

Głowica zespołu w postaci odpowiednio ukształtowanej gon-



Rys. 178. Zespół wiatrowo-elektryczny syst. Bauera

doli była umieszczona na kratowym słupie wysokości 233 m o dość lekkiej konstrukcji i była podparta od tyłu kratowym dźwigarem, którego dolny koniec umieszczony na odpowiednim wózku mógł się toczyć na szynie kolejowej, ułożonej na okręgu koła o promieniu 20,5 m.



Rys. 179. Zespół wiatrowo-elektryczny pod Bałakławą

Średnica trójłopatowego śmigła wynosiła 30 m. Łopata posiadała kształt trapezowy, przy czym jej szerokość na obwodzie wewnętrznym wynosiła 2 m, zaś na obwodzie zewnętrznym 1 m.

Grubość płata w szerszym końcu wynosiła 0,68 m. Regulacja szybkości obrotowej była dokonywana przy pomocy stabilizatorów (patrz rozdz. IV punkt 2c). Śmigło o szybkości obrotowej 30 obr/min, i wyróżniku szybkobieżności $Z = 4,75$ napędzało generator asynchroniczny trójfazowy za pośrednictwem dwustopniowej przekładni zębatej o przełożeniu 1 : 21,4. Generator posiadał moc 93 kW, a napięcie 220 V. Przeciążalność generatora dochodziła do 21 % mocy znamionowej, przy czym włączanie i wyłączanie odbywało się samoczynnie. Moc zespołu można było regulować przy pomocy oporników w obwodzie wirnika, które samoczynnie były włączane przy 5-procentowym przeciążeniu zespołu i ponownie zwierane przy spadku obciążenia do 95 % obciążenia znamionowego.

Nastawianie zespołu pod wiatr odbywało się samoczynnie pod działaniem chorągiewki ustawionej na wierzchu głowicy, której położenia względem głowicy powodowały włączenie do pracy w odpowiednim kierunku silnika elektrycznego o mocy 1,5 kW, przetaczającego po szynie wózek z dolnym końcem tylnego dźwigara zespołu.

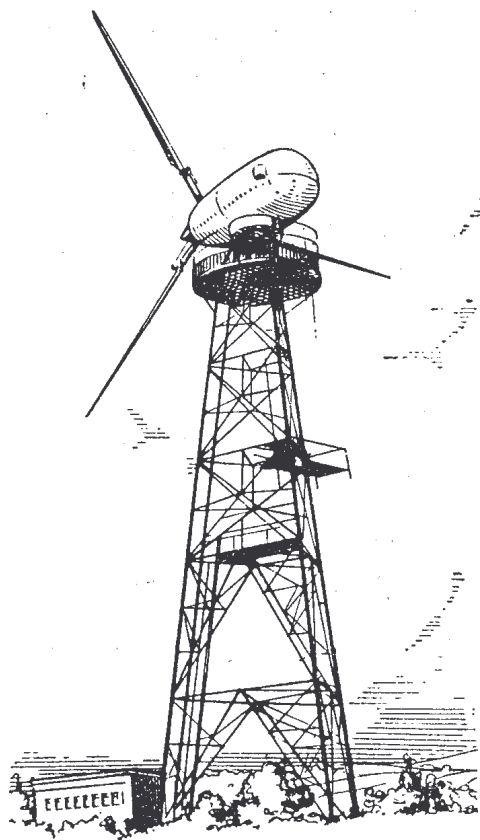
Przeprowadzone doświadczenia nad pracą tego zespołu wykazały wartość współczynnika wykorzystania energii wiatru $c_1 = 0,242$ oraz dowiodły możliwość poprawnej współpracy zespołu wiatrowego z generatorem asynchronicznym z siecią elektryczną. Odrębna od spotykanych dotychczas konstrukcja wieży wraz z tylną podporą nie jest jednak pod względem zużycia materiałów dość oszczędną (ciężar całego zespołu wyniósł 49,1 tony) i nie została już powtórzona w żadnym z następnie wybudowanych zespołów.

W latach ostatnich w Anglii na wyspie Costa-Hed (Orkady) pobudowano doświadczalny zespół wiatrowo-elektryczny systemu Browna o mocy 100 kW (przy szybkości wiatru 15,5 m/sek) posiadający trójłopatowe śmigło o średnicy 15 m, obracające się z szybkością obrotową 130 obr/min (rys. 180).

Zespół posiada w swej głowicy ukształtowanej w postaci gondoli trójfazowy generator asynchroniczny napędzany przez śmigło za pośrednictwem przekładni zębatej o przełożeniu 1 : 5. Śmigło zespołu pracuje z tyłu wieży i jest nastawiane odpowiednio do kierunku wiatru przy pomocy urządzenia elektrycznego

sterowanego chorągiewką kierunkową, ustawioną na wierzchu głowicy.

Regulacja szybkości obrotowej jest dokonywana przez przekręcanie płatów śmigła względem ich osi, co przeprowadza odpowiednie urządzenie hydrauliczne. Płaty śmigła są wykonane z odpowiednio klejonego drewna i są pokryte plastykiem. Konstrukcja taka okazała się bardzo lekką, gdyż pojedyncza łopata śmigła waży tylko ok. 60 kg.



Rys. 180. Zespół wiatrowo-elektryczny syst. *Browna*

Zespół ten współpracuje równolegle z siecią elektryczną o napięciu 11 kV zasilaną przez elektrownie z silnikami spalinowymi.

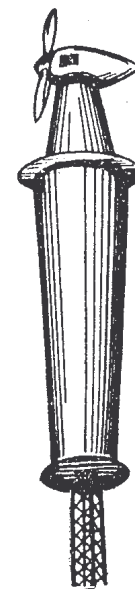
Pracę tego zespołu porównuje się z pracą zespołu systemu *Andreau* o tej samej mocy 100 kW (patrz rys. 182) i zależnie od osiągniętych wyników projektuje się wybudowanie 50—60 zespo-

łów o mocy po 1000 kW każdy, które współpracowałyby z angielską energetyczną siecią krajową.¹⁾

Zespoły większej mocy bez mechanicznej przekładni. Rozpatrywane dotychczas zespoły wiatrowo-elektryczne stanowiły zasadniczo klasyczny typ urządzeń tego rodzaju, w których do przenoszenia mocy śmigła, bądź też koła wiatrowego, na prądnicę użyto wielokrotnie wypróbowanej już w innych działach techniki przekładni zębatej albo zębatej i pasowej. Wielkość, ciężar, a zatem i koszt tej przekładni wzrastają bardzo szybko wraz z mocą śmigła, gdyż na skutek zmniejszania się przy tym szybkości obrotowej zwiększają się znacznie wielkości momentów obrotowych a zatem i sił, występujących w poszczególnych węzłach konstrukcji.

Wynalazcza myśl konstruktorów zmierzała od dawna do takich rozwiązań zespołów wiatrowo-elektrycznych dużej mocy, które umożliwiałyby obywanie się bez jakichkolwiek przekładni mechanicznych.

Pierwszą próbę takiego rozwiązania dał niemiecki konstruktor *Flettner*, gdy na końcach skrzydeł swego pomysłu (rys. 181) złożonych z jego rotorów (patrz punkt 3a tego rozdziału), a opartych w swym działaniu na zjawisku *Magnusa*, umieścił właściwe zespoły wiatrowo-elektryczne poddane podczas obrotu skrzydła odpowiednio zwiększonej względnej szybkości wiatru.



Rys. 181. Skrzydło wiatraka *Flettnera* z zespołem wiatrowo-elektrycznym

Tę samą zasadę można oczywiście zastosować i do śmigła zwykłego, wykazującego, jak wiadomo, korzystniejsze właściwości aerodynamiczne niż rotory *Flettnera*.

¹⁾ Największe z dotychczas zbudowanych zespołów wiatrowo-elektrycznych (o mocy 1000 kW, systemu *Putnama*, *Honnefa*) nie będą jednak z braku miejsca tutaj opisywane.

Gdy wyróżnik szybkobieżności takiego śmigła będzie wynosił np. 5, to z trójkąta szybkości (rys. 60) wynika, że względna szybkość powietrza, której działaniu są poddane właściwe zespoły wiatrowo-elektryczne, wynosi

$$w' = v\sqrt{1^2 + 5^2} = 5,1v$$

czyli jest 5,1 raza większa niż szybkość wiatru.

Ponieważ zaś moc śmigła jest proporcjonalna do trzeciej potęgi szybkości wiatru, zatem wielkość śmigła zespołu będzie odpowiednio mniejsza, a jego szybkość obrotowa odpowiednio większa. W bardzo wielu przypadkach szybkości obrotowe będą wystarczające do bezpośredniego napędu prądnic elektrycznych.

Bardziej praktyczne i nowoczesne rozwiązanie bezprzekładniowego zespołu wiatrowo-elektrycznego o zupełnie nowej zasadzie działania dał francuski konstruktor Andreau.

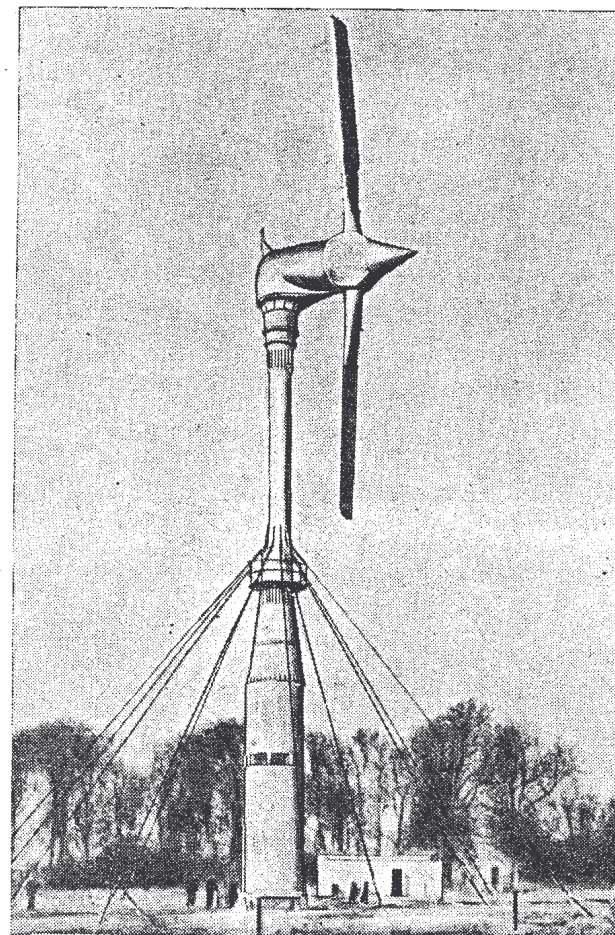
Śmigło tego zespołu (rys. 182) jest wewnątrz puste i jest zaopatrzone na obu końcach w odpowiednie otwory wylotowe. Wnętrze śmigła jest połączone hermetycznie poprzez głowicę zespołu z wnętrzem wieży wykonanej, jako rura i zaopatrzonej u dołu w odpowiednie otwory wlotowe dla powietrza.

Podczas obrotu śmigła pod wpływem wiatru działa ono, jak odśrodkowa dmuchawa, powodując wyrzucanie na zewnątrz śmigła powietrza ssanego z dołu wieży. Na drodze wytworzonego w ten sposób strumienia powietrza na dole wieży jest ustawiona odpowiednia turbina powietrzna bezpośrednio sprzężona z prądnicą elektryczną.

Jest zrozumiałe, że w urządzeniu tym szybkość obrotowa turbiny powietrznej nie jest prawie wcale związana z szybkością obrotową śmigła i może być wielokrotnie większa od szybkości obrotowej śmigła. Zespół taki musi jednak wykazywać względnie małą sprawność, wobec czego jego wielkość potrzebna na określoną moc musi być znacznie większa.

Zespół tego typu o mocy 100 kW (przy szybkości wiatru 13,3 m/sek) został ostatnio wybudowany w Anglii na półwyspie Lleyń i posiada dwułopatowe śmigło o średnicy ok. 25 m, pracujące z tyłu wieży o wysokości 30,5 m. Regulacja szybkości obrotowej śmigła jest dokonywana przez odpowiednie przekręcanie jego płatów względem ich osi, co rozpoczyna się już przy szyb-

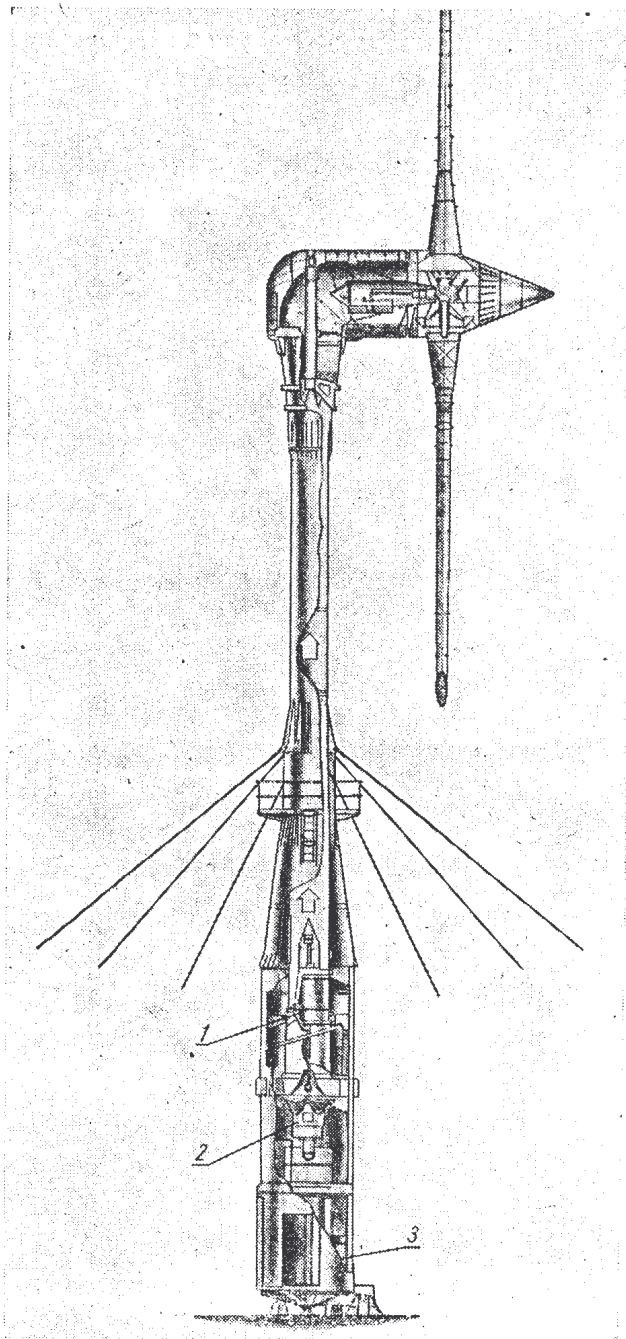
kości wiatru 13,3 m/sek i trwa aż do szybkości wiatru 29 m/sek. Przy tej bowiem szybkości wiatru płaty śmigła przyjmują położenie równoległe do kierunku wiatru.



Rys. 182. Zespół wiatrowo-elektryczny syst. Andreau

Dolna część wieży jest żelazobetonowa i posiada średnicę u dołu 2,75 m, a u góry 1,07 m; górna część natomiast jest stalowa. W środku wysokości wieża jest zaopatrzona w liczne odciągi.

Na rys. 183 przedstawiono zespół ten w przekroju, z którego można zapoznać się z poszczególnymi jego urządzeniami.



Rys. 183. Przekrój zespołu Andreau

Nastawianie śmigła odpowiednio do kierunku wiatru dokonywa się silnikiem elektrycznym sterowanym odpowiednim wskaźnikiem kierunku wiatru, umieszczonym na wierzchu głowicy zespołu.

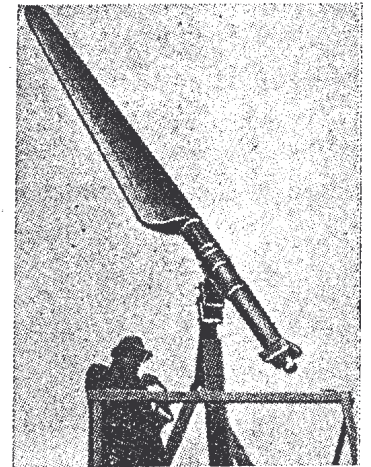
Wirnik turbiny powietrznej posiada średnicę 1220 mm i jest zaopatrzony w 47 łopatek; korpus turbiny ma 50 łopatek kierowniczych. Szybkość obrotowa turbiny powietrznej wynosi 1000 obr/min, a współczynnik jej sprawności przyjęty do obliczeń wynosi 0,85. Wał turbiny powietrznej jest sprzężony z wałem prądnicy za pośrednictwem sprzęgła przenoszącego moment obrotowy tylko w jednym kierunku. Regulacja zespołu została urządzona, jako samoczynna, jednak w rzeczywistości całkowitej jej samoczynności nie osiągnięto.

Ciężar każdej z łopat śmigła wynosi 725 kG, ciężar zaś całego zespołu — 60 ton. W warunkach angielskich zespół wzniesiony powinien być rentowny przy średniej rocznej szybkości wiatru 8,5 — 9,5 m/sek.

Pewną odmianę tej samej zasady działania, co zespół Andreau, stanowi zespół niemieckiego konstruktora Hüttera, różniący się od poprzedniego tym, że turbina powietrzna jest umieszczona nie w wieży, jak w systemie Andreau, a w samym ramieniu łopaty śmigła u jej nasady.

Zespół wiatrowo-elektryczny tego typu o jednej łopacie i wykorzystujący, jako przeciwcieżar samą prądnicę (rys. 184) został zbudowany o promieniu śmigła 3 m i mocy 600 W. Śmigło pracuje z tyłu wieży i jest nastawiane odpowiednio do kierunku wiatru samo przez się bez jakichkolwiek dodatkowych urządzeń.

Szybkoobrotowy zespół wiatrowo-elektryczny W. Jagodzińskiego (rys. 185) w działaniu swym opiera się na tym, że na końcach łopat 1 zwykłego śmigła są odpowiednio umieszczone rotory Savoniusa 2 (patrz punkt 2c tego rozdziału) poddane podczas



Rys. 184. Zespół wiatrowo-elektryczny syst. Hüttera

obrotu śmigła podstawowego odpowiednio spotęgowanemu pod względem szybkości strumieniowi powietrza. Rotory są osadzone na wałach 3, przebiegających ku środkowi śmigła wzdłuż osi jego łopat. Wały te obracają się w łożyskach 4 osadzonych w płytach śmigła.

Dwoma takimi szybkoobrotowymi wałami zaopatrzonymi oczywiście w odpowiednie przeguby, można napędzać obustronnie wirnik prądnicy elektrycznej 5 umieszczonej odpowiednio w środku śmigła wzdłuż osi napędzających wałów. W wyniku powyższego wirnik prądnicy jest napędzany wałami szybkoobrotowymi, sama zaś prądnica wiruje wokół swej osi poprzecznej wraz ze śmigłem, a zatem z szybkością obrotową względnie niewielką. Odbiór prądu elektrycznego od prądnicy oraz ewentualny dopływ prądu do jej wzbudzenia odbywa się przez odpowiednie pierścienie izolowane oraz szczotki 6.

W pewnych przypadkach może być korzystne napędzanie jednym wałem wirnika prądnicy, drugim zaś — w przeciwnym kierunku jego stojana. Uzyskuje się przez to podwojenie szybkości obrotowej wirnika względem stojana.

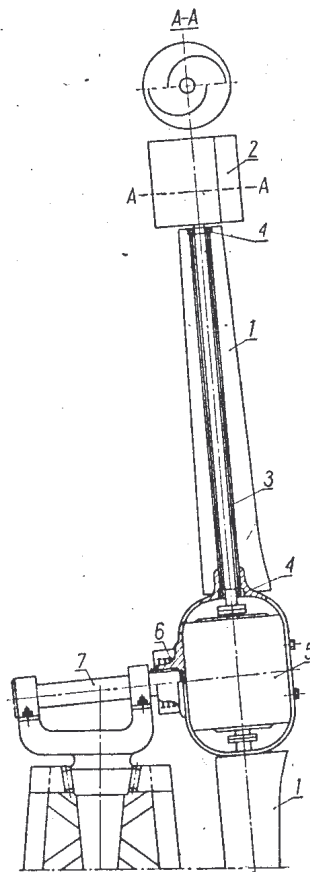
Bardzo korzystne w mniejszych urządzeniach jest zastosowanie tylko jednej łopaty śmigła podstawowego z jednym rotorem, przy czym prądnica odpowiednio przesunięta odśrodkowo może być wykorzystana jako przeciwciężar łopaty.

Urządzenie wyżej opisane wykazuje bardzo korzystny pod względem wytrzymałościowym układ sił, działających na łopaty śmigła. Układ ten w porównaniu ze śmigłami zwykłych silników wiatrowych jest w znacznej mierze odciążony.

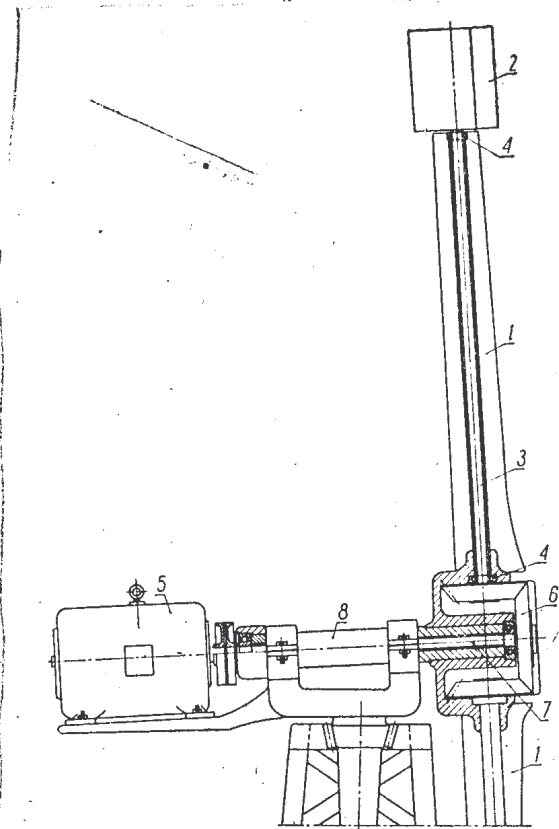
Jakkolwiek ciężar samej łopaty śmigła jest zwiększony przez rotor i jego wał, to jednak moment gnący u nasady ramienia jest mniejszy, gdyż ramię to nie przenosi zginającego je momentu mocy. Również i promieniowy rozkład obciążeń łopaty bardzo korzystnie współdziała z rotorem, który jest zasadniczo unoszony, jak gdyby na grzbiecie łopaty śmigła i tylko między obu tymi elementami konstrukcyjnymi występuje główna wymiana sił i mocy. Przez znaczniejsze pochYLENIE osi łopat do tyłu można bardzo skutecznie przeciwstawić osiowemu parciu wiatru na łopaty ich siły odśrodkowe.

Ponieważ pozostałe części konstrukcji, jak ramiona śmigła,

wał itp. są odciążone od przenoszenia mocy, a spełniają jedynie drugorzędą rolę konstrukcyjną, mogą być wykonane bardzo lekko. Lekkość zaś silnika wiatrowego bardzo korzystnie wpływa



Rys. 185. Zespół wiatrowo-elektryczny syst. Jagodzińskiego: 1 — łopata śmigła, 2 — rotor Savoniusa, 3 — wał rotora (wewnątrz płyta śmigła), 4 — łożyska wału, 5 — prądnica, 6 — pierścienie ślizgowe, 7 — wał poziomy silnika



Rys. 186. Zespół wiatrowo-elektryczny syst. Jagodzińskiego z nieruchomą prądnicą: 1 — łopata śmigła, 2 — rotor Savoniusa, 3 — wał rotora (wewnątrz płyta śmigła), 4 — łożyska wału, 5 — prądnica, 6 — stożkowe koło zębate, 7 — wał do napędu prądnicy, 8 — wał poziomy silnika (wydrażony)

na ciężar wieży. Powiększenie momentu gnącego głównego wału przez ciężar prądnicy, zwłaszcza że jest ona szybkoobrotowa, nie ma zasadniczego znaczenia.

W innej odmianie szybkoobrotowego zespołu wiatrowo-elektrycznego (jednak już nie bezprzekładniowego) szybkoobrotowymi wałami (rys. 186) napędza się odpowiednio wykonane przekładnie stożkowe. Drugie koło tej przekładni 6 jest wspólne dla wszystkich przekładni i jest osadzone na wale 7 przeprowadzonym wewnątrz wału poziomego 8 w jego osi i napędzającym za pośrednictwem sprzęgła prądnicę elektryczną 5 ustawioną na przedłużeniu osi tego wału. Poziomy wał 8 śmigła złączony sztywno z jego łopatom obraca się ze względnie niewielką szybkością, zaś wał 7 w wydrążeniu wału poziomego obraca się ze znacznie większą szybkością. Kierunki obrotów muszą być tak odpowiednio dobrane, aby szybkość obrotowa wału 7 była oczywiście zgodna z szybkością obrotową wału 8.

Zaletą tego drugiego urządzenia jest to, że ilość łopat w śmigle podstawowym może być większa, niż w zespole opisanym poprzednio, gdzie łopat może być tylko dwie lub jedna oraz że korpus prądnicy znajduje się tutaj w spoczynku, dzięki czemu może ona nie być specjalna.

Regulacja zespołu wiatrowego tego typu może być dokonywana jednym z wielu zwykle stosowanych sposobów regulacji śmigła podstawowego lub rotorów albo też jednego i drugich jednocześnie.

4. PORÓWNANIE AERODYNAMICZNYCH CHARAKTERYSTYK SILNIKÓW WIATROWYCH

Poszczególne typy silników wiatrowych wykazują, jak to już stwierdziliśmy, bardzo różne właściwości techniczno-ruchowe, decydujące o zachowaniu się ich w różnych warunkach pracy. Dotyczy to przede wszystkim wielkości momentu rozruchowego, momentu obrotowego, współczynnika wykorzystania energii wiatru, osiowego parcia wiatru, właściwości regulacji szybkości obrotowej oraz mocy, pewności zabezpieczenia silnika przed zbyt silnymi wiatrami itp.

W celu możliwie łatwego ujęcia najbardziej charakterystycznych cech silników wiatrowych, mianowicie współczynnika wykorzystania energii wiatru decydującego, jak wiadomo, o wielkości silnika dla żądanej mocy, oraz współczynnika momentu obrotowego, powróćmy jeszcze raz do rys. 65, na którym przed-

stawiono w ogólnym zestawieniu charakterystyki poszczególnych typów silników wiatrowych w postaci odpowiednich krzywych. Krzywe te przedstawiają charakterystyczne wielkości silników wiatrowych w zależności od wyróżnika ich szybkobieżności $Z = \frac{u}{v}$, czyli od stosunku szybkości obwodowej końca śmigła albo łopatki koła wiatrowego do szybkości wiatru.

Z wykresów tych wynika, że współczynnik wykorzystania energii wiatru w silnikach śmigłowych jest większy, niż w silnikach wielołopatkowych i znacznie większy, niż w silnikach o poprzecznej osi obrotu (bębnowych, karuzelowych). Ten większy współczynnik c_1 występuje w silnikach śmigłowych przy większych wyróżnikach szybkobieżności, a zatem przy większych szybkościach obrotowych. Poza tym linia zmienności tego współczynnika w silnikach śmigłowych jest bardziej płaska, czyli że ten większy współczynnik występuje w większym zakresie zmienności wyróżnika szybkobieżności. Sprawność silników śmigłowych jest zatem większa i występuje w większym zakresie szybkości niż w silnikach wielołopatkowych, a tym bardziej w silnikach bębnowych.

Wielkości momentów obrotowych są w silnikach śmigłowych o stałych łopatach śmigła znacznie mniejsze, niż w silnikach wielołopatkowych, a nawet w silnikach o poprzecznej osi obrotu. Zwłaszcza wielkość momentów rozruchowych, decydująca o szybkości wiatru, przy której silnik zaczyna się obracać, jest najmniejsza w silnikach śmigłowych o stałych łopatach śmigła a największa w silnikach wielołopatkowych, w których moment obrotowy jest największy przy rozruchu i maleje w miarę powiększania się szybkości obrotowej. Z kształtu krzywych momentów obrotowych wynika, że silniki wielołopatkowe pod stałym obciążeniem pracują statecznie w całym zakresie swej szybkości obrotowej, w silnikach śmigłowych natomiast praca stateczna może się odbywać zasadniczo tylko w zakresie od biegu luzem do obrotowego momentu największego, czyli tylko na prawej gałęzi charakterystyki momentów obrotowych.

Z krzywych na rys. 135 i 144 wynika, że największy współczynnik osiowego parcia wiatru wykazują silniki wielołopatkowe i to podczas swego rozruchu, w silnikach śmigłowych o stałych łopatach śmigła współczynnik ten jest mniejszy, a jego wartość

największa występuje nie podczas rozruchu, ale w zakresie znamionowej szybkości obrotowej silnika, czyli w zakresie największego współczynnika wykorzystania energii wiatru c_l . Współczynnik ten w silnikach śmigłowych jest tylko trochę mniejszy niż w silnikach wielołopatkowych.

Z przedstawionych charakterystyk można również określić wielkości szybkości obrotowych poszczególnych typów silników podczas ich ruchu bez obciążenia, czyli szybkości ich biegu luzem. Jakkolwiek wzrost w tych warunkach szybkości obrotowej w silnikach śmigłowych o stałych łopatkach w stosunku do szybkości obrotowej znamionowej jest trochę mniejszy, niż w silnikach wolnobieżnych, to jednak wielkości bezwzględne tych szybkości są w silnikach śmigłowych znacznie większe niż w silnikach wielołopatkowych. Dlatego też silniki szybkobieżne muszą być zaopatrzone w odpowiednie urządzenia, zabezpieczające je przed nadmierną zwyżką szybkości obrotowej.

Ze względu na wolnobieżność silników wielołopatkowych ich łopatom nie nadaje się kształtów opływowych, a łopatki wykonywa się zwykle z odpowiednio wygiętej blachy stalowej. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę, że ta prostsza i łatwiejsza w porównaniu z silnikami śmigłowymi konstrukcja jest okupiona znacznie większym zużyciem materiału. Śmigło natomiast silnika śmigłowego wymaga bardziej umiejętnego, dokładniejszego i droższego wykonania.

Ponieważ wszystkie przedstawione charakterystyki silników wiatrowych są uzależnione od wyróżnika szybkobieżności $Z = \frac{u}{v}$ więc, aby utrzymać ich charakter zmienności i w rzeczywistych warunkach ruchu, należy w miarę wzrostu szybkości wiatru zwiększać i ich szybkości obrotowe. Wtedy szybkość obrotowa silników wiatrowych jest proporcjonalna do szybkości wiatru. Tylko w tych warunkach prawo zależności mocy silnika od trzeciej potęgi szybkości wiatru [wzór 58] jest zachowane w całej rozciągłości, gdyż tylko wtedy współczynnik wykorzystania energii wiatru c_l pozostaje stały. W tych tylko warunkach otrzymuje się w rzeczywistości największe wykorzystanie energii wiatru, odpowiadające największemu współczynnikowi $c_{l \max}$.

Ponieważ jednak w rzeczywistości w miarę zwiększania się szybkości wiatru urządzenia regulacyjne silnika utrzymują jego szybkości obrotowe mniej więcej na stałym poziomie, współczynnik wykorzystania energii wiatru musi się zmieniać i zasadniczo maleje według lewych gałęzi krzywych $c_l = f(Z)$. W związku zaś ze zmniejszaniem się w miarę wzrostu szybkości wiatru współczynnika c_l nie może być zachowane prawo zależności mocy od trzeciej potęgi szybkości wiatru. Moc ta wzrasta w tych warunkach wolniej, niż trzecia potęga szybkości wiatru.

Co się tyczy silników śmigłowych z przestawialnymi łopatkami śmigła, to wykazują one właściwości ruchowe pośrednie między właściwościami silników śmigłowych o stałych łopatkach śmigła a silnikami wielołopatkowymi. Przez odpowiednie i samoczynne ustawianie płatów śmigła podczas jego rozruchu uzyskuje się znaczne zwiększenie jego momentu rozruchowego. Poza tym przekręcanie płatów śmigła podczas jego ruchu umożliwia uzyskanie w czasie zbyt silnego wiatru prostego ograniczenia mocy silnika. Osiąga się to przy utrzymaniu stałej szybkości obrotowej śmigła przez przesunięcie na charakterystyce punktu jego pracy do mniejszych wartości momentu obrotowego. Nawet całkowite zatrzymanie silnika podczas huraganu jest wtedy osiągalne bez jakichkolwiek dodatkowych urządzeń hamulcowych.

5. ZALETY I WADY POSZCZEGÓLNYCH TYPÓW SILNIKÓW WIATROWYCH

Porównania zalet i wad obu skrajnych typów silników wiatrowych o osi równoległej do kierunku wiatru, czyli silników wielołopatkowych (wolnobieżnych) i śmigłowych (szybkobieżnych), właściwie już dokonano w poprzednim punkcie przy rozpatrywaniu ich charakterystyk. Pozostaje zatem jeszcze dokonać porównania właściwości całej tej grupy silników z silnikami o osi obrotu poprzecznej do kierunku wiatru, czyli z silnikami wykorzystującymi czołowe parcie wiatru. Dokonanie bardziej szczegółowego porównania właściwości silników obu tych grup jest tym bardziej wskazane, że w zagadnieniu wykorzystania energii wiatru nie ma powszechnie słusznego poglądu na rolę silników o osi obrotu poprzecznej do kierunku wiatru oraz, że w porównaniu tym nie można się opierać tylko na wykresach charakterystyk.

Najdawniejsze silniki wiatrowe o poprzecznej do wiatru osi obrotu, jak silniki bębnowe, karuzelowe itp. odznaczają się budową najprostszą i do wykonania najłatwiejszą. Mogą być one wykonane mniej lub więcej poprawnie przez każdego rzemieślnika, obeznanego nieco z ciesielstwem. Ze względu na tę łatwość wykonania oraz na prostotę działania, a zatem ze względu na możliwość bezpośredniego zrozumienia zjawisk fizycznych związanych z ich pracą ten typ silników wiatrowych jest przedmiotem ciągłych ulepszeń, pomysłów i wynalazków, zgłaszanych przez wynalazców — laików nieuświadomionych dostatecznie w teoretycznych podstawach zagadnienia. A przecież prostota konstrukcji, zaleta niewątpliwie bardzo ważna zwłaszcza w zamierzonych czasach, nie może być decydującą w czasach dzisiejszych, kiedy jest możliwość budowy doskonalszych konstrukcji.

Ta najważniejsza zaleta silników wiatrowych o poprzecznej do wiatru osi obrotu jest jednak całkowicie zniweczona przez ich ogromne i zasadnicze wady, z przyczyny których silniki wiatrowe tego typu nie mogą mieć dostatecznych możliwości rozwoju.

Zasadniczą wadą tych silników wiatrowych jest, jak to wynika z przytoczonych rozważań teoretycznych, ich znacznie mniejszy współczynnik wykorzystania energii wiatru w porównaniu z silnikami o równoległej do wiatru osi obrotu, np. z silnikami wielołopatkowymi. Współczynnik ten wynosi u silników o osi obrotu poprzecznej do wiatru ok. 0,10, gdy u silników wielołopatkowych współczynnik ten wynosi 0,30, a u silników śmigłowych — nawet 0,38.

Drugą wadą silników wiatrowych tego typu jest ich mały wyróżnik szybkobieżności, czyli w wyniku mała szybkość obrotowa silnika. Już z samej zasady działania tego rodzaju silników, polegającej na wykorzystywaniu czołowego parcia wiatru na łopatkach, przesuujących się w tym samym kierunku co wiatr, wynika, że szybkość ta nie może być w żadnym przypadku większa od szybkości wiatru, a zawsze musi być od niej mniejsza. W najdogodniejszych warunkach pracy takiego silnika szybkość obwodowa skrajnej krawędzi łopatki wynosi połowę szybkości wiatru ($Z = 0,5$). Uzyskana wielkość szybkości obrotowej silnika wiatrowego tego typu jest uzależniona od szybkości względnej w powietrza, przesuwanego się względem łopatki, czyli od różnicy szybkości wia-

tru v i szybkości przesuwania się łopatki u , a różnica ta jest zawsze mniejsza od szybkości wiatru.

W silnikach natomiast o równoległej do wiatru osi obrotu np. w silnikach śmigłowych, łopatki, przesuując się poprzecznie do kierunku wiatru, usuwają się w bok spod działania jednych już przyhamowanych strug powietrza, podsuwając się pod działanie innych o niezmienionej jeszcze szybkości. Poza tym skutek oddziaływania wiatru na tak przesuujące się łopatki i tutaj zależy od szybkości powietrza przesuwanego się względem nich, czyli od szybkości względnej w , będącej jednak różnicą geometryczną szybkości wiatru v i szybkości przesuwania się łopatki u . Różnica ta jest zawsze większa od szybkości wiatru.

Podczas tych zjawisk występuje zasadniczo tylko odchylenie się strug wiatru nieco w bok od poprzedniego kierunku prawie bez szkodliwego spiętrzenia przepływu na łopacie.

Następną wadą silników o osi obrotu poprzecznej do wiatru jest ta, że zawsze pracują one czynnie tylko częścią swych łopatek, gdy pozostała ich część jest w danym momencie dla pracy użytecznej nie tylko zbędna, ale nawet szkodliwa. Przesuwając się bowiem za zasłoną lub też zwrócone swymi grzbietami do wiatru łopatki powodują poważne opory aerodynamiczne, a w wyniku obniżenie mocy części łopatek, pracujących czynnie. Poza tym wielkość wykorzystywanego przekroju strumienia powietrza w tym typie silników wiatrowych jest znacznie mniejsza niż w silnikach innych. Na przykład przekrój ten w silnikach karuzelowych odpowiada zaledwie połowie powierzchni poprzecznego przekroju silnika, gdy w szybkoobrotowych silnikach śmigłowych jest on ok. dwunastokrotnie większy od powierzchni śmigła, gdyż w tym przypadku stanowi on powierzchnię zakreśloną przez łopatę śmigła.

Do wad silników o osi obrotu poprzecznej do wiatru należy jeszcze dodać ich mniejszą sprawność mechaniczną, co ujawnia się zwłaszcza we wszelkiego rodzaju silnikach o skrzydłach składanych, przesuwanym itp., jak również wielkie trudności przy regulacji ich szybkości obrotowej oraz przy ochronie ich przed skutkami silnych wiatrów, burz, huraganów itp.

Prawie wszystkie wymienione wady silników o osi obrotu poprzecznej do wiatru powodują uzyskanie od nich znacznie mniej-

szej mocy na jednostkę ich ciężaru, czyli wymagają znacznie większej ilości materiału na żadaną od silnika moc.

Tę ilość materiałów można z pewnym przybliżeniem porównawczo obliczyć w następujący sposób.

Z przyczyny mniejszego współczynnika wykorzystania energii wiatru powierzchnia przekroju wykorzystywanego strumienia powietrza w silnikach o osi obrotu poprzecznej do wiatru, a więc karuzelowych, bębnowych itp. musi być większa w stosunku do tych współczynników, czyli:

$$\frac{c_{lr}}{c_{lp}} = \frac{0,38}{0,10} \approx 4$$

Ponieważ powierzchnia skrzydeł silnika karuzelowego musi być prawie czterokrotnie większa od przekroju wykorzystywanego strumienia powietrza, zaś w szybkoobrotowym silniku śmigłowym powierzchnia śmigła stanowi tylko jedną dwunastą przekroju wykorzystywanego strumienia powietrza, zatem powierzchnia skrzydeł silnika karuzelowego, wykorzystującego ten sam przekrój strumienia powietrza musi być ok. 48 razy większa niż powierzchnia śmigła. Wobec tego powierzchnia skrzydeł silnika karuzelowego, dostarczającego tę samą moc, musi być $4 \cdot 48 \approx 200$ razy większa niż powierzchnia śmigła. Poza tym należy jeszcze uwzględnić znaczne powierzchnie zasłaniające połowę wirnika, przesuwającą się przeciw wiatrowi, wskutek czego łączna powierzchnia silnika karuzelowego będzie ok. 300 razy większa niż powierzchnia śmigła.

Jednak na tym wyniku nie mogą się kończyć nasze obliczenia, gdyż należy sobie jeszcze uprzytomnić, że te ogromne powierzchnie silników o osi obrotu poprzecznej do wiatru obracają się znacznie wolniej od śmigieł oraz, że dla umożliwienia swobodnego dopływu wiatru, muszą być umieszczone na pewnej wysokości nad powierzchnią ziemi.

Samo już konstrukcyjne zestawienie i ujęcie tych wielokrotnie większych powierzchni nastęrcza ogromne trudności, gdyż wymaga opanowania pod względem wytrzymałościowym znacznie większych sił oraz momentów gnących w poszczególnych węzłach konstrukcyjnych. A przecież powierzchnie te są poddane działaniu znacznie większych mas powietrza niż śmigło.

Wielokrotnie mniejsza szybkość obrotowa tego rodzaju silników powoduje konieczność występowania wielkich momentów obrotowych, do których ujęcia i przenoszenia potrzeba używać grubych i ciężkich wałów, łożysk, konstrukcji wsporczych itp. Ponieważ znaczna większość maszyn produkcyjnych, zwłaszcza prądnice elektryczne wymagają do swego napędu większej szybkości obrotowej, konieczne się staje użycie w tego rodzaju silnikach wiatrowych wielkich, ciężkich i kosztownych, a przy tym niskosprawnych przekładni mechanicznych.

Konieczność umieszczenia wielokrotnie większych i cięższych skrzydeł, wałów, a częściowo i przekładni na pewnej wysokości nad powierzchnią ziemi wymaga wzniesienia mocnych, a zatem ciężkich i kosztownych wież. Wieże te muszą przeciwstawiać się wielkim siłom i momentom gnącym, występującym w tych silnikach podczas silnych wiatrów i huraganów zwłaszcza, że i wtedy na wiatr są wystawiane całą swą czynną powierzchnią oraz zasłoną.

Z powyższego wynika dostatecznie jasno, że silniki karuzelowe, bębnowe itp. nie mogą mieć prawie żadnych możliwości rozwoju i znajdują się w znacznie niekorzystniejszym położeniu wobec silników śmigłowych, niż np. koła wodne w stosunku do turbin wodnych, które przynajmniej wykazują przy małych spadach większą od turbin sprawność.

Wśród silników wiatrowych o osi obrotu poprzecznej do wiatru wyróżniają się korzystniej silniki rotorowe pomysłu fińskiego wynalazcy Savoniusa znane od przeszło trzydziestu lat (rys. 121).

Z przedstawionego już poprzednio działania rotora Savoniusa widać, że nie posiada on tak niekorzystnych oporów aerodynamicznych, jak silniki karuzelowe lub bębnowe i dzięki temu wykazuje współczynnik wykorzystania wiatru 0,18—0,23, czyli co najmniej dwukrotnie większy niż tamte.

Pomimo jednak tego polepszenia współczynnik ten pozostaje jeszcze prawie dwukrotnie mniejszy, niż u silników śmigłowych i dlatego powierzchnia przekroju wykorzystywanego strumienia powietrza dla tej samej mocy musi być dwukrotnie większa. Ponieważ zaś powierzchnia rotora musi być, jak to wynika z rys. 121, równa przekrojowi strumienia powietrza, a powierzchnia śmigła stanowi jedną dwunastą takiej powierzchni, zatem powierzchnia

rotora dla tej samej mocy musi być 24 razy większa niż powierzchnia śmigła. Zagadnienie przekładni obrotów oraz ochrony przed huraganami, jakkolwiek znacznie złagodzone w porównaniu z silnikami karuzelowymi, przedstawiają się tutaj również niekorzystnie.

Zatem i ten rodzaj silników wiatrowych, poza szczególnymi przypadkami nie ma możliwości większego rozpowszechniania się.

Również i wiatrowe silniki z rotorami Flettnera, wykorzystującymi zjawisko Magnusa (rys. 138), głosne przed trzydziestu laty, nie mają widoków rozwoju głównie z następujących przyczyn. Aerodynamiczne właściwości powierzchni walcowych są znacznie gorsze, niż także właściwości śmigieł, gdyż współczynnik aerodynamicznej doskonałości obracających się w przepływie walców jest, jak wynika z wykresów biegunowych (rys. 48) parokrotnie mniejszy niż śmigieł. Konstrukcja koła wiatrowego z rotorami, obracającymi się ze znaczną szybkością na jego ramionach, a posiadającego swój własny ruch obrotowy, jest znacznie bardziej złożona niż konstrukcja śmigła albo nawet wielołopatkowego koła turbiny wiatrowej. Konieczność napędu rotorów wymaga zastosowania dość złożonej przekładni zębatej i użycia jednego silnika elektrycznego albo też zaopatrzenia każdego z rotorów w silnik elektryczny. Silniki te muszą być w obu przypadkach zasilane z odpowiedniego źródła energii, co stanowi ogromną wadę tego rodzaju urządzenia. Poza tym ochrona tych silników przed skutkami silnych wiatrów i huraganów jest bardzo niepewna i trudna do urzeczywistnienia.

Z powyższego przeglądu właściwości silników wiatrowych wynika, że silniki o osi obrotu poprzecznej do wiatru oraz silniki z rotorami Flettnera na skutek posiadanych wad ustępują znacznie silnikom wiatrowym o równoległej do wiatru osi obrotu, jak to wiatrakom, silnikom wielołopatkowym i silnikom śmigłowym i z tego względu nie stanowią nigdzie przedmiotu poważniejszych zainteresowań.

Natomiast silniki o równoległej do wiatru osi obrotu, zwłaszcza zaś silniki śmigłowe, nie posiadające tych wad, a wykazujące poważne zalety, jako to względną lekkość, znaczną sprawność, dużą pewność działania posiadają wszelkie możliwości dalszego rozwoju i rozpowszechnienia.

Wobec ciągłych zmian szybkości wiatru i to zarówno chwilowych jak i średnich okresowych, ciągłym zmianom podlega również i moc dyspozycyjna silnika wiatrowego. Poza tym cisze i wiatry słabe uniemożliwiają całkowicie i niekiedy przez dłuższy okres czasu jakikolwiek bezpośredni napęd od silnika wiatrowego; w pewnych natomiast okresach wiatr silny dostarcza większej mocy, niż potrzeba w tym czasie do zasilania odbiorników. Natomiast moc wymagana przez odbiorniki jest na ogół stałą, przynajmniej w niezbyt dużych okresach czasu, poza tym większość maszyn roboczych wymaga dla swej prawidłowej pracy również stałej szybkości obrotowej.

Przez odpowiednie przystosowanie mocy wymaganej do mocy dyspozycyjnej silnika wiatrowego (np. przez uruchamianie maszyn mogących pracować okresowo tylko podczas dostatecznie silnych wiatrów) udaje się czasami te wady energii wiatru zmniejszać, ale związane to jest prawie zawsze ze znacznymi trudnościami. Całkowite usunięcie tej zasadniczej wady energii wiatru może być osiągnięte tylko przez dokonywanie odpowiedniego jak by przesuwania w czasie całkowitej lub częściowej mocy silników wiatrowych z okresów wiatrów silnych na inne okresy czasowe. Osiągnąć to można przez akumulowanie nadwyżek ponad bieżące zapotrzebowanie mocy podczas trwania wiatrów silnych w odpowiednich zasobnikach (akumulatorach) i wykorzystywanie ich w okresach niedoboru mocy wiatrowej. Zasadniczym wymaganiami od wszystkich takich urządzeń zasobnikowych musi być możliwie niski koszt zarówno ich budowy, jak i ich pracy, oraz — jakkolwiek przy wykorzystywaniu energii wiatru ma to mniejsze znaczenie — wysoka ich sprawność, czyli możliwie duży zwrot energii do nich doprowadzonej.

Z urządzeń, akumulujących energię wiatru rozpatrzemy następujące akumulatory:

- mechaniczne,
- elektryczne,
- wodne,
- chemiczne,
- ciepłne,
- powietrzne (ciśnieniowe).

1. AKUMULATORY MECHANICZNE

Akumulator bezwładnościowy (koło zamachowe). Urządzenie to jest w możności akumulować energię wiatru tylko w ograniczonym stopniu i praktycznie wyrównuje energię tylko podmuchów wiatru oraz krótkotrwałych jego zaników, nie dłuższych jednak nad 10 — 40 sek. Koło zamachowe zwiększa właściwie tylko naturalną bezwładność koła wiatrowego.

W celu największego wykorzystania bezwładności koła zamachowego zakres jego pracy obiera się przy możliwie dużej szybkości obrotowej, wykorzystując przy tym możliwie wysoko wytrzymałość materiału.

Podczas zwiększania się szybkości wiatru, koło zamachowe, nabierając przez zwiększanie szybkości obrotowej energii kinetycznej, przeciwdziała do pewnego stopnia zwiększaniu w tym okresie czasu szybkości obrotowej prądnicy. Przy zmniejszaniu się zaś szybkości wiatru, a zatem i szybkości obrotowej silnika wiatrowego, koło zamachowe podtrzymuje w dalszym ciągu szybkości obrotowe prądnicy, oddając jej swą energię kinetyczną. Aby jednak koło zamachowe w tym okresie czasu nie napędzało silnika wiatrowego, między silnikiem a prądnicą wraz z kołem zamachowym jest wmontowane odpowiednie sprzęgło, działające czynnie tylko przy jednym kierunku momentu napędowego.

W wyniku takiego urządzenia można uzyskać nawet podczas bardzo nierównomiernego wiatru dostatecznie wyrównaną moc napędną maszyny roboczej. Największa nierównomierność mocy silnika wiatrowego występuje zwykle przy względnie niewielkich szybkościach wiatru, rzędu 6 — 7 m/sek, kiedy to silnik wiatrowy może być obciążony tylko częściowo i właśnie w tych warunkach

koło zamachowe łatwiej wyrównuje moc napędową maszyny roboczej.

Wielkość energii zakumulowanej w kole zamachowym wynosi

$$E = \frac{J_0 \cdot \omega^2}{2} \text{ kGcm} \quad [128]$$

gdzie:

J_0 — masowy moment bezwładności koła zamachowego względem osi obrotu w kGcmsek²,

ω — szybkość kątowna w 1/sek.

Aby energię obliczoną ze wzoru [128] otrzymać w kWh, należy otrzymany wynik pomnożyć przez $\frac{0,736}{100 \cdot 75 \cdot 3600} = 2,73 \cdot 10^{-8}$. Najmniejszy ciężar

koła zamachowego uzyskuje się przy całkowitym wykorzystaniu jego wytrzymałości na rozciąganie σ_t , która np. dla stali węglowej wynosi od 37 do 45 kG/mm², dla żeliwa od 12 do 24 kG/mm² itp. Korzystając z odpowiednich wzorów wytrzymałościowych można obliczyć z pewnym przybliżeniem ciężar koła zamachowego, potrzebnego dla zakumulowania określonej ilości energii E w sposób następujący.

Przyjmując w najprostszym przypadku koło zamachowe w postaci okrągłej tarczy zaopatrzonej w środku w odpowiedni otwór na wał, otrzymamy naprężenie jego materiału w wielkości

$$\sigma_t = 0,825 \frac{\gamma}{g} \omega^2 R^2 \text{ kG/cm}^2 \quad [129]$$

gdzie:

γ — ciężar właściwy koła zamachowego w kG/cm³ (dla stali $\gamma = 0,00785$ kG/cm³),

g — przyspieszenie ziemskie w cm/sek²,

ω — szybkość kątowna w 1/sek,

R — promień koła zamachowego w cm.

Podstawiając w tym wzorze za ω^2 wartość otrzymaną z wielkości energii [128] przy uwzględnieniu, że moment bezwładności takiego koła zamachowego wynosi $J_0 = \frac{G}{g} \cdot \frac{R^2}{2}$, otrzymamy

$$\sigma_t = 0,825 \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{2E}{J_0} R^2 = 0,825 \frac{\gamma 2E \cdot 2g}{g G \cdot R^2} R^2 = 3,3 \frac{E}{G} \gamma \quad [130]$$

gdzie:

E — energia zakumulowana w kGcm,

G — ciężar koła zamachowego w kG.

Zatem ciężar koła zamachowego wynosi

$$G = \frac{3,3 \cdot E \cdot \gamma}{\sigma_t} \text{ kG} \quad [131]$$

W celu otrzymania odpowiedniego wyniku przy wyrażeniu energii E w kWh i naprężenia σ_t w kG/mm² należy wprowadzić odpowiedni

współczynnik $\left(\frac{1}{2,73 \cdot 10^{-8} \cdot 100} = \frac{1}{2,73 \cdot 10^{-6}}\right)$, a podstawiając za $\gamma = 0,00785 \text{ kG/cm}^3$, otrzymamy:

$$G = \frac{3,3 \cdot 10^6 \cdot 0,00785}{2,73} \cdot \frac{E'}{\sigma_t} = 0,0095 \cdot 10^6 \frac{E'}{\sigma_t} = 9500 \frac{E'}{\sigma_t}$$

Ciężar takiego koła zamachowego ze stali węglowej ($\sigma_t' = 40 \text{ kG/mm}^2$) dla zakumulowania 1 kWh wypada

$$G = \frac{9500}{40} = 240 \text{ kG}$$

Dla kół zamachowych o innych kształtach i wykonanych z innego materiału ciężar ten będzie oczywiście inny i np. dla koła o stałym w każdym przekroju naprężeniu materiału i wykonanego ze stali o wytrzymałości 80 kG/mm^2 wynosi tylko 50 kG/kWh .

Dla taniości koła zamachowe można wykonywać z pierścieni wyciętych palnikiem z blach stalowych odpowiedniej grubości (50 mm). Obliczanie takich kół jest bardziej złożone i musi być dokonywane przy zastosowaniu właściwej metody.

Ilość energii zakumulowanej w kołach zamachowych wg dotychczasowych naszych obliczeń dotyczy energii całkowitej, czyli uzyskiwanej od koła aż do całkowitego jego zatrzymania się. Jednak podczas normalnej pracy takiego akumulatora jego szybkości obrotowej nie można zmniejszać za bardzo, gdyż maszyny robocze wymagają zwykle stałej szybkości obrotowej i właśnie w tym celu akumulator bezwładnościowy zostaje zastosowany. Zwłaszcza przy otrzymywaniu prądu zmiennego ze względu na konieczność utrzymywania możliwie stałej jego częstotliwości różnice szybkości obrotowych prądnic, a zatem i kół zamachowych muszą być możliwie małe.

Ilość energii zakumulowanej w kole zamachowym w tych warunkach wynosi

$$E = \frac{J_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{2} \quad \text{kGcm} \quad [132]$$

gdzie:

J_0 — masowy moment bezwładności koła zamachowego względem osi obrotu w kGcmsek^2 ,

ω_1 — szybkość kątowna największa w 1/sek,

ω_2 — szybkość kątowna najmniejsza w 1/sek.

W urządzeniach prądu zmiennego dla zakumulowania np. 0,1 kWh (10 kW w ciągu 36 sek) przy 10-procentowej różnicy szyb-

kości obrotowych masowy moment bezwładności koła zamachowego musi wynosić 3000 kGcmsek^2 , a jego ciężar 1...1,5 tony.

Najpoważniejsze straty energii w tego rodzaju akumulatorach powoduje ich tarcie w łożyskach, tarcie o powietrze, jak również praca wentylacyjna. Zwłaszcza te dwa ostatnie źródła strat powodują poważne zmniejszenie sprawności koła zamachowego, wobec czego usiłuje się ich wielkość odpowiednio zmniejszyć przez otoczenie koła zamachowego hermetyczną obudową, z której wnętrza wypompowuje się częściowo powietrze.

Główną zaletą takiego akumulatora bezwładnościowego jest znaczne wyrównywanie szybkości obrotowej silnika wiatrowego, co umożliwi napęd przez niego maszyn roboczych, wymagających możliwie stałej szybkości obrotowej. Jakkolwiek akumulator bezwładnościowy powiększa straty silnika wiatrowego o ok. 25 %, to jednak straty te są mniejsze od strat ponoszonych przy utrzymywaniu stałej szybkości obrotowej silnika przez zmniejszenie jego obciążenia.

Akumulator bezwładnościowy zwiększa ciężar silnika wiatrowego o mocy do 5 kW o 10 do 15 %, a jego koszt o ok. 20 % (przy 10 minutowej pojemności); zwiększenie kosztu energii jest nieznaczne.

Akumulatory ciężarowe. Do tej samej grupy akumulatorów mechanicznych należy zaliczyć, nie wypróbowane wprawdzie jeszcze praktycznie, urządzenia akumulujące energię wiatru pod postacią podnoszonych ciężarów, np. w szybach, studniach, bądź też na pochyłościach wzgórz na odpowiednio ułożonym torze. Sprawność tego rodzaju akumulatorów ze względu na konieczność operowania ogromnymi siłami, byłaby jednak niska ze względu na stosowanie dużych przekładni.

Akumulatory sprężynowe. Akumulatory te umożliwiają przechowywanie energii pod postacią naciągu napiętych sprężyn. Jakkolwiek tego rodzaju akumulator w porównaniu z akumulatorem bezwładnościowym wykazuje zaletę, że wykorzystanie zakumulowanej w nim energii może być znacznie dalej przesunięte w czasie, to jednak nie posiada widoków zastosowania ze względu na to, że zwiększałby koszt silnika wiatrowego nawet małej mocy ok. 12-krotnie. Ciężar takiego akumulatora wynosiłby ok. 14 ton/kWh.

2. AKUMULATORY ELEKTRYCZNE

Akumulatory (zasobniki) elektryczne są już od dawna stosowane do zasilania energią elektryczną odbiorników podczas postoju lub niewystarczającej mocy silników wiatrowych. Ze względu na duże koszty, akumulatory elektryczne są stosowane zwykle do urządzeń o mniejszych i średnich mocach, a ze względów technologicznych zasadniczo mogą być stosowane tylko w urządzeniach prądu stałego. Zasady działania, budowa i sposoby obchodzenia się z akumulatorami elektrycznymi są opisywane w wielu książkach, z którymi należy się zapoznać w celu właściwego postępowania z akumulatorami. Akumulatory są względnie drogie, a nie znając sposobów obchodzenia się z nimi bardzo łatwo je uszkodzić lub całkowicie zniszczyć. Zostaną tutaj przedstawione tylko najważniejsze zalety i wady obu rodzajów akumulatorów elektrycznych (ołowiowych oraz żelazo-niklowych i żelazo-kadmowo-niklowych) z punktu widzenia wykorzystania w urządzeniach wiatrowych.

Zaletą akumulatorów ołowiowych jest ich wysoka sprawność, a do wad należy zaliczyć:

1. względnie wysoki koszt nabycia,
2. dość krótki okres pracy (życia),
3. niemożność przetrzymywania akumulatora w ciągu dłuższego czasu w stanie nienaładowanym,
4. mała odporność na pobór dużych prądów,
5. konieczność stałego i właściwego doglądu, polegającego w zasadzie na:

- nieprzekraczaniu znamionowego natężenia prądu ładowania i wyładowania,
- nieprzekraczaniu granicy wyładowania akumulatora, jaką stanowi 1,8 V,
- nieprzeładowywaniu akumulatora,
- utrzymaniu odpowiedniej gęstości elektrolitu,
- dolewaniu wody destylowanej,
- utrzymywaniu odpowiedniej czystości akumulatora.

Wadami akumulatorów żelazo-niklowych i żelazo-kadmowo-niklowych jest znacznie niższe w porównaniu z akumulatorami ołowiowymi napięcie znamionowe pojedynczego ogniwa oraz znacznie wyższy (3 ... 4-krotnie) koszt nabycia.

Te dwie najważniejsze wady akumulatorów żelazo-niklowych i żelazo-kadmowo-niklowych są jednak zrównoważone następującymi ich wielkimi zaletami cennymi zwłaszcza przy wykorzystaniu energii wiatru:

- zbędnością uciążliwej obsługi, ograniczającej się tylko do okresowego dolewania wody destylowanej i do wymiany elektrolitu co 1 ... 2 lata,
- dopuszczalnością całkowitego ich wyładowania oraz długiego przetrzymywania ich w tym stanie,
- odpornością na przeładowania,
- odpornością na pobieranie dużych prądów,
- 5 ... 10-krotnie większą trwałością.

3. AKUMULATORY WODNE

Akumulatory wodne stanowią w swej zasadzie urządzenia hydrotechniczne, umożliwiające odpowiednie spiętrzanie wody przy pomocy energii uzyskiwanej z silników wiatrowych. Nadwyżkami mocy silnika wiatrowego, występującymi zwłaszcza podczas silnych wiatrów, przepompowuje się wodę ze zbiornika dolnego do zbiornika górnego. Następnie podczas niedoboru energii wiatrowej woda jest przepuszczana przez odpowiednią turbinę wodną, która dostarcza energii. Pompa wodna może być przy tym napędzana bezpośrednio silnikiem wiatrowym, albo też za pośrednictwem prądu elektrycznego. Wobec znacznych postępów w budownictwie turbin wodnych, mogących pracować również jako pompy wodne, istnieje możliwość zastąpienia pompy i turbiny jedną maszyną.

Zdolność zasobnikową takiego urządzenia akumulatorowego można obliczyć na podstawie zasadniczego wzoru dla mocy N spadów wody

$$N = 9,8 \cdot \eta \cdot Q \cdot H \text{ kW} \quad [133]$$

gdzie:

- η — współczynnik sprawności zastosowanych urządzeń,
- Q — ilość wody przepływającej w m^3/sek ,
- H — wysokość spadów (różnica poziomów) w m.

Ilość wody potrzebna do zakumulowania 1 kWh wynosi za tym

$$Q' = \frac{1 \cdot 3600}{9,8 \cdot \eta \cdot H} \text{ m}^3 \quad [134]$$

Przyjąwszy współczynnik sprawności części urządzeń, pracujących przy zamianie energii potencjalnej wody na energię elektryczną (zbiornika górnego, rurociągu, turbiny wodnej i prądnicy) w wysokości $0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,85 = 0,65$, otrzymamy ilość wody dla zakumulowania 1 kWh w następującej wielkości

$$Q' = \frac{3600}{9,8 \cdot 0,65 \cdot H} = \frac{565}{H} \text{ m}^3 \quad [135]$$

Zatem przy różnicy poziomów obu zbiorników, wynoszącej np. 10 m, dla zakumulowania 1 kWh potrzeba ok. 56 m³ wody, a dla zakumulowania zaś 10 kWh na pięciogodzinny okres pracy potrzeba w tych warunkach ($H = 10 \text{ m}$)

$$56 \cdot 10 \cdot 5 = 2800 \text{ m}^3$$

Z tego przykładu widać, że zbiorniki tego rodzaju akumulatorów muszą być ogromne i wobec tego akumulatory wodne mogą być stosowane tylko w odpowiednio sprzyjających warunkach terenowych.

Trzeba tutaj zaznaczyć, że jakkolwiek dla energetycznej pojemności akumulatora wodnego, jest obojętnym wielkość każdego z obu czynników wzoru [133] w praktyce jednak jest znacznie korzystniejszy akumulator o mniejszej ilości wody Q , a o możliwie dużej różnicy poziomów H .

Zwykle dla celów akumulacyjnych proponuje się przystosowanie naturalnych spadów wodnych już wykorzystywanych energetycznie, a które przez współpracę z silnikiem wiatrowym mogłyby znacznie zwiększyć swą moc dyspozycyjną.

W celu określenia całkowitej sprawności akumulatora wodnego należy poza już wymienioną częścią urządzeń uwzględnić jeszcze urządzenia, pracujące podczas pompowania wody, mianowicie: przekładnię między silnikiem wiatrowym a pompą ($\eta_{prz} = 0,90$), pompę wodną ($\eta_p = 0,80$) i rurociągi ($\eta_r = 0,95$) i wtedy współczynnik ten wyniesie

$$0,65 \cdot 0,90 \cdot 0,80 \cdot 0,95 = 0,45$$

Tak więc z akumulatora wodnego można uzyskać we względnie pomyślnych warunkach tylko 45% energii zużytej do jego naładowania.

Koszt akumulatora wodnego przewyższa jednak co najmniej 1,5 — 2,0-krotnie koszt silnika wiatrowego.

4. AKUMULATORY CHEMICZNE

W tego rodzaju akumulatorach nadwyżkami mocy silnika wiatrowego zasila się odpowiedni elektrolizer, w którym prąd elektryczny rozkłada wodę na jej gazowe składniki tlen (O_2) i wodór (H_2). Palny gaz wodór przechowywany w odpowiednich zbiornikach jest wykorzystywany podczas niedostatecznego wiatru do zasilania silnika wybuchowego, napędzającego prądnicę elektryczną.

Elektrolizer jest w swej zasadzie działania bardzo podobny do akumulatora elektrycznego, ale jego elektrody w najprostszym wykonaniu są zrobione z blach żelaznych, elektrolitem zaś jest wodny roztwór ługu sodowego ($NaOH$) o gęstości około 1,20. W celu uniemożliwienia mieszania się gazów i powstawania mieszaniny „piorunującej”, poszczególne elektrody są poprzedzielane odpowiednimi przegrodami, umożliwiającymi jednak przepływ przez nie prądu elektrycznego. W elektrolizerach można wytwarzać gazy pod normalnym ciśnieniem, albo też (co jest znacznie ekonomiczniejsze) pod ciśnieniem zwiększonym np. przy 30...50 atn. Na wytworzenie 1 m³ wodoru w elektrolizerze bezciśnieniowym potrzeba zużyć około 4,5...6,2 kWh, zaś w elektrolizerze ciśnieniowym — poniżej 5 kWh.

Ponieważ ciepło spalania wodoru wynosi 2560 kcal/m³ (wartość dolna) współczynnik termodynamicznej sprawności elektrolizy wytwarzania wodoru (bez uwzględnienia wartości otrzymwanego jednocześnie tlenu) wynosi

$$\eta = \frac{2560}{5 \cdot 861} \approx 0,60$$

Ponieważ sprawność gazowych silników wybuchowych jest ok. 25%, zaś prądnic elektrycznych — ok. 85%, więc współczynnik ogólnej sprawności tego rodzaju akumulatorów wynosi

$$\eta_0 = 0,60 \cdot 0,25 \cdot 0,85 \approx 0,13$$

Sprawność ta jest bardzo małą i raczej nie usprawiedliwia stosowania tego rodzaju akumulowania energii wiatrowej w zwykłych warunkach i to nawet pomimo jej taniości, jako energii odpadowej.

Jednak przy wykorzystywaniu sprężonego wodoru do zasilania silników spalinowych trakcyjnych, np. na ciągnikach, samo-

chodach itp. sprawność ta w odniesieniu do siły pociągowej na obwodzie kół (zamiast sprawności prądnicy przyjmujemy w tej samej wysokości sprawność przekładni i osi) jest zupełnie usprawiedliwiona. Jednak takie rozwiązanie zagadnienia wykracza poza dziedzinę właściwego akumulowania energii wiatrowej i wobec tego nie będzie tutaj pogłębiane.

Również i zastosowanie wodoru do celów opałowych w osiedlach podobnie, jak się używa gazu świetlnego w miastach, miałyby znacznie pomyślniejsze widoki powodzenia zarówno ze względu na sprawność, jak i ze względu na znaczne ułatwienie życia oraz higienę ludności wiejskiej.

5. AKUMULATORY CIEPLNE

Akumulatory ciepłe umożliwiają akumulowanie energii wiatrowej pod postacią ciepła w gorącej wodzie lub niekiedy w parze. Nadwyżkami mocy zespołu wiatrowo-elektrycznego, uzyskiwanymi podczas silnych wiatrów, ogrzewa się w odpowiednio urządzonej zbiorniku wodę, której ciepło można wykorzystywać do różnych celów. Ze względu na możliwość uzyskiwania w tego rodzaju urządzeniach znacznych pojemności cieplnych można osiągać i odpowiednio duże przesunięcie okresu użytkowania ciepła względem okresu jego uzyskiwania.

Do spełnienia roli właściwego akumulatora energii wyjściowej (elektrycznej) urządzenia ciepłe powinny umożliwiać uzyskiwanie pary i to o możliwie dużym ciśnieniu, co najłatwiej osiągnąć przy zastosowaniu akumulatora parowego. Para pobierana z takiego akumulatora może być użyta do napędu turbo-prądnicy dostarczającej energii elektrycznej podczas postoju zespołu wiatrowo-elektrycznego.

Sprawność tego rodzaju akumulatora ciepłego byłaby jednak bardzo mała głównie ze względu na małą sprawność termodynamiczną turbiny parowej oraz ze względu na straty ciepłe akumulatora parowego, powiększające się w miarę przedłużających się okresów czasu oczekiwania na pobór pary.

Ponieważ energia elektryczna uzyskiwana z zespołów wiatrowo-elektrycznych jest używana również i do celów ogrzewniczych, zatem pokrywanie zapotrzebowania tego ciepła ze zbiornika gorącej wody bez pośrednictwa pary i elektryczności może

również spełniać rolę pełnowartościowego akumulatora energetycznego. Jednak sprawność urządzenia zasobnikowego w tym ostatnim przypadku otrzymuje się znacznie większą i wskutek tego zastosowanie takiego akumulatora ciepłego jest w wielu przypadkach w pełni uzasadnione.

Najważniejsze straty w tym przypadku powstają w wyniku przewodzenia ciepła przez ścianki zbiornika, jednak straty te można względnie zmniejszyć przez samo zwiększanie wielkości zbiornika. Pojemność cieplna zbiornika bowiem zwiększa się wraz z trzecią potęgą jego wymiaru liniowego, straty ciepłe zaś, jako zależne od wielkości powierzchni — tylko z drugą potęgą tego wymiaru.

Przy użyciu dla tych celów zbiorników odpowiednio dużych wymiarów, np. dla potrzeb ogrzewania kilku domów łącznie, można przy względnie niewielkich stratach ciepła uzyskać akumulowanie ciepła nawet sezonowe, czyli z lata na zimę. W zbiorniku takim podgrzewa się wodę nadwyżkami mocy zespołu wiatrowo-elektrycznego w ciągu całego prawie roku, a zakumulowane w ten sposób ciepło zużytkowuje się głównie podczas zimy. Przy zastosowaniu np. półmetrowej grubości izolacji korkowej zbiornika odpowiedniej wielkości roczne straty ciepła mogą nie przekraczać 10 %, co jest technicznie całkowicie dopuszczalne. W celu uzyskania możliwie lekkiej konstrukcji takich zbiorników proponowano pogrążyć je w odpowiednio głębokich jeziorach lub stawach, przez co osiąga się odciążenie zbiorników od sił hydrostatycznych napieniającej je wody. Jednak izolacja korkowa musi być w tych warunkach odpowiednio zabezpieczona przed zawilgoceniem, gdyż w stanie wilgotnym traci w znacznym stopniu swe własności izolacyjne.

Zamiast budowania specjalnych zbiorników dla przechowywania ciepłej wody było już proponowane użycie dla celów zasobnikowych naturalnych wód gruntowych, zalegających zwykle w głębi ziemi. Jednak teren przeznaczony do tych celów musi być pod względem hydrologicznym dostatecznie odosobniony, aby nie wystąpiły straty ciepła przez odpływ lub wymianę wody z otoczeniem.

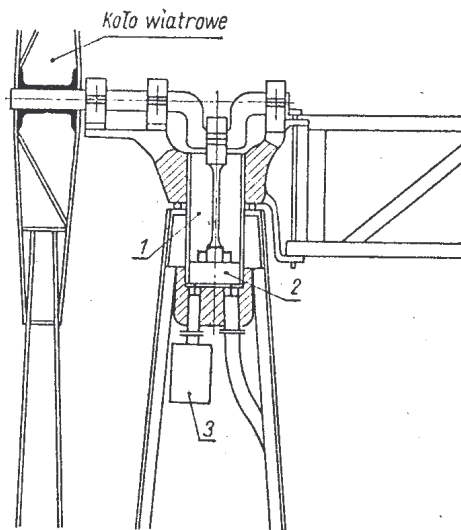
Przy akumulowaniu ciepła we wszystkich tego rodzaju zbiornikach ze względu na straty nie dopuszcza się jednak podgrzewa-

nia wody do wyższej temperatury niż ok. 70 °C. Temperatura ta wystarcza tylko do niektórych celów, jak np. do ogrzewania mieszkań, kąpieli itp. Dla wody o wyższej temperaturze, której zresztą potrzeba znacznie mniej, przewiduje się dodatkowy odpowiednio mniejszy, ale również dobrze izolowany, zbiornik wodny umieszczony w środku zbiornika głównego.

Przy użytkowaniu ciepła zakumulowanego w zasobnikach cieplnych znaczną rolę może odegrać również i pompa ciepła, o zasadach działania której, można znaleźć wyczerpujące dane w podręcznikach termodynamiki.

6. AKUMULATORY POWIETRZNE (CIŚNIENIOWE)

Akumulatory powietrzne umożliwiają akumulowanie energii wiatru pod postacią sprężonego powietrza. Nadwyżkami mocy zespołu wiatrowo-elektrycznego, występującymi podczas silnego wiatru, spręża się powietrze, które przechowywane w odpowiednich zbiornikach może służyć podczas postoju silnika wiatrowego do napędu silnika tłokowego lub turbiny powietrznej sprężonych z prądnicami elektrycznymi. To sprężone powietrze może służyć również i do bezpośredniego napędu różnych narzędzi pneumatycznych.



Rys. 187. Schemat sprężarki powietrznej napędzanej bezpośrednio przez silnik wiatrowy: 1 — cylinder sprężarki, 2 — tłok sprężarki, 3 — filtr na wlocie powietrza

Sprężanie powietrza energią silnika wiatrowego może być dokonywane za pośrednictwem energii elektrycznej przy użyciu do tego celu sprężarki napędzanej silnikiem elektrycznym albo też bezpośrednio przy użyciu sprężarki napędzanej od poziomego wału silnika wiatrowego (rys. 187).

W tym przypadku cylinder sprężarki 1 jest umieszczony w pionowej osi obrotu głowicy silnika wiatrowego wokół wieży i jest konstrukcyjnie z nią związany. Tłok sprężarki 2 o jednostronnym lub dwustronnym działaniu może być napędzany od wału głównego przy pomocy korby albo też mimośrodowo. Takie urządzenie sprężarki umożliwia swobodny obrót głowicy silnika wiatrowego wokół wieży.

Sprawność akumulatora powietrznego przy uwzględnieniu ponoszonych strat energii w sprężarce, w silniku powietrznym i prądnicach wynosi ok. 0,40. Ciężar urządzenia dla zakumulowania 1 kWh wynosi około 800 kG, zaś jego koszt wypada na równi kosztu silnika wiatrowego.

KONSTRUKCJE SILNIKÓW WIATROWYCH, ICH WIEŻE, MONTAŻ I OBSŁUGA

1. WIATRANKI WIEJSKIE

Dobrze zbudowany wiatrak drewniany powinien posiadać przede wszystkim prawidłowo wykonane skrzydła, które umożliwiająby duże wykorzystywanie energii wiatru i to przede wszystkim w zakresie małych jego szybkości. W wyniku uzyskuje się przez to możliwie małe wymiary wiatraka, zatem jego taniość oraz długotrwałe wykorzystywanie wiatraka przy słabych wiatrach. Przytoczony tutaj opis ¹⁾ dotyczy wykonania jednego z lepszych wiatraków wiejskich.

Długość poszczególnych skrzydeł tego wiatraka wynosi 5 m, zatem średnica zakreślanego przez skrzydła koła wynosi 10 m, a jego powierzchnia ok 80 m². Moc tego wiatraka przy szybkości wiatru 6 m/sek wynosi ok. 5,5 KM.

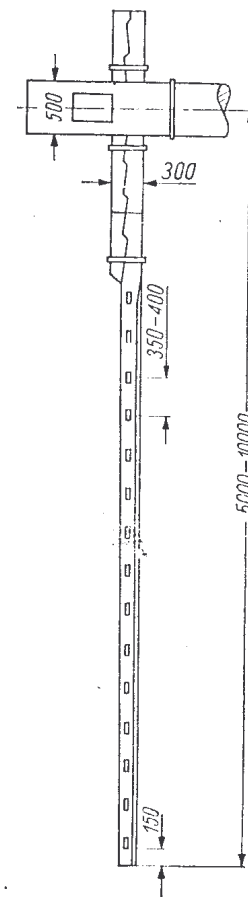
Ramię skrzydła wykonuje się z dobrego i suchego bala sosnowego lub jodłowego długości przynajmniej 6 m. Grubość cieńszego końca ramienia powinna wynosić 15 cm, grubszego zaś w miejscu przyszłego osadzenia w wale przynajmniej 20 cm. Ramiona skrzydeł mogą być również wykonane z krótszych bali i wtedy para ramion powinna składać się z jednej części środkowej i dwu skrajnych połączonych wzajemnie strzemionami i śrubami (rys. 188).

Kąty ustawienia w skrzydłach poszczególnych żeber muszą być odpowiednio dobrane do odległości żebra od osi obrotu, a najlepiej, aby odpowiadały wielkościom podanym w tabl. 11 (str. 276).

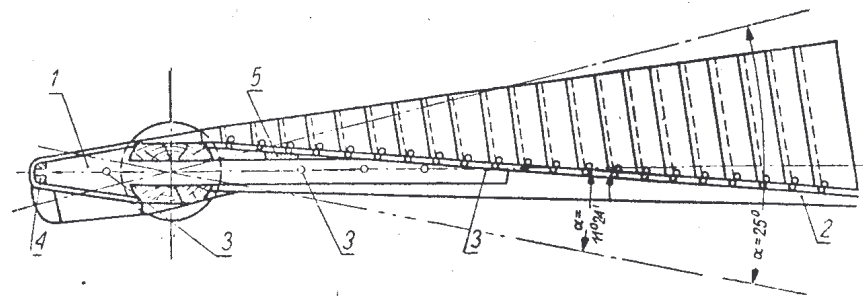
¹⁾ Według J. Szowheniwa „Silniki wietrzne”.

Otworki do osadzenia poszczególnych żeber w ramionach skrzydeł muszą być zatem wykonane ukośnie. Do prawidłowego wiercenia otworów w ramionach używa się odpowiednich wzorników z zaznaczonymi wielkościami właściwych kątów. Po wywierceniu otworki powiększa się do potrzebnych wymiarów dłutem.

Każde żebro skrzydłowe składa się z dwu części (rys. 189) grubości 18 mm wykonanych z odpowiednio obrobionych desek sosnowych lub jodłowych. Obie te części osadza się w otworze w ramieniu skrzydłowym, przy czym część 1 z jednej strony, zaś część 2 z drugiej strony ramienia i zamocowuje się je ze sobą kołkami 3 jesionowymi lub dębowymi średnicy 12 mm rozmieszczonymi w odległościach ok. 112 mm. Czoła zamocowanych w ten sposób żeber łączy się między sobą odpowiednio zaokrąglonymi listwami 4, które niekiedy obija się w następstwie blachą żelazną. Podobnie łączy się poszczególne żebra z drugiej strony ramienia listwą 5.



Rys. 188. Para ramion skrzydłowych wiatraka wiejskiego wykonana z trzech części

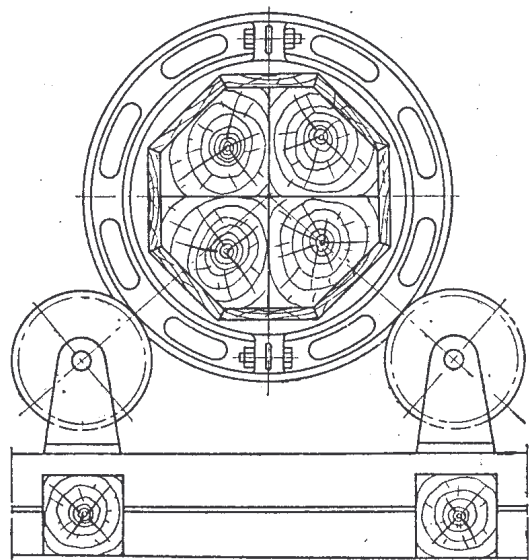


Rys. 189. Żebro skrzydła wiatraka wiejskiego osadzone w ramieniu

Kąty ustawienia żeber w skrzydłach wiatraka wiejskiego
o średnicy 10 m

Kolejność żeber	Odległość żeber od osi obrotu, m	φ	Grubość ramienia mm
1	1,25	25°00'	175
2	2,00	20°54'	169
3	2,50	18°27'	165
4	3,00	16°26'	161
5	3,50	14°40'	159
6	4,00	13°28'	155
7	4,50	12°15'	151
8	5,00	11°24'	147

Do tak wykonanego szkieletu skrzydła przybija się odpowiednimi gwoździami stałe poszycie skrzydła wykonane z deszczulek sosnowych lub jodłowych grubości 7 mm. Poszycie zdejmowane



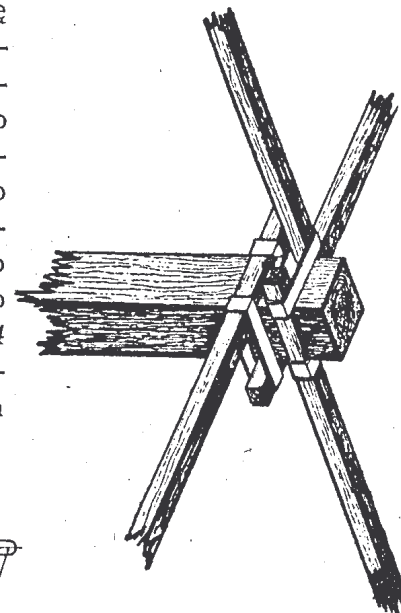
Rys. 190. Wał skrzydłowy wiatraka wiejskiego wykonany z czterech bali (przekrój)

umieszczane w skrajnych częściach skrzydła jest wykonane z połączonych ze sobą deszczulek, które się wsuwa między poszczególne żebra i tam się odpowiednio zabezpiecza.

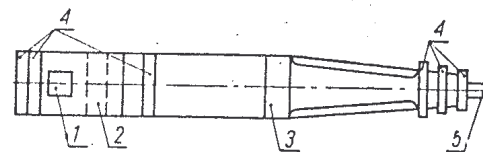
Podczas budowy skrzydeł należy zwracać baczną uwagę na możliwie jednakowe ich wykonanie, aby uzyskać jednakowy ciężar wszystkich skrzydeł, a przez to dobre wyrównowanie całego koła wiatrowego. Ciężar pojedynczego skrzydła wynosi ok. 115 kG.

Wał skrzydłowy wykonuje się z drewna (może być i stalowy) i w naszym przypadku powinien mieć średnicę ok. 50 cm. Wał taki może być wykonany z pojedynczego bala albo też może być złożony z czterech cieńszych ściśle do siebie dopasowanych i ściągniętych odpowiednimi obęczami stalowymi (rys. 190 i 191).

Obróbkę mechaniczną wału złożonego zaznacza się po jego zestawieniu, ale przeprowadza się ją w poszczególnych częściach oddzielnie. Przede wszystkim wycina się otwory 1 i 2 (rys. 191) do osadzenia ramion skrzydeł, obrabia się na kwadrat miejsce 3 do osadzenia koła zębatego oraz obrabia się cały wał do pożądanego kształtu. Następnie składa się go i naciąga na odpowiednie miejsca 4 rozgrzane obęczy oraz czop szyjny. W tylny koniec wału wbija się stalowy czop oporowy 5.



Rys. 192. Ramiona skrzydeł wiatraka osadzone zewnętrznie na wale skrzydłowym

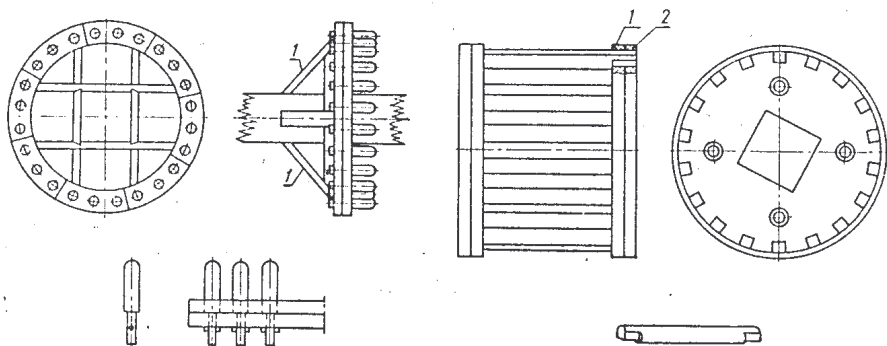


Rys. 191. Wał skrzydłowy wiatraka wiejskiego (widok)

Czop szyjny wału podpira się na odpowiedniej belce dwoma łożyskami wałeczkowymi (rys. 190), a trzecie łożysko umieszcza się nad nim. Czop tylny osadza się w łożysku oporowym umieszczonym na odpowiedniej belce.

Przy użyciu na wał pojedynczego bala może on być odpowiednio cieńszy. Aby tego wału nie osłabiać otworami do osadzenia ramion skrzydłowych, umocowuje się je parami na zewnątrz jego końca (rys. 192).

Duże koło zębate (rys. 193) najczęściej jest palczaste. Pierścień kołowy o średnicy 1,5 m jest wykonany dwuwarstwowo z odpowiednio zestawionych wycinków pierścieniowych z desek sosnowych grubości ok. 90 mm. Wycinków tych jest w każdej warstwie po osiem i są względem siebie tak przesunięte, aby ich końce w jednej warstwie wypadały w środkach wycinków drugiej warstwy. Połączenie poszczególnych wycinków w całość pierścienia jest dokonane przy pomocy dębowych kołków, które po wbiciu i przyścięciu odpowiednio się zaklinowuje. Jednocześnie zaopatruje się pierścień w odpowiednie ramiona, umożliwiające osadzenie koła na wale skrzydłowym.



Rys. 193. Duże koło zębate wiatraka wiejskiego

Rys. 194. Małe koło zębate przekładni wiatraka wiejskiego

Na tak wykonanym pierścieniu zaznacza się otwory do osadzenia w nim drewnianych palców, których długość przyjmuje się zwykle 1,5 raza większą od grubości. Palce te obtacza się na tokarce do kształtu pokazanego na rysunku i zaopatruje się w odpowiednie otwory, w które po osadzeniu palców w pierścieniu kołowym zabija się odpowiednie kliny.

Wykonane w ten sposób koło osadza się na wale skrzydłowym i zaopatruje się w odpowiednie podpórki (1 na rys. 193).

Małe koło przekładni robi się jako klatkowe. Składa się ono z dwu kręgów (1 i 2 rys. 194) odsuniętych od siebie na tyle, aby mogły się między nimi pomieścić, wsuwające się tam, palce koła dużego. Każdy krąg jest zrobiony z dwu tarcz drewnianych zestawionych każda z dwu połówek połączonych ze sobą klejem i kołkami. Na obwodach tych kręgów wycina się otwory do osa-

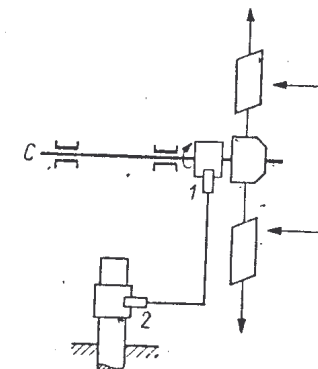
dzenia drewnianych zębów rozpórkowych, po osadzeniu których naciąga się na kręgi odpowiednio nagrzane obręcze stalowe, zabezpieczające zęby przed wypadnięciem. Następnie oba kręgi ściąga się wzajemnie odpowiednio długimi śrubami.

Pozostałe części składowe wiatraka wykonywa się zwykłymi sposobami ciesielskimi, zaś urządzenie samego młyna żarnowego wg praktyki młynarskiej.

Wysokość budynku wiatraka powinna być możliwie duża, aby zapewniała dostateczny dopływ wiatru do skrzydeł.

Każdy wiatrak powinien być zabezpieczony przed uderzeniem pioruna. Zabezpieczenie to można zrobić w dwojaki sposób.

Pierwszy sposób polega na zaopatrzeniu każdego skrzydła w odpowiedni zwód piorunochronowy, przyłączony do metalowego pierścienia osadzonego na wale skrzydłowym i wraz z nim się obracającego. Do tego pierścienia dotyka stała sprężysta metalowa płytka, czyli tzw. szczotka, połączona przewodem z drugą taką szczotką, ślizgającą się po pierścieniu metalowym umieszczonym na słupie kozłowym wiatraka. Ten pierścień metalowy musi być odpowiednio uziemiony. Schemat takiego urządzenia piorunochronowego przedstawiono na rys. 195.



Rys. 195. Urządzenie piorunochronu w wiatraku wiejskim

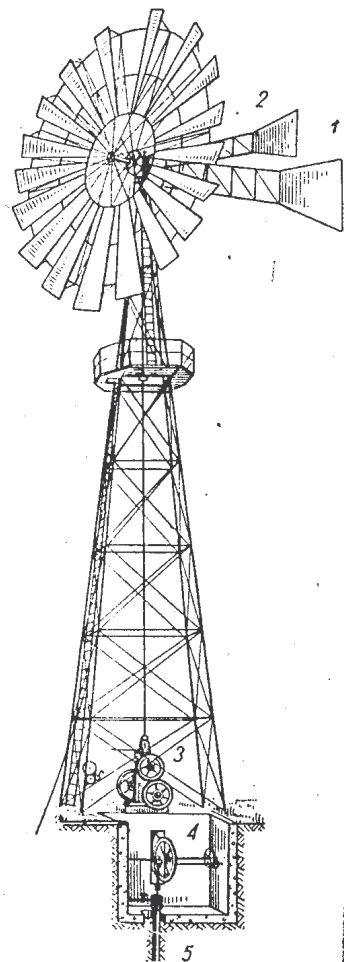
Drugi (mniej pewny) sposób zabezpieczenia wiatraka przed piorunem jest znacznie prostszy i polega na umieszczeniu zwodu piorunochronowego na oddzielnym i odpowiednio wysokim słupie, ustawionym w pobliżu wiatraka. Przyjmuje się zwykle że piorunochron taki zabezpiecza przed uderzeniem pioruna przestrzeń zawartą w stożku o wysokości i promieniu podstawy równym wysokości słupa.

2. SILNIKI WIATROWE WOLNOBIEŻNE (WIEŁOŁOPATKOWE)

Silnik tutaj opisany (rys. 196) posiada ustaloną już konstrukcję, opracowaną przez firmę Herkules. Konstrukcja ta uległa niewielkim zmianom i w radzieckim silniku TB-8. Silnik jest prze-

znaczone przede wszystkim dla gospodarstw rolniczych i hodowlanych i przy wietrze o szybkości 8 m/sek rozwijają moc na wale koła łopatkowego 6,5 KM przy 25 obr/min. Wyróżnik szybkobieżności wynosi 1,3.

Osiowy przekrój konstrukcji tego silnika przedstawiono na rys. 197, zaś konstrukcję samego koła łopatkowego na rys. 198.

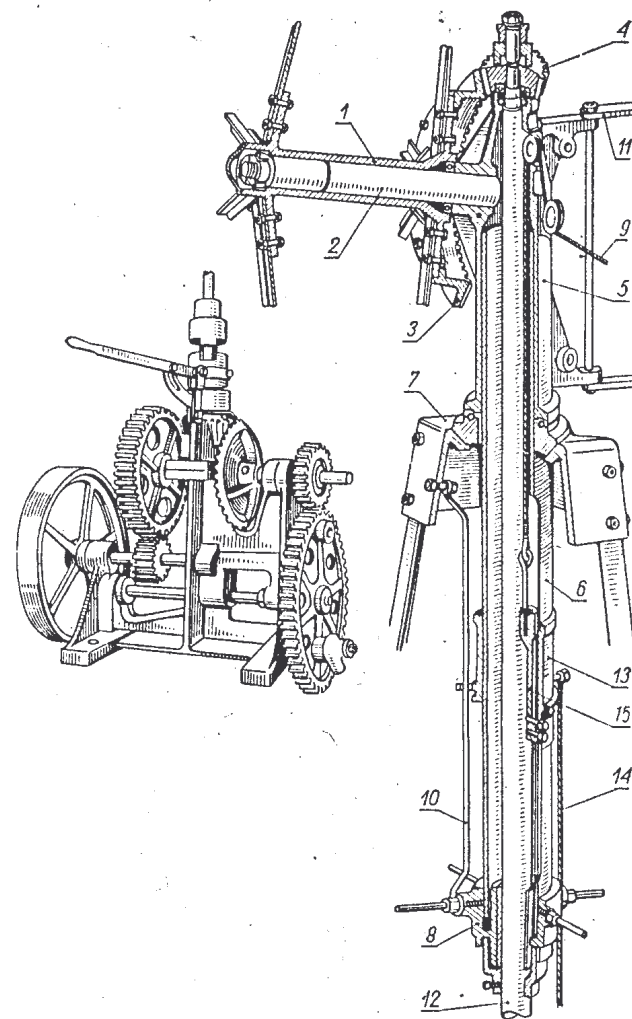


Rys. 196. Silnik wiatrowy TB-8

Koło łopatkowe o średnicy 8 m posiada 18 łopatek wygiętych z ocynkowanej blachy stalowej grubości 1,25 mm. Łopatki te są przymocowane do trzech obręczy połączonych ze sobą i z piastą koła sześcioma ramionami wykonanymi z kątowników 45 × 45 mm. Łopatki posiadają zmienne kąty nachylenia względem płaszczyzny obrotu koła łopatkowego. Przy zewnętrznej obręczy kąt między cięciwą łopatki a płaszczyzną obrotu wynosi 22°, przy wewnętrznej zaś obręczy kąt ten wynosi 47°. Długość łopatki wynosi 2450 mm, jej szerokość na skraju zewnętrznym wynosi 674 mm, zaś na skraju wewnętrznym 410 mm. Ramiona koła są przymocowane do kołnierzy piasty odpowiednimi śrubami. Do tylnego kołnierza jest przyśrubowany wieniec stożkowy koła zębatego 3.

Głowica silnika 5 jest wykonana z żeliwa; w jednej z jej ścianek jest wprasowana oś 2 nachylona do poziomu pod kątem 6,5°. Na tej osi jest osadzone w dwu łożyskach (wałeczkowym i kulkowym) koło łopatkowe. Pochylenie osi ma na celu możliwie duże przesunięcie dolnej części koła łopatkowego od wieży. Wieniec zębaty 3 zazębia się z kółkiem zębatym 4 osadzonym na pionowym wale 12 silnika. Koło duże tej przekładni stożkowej posiada 63 zęby, małe natomiast — 17.

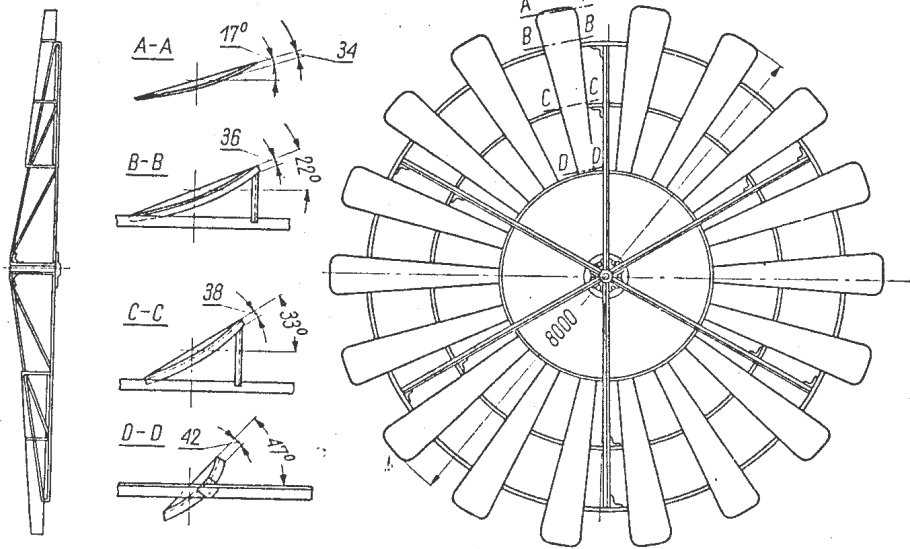
Głowica silnika dolną swą podstawą spoczywa na żeliwnej rurze osadczą 6, która może swobodnie się obracać w dwu łożyskach: górnym 7 na kulkach ułożonych w samonastawnej półkulistej czaszy, oraz dolnym 8 ślizgowym wykonanym z żeliwa



Rys 197. Przekrój osiowy silnika wiatrowego TB-8 z zestawem przekładniowym: 1 — piasta koła łopatkowego, 2 — oś do osadzenia koła wiatrowego, 3 — wieniec koła zębatego, 4 — małe koło zębate, 5 — głowica silnika, 6 — rura osadczą, 7 — górne łożysko rury osadczą (kulkowe), 8 — dolne łożysko rury osadczą (ślizgowe), 9 — linka naciągowa steru, 10 — pręt, 11 — ramię steru, 12 — pionowy wał silnika, 13 — tuleja przesuwna, 14 — linka naciągowa od kołowrotu, 15 — ciągnio

i przymocowanym odpowiednimi poprzeczkami do nóg wieży. Zatem głowica silnika wraz z rurą osadczą może się obracać względem pionowej osi, co jest potrzebne przy samoczynnym nastawianiu się silnika pod wiatr przy jego uruchamianiu lub zatrzymywaniu oraz przy regulacji obrotów.

Ster tylny, dokonywujący nastawiania silnika pod wiatr, składa się z kratowego ramienia o długości 7370 mm. Tylny koniec tego ramienia rozwidla się w kształt trapezu, do którego jest przymocowany płat steru o powierzchni 4,85 m² wykonany z ocynkowanej blachy.



Rys. 198. Konstrukcja koła wielołopatkowego TB-8

Silnik jest umieszczony na stalowej kratowej wieży o wysokości 14,85 m. U podnóża wieży znajduje się zestaw przekładniowy (uwidoczniiony z boku rys. 197) połączony z pionowym wałem silnika za pośrednictwem przestawnego sprzęgła. Zestaw ten umożliwi napędzanie maszyn rolniczych, tłokowej pompy do wody, prądnicy elektrycznej itp. Podczas postoju silnika wiatrowego zestaw ten może być napędzany od konnego kieratu albo też od ciągnika. Na ten okres czasu pionowy wał silnika wiatrowego zostaje odłączony od zestawu przekładniowego przy pomocy poprzednio wspomnianego sprzęgła uruchamianego odpowiednią dźwignią.

Do regulacji szybkości obrotowej silnika jest przeznaczony ster boczny o powierzchni płata 1,95 m².

Uruchamianie oraz zatrzymywanie silnika dokonywa się z dołu przy pomocy ręcznego kołowrotu linowego, przymocowanego do jednej z nóg wieży. Linka 14 od tego kołowrotu jest umocowana do przesuwanącej się wzdłuż rury osadczej tulei 13. Tuleja ta posiada odpowiedni występ z otworem, przez który jest przesunięty pręt 10 zamocowany w swych końcach w wierzchołku i poprzeczce wieży. Pręt ten nie pozwala tulei obracać się wraz z rurą osadczą względem osi wieży, a umożliwia jej przesuwanie się wzdłuż tej rury.

Naciągowa linka od steru tylnego 9 jest doprowadzona poprzez dwa krążki do wnętrza rury osadczej, gdzie jest przymocowana do odpowiedniego cięgna 15, przesuwanego się w dół i w górę w szparze wykonanej w ścianie rury osadczej. Przez szparę tę wystaje na zewnątrz rury dolna część cięgna, na której opiera się poprzednio opisana zewnętrzna tuleja przesuwna 13.

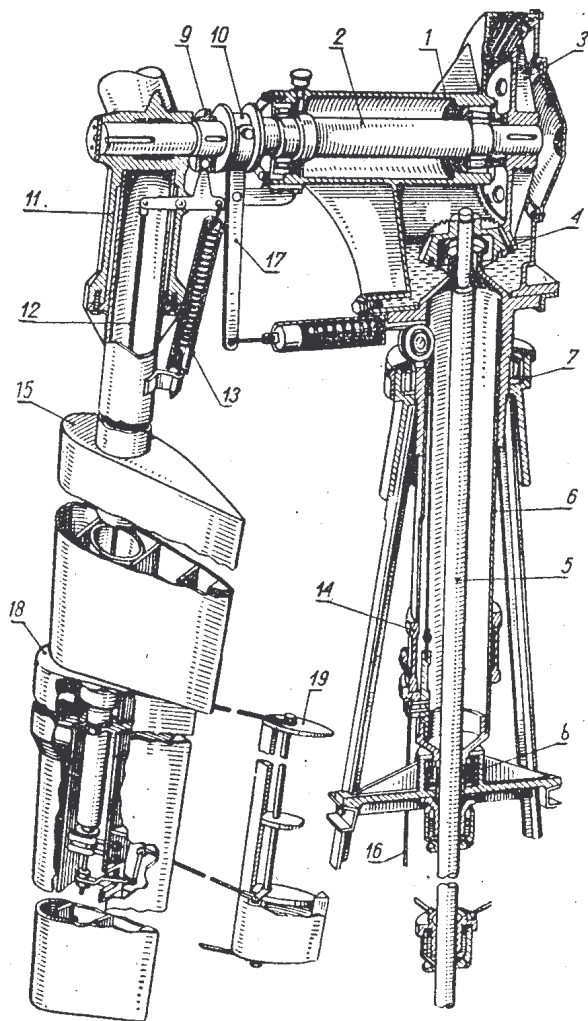
W ten sposób uzyskuje się połączenie naciągowego mechanizmu w obrotowej głowicy silnika z urządzeniem przesuwanym wzdłuż rury osadczej przy pomocy kołowrotu za pośrednictwem linki 14.

Ściągając zatem przy pomocy kołowrotu linkę, powoduje się przesuwanie w dół tulei, a zarazem opierającego się o jej dolną podstawę cięgna od steru tylnego, który zostaje przez to ściągnięty w stronę steru bocznego, w wyniku czego koło łopatkowe odwraca się od wiatru, przyjmując położenie równoległe do jego kierunku. W czynności tej nie przeszkadza zupełnie obrót głowicy wraz z rurą osadczą, gdyż, obracający się wraz z tą rurą, dolny koniec cięgna przesuwa się po dolnej krawędzi tulei. Również i w stanie odstawionym od wiatru głowica silnika ma możliwość obracania się wokół osi pionowej pomimo silnego naciągu linki.

3. SILNIKI WIATROWE ŚREDNIOBIEŻNE

Przedstawicielem tego typu silników wiatrowych jest radziecki silnik ВИМЭ Д-12 przedstawiony na rys. 151. Osiowy przekrój tego silnika przedstawiono na rys. 199. Silnik ten ze względu na prawie stałą szybkość obrotową, regulowaną przy pomocy stabi-

lizatorów, nadaje się do napędu prądnic elektrycznych, obrabiarek, pomp odśrodkowych itp. Moc na wale śmigłowym przy szybkości wiatru 8 m/sek wynosi 15 KM przy jego szybkości obrotowej 55 — 60 obr/min.



Rys. 199. Przekrój osiowy silnika ВИМЭ Д-12: 1 — głowica silnika, 2 — wał poziomy, 3 — koło zębate duże, 4 — koło zębate małe, 5 — wał pionowy, 6 — rura osadczą, 7 — górne łożysko rury osadczą, 8 — dolne łożysko rury osadczą, 9 — tuleja przesuwna na wale poziomym, 10 — tuleja nastawcza dźwigni, 11 — dźwignia kątowa, 12 — linka do nastawiania stabilizatora, 13 — sprężyna dźwigni kątowej, 14 — tuleja przesuwna na rurze osadczą, 15 — stała część płata śmigła, 16 — linka naciągowa od kołowrotu, 17 — dźwignia, 18 — ruchoma część płata śmigła, 19 — stabilizator

Silnik posiada trójłopatowe śmigło o średnicy 12 m. Łopaty śmigła wykonane częściowo ze stali, częściowo z drewna posiadają kształt opływowy i są osadzone na ramionach ze stalowych rur.

W głowicy silnika wykonanej z żeliwa znajdują się łożyska do osadzenia wału śmigła oraz mieści się stożkowa przekładnia zębata 3, 4 przenosząca moc śmigła na pionowy wał silnika 5. Głowica jest umieszczona na rurze osadczą 6, która może się obracać wokół pionowej osi w dwu łożyskach: górnym 7 wałeczkowym i dolnym 8 — kulkowym. Stożkowa przekładnia pracuje w oleju mieszczącym się w odpowiednio wykonanym zagłębieniu głowicy.

Uruchamianie i zatrzymywanie silnika dokonuje się z dołu przy pomocy kołowrotu linowego przymocowanego do jednej z nóg wieży. Linka naciągowa 16 jest zaczepiona u tulei 14, której dolna krawędź opiera się na występie wewnętrznego cięgna, który wystaje na zewnątrz rury osadczą przez odpowiednią szparę w jej ścianie (podobnie, jak w poprzednio opisanym konstrukcji silnika TB-8). Do cięgna wewnętrznego jest przyczepiona ilnka, która przeprowadzona przez krążek jest zaczepiona drugim końcem o ramię dźwigni 17, przesuwaną odpowiednią tuleją 10, osadzoną luźno na wale śmigła i przesuwaną tylko wzdłuż jego osi.

Przez zwalnianie linki 16 tuleja 10 na wale śmigłowym przesuwa się w stronę wieży, pociągając za sobą tuleję 9, która obraca się wraz z wałem śmigła. Do tulei są przyłączone za pośrednictwem kątownika dźwigni 11 cięgna od stabilizatorów wszystkich trzech łopat śmigła. Cięgna 12 są poprowadzone wewnątrz rurowych ramion łopat aż do ruchomych części płatów; gdzie za pośrednictwem odpowiednich dźwigni oddziałują na stabilizatory.

Przy naciąganiu linki kołowrotem nastawia się stabilizatory na duży kąt ujemny, w wyniku czego na ruchomych częściach płatów śmigła powstają momenty obrotowe, przeciwdziałające momentom stałych części płatów, przez co silnik jest unieruchomiony.

W celu uruchomienia silnika odkręca się z kołowrotu linkę 16, w wyniku czego stabilizatory pod wpływem sprężyn 13 ustawiają się względem wiatru pod określonym kątem natarcia. Pod wpływem wiatru stabilizatory przekręcają się względem osi łopat śmigła i ustawiają ruchome części płatów śmigłowych w położenie

robotyczne. W wyniku tego przy wietrze o szybkości 4 m/sek silnik zaczyna się obracać.

Ze względu na to, że regulacja tego silnika polega na przeciwdziałaniu momentów obrotowych ruchomych części płatów śmigła momentom obrotowym ich części stałych, konstrukcja śmigła musi być szczególnie mocna.

Przykład ten daje pojęcie, jak bardzo złożoną może być konstrukcja silnika wiatrowego i to silnika, którego aerodynamiczne oraz ruchowe właściwości nie są jednak bez poważnych wad.

4. SILNIKI WIATROWE SZYBKOBIEŻNE (ŚMIGŁOWE)

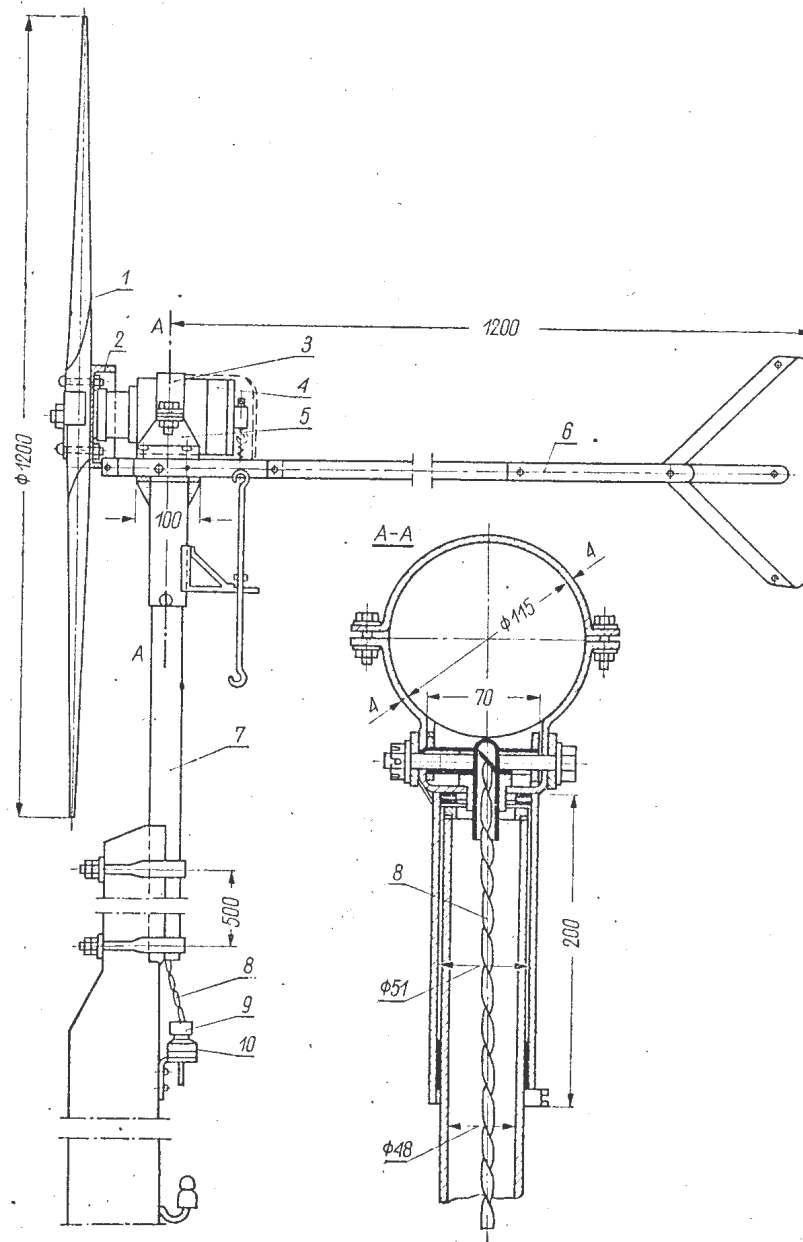
Z tej grupy silników wiatrowych zostaną opisane konstrukcje zespołów wiatrowo-elektrycznych z silnikami śmigłowymi najmniejszej i małej mocy (80 W i 1000 W), które względnie łatwo jest wykonać samemu dla swych potrzeb.

Zespół wiatrowo-elektryczny Д-1,2 o mocy 80 W (rys. 200) jest najprostszym zespołem o średnicy śmigła 1,2 m i o szybkości obrotowej od 300 do 800 obr/min. Zespół ten jest bezprzekładniowy i może być wykonany przez każdego nieco uświadomionego w mechanice stosowanej. Dla ułatwienia tej pracy w tabl. 12 podano wszystkie części składowe zespołu wraz z ich szkicami.

Dwułopatowe śmigło drewniane jest wykonane ze sklejonych desek sosnowych wg rys. 201 oraz pomocniczych wzorników przedstawionych na rys. 202. Prawidłowe wykonanie śmigła jest sprawą najtrudniejszą, jednak przy pewnej dozie umiejętności i staranności można je dobrze wykonać w sposób następujący.

Jakkolwiek najlepiej jest wykonać śmigło z drewna klejonego, jednak w ostateczności można je również wykonać i z pojedynczej deski, ale musi być ona wtedy wycięta ze środkowej części pnia, aby słoje drzewne przebiegały w niej możliwie prostopadle do szerokości deski. W desce tej nie może znajdować się jednak rdzeń drzewny. Deska ta musi być sucha, niepopękana i prosta oraz powinna posiadać następujące wymiary: długość 1300 mm, szerokość 120 mm i grubość 50 mm.

Deskę tę należy po jednej stronie dokładnie ostrugać, aby otrzymać gładką i równą powierzchnię (płaszczyznę). Na powierzchni tej wyznacza się możliwie dokładnie osie podłużną i po-



Rys. 200. Zespół wiatrowo-elektryczny Д-1,2

Części zespołu wiatrowo-elektrycznego Д-1,2

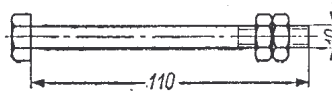
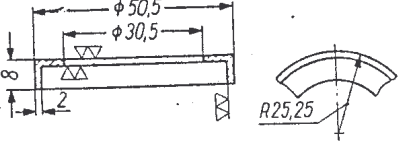
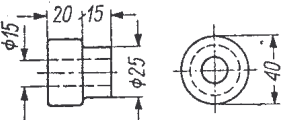

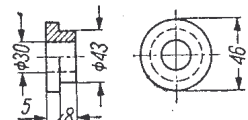
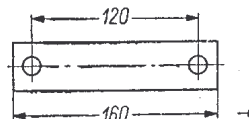
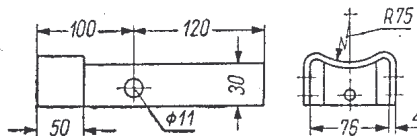
Ilość sztuk	Nazwa części	Szkic, lub dane techniczne	Materiał
1	Prądnica prądu stałego	ГБФ 4600;6V;80W;800—300 obr/min	—
1	Śmigło		Sosna klejona
1	Tarcza hamulcowa		Stal
1	Nakładka na śmigło		Stal
2	Śruba do umocowania tarczy hamulcowej do śmigła		Stal
6	Podkładka		Stal
1	Obejma siodła		Stal
1	Siodło wraz z rurą nasadczą		Stal

Tablica 12

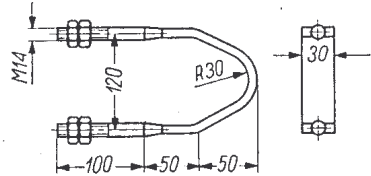
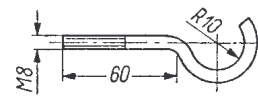
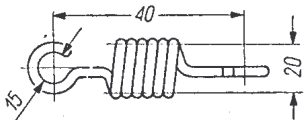
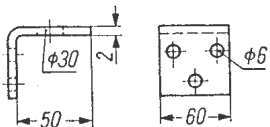
Tablica 12 (cd.)

Ilość sztuk	Nazwa części	Szkic, lub dane techniczne	Materiał
1	Rura osadcza		Stal
1	Ramię steru tylnego		Stal
1	Cięgno hamulcowe		Stal
1	Prowadnik cięgna hamulcowego		Stal
3	Śruba do obejmy siodła		Stal
1	Ostona prądnicy		Blacha stalowa
1	Płat steru		Blacha stalowa

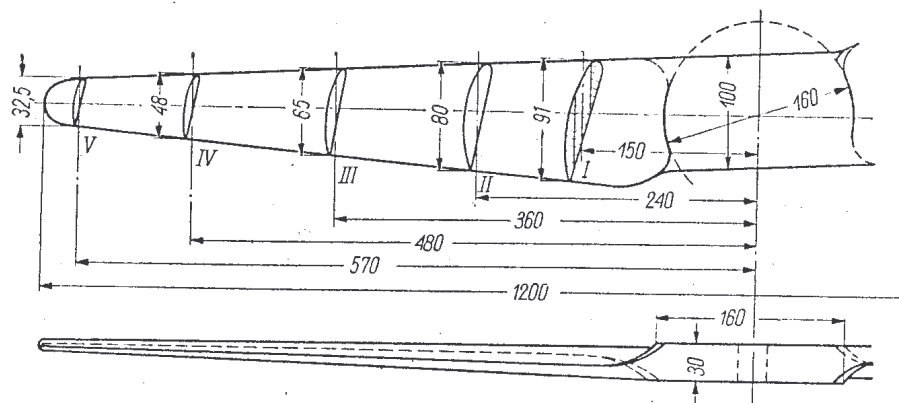
Tablica 12 (cd.)

Ilość sztuk	Nazwa części	Szkic, lub dane techniczne	Materiał
1	Śruba podsiodłowa		Stal
1	Pierścień wsporczy		Mosiądz
1	Tulejka izolacyjna		Bakielit
1	Rurka rozpórkowa		Stal
1	Tulejka wsporcza		Stal
2	Płytki		Stal
1	Dźwignia hamulcowa		Stal

Tablica 12 (cd.)

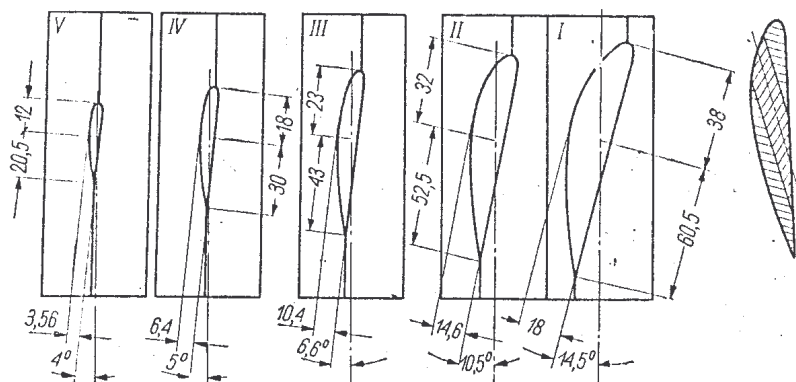
Ilość sztuk	Nazwa części	Szkic, lub dane techniczne	Materiał
2	Chomątko do umocowania rury osadczej		Stal
1	Haczyk		Stal
1	Sprężyna		
1	Wspornik gniazdka przyłączonego		Stal
1/2 m	Rurka gumowa	Średnica wewnętrzna 10 mm	
3m	Przewód giętki	Przekrój 2 x 2,5 mm ²	
1	Wtyczka przyłączowa	Dwukołkowa	
1	Gniazdko przyłączowe		
3	Wkrętka do drzewa	Średnica 5 mm, długość 40 mm	

przeczną oraz z punktu ich przecięcia się zakreśla się koło (niepełne) o średnicy 160 mm. Następnie po obu stronach osi poprzecznej w odległościach zaznaczonych na rys. 201 kreśli się linie równoległe, odpowiadające miejscom podanych przekrojów śmigła.



Rys. 201. Dwułopatowe śmigło zespołu Д-1,2

Na liniach tych zaznacza się po obu stronach osi podłużnej odpowiednie wymiary szerokości śmigła (rzuty długości profilów), a po połączeniu tych punktów linią otrzymuje się zarys rzutu całego śmigła na płaszczyznę poziomą; według tego zarysu trzeba deskę obciąć pilką.



Rys. 202. Wzorniki do wykonania śmigła zespołu Д-1,2

W celu ukształtowania przedniej (odwietrznej) powierzchni śmigła należy na obu bokach deski odpowiednio zaznaczyć odległości od jej powierzchni górnej obu końców krawędzi profilów

przekrojowych (bez uwzględnienia ich zaokrągleń) i połączyć je odpowiednią linią; według tej linii należy zbędny materiał deski zestrugać. Podczas tego zestrugiwania sprawdza się linią prostą przykładaną poprzecznie do deski prawidłowość otrzymywanych dolnych krawędzi profilów.

Tyłną (grzbietową) powierzchnię śmigła należy zestrugiwać wg wzorników górnych z rys. 202 wykonanych w wielkościach naturalnych ze sztywnej tektury. Zestrugiwanie to należy przeprowadzić w ten sposób, aby każdy wzornik w odpowiednim miejscu dokładnie przylegał do powierzchni śmigła.

Następnie należy wykonać zaokrąglenia i wykończenia dolnych części profilów wg ich wzorników dolnych (rys. 202) oraz dokładnie zestrugać środkową część śmigła do grubości 30 mm (rys. 201) i wywiercić w środku odpowiedni otwór do osadzenia śmigła na wale prądnicy.

Następną czynnością jest wygładzenie powierzchni śmigła papierem szklistym, po czym śmigło należy dokładnie zrównoważyć statycznie.

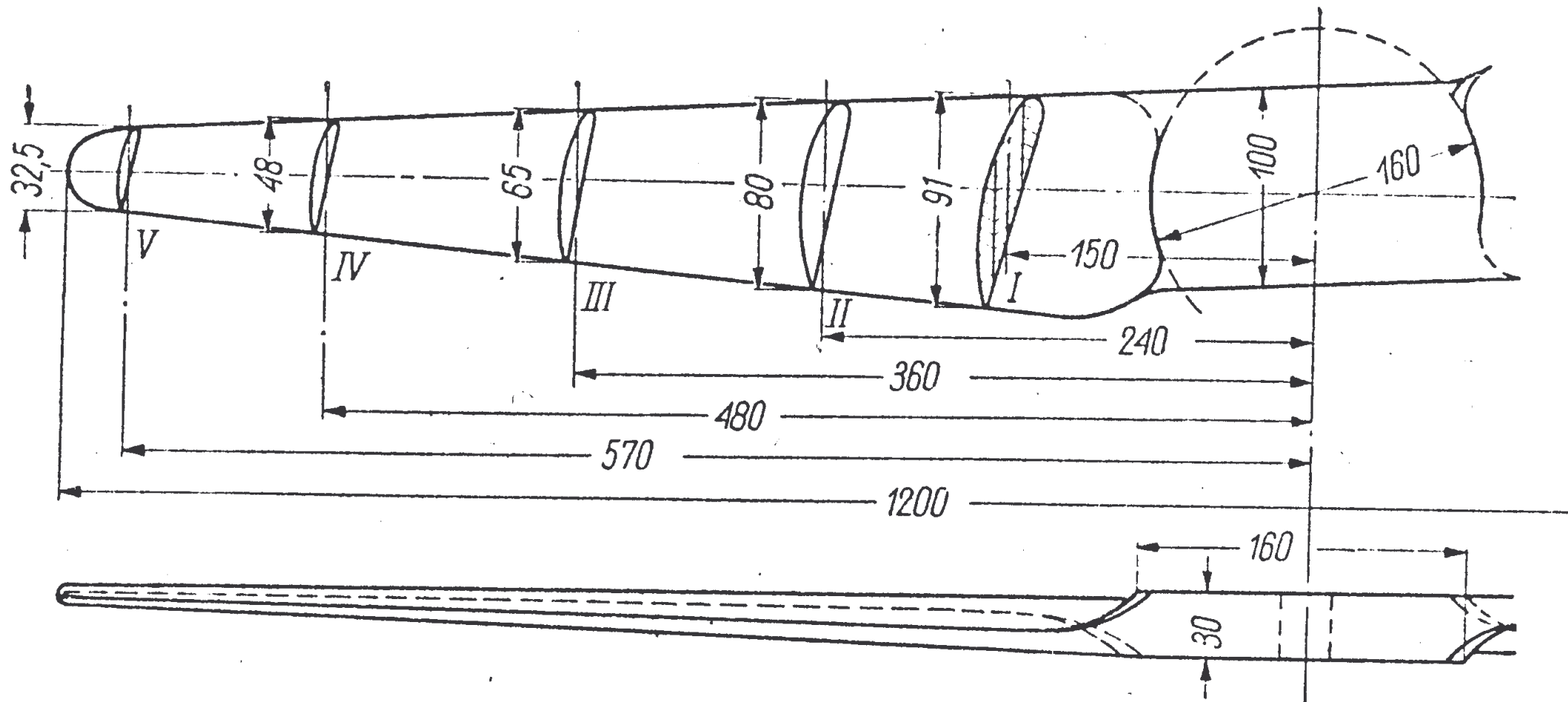
W tym celu śmigło umieszcza się wg jego osi poprzecznej na ostrej krawędzi odpowiedniej podpory i doprowadza się je do położenia poziomego przez dodatkowe wygładzanie papierem szklistym stwierdzonych nierówności na połowie cięższej albo też przez dodatkowe obciążenie połowy lżejszej wbitymi w nią gwoździkami.

Dla ochrony przed wpływami atmosferycznymi śmigło należy dwukrotnie zagruntować gorącym pokostem, a po jego wyschnięciu i przetarciu drobnym papierem szklistym należy je pomalować odpowiednim lakierem.

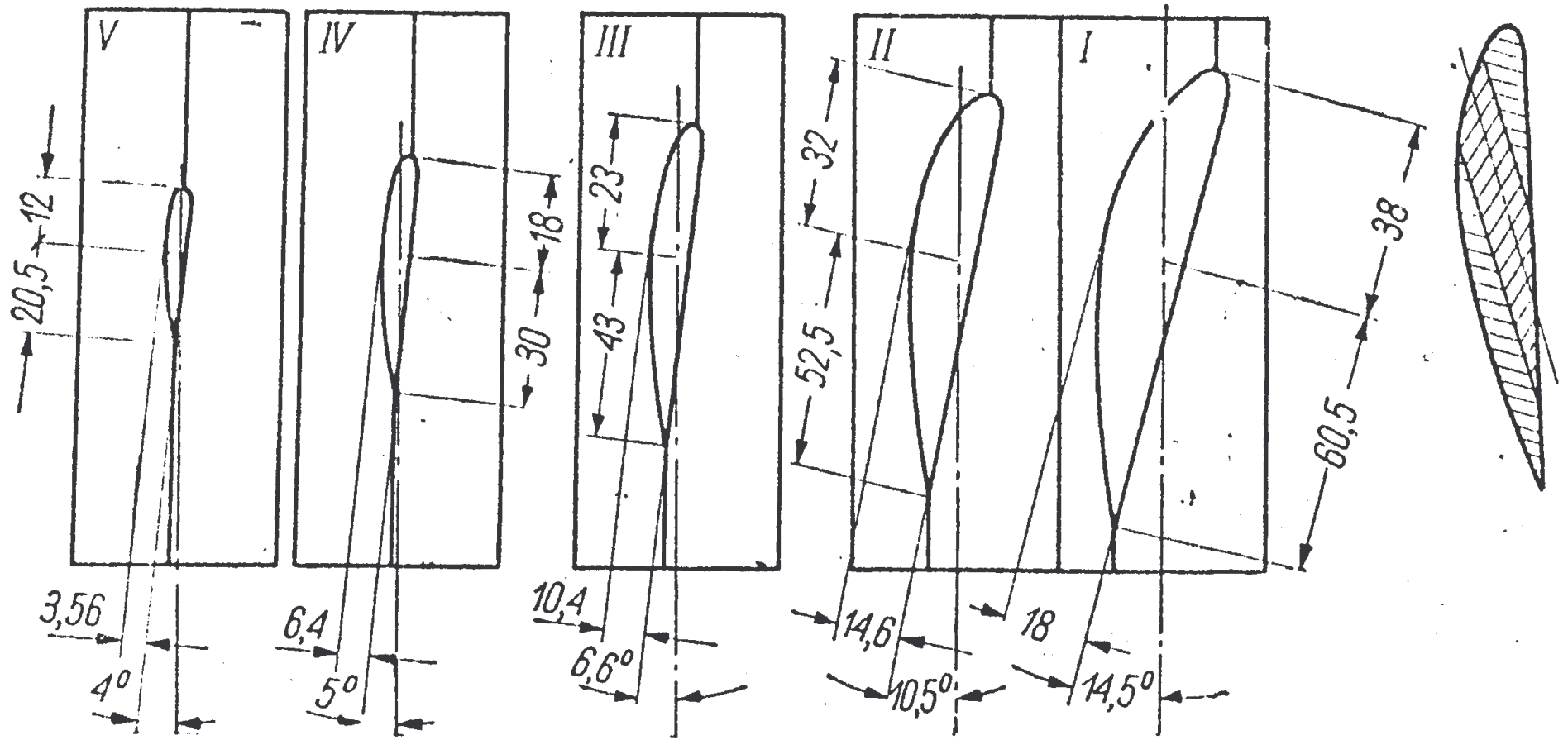
Po przymocowaniu do śmigła tarczy hamulcowej 2 (rys. 200) umieszcza się je na wale prądnicy i przez stalową nakładkę unieruchamia się nakrętką. Prądnicę umieszcza się w siodle głowicy 5 i umocowuje się ją tam wierzchnią obejmą 3.

Najlepiej nadaje się prądnica radziecka typu ГВФ4600, 6V 80W, 300 do 800 obr/min i do jej wymiarów są przystosowane wymiary otworu w śmigle, wymiary siodła dla niej w głowicy zespołu, jak również i wymiary obejmy wierzchniej (podane na rysunkach w tabl. 12).

Zamiast tej prądnicy może być również użyta jedna z prąd-



Rys. 201. Dwulopiatowe śmigło zespołu D-1,2



Rys. 202. Wzorniki do wykonania śmigła zespołu Д-1,2

nic samochodowych dostępnych w Polsce, np. typy: P1a od samochodu M-20 Warszawa, P2a od samochodu GAZ-51, P3a od kombajnu zbożowego, P6a od samochodu Star 20. Charakterystyki tych prądnic są do siebie zbliżone: 12 V, 13—18 A, szybkość obrotowa 800 do 1450 obr/min. Przez zmniejszenie szybkości obrotowej tych prądnic do połowy (400 do 725) oraz przez przełączenie ich uzwojeń magnesujących z szeregowych na równoległe łatwo jest je przystosować do naszych celów.

Wymiary otworu w śmigle oraz wymiary siodła w głowicy zespołu i obejmę wierzchniej należy przystosować do wymiarów posiadanej prądnicy.

W celu ochrony prądnicy przed zamknięciem należy okryć ją odpowiednio wykonaną z blachy osłoną.

Głowicę zespołu stanowi rura stalowa o wewnętrznej średnicy 50 mm i długości 200 mm, do której jest przyspawane wyżej wspomniane siodło prądnicy wykonane z płaskownika szerokości 100 mm i grubości 4 mm.

Głowica zespołu jest nasadzona na stojak rurowy 7 wykonany z rury o zewnętrznej średnicy 48 mm i długości 1000 mm, wokół którego na odpowiedniej tulei może się obracać. Stojak ten przy pomocy dwu chomąt rozstawionych na odległości 500 mm jest przymocowany do wierzchołka drewnianego słupa odpowiedniej wysokości.

Do nastawiania silnika pod wiatr służy ster tylny 6 umocowany w głowicy zespołu (pod siodłem) przegubowo w ten sposób, że może się nieco wahać w płaszczyźnie pionowej. Płat steru o wymiarach 350 × 380 mm jest wykonany z blachy stalowej grubości 1 mm. Na drugim końcu ramienia steru jest umocowana dźwignia hamulcowa, mogąca swą główką o odpowiedniej wklęsłości opierać się na obwodzie tarczy hamulcowej. Aby zaś podczas pracy śmigła nie było ono hamowane, ramię steru jest podciągane ku górze przez odpowiednią sprężynę zaczepioną u tylnej pokrywy prądnicy.

Do zatrzymywania śmigła, np. podczas zbyt silnego wiatru wystarcza niewielkie ściągnięcie za pośrednictwem linki i cięgna 7 ramienia steru ku dołowi, przez co główka dźwigni hamulcowej może się oprzeć o tarczę hamulcową, wywołując odpowiednie tarcie.

Giętkie przewody od prądnicy są przeprowadzone przez środek rurowego stojaka i są zakończone dwukołkową wtyczką 9 wetkniętą w gniazdko 10. Co pewien czas, np. raz na pół roku trzeba wtyczkę wyjąć z gniazdka i sprawdzić, czy przewody nie są zbyt skręcone, co by mogło spowodować ich zerwanie się. Aby do tego nie dopuścić przewody należy rozkręcić.

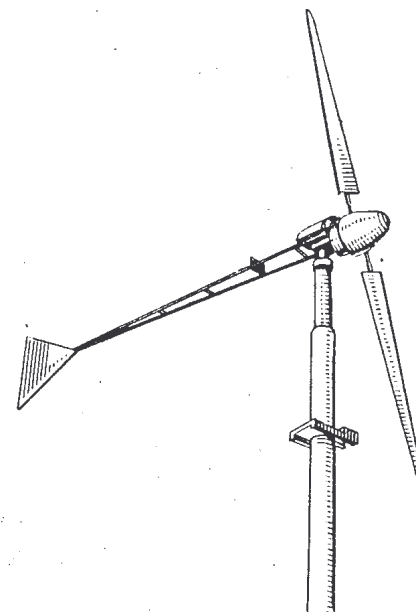
Bateria akumulatorów o napięciu 6 V (trzy ogniwa), typu samochodowego musi być przyłączona do prądnicy za pośrednictwem odpowiedniego samoczynnego wyłącznika, również typu samochodowego.

Regulacja szybkości obrotowej zespołu jest dokonywana systemem obciążenia użytecznego.

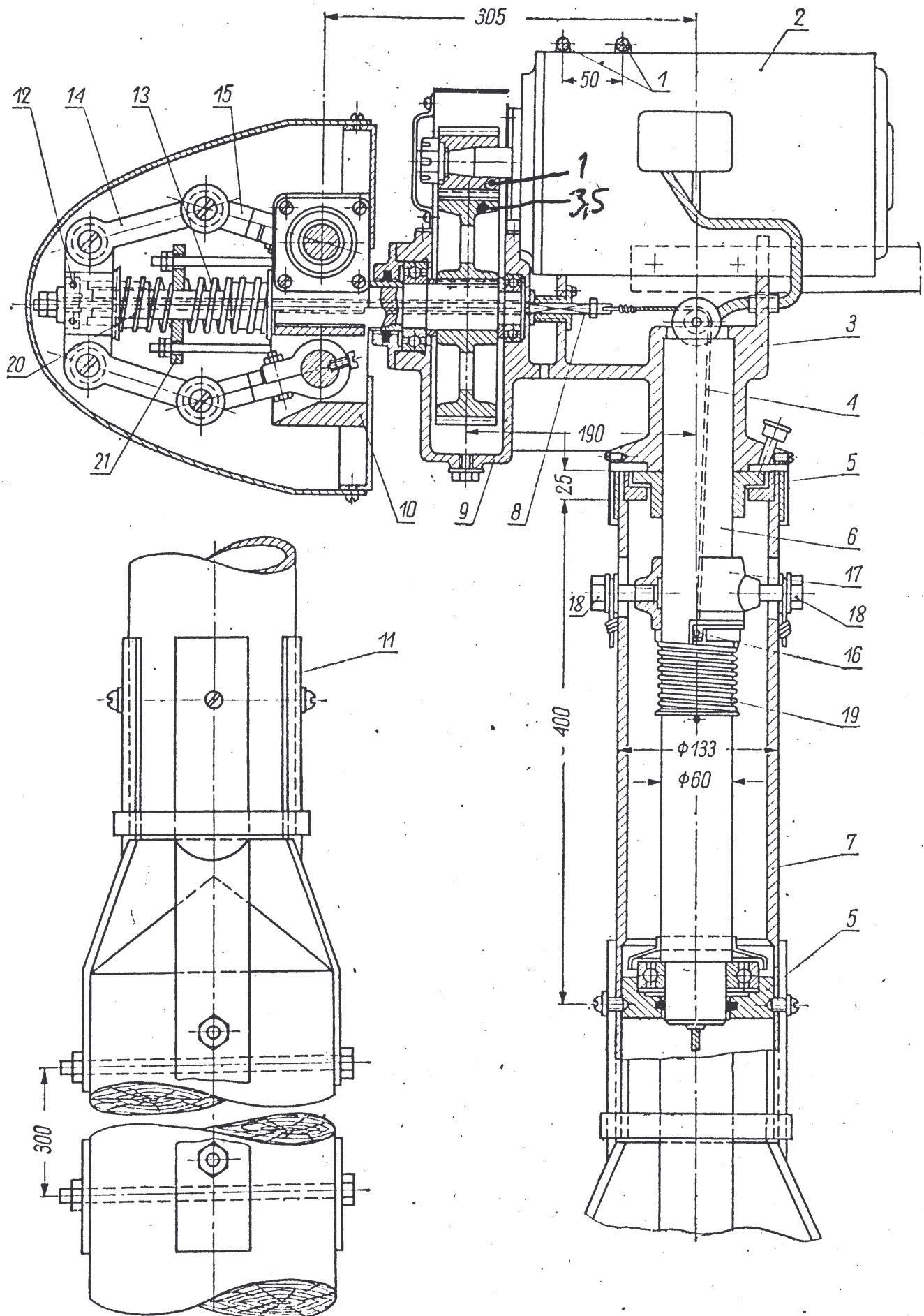
Zespół wiatrowo-elektryczny ВИМ Д-3,5 mocy 1 kW (rys. 203 i rys. 204) jest ze względu na wielkość śmigła bardziej złożony i trudniejszy do wykonania od zespołu poprzednio opisanego.

Obroty silnika są tu regulowane przekręcaniem łopat śmigła względem ich osi. Silnik jest zaopatrzony w jednostopniową przekładnię zębatą, przez co jest umożliwiające wykorzystanie w nim prądnic elektrycznych szybkoobrotowych o różnych szybkościach. Zespół ten posiada regulację systemu Fatejewa-Peczковского (rozd. IV, punkt 2c), polegającą na zwiększaniu kąta natarcia łopat śmigła w miarę wzrastania szybkości wiatru.

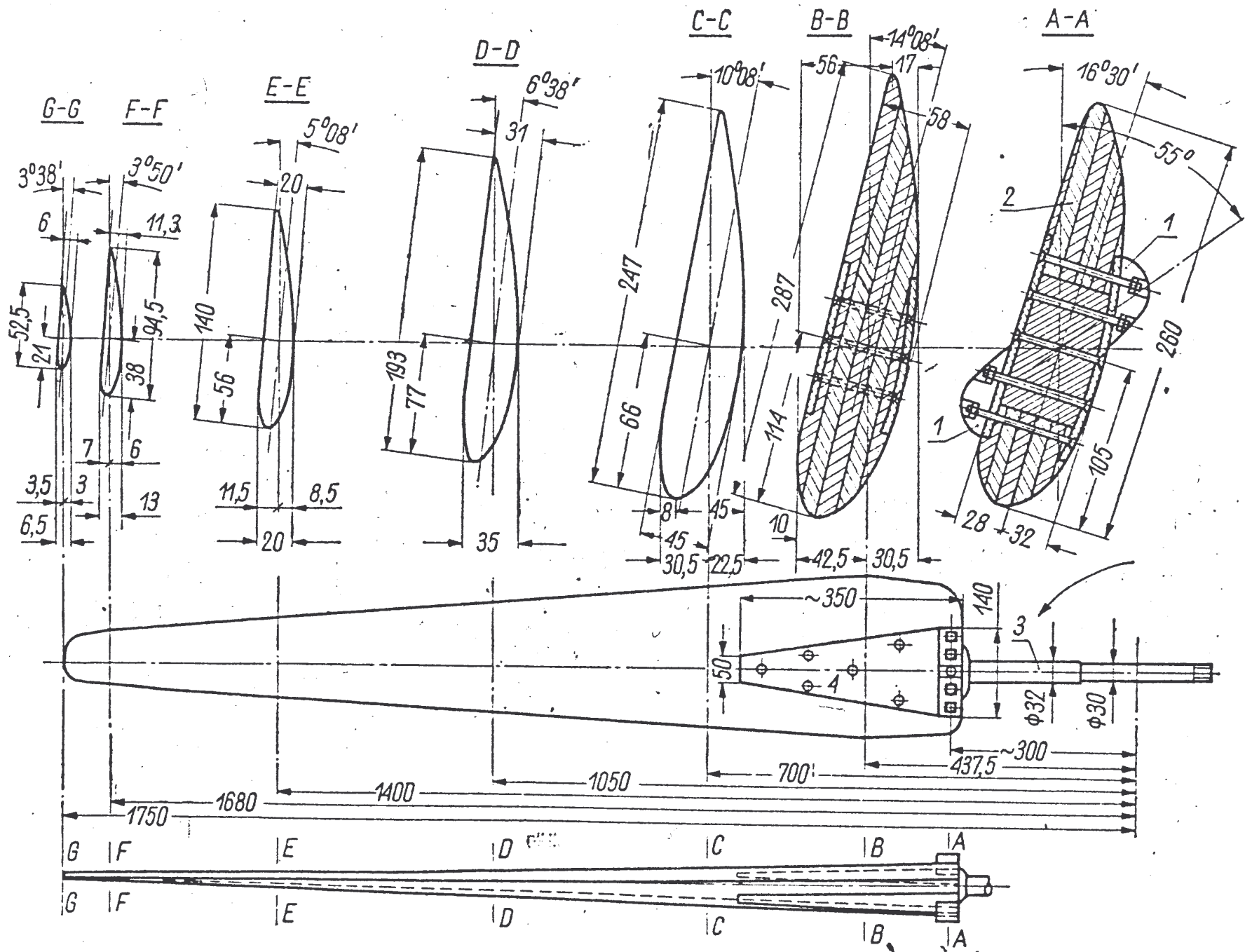
Śmigło jest dwułopatowe i składa się z dwu oddzielnych łopat, których drewniane płyty o długości 1450 mm są przymocowane do stalowych ramion. Płyty śmigła są wykonane z klejonych desek sosnowych wg rys. 205 i mogą być również wykonane



Rys. 203. Zespół wiatrowo-elektryczny ВИМ Д-3,5



Rys. 204. Przekrój głowicy zespołu D-3,5: 1 — obejmą wierzchnią prądnicy, 2 — prądnica, 3 — głowica zespołu, 4 — linka naciągowa, 5 — łożysko rury głowicy, 6 — rura głowicy, 7 — rura osadcza, 8 — ciągnio, 9 — komora przekładni, 10 — występy piasty śmigła, 11 — płaskowniki mocujące rurę osadcza, 12 — tuleja naciskowa, 13 — sprężyna regulacyjna, 14 — ciągnio regulacyjne, 15 — dźwignia regulacyjna, 16 — orczyk naciagowy, 17 — tuleja, 18 — uchwyty tulei, 19 — sprężyna odciągowa, 20 — sprężyna rozruchowa, 21 — tarczka regulacyjna



Rys. 205. Łopata śmigła zespołu Д-3,5: 1 — ciężarki regulacyjne, 2 — płat łopaty śmigła, 3 — ramię łopaty, 4 — nakładka przymocowująca płat śmigła do jego ramienia

wg wskazówek podanych przy opisie zespołu poprzedniego oraz przy pomocy wzorników (rys. 206).

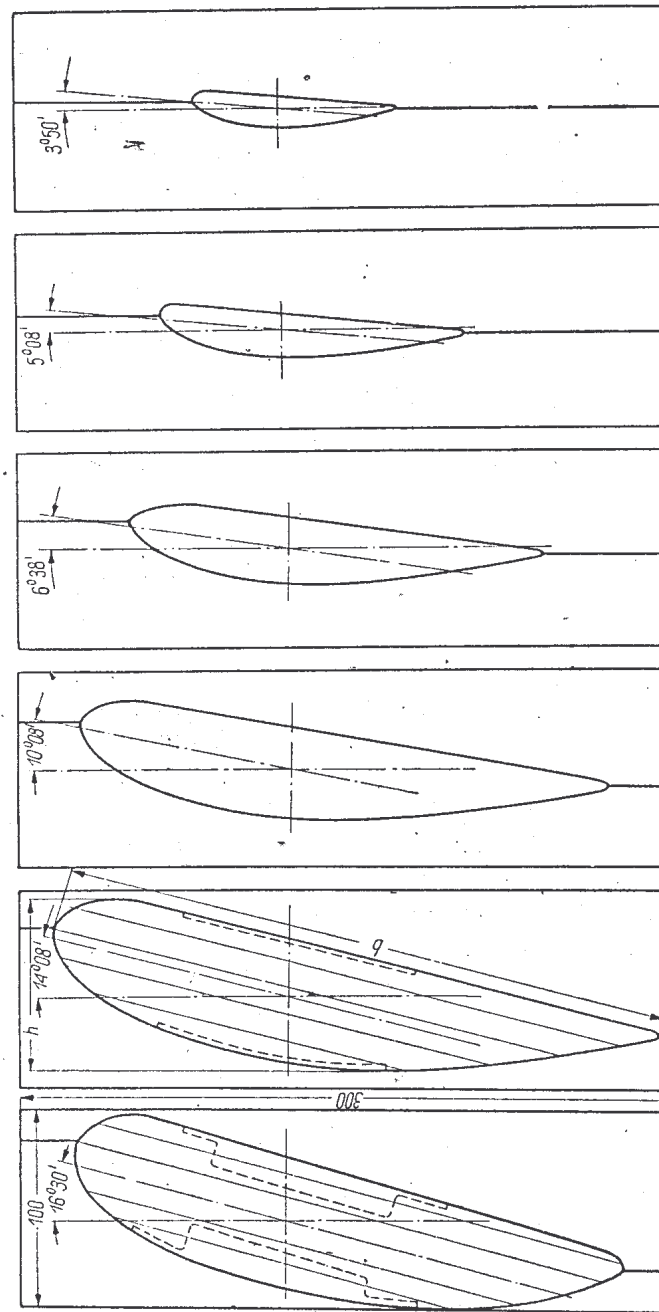
U podstaw nakładek 4, przymocowujących płaty śmigła do jego ramion, są umieszczone odpowiednie ciężarki regulacyjne (rys. 205). Jeden z ciężarków znajduje się na spodniej krawędzi profilu bliżej jego czoła, drugi zaś — na krawędzi grzbietowej, bliżej jego tyłu.

Każde z ramion łopat jest osadzone w dwu łożyskach kulkowych, umieszczonych w odpowiednich występach piasty śmigła 10 i jest zaopatrzone w dźwignię 15 złączoną przegubowo z ciągnem 14. Ciągna te za pośrednictwem tulei 12 naciskają na sprężyny 13 i 20 nasunięte na koniec wału śmigła. Dzięki takiemu powiązaniu przez ciągnia i dźwignie ruchu obu łopat uzyskuje się jednakowe zawsze skręcanie obu płatów śmigłowych, co zapewnia utrzymanie prawidłowego wyrównoważenia śmigła we wszystkich położeniach jego łopat.

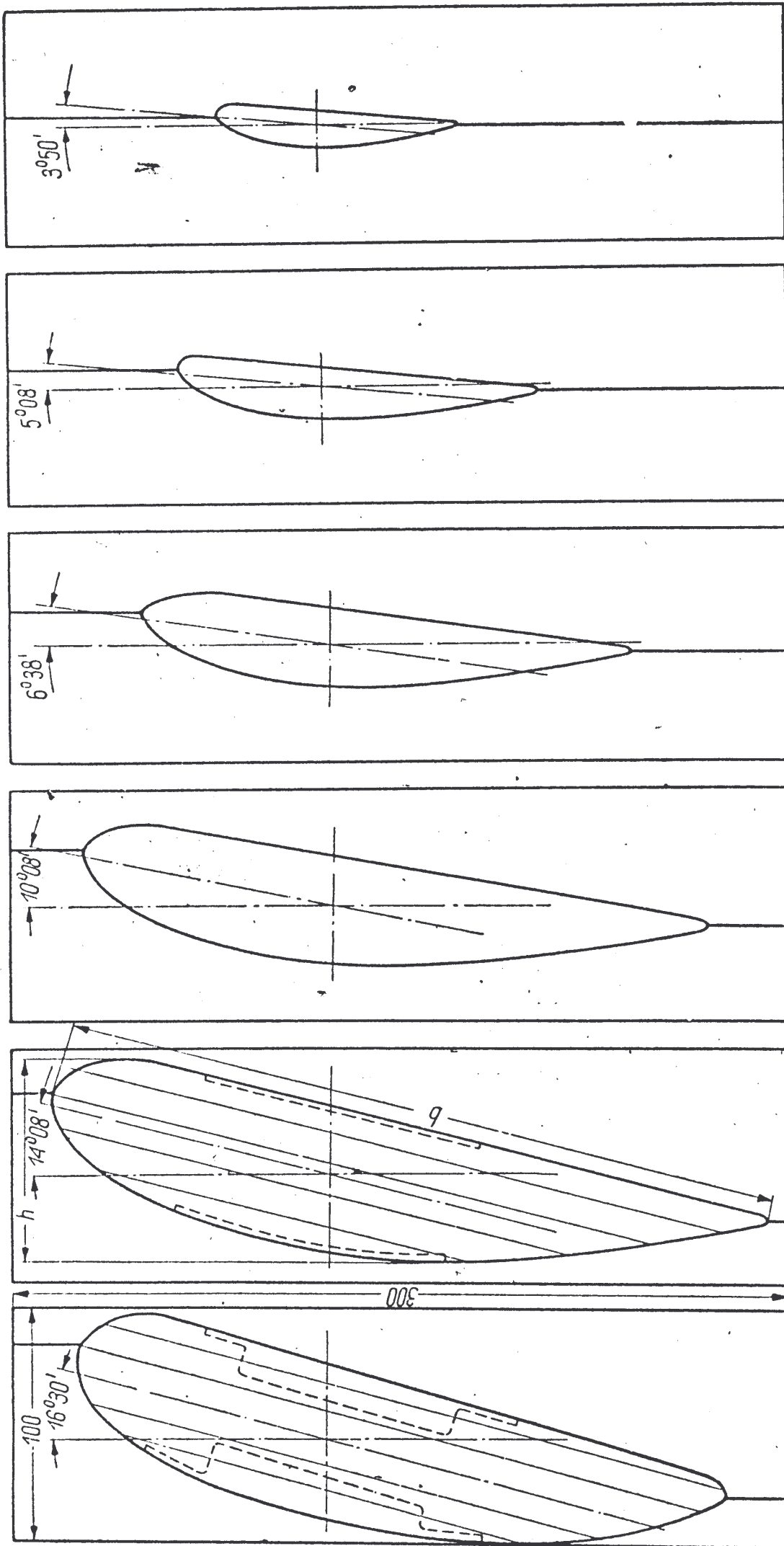
Jedna ze sprężyn 20 jest znacznie słabsza od drugiej 13 i ma za zadanie przekreślenie łopat śmigła na najmniejszy kąt natarcia podczas postoju śmigła dla powiększenia wielkości jego momentu rozruchowego. Po rozruchu zespołu, co może w tych warunkach nastąpić już przy bardzo słabym wietrze, łopaty śmigła przekreślają się w swe położenie robocze (na większy kąt natarcia), ściskając całkowicie sprężynę 20. W tym stanie pracy śmigła siły ciągnien przenoszą się za pośrednictwem całkowicie ściśniętej sprężyny 20 i tarczki naciskowej 21 na regulacyjną sprężynę 13.

Po przekroczeniu przez wiatr szybkości obliczeniowej, wobec zwiększania się obrotów śmigła ciężary regulacyjne, usiłując znaleźć się w płaszczyźnie obrotów śmigła i pokonywując siłę wywieraną przez sprężynę 13, przekreślają jego łopaty w kierunku dalszego zwiększenia kąta natarcia. Przez zmianę nacisku sprężyny 13 przy pomocy nakrętek, utrzymujących tarczkę naciskową 21 można uzyskać zapoczątkowanie regulacji przy dowolnych szybkościach wiatru.

Prądnicą elektryczną jest umocowana w głowicy zespołu przy pomocy wierzchnich obejm 1 (rys. 204). Przekładnia zębata pracuje w odpowiednio wykonanym zagłębieniu głowicy, służącym jednocześnie jako zbiornik oleju. W dolną część korpusu głowicy jest wciśnięta rura 6, za pośrednictwem której głowica ze-



Rys. 206. Wzorniki do wykonania śmigła zespołu D-3.5



Rys. 206. Wzorniki do wykonania śmigła zespołu Д-3,5

społu jest osadzona w dwu łożyskach 5, mieszczących się w zewnętrznej rurze osadczej 7. Do dolnej części tej rury są przyspawane cztery płaskowniki, służące do jej przymocowania do wierzchołka słupa odpowiedniej wysokości.

Zatrzymywanie oraz uruchamianie zespołu dokonuje się również przez przekręcenie łopat śmigła względem ich osi. Dokonuje się tego przy pomocy cięgna 8, zaczepionego w tulei 12, przeprowadzonego przez wydrążenie wału śmigłowego i zaopatrzonego w linkę 4. Linka ta jest uwiązana w środku orczyka 16, przetkniętego przez rurę głowicy 6, a którego oba końce mogą się przesuwawać w kierunku pionowym w dwu szparach, wykonanych w ściankach tej rury. Na obu wystających z rury końcach orczyka opiera się tuleja 17 nasunięta na rurę 6 i zaopatrzona w dwa uchwyty 18, wystające przez dwa otwory wykonane w osadczej rurze 7. Na tych uchwytach jest zaczepiona rozwidlona linka nawijana drugim końcem u podnóża wieży na wał kołowrotu.

Dla zapewnienia tulei 17 samoczynnego przesuwania się ku górze przy zwolnieniu linki, na rurze 6, pod tuleją jest nasunięta odpowiednia sprężyna 19.

Naciągnąwszy przy pomocy kołowrotu linkę, ścisną się za pośrednictwem tulei 17, cięgna 8 i tulei 12 obie sprężyny 13 i 20, powodując przekręcenie obu łopat śmigła aż do jego zatrzymania się.

Przeprowadzone pomiary szybkości obrotowej prądnicy stwierdziły, że przy zmianie szybkości wiatru z 8 do 24 m/sek szybkości obrotowe prądnicy wzrastają od 1100 do 1300 obr/min, przy biegu luzem oraz od 1000 do 1200 obr/min pod obciążeniem. Średnia nierównomierność ²⁸⁶ ³¹⁴ ³³¹ ³⁵² szybkości obrotowej wynosi zatem

$$\delta = \frac{1200 - 1000}{1100} \cdot 100 = 18,2\%$$

Prądnica zespołu (typ radziecki ГТ-4563А) o mocy 1000 W wytwarza prąd stały o napięciu 24 V. Bateria akumulatorów posiada pojemność 140 Ah.

Jakkolwiek korpus tego zespołu jest wykonany z żeliwa, jednak można go wykonać również i z blachy odpowiednio pospawanej, wobec czego cały zespół może być wykonany w każdym warsztacie mechanicznym. Jako prądnice mogą być zastosowane elektryczne rozruszniki większych samochodów ciężarowych o odpowiedniej mocy.

5. SŁUPY I WIEŻE SILNIKÓW WIATROWYCH

Silniki wiatrowe dla prawidłowej swej pracy muszą być umieszczone na pewnej wysokości nad powierzchnią ziemi w celu umożliwienia całkowicie swobodnego dopływu do nich wiatru, który tuż nad powierzchnią ziemi napotyka na liczne przeszkody. Poza tym w miarę wznoszenia się ku górze wiatr, jak to już było zaznaczone, staje się bardziej równomierny i zyskuje na szybkości. Ponieważ moc silnika jest proporcjonalna do trzeciej potęgi szybkości wiatru [wzór 31], a szybkość wiatru jest proporcjonalna do pierwiastka piątego stopnia z wysokości H [wzór 5], to moc silnika wiatrowego będzie się zmieniać wraz z wysokością wg następującego wzoru

$$N = N_0 \left(\frac{v}{v_0} \right)^3 = N_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^{\frac{1}{5} \cdot 3} = N_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^{0,6}$$

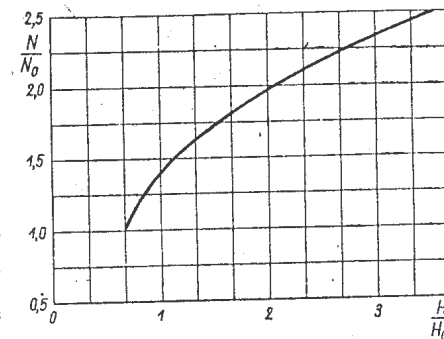
gdzie:

N_0 — moc na wysokości H_0 ,

N — moc na wysokości H .

Na rys. 207 podano wykres zależności $\frac{N}{N_0} = f\left(\frac{H}{H_0}\right)$.

Z tych względów jest bardzo korzystnym umieszczanie silników wiatrowych możliwie wysoko. Wobec czego i wieże, służące do tego celu, powinny być możliwie wysokie, a w każdym przypadku takie, aby dolna krawędź koła wiatrowego znajdowała się przynajmniej na 3-metrowej wysokości nad przeszkodami, znajdującymi się w odległości do 300—400 m. W terenie górzystym najbardziej odpowiednimi miejscami do ustawienia silników wiatrowych są szerokie doliny lub łagodnie wznoszące się wzgórza.



Rys. 207. Wykres zależności mocy silników wiatrowych od wysokości ich umieszczenia nad powierzchnią ziemi

a. Słupy drewniane

Silniki wiatrowe najmniejsze są umieszczane najczęściej na różnego rodzaju wieżyczkach wznoszonych na dachach domów

lub na pojedynczych możliwie wysokich słupach drewnianych wzmocnianych odpowiednimi odciągami.

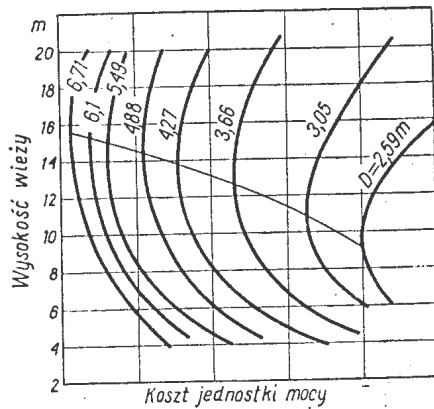
Słupy drewniane dla mniejszych silników wiatrowych są tańsze od stalowych i od betonowych, jednak krócej trwają, gdyż w najkorzystniejszych przypadkach (przy dobrej impregnacji i właściwym utrzymaniu) do 30 lat.

b. Słupy i wieże stalowe

Słupy i wieże stalowe są wykonywane rozmaicie. Słupy najczęściej jako rurowe lub kratowe wykonane są z kątowników zwykle spawanych, wieże natomiast — jako kratowe z kątowników lub rur stalowych. Budowa wysokich wież nie przedstawia dzisiaj żadnych trudności technicznych zwłaszcza, że dla silników wiatrowych nawet dużych mocy stosuje się znacznie niższe wieże niż np. wznoszone dla radia. Wieże silników wiatrowych są jednak bardziej od tamtych obciążone zwłaszcza siłami poziomymi, co

wymaga poza wzmocnieniem konstrukcji silniejszych ustojów, a za tym większych fundamentów.

Myślą przewodnią przy budowie wież jest uzyskanie możliwie dużej ich wytrzymałości przy możliwie małym zużyciu materiałów, a zatem przy możliwie lekkiej ich konstrukcji. Umiejętność obrania odpowiedniego kształtu wieży oraz poprawne rozwiązanie poszczególnych elementów konstrukcyjnych daje pod tym względem bardzo pomyślne wyniki.

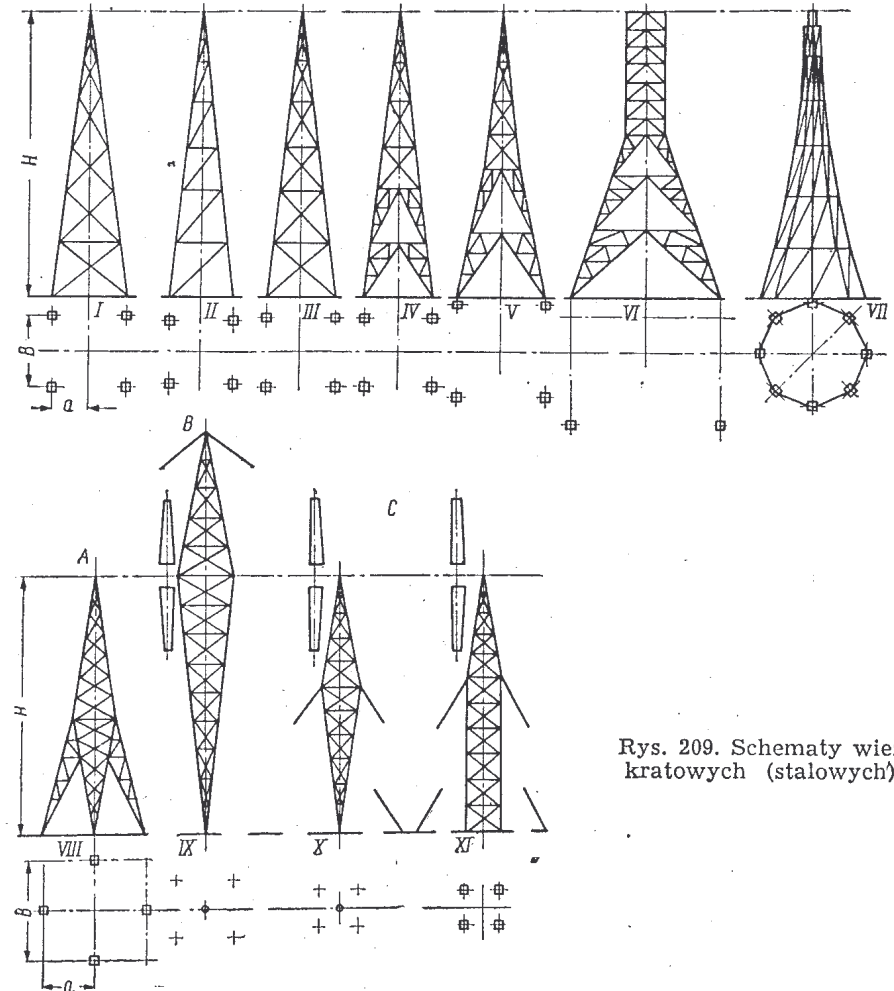


Rys. 208. Zależność jednostkowego kosztu mocy silnika wiatrowego od średnicy koła wiatrowego D i wysokości wieży H

Najłżejsze wieże uzyskuje się wtedy, gdy ich poprzeczki pracują tylko na rozciąganie.

Poszczególne piętra wysokich wież powinny stanowić pod względem konstrukcyjnym oddzielne człony o możliwie dużej wytrzymałości, spoczywające na piętrach niższych, a stanowiących podstawę dla pięter wyższych.

Przy ustalaniu najkorzystniejszych wysokości wież dla różnych mocy silników wiatrowych, a za tym dla różnych średnic ich kół wiatrowych D , można korzystać z krzywych (rys. 208) podanych przez Krasowskiego, a przedstawiających zależności jednostkowego kosztu mocy silników wiatrowych od średnic ich kół wiatrowych D i wysokości wież H .



Rys. 209. Schematy wież kratowych (stalowych)

Z przedstawionych na rys. 209 schematów wież kratowych trzy pierwsze (I, II i III) stosuje się do silników o mocy do 10 KM, pozostałe zaś — tylko dla zespołów o większych mocach. Bardzo

korzystnie pod względem ciężaru przedstawiają się wieże z odciągami, a zwłaszcza przedstawiona na schemacie X. Wieża tego typu może być stałą albo też obracającą się w dolnym łożysku stopowym i górnym — pierścieniowym sztywnym, natomiast wieża według schematu IX może być tylko obracającą się.

Lekkość wież z odciągami jest jednak okupiona przez pewne niedogodności eksploatacyjne. W celu uniknięcia nadmiernych zwisów długich odciągów linowych, które by powodowały niestabilność ustoju wieży, odciągi te zawieszają się na dodatkowych linach nośnych.

W celu uniknięcia znacznie większych momentów zginających zarówno wieże, jak i słupy zaopatruje się w odciągi podwójne, zaczepione na dwu różnych wysokościach wieży.

Długotrwałość pracy wież stalowych w zwykłych warunkach klimatycznych, jednak odpowiednio utrzymywanych, wynosi ponad 50 lat. W okolicach nadmorskich okres ten może jednak skrócić się niekiedy nawet do połowy.

c. Słupy i wieże betonowe

Słupy i wieże betonowe stosuje się zwykle w przypadkach niemożności stosowania słupów stalowych głównie z powodu zbyt silnej ich korozji, np. w rejonach nadmorskich, w pobliżu niektórych zakładów przemysłowych itp. Słupy te mogą być wykonane z betonu zwykłego lub zagęszczone siłą odśrodkową albo też z betonu wibrowanego; mogą też być one wykonane i z betonu wstępnie sprężonego (strunobeton).

W celu osiągnięcia możliwie małego parcia wiatru na wieże wykonuje się je najczęściej w kształcie walca lub stożka. Dodatkową zaletą takich wież jest możliwość wykorzystania ich wnętrza.

Koszt wież betonowych jest trochę większy niż stalowych (obecnie w Polsce — prawie dwukrotnie mniejszy), jednak ich trwałość jest niekiedy znacznie większa niż wież stalowych.

6. UWAGI DOTYCZĄCE MONTAŻU SILNIKÓW WIATROWYCH

Przy montażu silników wiatrowych większej mocy, jednak nie przekraczającej 10 KM, składa się przede wszystkim wieżę,

co dokonuje się w jej położeniu poziomym. Następnie po niewielkim podniesieniu wierzchołka wieży i po wsparciu jej na odpowiedniej podporze montuje się głowicę silnika wiatrowego oraz pionowy wał, a w końcu zakłada się koło wiatrowe oraz ster tylny i boczny. Głowica silnika musi być przy tym tak obrócona, aby koło wiatrowe znajdowało się na wierzchu, zaś płaty sterowe — opierały się o powierzchnię ziemi.

W tym stanie wieża wraz z silnikiem może być już przy pomocy odpowiednich urządzeń dźwigowych (rys. 210) podniesiona górną swą częścią i odpowiednio ustawiona pionowo. Następnie zabetonowuje się jej nogi w odpowiednich dołach fundamentowych.

Silniki większe zasadniczo ustawia się również w ten sam sposób, jednak wieżę podnosi się tylko z głowicą silnika. Po ustawieniu wieży umieszcza się na głowicy silnika odpowiednie wsporniki i wysięgniki, przy pomocy których za pośrednictwem wciągarki lub wielokrążków wciąga się poszczególne części silnika (koło wiatrowe, stery, przekładnię, prądnicę itp.), które odpowiednio w głowicy się zamontowuje.

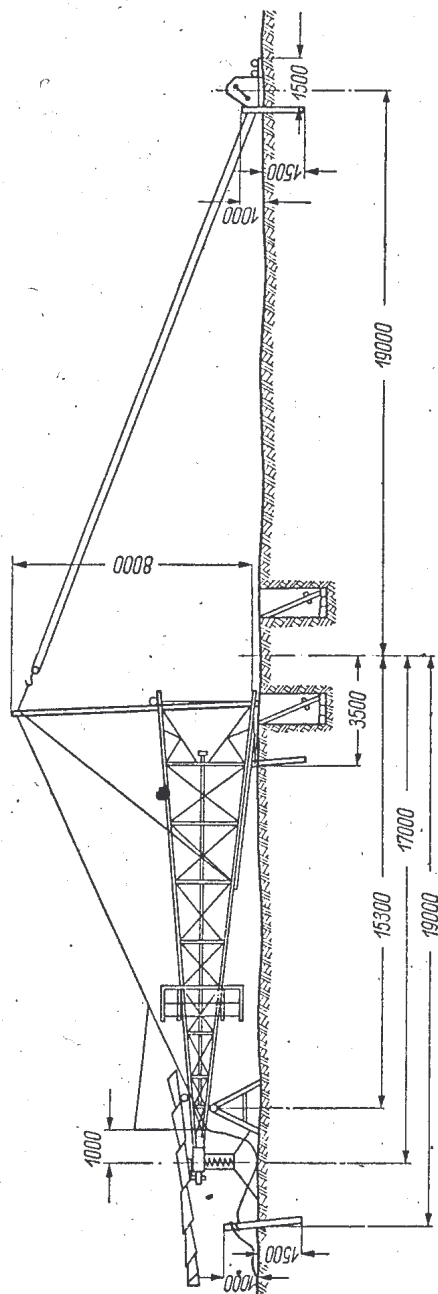
Wieżę dla silników największych montuje się z poszczególnych części od razu w położeniu pionowym przy użyciu odpowiednich dźwigów, drabin, pomostów itp.

Po dokonaniu montażu silnika wiatrowego przeprowadza się w odpowiedni sposób regulację jego mechanizmów, a następnie dokonuje się pierwszego jego uruchomienia. Przy dokonywaniu odpowiednich prób ruchowych można stwierdzić prawidłowość dokonanego montażu oraz przeprowadzić ostateczne doregulowanie silnika.

7. OBSŁUGA, REMONTY I NAPRAWY SILNIKÓW WIATROWYCH

Warunki pracy silników wiatrowych są w porównaniu z warunkami wszystkich innych silników najbardziej uciążliwe.

Silniki te pracują na wolnym powietrzu, wskutek czego są narażone na niekorzystne wpływy atmosferyczne, jak wilgoć, mróz, śnieg, kurz itp. Podczas wiatru silniki te są stale w ruchu i często nawet w stanie odstawionym z pracy nie znajdują spoczynku. Wiatry porywiste i huragany powodują znaczne i częste



Rys. 210. Urządzenie do postawienia silnika wiatrowego wraz z wieżą

przeciążenia poszczególnych części silników. Wiele ich części, jak przeguby sterów, oporowe łożyska głowicy itp. pracują również i w stanie odstawionym z pracy samego silnika. Dla całości tego obrazu należy dodać stałe i nierównomierne działanie wiatru oraz częste osady atmosferyczne na pracujących częściach silnika i znajdujących się w strumieniu najsilniejszego wiatru.

W celu umożliwienia silnikom wiatrowym spełniania w tych bardzo trudnych warunkach ich zasadniczych zadań muszą być one odpowiednio obsługiwane i tak utrzymywane, aby znajdowały się zawsze w należyтым stanie.

Obsługa silnika wiatrowego polega w zasadzie na codziennym sprawdzaniu smarowania trących się części (łożysk, kół zębatach itp.) oraz na uzupełnianiu smaru. (Smar w łożyskach kulkowych należy zmieniać corocznie, zaś olej w zbiornikach — co sześć miesięcy).

Drugą ważną czynnością podczas doglądu silnika wiatrowego jest codzienne sprawdzanie wszystkich śrub i natychmiastowe dociąganie zluzonych nakrętek, jak również niezwłoczne usuwanie wszelkich zauważonych nieprawidłowości w działaniu silnika.

Podczas codziennego przeglądu silnika wiatrowego musi on być w zasadzie unieruchomiony, co najprościej dokonać przy pomocy odpowiednio urządzonego hamulca. Gdy silnik urządzenia hamulcowego nie posiada, jego unieruchomienie dokonuje się przez przywiązanie koła wiatrowego do ramienia steru bocznego. Przywiązywanie w tym celu koła wiatrowego do wieży nie może być dokonywane, gdyż nawet przy chwilowej zmianie kierunku wiatru grozi to uszkodzeniem koła.

Koniecznym warunkiem prawidłowego doglądu silnika wiatrowego jest natychmiastowe usuwanie spostrzeżonych usterek i niedokładności, aby nie powodowały one w następstwie poważniejszych uszkodzeń a nawet całkowitego zniszczenia silnika.

Równie ważną sprawą dla prawidłowej pracy silnika wiatrowego jest przestrzeganie, aby nie był on przeciążany, co może się łatwo zdarzać, gdy regulacja silnika jest oparta na zjawisku siły odśrodkowej. Obciążenie bowiem silnika wiatrowego przy silnym wietrze ponad normę powoduje zmniejszenie jego, szybkości obrotowej, a za tym niemożność odregulowania nadwyżki mocy przez regulator, co może doprowadzić do zniszczenia silnika.

Po dłuższym okresie pracy urządzenia wiatrowego staje się koniecznym dokonanie wymiany jego zużytych części, np.: kół zębatach, łożysk, części regulacyjnych itp. na nowe, do czego niekiedy potrzeba zdjąć i koło wiatrowe. Przy tej sposobności przeprowadza się jednocześnie naprawę i innych części całego urządzenia.

Po kilkuletnim okresie pracy silnika wiatrowego, gdy zużycie jego części posunie się tak daleko, że nie może już być usunięte bez całkowitego rozebrania silnika, przeprowadza się jego remont kapitalny, polegający na sprawdzeniu i doprowadzeniu do odpowiedniego stanu wszystkich jego części. Remont taki może być przeprowadzony tylko przez odpowiednio wykwalifikowany personel, posiadający do rozporządzenia odpowiedni warsztat. Dokonywanie remontu kapitalnego przeprowadza się niekiedy w związku z naprawą poważniejszych uszkodzeń silnika.

W celu ochrony silnika, jak również i jego wieży oraz pozostałych urządzeń przed korozją należy co kilka lat malować je dobrą farbą ochronną, oczywiście po uprzednim starannym oczyszczeniu miejsc zardzewiałych.

Słupów oraz belek drewnianych farbą malować nie należy, gdyż na skutek utrudnionego przez to wysychania drewno szybciej gnije. Do ochrony części drewnianych najlepiej nadaje się ich nasycenie (impregnacja) olejem smolistym. Zwłaszcza przyziemne oraz znajdujące się tuż pod powierzchnią ziemi, części słupów, narażone na częste namakanie i wysychanie, wymagają szczególnego zabezpieczenia przed szybkim gniciem.

Najłatwiej można tego dokonywać przez coroczne odkopywanie tych części słupów i smarowanie ich karboliną, po czym doły zasypuje się ponownie.

8. WARUNKI BEZPIECZEŃSTWA I HIGIENY PRACY PRZY REMONTACH I OBSŁUDZE SILNIKÓW WIATROWYCH

W celu zapewnienia obsługującym silniki wiatrowe możliwie bezpiecznych warunków pracy, silniki zaopatruje się w odpowiednie pomosty oraz ogrodzenia, mające na celu zarówno niedopuszczenie obsługującego do miejsc niebezpiecznych, jak i zabezpieczenie go przed spadnięciem z wysokości.

Miejsce ustawienia silnika wiatrowego powinno być ogrodzone, aby nikt z osób postronnych, a zwłaszcza dzieci, nie mógł mieć do urządzeń dostępu.

Do pracy na wysokości mogą być wyznaczani tylko pracownicy dopuszczani do tego na podstawie odpowiednich badań lekarskich. W szczególności nie mogą być do tego przeznaczani osobnicy, cierpiący na zawroty w głowie, na padaczkę, na serce itp. W miejscach pracy na wysokości powinny być przewidziane odpowiednie pomosty z oparciami. Wejście na pomosty powinno się odbywać po drabinach.

Przy pracy poza pomostami, np. na głowicy silnika, należy używać pasa monterskiego, przy pomocy którego pracujący jest obowiązany przywiązywać się do jakiejś odpowiednio wytrzymałej części silnika lub wieży.

Podczas pracy silnika wiatrowego obsłudze nie wolno znajdować się na górnym pomoście.

Do wspinania się na słupy drewniane można używać odpowiednich słupolazów.

Najpoważniejszą czynnością podczas montażu silnika wiatrowego jest stawianie jego wieży i wobec tego wszystkie czynności przedsiębrane w tym celu muszą być odpowiednio przemyślane i starannie przeprowadzone. Zwłaszcza muszą być pewne urządzenia dźwigowe.

Poza tymi uwagami szczególnymi podczas montażu i obsługi silników wiatrowych należy przestrzegać przepisy bezpieczeństwa, dotyczące prac w podobnych warunkach, np. przy budowie, ustawianiu i obsłudze słupów linii elektrycznych.

ZASTOSOWANIE SILNIKÓW WIATROWYCH

Wykorzystanie energii wiatru ma dwa dość odrębne cele, a mianowicie: pierwszy to uzyskanie mocy i energii w miejscach pozbawionych innych dogodniejszych ich źródeł, a zwłaszcza w miejscach odległych od elektrycznych linii rozdzielczych oraz drugi to uzyskanie oszczędności paliwa przez współpracę zespołów wiatrowych z siecią elektryczną.

Jeżeli w drugim przypadku urządzenie wiatrowe przynosi tylko oszczędność paliwa, to w przypadku pierwszym urządzenie wiatrowe daje dodatkową oszczędność linii elektrycznej, którą trzeba by dany odbiór zasilać. Zastosowanie urządzeń wiatrowych ma większe możliwości szerokiego rozpowszechnienia w przypadku pierwszym, niż w przypadku współpracy z siecią elektryczną. Również i pod względem mocy oba te cele wymagają różnych urządzeń. Dla współpracy z siecią elektryczną mogą być stosowane tylko zespoły możliwie duże, a dla celów użytkowych stosuje się silniki wiatrowe najmniejsze, małe i średnie (do $D = 12$ m).

Pod określeniem celów użytkowych rozumie się użytkowanie energii wiatru bez pośrednictwa przesyłowych linii energetycznych, ale zarówno bez — jak i z pośrednictwem prądu elektrycznego.

Wśród tych użytkowych celów wykorzystania energii wiatru można wyodrębnić kilka grup odbiorów:

- dla celów gospodarstw wiejskich,
- dla drobnego przemysłu i rzemiosła,
- dla celów melioracyjnych,
- do wytwarzania energii elektrycznej.

1. ZASTOSOWANIE SILNIKÓW WIATROWYCH W GOSPODARSTWACH WIEJSKICH

Energia wiatru w gospodarstwach wiejskich znalazła najważniejsze zastosowanie do pompowania wody w celu zasilania gospodarczego wodociągu. Ze względu na dość duże w gospodarstwie wiejskim zapotrzebowanie na wodę, a za tym ze względu na konieczność zużywania na ten cel znacznych ilości energii zastosowanie silników wiatrowych doskonale rozwiązuje to zagadnienie, zwłaszcza że pompowanie wody może być dokonywane okresowo, a za tym niestałość wiatrów nie ma tutaj prawie żadnego znaczenia.

Moc potrzebną do napędu pompy oblicza się według ilości wody i wysokości jej podnoszenia. Jeśli ilość wody pompowanej w ciągu godziny wynosi Q m³/godz, zaś wysokość pompowania wynosi H m, to moc pompowania wynosi

$$N = \frac{Q \cdot H \cdot 1000}{3600 \cdot 75 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} \text{ KM} \quad [136]$$

gdzie:

η_1 — współczynnik sprawności pompy (zwykle $\eta_1 = 0,80$)

η_2 — współczynnik sprawności przekładni (zwykle $\eta_2 = 0,75$)

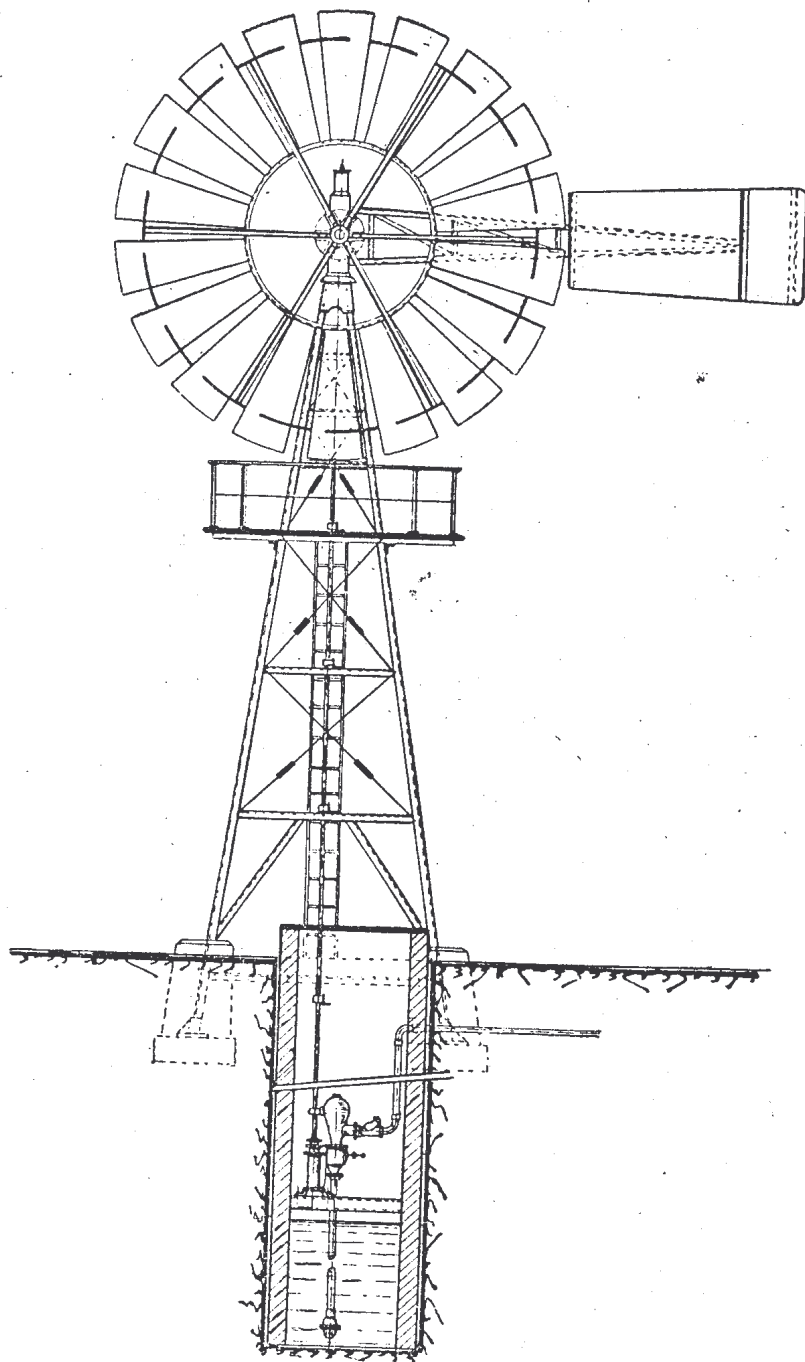
Po podstawieniu i przeliczeniu otrzymamy dla zwykłych warunków

$$N = 0,0062 \cdot Q \cdot H \text{ KM} \quad [137]$$

W praktyce urządzenia wiatrowo-pompowe stosuje się różne w zależności od miejscowych warunków (rys. 211). Najczęściej stosuje się tutaj pompy tłokowe, gdyż mogą one pracować w dużym zakresie szybkości obrotowej. Ponieważ pompy te wymagają do rozruchu względnie dużego momentu obrotowego, silniki wiatrowe są zwykle wielołopatkowe (turbiny wiatrowe).

Sama pompa musi być umieszczona możliwie blisko dolnego poziomu wody, aby długość rury ssącej była możliwie mała i w żadnym przypadku, aby wysokość ssania nie przekraczała 7 m. W przypadkach, gdy całkowita wysokość pompowania wody nie przekracza 7 m, pompa może być tylko ssąca, w innych zaś przypadkach musi być ssąco-tłocząca.

Napęd pompy może być wykonany albo za pośrednictwem



Rys. 211. Wielołopatkowy silnik wiatrowy z drągiem pionowym, napędzającym tłokową pompę wodną

pionowego drąga, spełniającego rolę korbowodu, napędzanego wykorbionym wałem poziomym silnika wiatrowego (rys. 141) albo też za pośrednictwem pionowego wału obrotowego i przekładni zębatej (rys. 212). W pierwszym przypadku pompa tłokowa powinna być o jednostronnym działaniu, gdyż wtedy drąg napędowy pracuje głównie na rozciąganie i może być względnie lekki.

Gdy dolny zbiornik wody jest rzeką lub jeziorem, silnik wiatrowy musi być zwykle umieszczony w pewnej odległości od brzegu i wtedy napęd pompy ustawionej w pobliżu wody może być dokonywany za pośrednictwem dodatkowej dźwigni i drąga ukośnego (rys. 213).

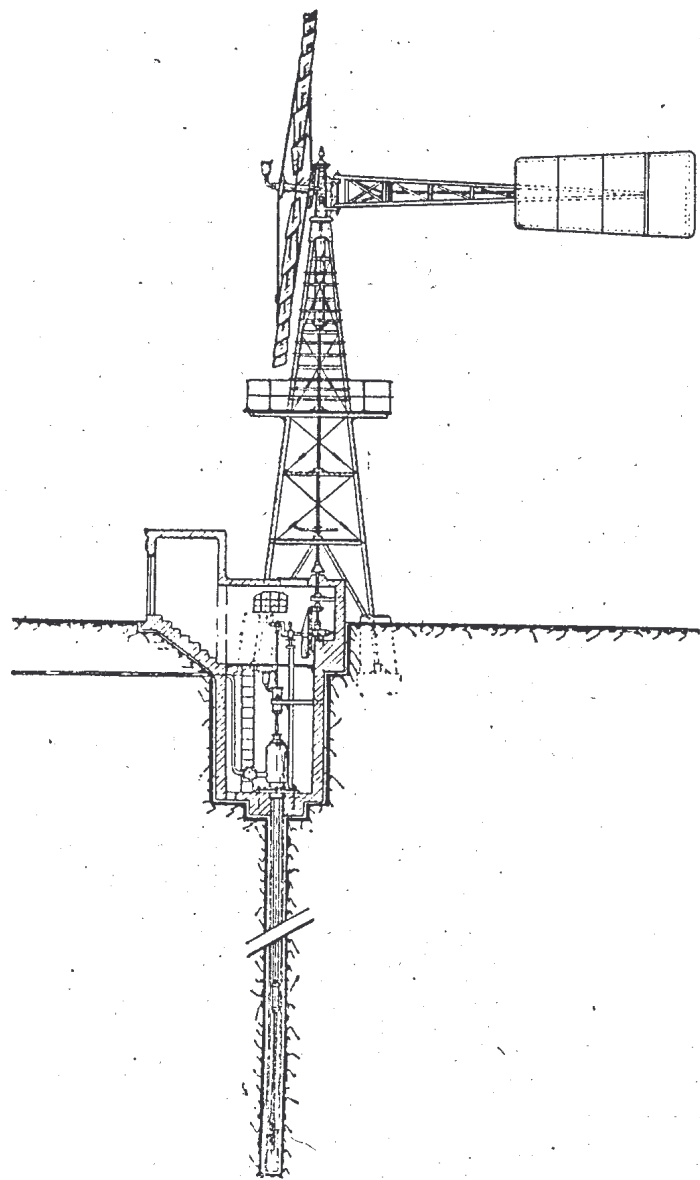
Silniki wiatrowe z obrotowym wałem pionowym stosuje się do pompowania większych ilości wody na większe wysokości. Pompy wielocylindrowe pracują bardziej równomiernie, niż pompy jednocylindrowe, są jednak znacznie droższe.

W celu obniżenia kosztów silnika wiatrowego, zwłaszcza przy niewielkich ilościach pompowanej wody, używa się silników śmigłowych. Dla zmniejszenia ich szybkości obrotowej, a zwiększenia momentu obrotowego w silnikach tych stosuje się przekładnię ślimakową, dla umożliwienia zaś rozruchu pompy przy możliwie słabym wietrze stosuje się samoczynne sprzęgła odśrodkowe (rys. 156).

Zasada działania samoczynnego sprzęgła polega na tym, że rozruch silnika śmigłowego, rozwijającego, jak wiadomo, niewielki moment rozruchowy, następuje przy odłączonej od pionowego wału pompy wodnej, czyli w bezobciążeniowym stanie silnika. Gdy silnik śmigłowy osiągnie odpowiednią szybkość obrotową, wraz z którą powiększa się również i jego moment obrotowy, zostaje on samoczynnie sprzężony przez sprzęgło z pompą, którą może w tym stanie uruchomić i w dalszym ciągu napędzać.

W ten sposób można uzyskać prawie taką samą wydajność pompy napędzanej silnikiem śmigłowym, jak i napędzanej silnikiem wielołopatkowym.

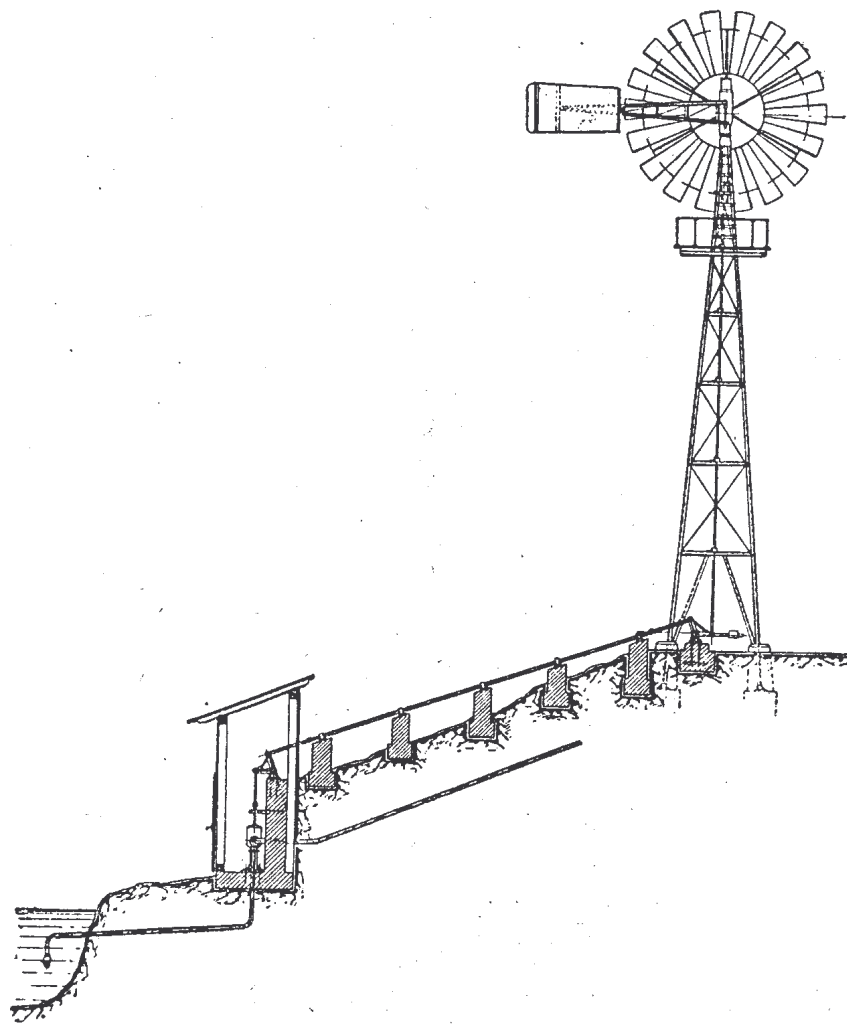
Poza pompowaniem wody energia wiatru w gospodarstwach wiejskich może być z wielkim pożytkiem wykorzystywana również i do przygotowania paszy dla bydła i trzody, a zwłaszcza do rżnięcia siewki, krajania buraków, śrutowania ziarna itp. Poza tym



Rys. 212. Wielołopatkowy silnik wiatrowy z pionowym wałem obrotowym, napędzający tłokową pompę wodną

silnik wiatrowy może być zastosowany do tak uciążliwych prac gospodarczych, jak piłowanie drewna, a nawet młócenie zboża.

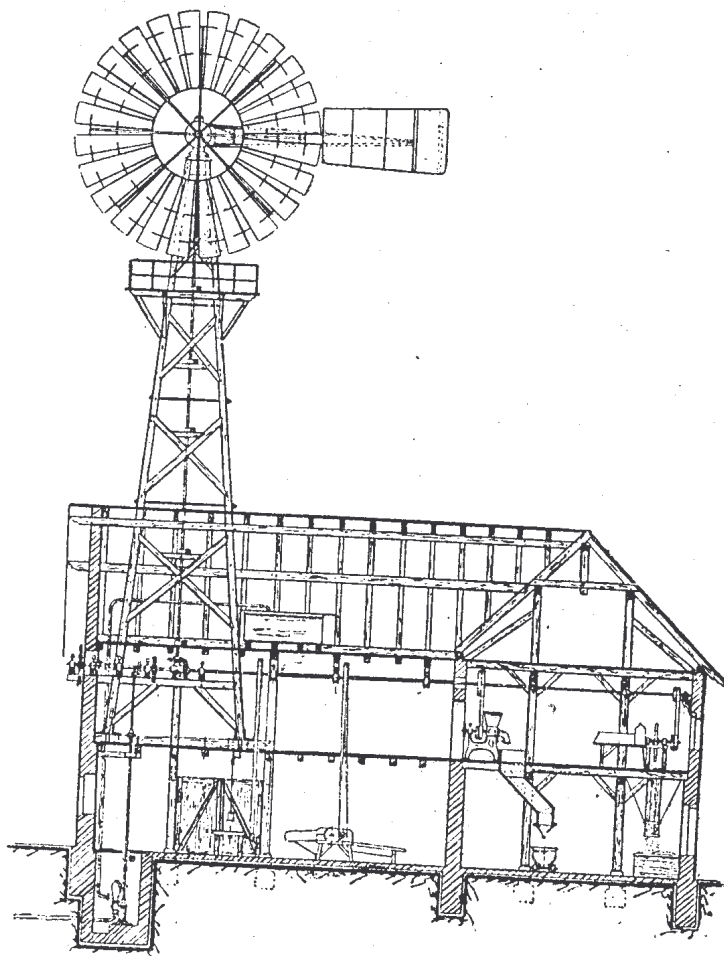
W tych przypadkach silnik wiatrowy musi posiadać pionowy wał obrotowy, a wszystkie odbiorniki energii muszą być skupione możliwie blisko siebie u podnóża wieży silnika. Jako przykład poprawnego rozwiązania dość wszechstronnego zastosowania ener-



Rys. 213. Wielołopatkowy silnik wiatrowy z drągami pionowym i ukośnym, napędzający tłokową pompę wodną

gii wiatru w gospodarstwie wiejskim może służyć urządzenie, przedstawione na rys. 214.

W przypadkach, gdy odbiorów energii nie udaje się skupić dostatecznie blisko podnóża wieży silnika wiatrowego, nie pozostaje do zrobienia nic innego, jak zelektryfikowanie całego urzą-



Rys. 214. Przykład dość wszechstronnego wykorzystania energii wiatrowej w gospodarstwie wiejskim

żenia energetycznego gospodarstwa. Oczywiście, że w tych warunkach zakres zastosowania tej energii w gospodarstwie wiejskim znacznie się rozszerza (por. punkt 4 tego rozdziału).

2. ZASTOSOWANIE SILNIKÓW WIATROWYCH W DROBNYM PRZEMYSŁE I RZEMIOŚLE

Najszerze zastosowanie znalazły silniki wiatrowe (właściwie wiatraki) w młynarstwie. Do przemiału zboża wiatraki były stosowane już od bardzo dawna i w dość szerokim zakresie. Właśnie ta żmudna i ciężka praca spowodowała już w zaraniu dziejów człowieka wprzęgnięcie wiatru dla jego potrzeb.

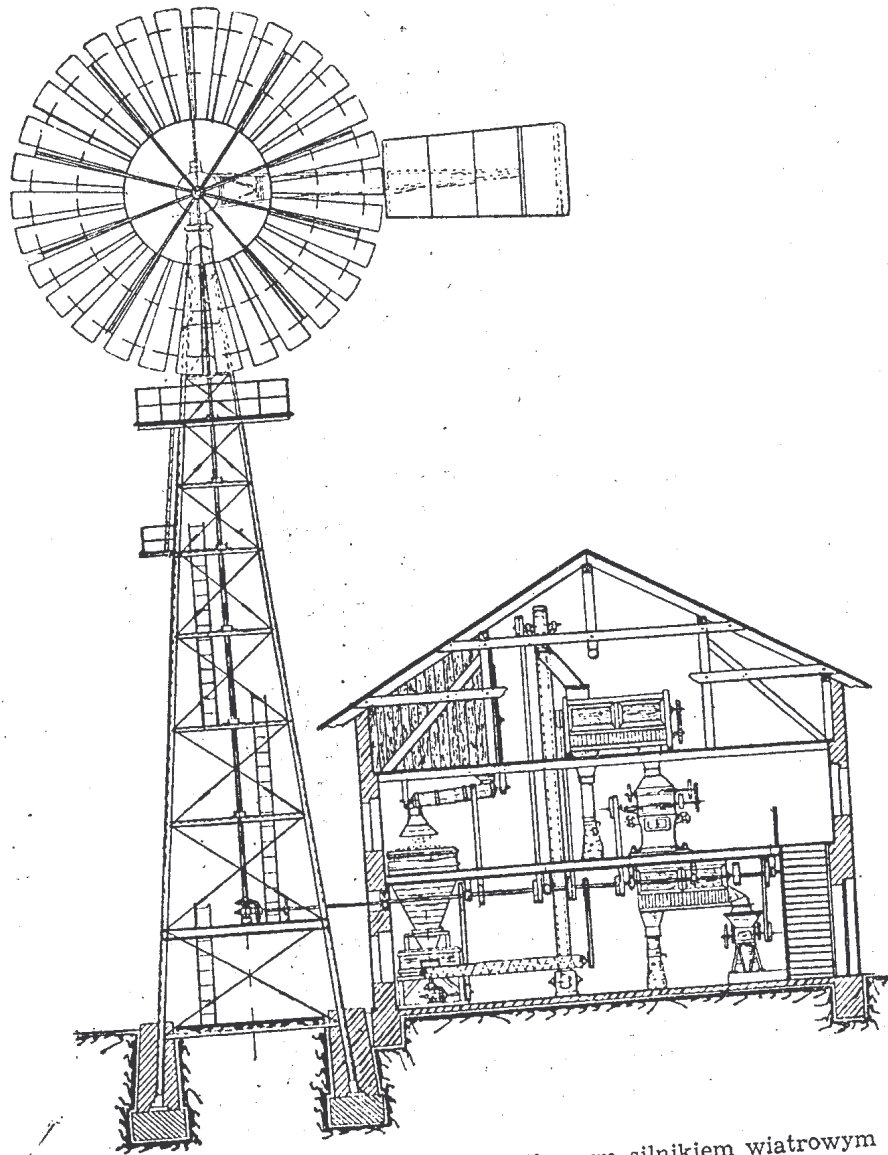
Najczęściej dla celów przemiałowych stosuje się wiatraki kozłowe lub holenderskie. Do przemiału grubego wystarcza moc 2 do 5 KM przy 110 do 150 obrotów żaren na minutę. Szybkość obwodowa kamienia żarnowego wynosi do 10 m/sec. Przemiał zboża takim urządzeniem jest jednak bardzo niedoskonały i ustępował zawsze przemiałowi w młynach wodnych.

Do przemiału drobnego konieczna jest większa moc (5 do 8 KM) oraz bardziej równomierna szybkość obrotowa, wobec czego do tych celów lepiej nadają się silniki wiatrowe wielołopatkowe (rys. 215) lub śmigłowe.

Dla dokonania rozruchu żarna napędzanego silnikiem wielołopatkowym konieczne jest podnoszenie na ten okres czasu wierzchniego kamienia ku górze. Przy zastosowaniu do napędu żarna szybkiego silnika śmigłowego ($Z = 5$) zabieg ten do jego rozruchu jednak nie wystarcza nawet podczas wiatru o szybkości 6—7 m/sec i trzeba w tych przypadkach stosować odpowiednie sprzęgła cierne uruchamiane najczęściej ręcznie. Zezwala to na rozpoczęcie pracy żarna już przy mniejszych szybkościach wiatru, a ponieważ moc żarna zmienia się proporcjonalnie do trzeciej potęgi jego szybkości obrotowej, nawet przy względnie słabym wietrze silnik nie zatrzymuje się częściej niż 2—3 razy na dobę.

Gdy silnik śmigłowy poza napędem żaren ma napędzać i inne maszyny, to sprzęgło musi być samoczynne i wtedy praca całego urządzenia wiatrowego nie wymaga właściwie ludzkiej obsługi. Sprzęgła takie dokonują poza tym ograniczenia mocy silników wiatrowych przez ograniczenie ich momentów obrotowych, które w przypadkach napędu żaren wzrastają prawie z drugą potęgą ich szybkości obrotowych.

W przypadku zastosowania do napędu żarna silnika wielołopatkowego, z przyczyny znacznego zwiększania się wraz z szybkością momentu obrotowego na jego wale pionowym, ster boczny nie jest w stanie odwrócić koła łopatkowego od zbyt silnego wiatru

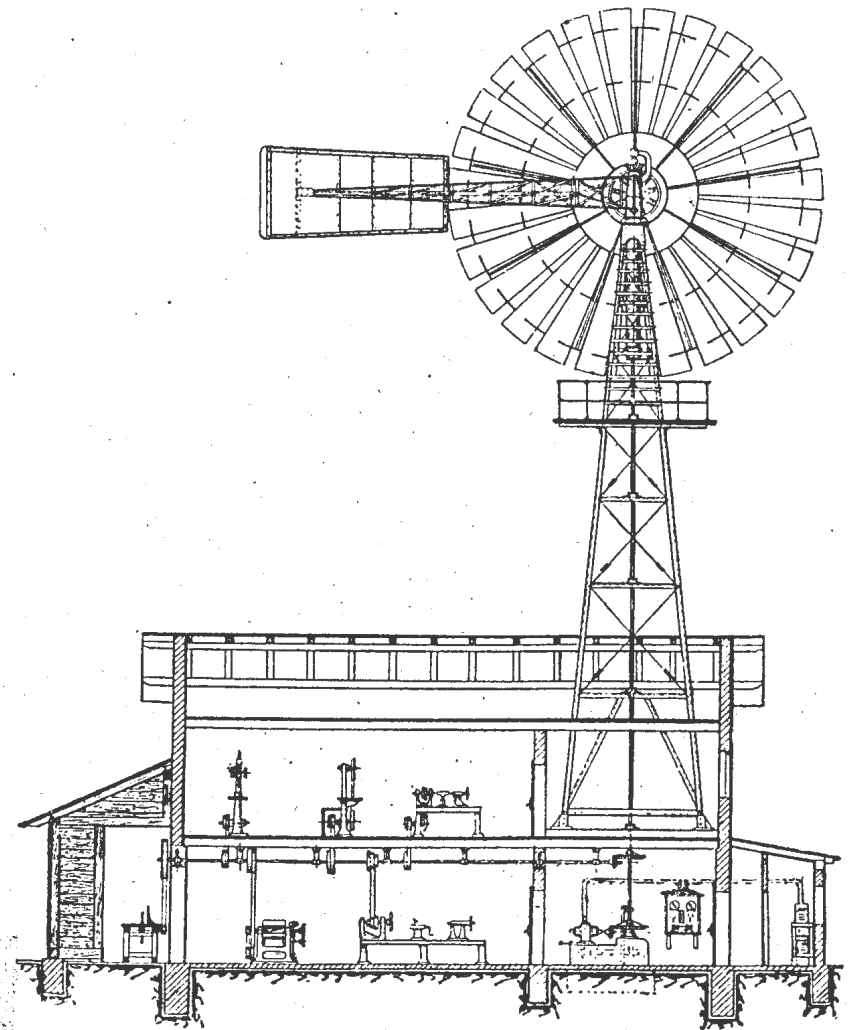


Rys. 215. Młyn zbożowy z wielołopatkowym silnikiem wiatrowym

[wzór 112] i konieczne staje się wtedy dodatkowe ograniczenie szybkości obrotowej silnika wiatrowego.

W celu całkowitego wykorzystania mocy silników wiatrowych, napędzających żarna, konieczne jest odpowiednie regulowanie zasypywania ziarna do żaren.

Dla doskonalszego przemiału zboża oraz dla lepszego przygotowania ziarna do przemiału np. przez dokładniejsze jego oczysz-



Rys. 216. Warsztat ślusarski napędzany wielołopatkowym silnikiem wiatrowym

czenie konieczna jest możliwie stała szybkość obrotowa napędu. Szybkość tę można osiągnąć przez zaopatrzenie silnika wiatrowego w odpowiedniej wielkości zasobnik (akumulator) bezwładnościowy. Urządzenie takich zasobników jest bardzo proste (patrz rozdz. VI), a jak pokazały wieloletnie doświadczenia, wyniki ich pracy są bardzo pomyślne.

Wahania szybkości obrotowej napędu zaopatrzonego w zasobnik bezwładnościowy są tak niewielkie, że staje się możliwe napędzanie przez silnik wiatrowy nawet takich maszyn, jak wialnie, triery itp.

Poza zastosowaniem silników wiatrowych w młynarstwie znajdują one dość często zastosowanie również i do napędu różnych maszyn w zakładach rzemieślniczych, np. w ślusarniach, stolarniach, niewielkich tartakach itp. Przykład takich urządzeń jest przedstawiony na rys. 216.

Również i w młeczarniach napęd ten może znaleźć zastosowanie.

3. ZASTOSOWANIE SILNIKÓW WIATROWYCH DO MELIORACJI GRUNTÓW

Bardzo wdzięczną dziedzinę zastosowań silników wiatrowych stanowi meliorowanie gruntów, polegające głównie na osuszeniu obszarów zbyt wilgotnych lub zalewanych wodą oraz na nawadnianiu zbyt suchych. Również i do zalewania stawów rybnych energia wiatru może być z korzyścią zastosowana.

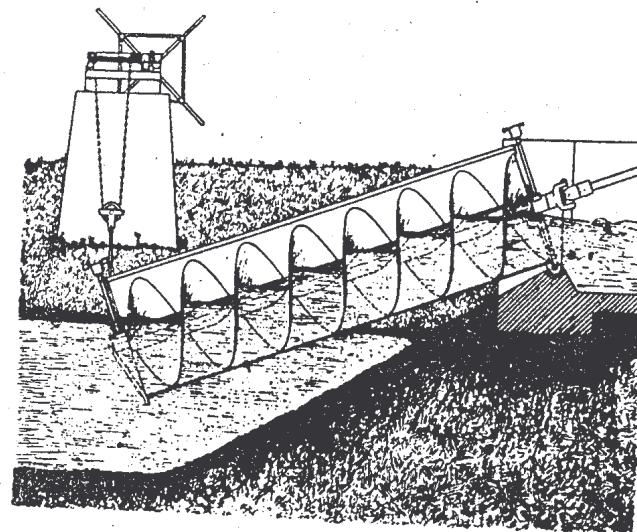
Typowym przykładem zastosowania energii wiatru do osuszenia na szeroką skalę obszarów użytkowych jest Holandia, w której wiatraki były zastosowane do tych celów już w XIV wieku. Wprawdzie w wyniku elektryfikacji krajów znaczenie wiatraków w tej dziedzinie uległo znacznemu ograniczeniu, jednak nowoczesne silniki wiatrowe, znacznie tańsze od wiatraków i nie wymagające stałej obsługi, w wielu przypadkach skutecznie współzawodniczą z silnikami elektrycznymi. Charakterystyczną cechą pompowych urządzeń melioracyjnych jest przepompowywanie dużych ilości wody na względnie niewielkie wysokości.

Do wypompowywania stosunkowo niedużych ilości wody (30 do 40 m³/godz), ale na dużą wysokość (do 6 m) stosuje się pompy

łukowe, napędzane najczęściej przez silniki wielołopatkowe za pośrednictwem pionowych drągów (rys. 211).

Moc silnika wiatrowego potrzebnego do wypompowania Q m³/godz wody na wysokość H m można obliczyć według poprzednio wyprowadzonego wzoru [137].

W przypadkach potrzeby przepompowywania znacznie większych ilości wody (1000 m³/godz), ale na mniejsze wysokości (0,5 do 3 m) stosuje się podnośniki ślimakowe wykonane w postaci śruby Archimedesesa (rys. 217), umieszczonej w odpowiednim korycie lub



Rys. 217. Podnośnik ślimakowy do wody

zurze z blachy albo desek. Podnośniki takie odznaczają się prostotą budowy, pewnością działania i długotrwałością pracy, a przy tym przy starannym wykonaniu wykazują dużą sprawność. Poza tym posiadają zaletę, że mogą być stosowane i do wody zanieczyszczonej.

Sam ślimak, jedno lub dwukrotny, jest umieszczony na wale stalowym, osadzonym w dwu łożyskach i połączonym przegubowo z wałem napędzającym. Cały podnośnik wspiera się górnym końcem na betonowym fundamencie, dolnym zaś jest zawieszony na linie nawiniętej na odpowiednim kołowrocie, przy pomocy którego tę część podnośnika można podnosić odpowiednio do poziomu dolnej wody. Kąt pochylenia osi podnośnika do poziomu może się

zmieniać od 10° do 40°, jednak najkorzystniej podnośnik pracuje przy pochyleniu na 15° do 20°.

Wydajność podnośników ślimakowych wynosi

$$Q = \eta \frac{n \cdot z}{60} q \text{ m}^3/\text{sek} \quad [138]$$

gdzie:

η — współczynnik sprawności, wynoszący dla podnośników w korytach od 0,6 do 0,7, zaś w rurach od 0,70 do 0,75,

n — liczba obrotów na minutę (zwykle $n = \frac{30}{d}$ do $\frac{50}{d}$ gdzie d jest średnicą ślimaka),

z — krotność ślimaka,

q — objętość wody zawarta między dwoma zwojami ślimaka.

Niekiedy stosuje się obok siebie dwa, a czasami i trzy podnośniki napędzane jednym silnikiem wiatrowym (rys. 218).

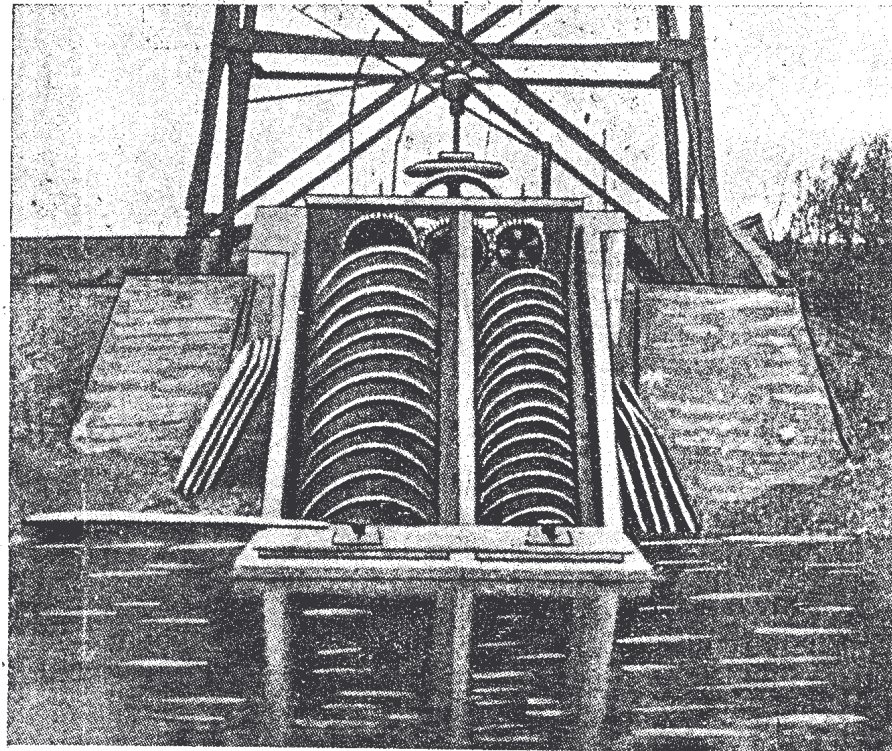
Do przepompowywania jeszcze większych ilości wody i na znacznie większe wysokości stosuje się pompy odśrodkowe (rys. 219), wykazujące względnie dużą sprawność ($\eta = 0,40 — 0,80$), jednak wymagające do swego napędu stałej szybkości obrotowej. Pompy te jednak muszą być przed rozpoczęciem pracy zalewane wodą, a przy tym nie nadają się do większych wysokości ssania od 5 m.

Również do przepompowywania dużych ilości wody (5 m³/sek), ale na mniejsze wysokości (do 3 m) stosuje się pompy śmigłowe, które są znacznie prostsze od pomp odśrodkowych, gdyż nie posiadają ani przewodów ssących, ani tłoczących. Śmigłowe wirniki tych pomp są umieszczone w odpowiednich rurach i pracują pod wodą.

Ze względu na konieczność napędu pomp odśrodkowych i śmigłowych ze stałą szybkością obrotową najlepiej jest je napędzać silnikami elektrycznymi, zasilanymi energią z zespołów wiatrowo-elektrycznych.

Chociaż zagadnienie przepompowywania wody za pośrednictwem prądu elektrycznego powinno być rozpatrywane w dziale o wykorzystaniu energii wiatru do wytwarzania energii elektrycznej, to jednak ze względu na jego szczególną więź z zagadnieniami melioracyjnymi zostanie ono rozważone na tym miejscu.

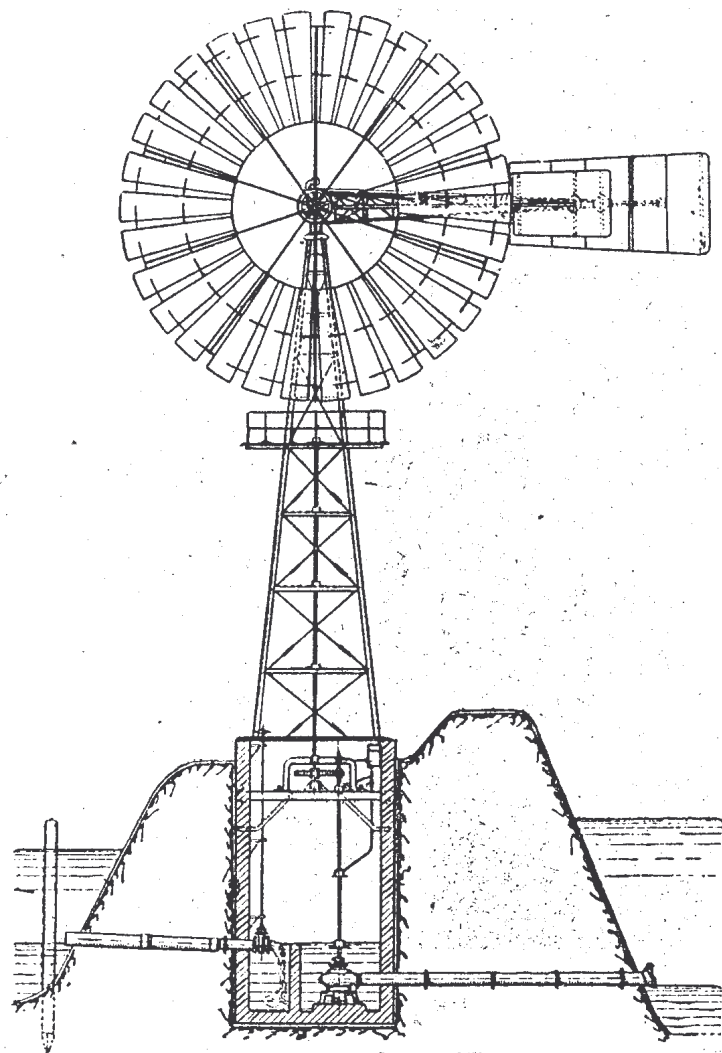
Jakkolwiek obserwuje się prawie wszędzie, i to zarówno w Holandii, jak i w Polsce, pęd do zastępowania pompowych urządzeń melioracyjnych zasilanych energią wiatru urządzeniami zasilanymi energią elektryczną z sieci energetycznej, to jednak nie wszędzie jest to gospodarczo uzasadnione. Zwłaszcza u nas zanied-



Rys. 218. Dwa podnośniki ślimakowe napędzane jednym silnikiem wiatrowym

bywanie odpowiedniego utrzymania w ruch istniejących 14 takich stacji wiatrowych ze względu na to, że pompy byłoby wygodniej zasilać z linii elektrycznych, nie powinno mieć miejsca.

Ze względu na charakter potrzeb pompowych dla melioracji silniki wiatrowe są najbardziej do tych celów wskazane, a ponieważ prawie nie wymagają obsługi oraz nie potrzebują nieraz długich linii zasilających, a przy tym nie spalają węgla, ani też innych paliw, powinny być przy każdej sposobności rozpowszechniane. Takie rozwiązanie zagadnienia przynosi tylko zyski.



Rys. 219. Napędzenie odśrodkowej pompy wodnej wielołopatkowym silnikiem wiatrowym

4. ZASTOSOWANIE ENERGII WIATRU DO WYTWARZANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Najlichniesze zastosowania silniki wiatrowe znajdują do wytwarzania energii elektrycznej, przy czym do tych celów są używane silniki wiatrowe wszelkich mocy od najmniejszej (50 W)

do największych (1000 kW). Tak względnie częste zastosowanie energii wiatru do wytwarzania energii elektrycznej jest powodowane licznymi zaletami prądu elektrycznego, jakimi są możliwości wszechstronnego jego użytkowania do najróżnorodniejszych celów oraz możliwość łatwego i względnie taniego akumulowania energii elektrycznej niezbyt dużej mocy, co dla samego zagadnienia wykorzystania energii wiatru ma zasadnicze znaczenie. Poza tym istnieje w tych warunkach możliwość łatwego oddawania mocy zespołu wiatrowo-elektrycznego do sieci elektrycznej.

Można by tutaj wprawdzie wyliczyć wszystkie zastosowania energii elektrycznej, jednak ze względu na szczupłość wyznaczonych ram poprzestać musimy tylko na stwierdzeniu, że przez użytkowanie z zespołów wiatrowych energii elektrycznej skala zastosowania energii wiatru zarówno znacznie się rozszerza, jak i pogłębia. Rzeczywistością staje się bowiem korzystanie na głębokim odludziu zarówno z radia i żarówki, jak i telewizora czy świetlówki.

Dla dania pojęcia o rozmiarze korzyści, które mogą być uzyskiwane od zespołu wiatrowo-elektrycznego o mocy 1 kW, wystarczy zaznaczyć, że pracujące już od kilku lat takie urządzenie o średnicy śmigła 3,5 m oraz baterii akumulatorów kadmowo-niklowych 2×24 V i 250 Ah umożliwia poza oświetleniem i radiofonizowaniem mieszkania swobodne korzystanie z pompy do wody, młynka, tokarki, a nawet elektrycznego spawania, nie wspominając już o innych drobniejszych napędach warsztatu ślusarskiego.

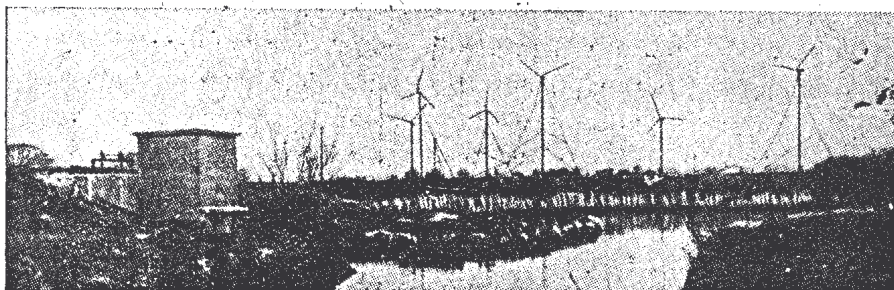
Drugim przykładem dość ciekawego, a przy tym oryginalnego zastosowania energii wiatru jest rozwiązanie na tej właśnie drodze energetyki odwadniania znacznego obszaru rolnego (Nenndorf—Hamrnich) na wybrzeżu Morza Północnego.

Dla odwodnienia obszaru, wynoszącego 560 ha, położonego poniżej średniego poziomu przepływającej w pobliżu rzeki Ems (poziom ten zmienia się wraz z przyływami i odpływami Morza Północnego), wybudowano odpowiednią stację pomp, zasilaną z sieci elektrycznej. Poza przepompowywaniem za obwałowanie wody przeciekowej i deszczowej z wymienionego obszaru trzeba jeszcze odpompowywać wodę deszczową z dodatkowej zlewni ok. 700 ha.

W związku jednak z dużymi kosztami ponoszonymi na energię elektryczną wzniesiono na obwałowaniu 8 zespołów wiatrowo-

-elektrycznych o średnicach 10 m, mocy po 7, 8 kVA, które zasilają energią elektryczną pompy odwadniające. Średnia roczna szybkość wiatru w tej okolicy wynosi 4,7 m/sek, zaś roczna wysokość opadu — 770 mm. Roczna ilość wody do odpompowania na wysokość 1,2 — 1,4 m wynosi $5\frac{1}{2}$ miliona m^3 , na co trzeba zużyć około 36000 kWh. Energia jest dostarczana obecnie przez silniki wiatrowe (rys. 220).

Paroletnia praca tego urządzenia wiatrowego wykazała znaczne korzyści takiego rozwiązania zagadnienia.



Rys. 220. Zasilanie stacji pomp odwadniających przez zespoły wiatrowo-elektryczne

Poza powszechnie znanymi zastosowaniami energii wiatru za pośrednictwem energii elektrycznej należałoby jeszcze wspomnieć o roli, jaką mógłby odegrać ten rodzaj energii w gazownictwie wiejskim, które obecnie ucieka się z konieczności do biogazu, uzyskiwanego drogą metanowej fermentacji nawozu i organicznych odpadków gospodarczych. Jak jednak kosztowna jest taka produkcja gazu opałowego, można stwierdzić w wybudowanych już obecnie urządzeniach doświadczalnych.

A przecież wykorzystanie do tego celu energii wiatru, zasilającej elektrolizery do rozkładu wody na wodór i tlen pod miernym ciśnieniem, rozwiązałyby sprawę dogodniej i znacznie taniej. Jakkolwiek ciepło spalania wodoru jest około trzy razy (licząc według objętości) mniejsze niż metanu, jednak nie zużywa się na to nawozu potrzebnego dla innych celów, a przy tym uzyskuje się dodatkowo czysty tlen bardzo pożądany na wsi do naprawczych robót spawalniczych — znacznie tańszy w wytwarzaniu i nie wymagający dalekiego przewozu. Przy zużywaniu tlenu w pobliżu

miejsca jego wytwarzania nie potrzebuje on być tak mocno sprężony, a w zupełności wystarczałaby mu prężność ciśnieniowego elektrolizera (50 atn).

Sama elektroliza wody może być jeszcze znacznie uproszczona, zautomatyzowana i potaniona, a zastosowywanie do przechowywania wodoru nowoczesnych zbiorników suchych (bez zamknięcia wodnego) znacznie upraszcza ich eksploatację oraz obniża koszty.

5. OBIÓR RODZAJU PRĄDU ELEKTRYCZNEGO W URZĄDZENIACH WIATROWYCH

Swoboda wyboru przy wykorzystywaniu energii wiatru rodzaju prądu elektrycznego występuje w zasadzie tylko przy jej wykorzystywaniu dla bezpośrednich celów użytkowych odbiorców odosobnionych, gdyż przy pracy zespołu wiatrowego na okręgową sieć elektryczną może mieć zastosowanie wyłącznie zmienny prąd trójfazowy.

Przy wyborze rodzaju prądu elektrycznego, który najlepiej nadawałby się przy wykorzystywaniu energii wiatru w tym pierwszym przypadku, zwrócić należy przede wszystkim uwagę na zasadnicze zalety i wady obu rodzajów prądu elektrycznego, mogących wchodzić tutaj w rachubę, mianowicie prądu stałego oraz prądu zmiennego trójfazowego.

Zasadniczą zaletą prądu stałego przy wykorzystywaniu energii wiatru jest możliwość łatwego zastosowania akumulatorów elektrycznych, wadą natomiast jest bardziej złożona i droższa budowa silników elektrycznych.

Zaletą zaś prądu zmiennego jest taniość silników elektrycznych (potrzeba przesyłania energii na większe odległości w naszym zagadnieniu nie występuje), wadą natomiast brak możliwości bezpośredniego stosowania akumulatorów elektrycznych.

Potrzeby gospodarcze oraz warunki, w jakich one występują, są niekiedy bardzo zróżnicowane i w związku z tym trafny wybór rodzaju prądu jest dość trudny.

a. W małych zespołach wiatrowo-elektrycznych używanych głównie do oświetlenia oraz do zasilania radiodbiorników, wobec obfitości wycofywanego z ruchu elektrycznego sprzętu samochodowego zastosowanie prądu stałego ma zdecydowaną przewagę.

Usiłowania, zmierzające do osiągnięcia większej pewności pracy przez zastosowanie w takich urządzeniach prądnic prądu zmiennego ze stałymi magnesami o większych od normalnej częstotliwościach z zastosowaniem prostowników stykowych, dają rozwiązania niewspółmiernie droższe i mające uzasadnienie tylko w nadzwyczajnych okolicznościach.

Istotne wątpliwości przy obiorze rodzaju prądu występują w urządzeniach wiatrowo-elektrycznych większej mocy, a za tym o wyższych napięciach, ze znacznym udziałem w obciążeniu silników elektrycznych. W tych przypadkach sprzęt samochodowy nie nadaje się do wykorzystania nawet w postaci drobnych silników.

b. W przypadkach, gdy obciążenie mocą mechaniczną może występować tylko w okresach wiatrów o odpowiedniej szybkości, a przy tym obciążenie to może być skupione w pobliżu silnika wiatrowego wskazane jest wtedy napędzanie maszyn bezpośrednio od silnika wiatrowego bez użycia prądu elektrycznego. Silnik wiatrowy jest wtedy zaopatrzony w pionowy wał, napędzający odpowiedni zestaw przekładniowy, od którego są napędzane maszyny. Wśród tych maszyn może być i prądnica prądu stałego do ładowania akumulatorów elektrycznych, zasilających odbiory oświetleniowe i mniejsze odbiory siłowe. Podczas długotrwałej ciszy można użyć w ostateczności do napędu zestawu przekładniowego ciągnika lub nawet kieratu konnego.

c. Gdy w warunkach ruchowych główne odbiory siłowe nie mogą być skupione w pobliżu silnika wiatrowego, trzeba zastosować zespół wiatrowo-elektryczny prądu trójfazowego. Wtedy prądem tym zasila się silniki asynchroniczne napędzające maszyny robocze oraz przetwornicę lub zespół prostowników stykowych do ładowania akumulatorów, wykorzystywanych tylko do oświetlenia. Podczas długotrwałego okresu bezwietrznego zespołem rezerwowym można ładować akumulatory i w ostateczności napędzać pompę wodną.

Gdy główne odbiory siłowe muszą być zasilane również i podczas okresu bezwietrznego, a jest możliwość w tych okresach czasu napędzać zespół rezerwowy odpowiedniej mocy, nic nie stoi na przeszkodzie również i wówczas korzystać z prądu trójfazowego.

d. Gdy natomiast nie będzie możliwości pędzenia podczas ciszy i słabych wiatrów rezerwowego zespołu spalinowego, zespół

wiatrowo-elektryczny musi być zespołem prądu stałego, a urządzenie powinno być wyposażone w odpowiednio pojemną baterię akumulatorów. Oczywiście, że wszystkie maszyny robocze powinny być zaopatrzone w silniki prądu stałego. Aby jednak bateria akumulatorów nie wypadła zbyt duża, możliwie duża ilość odbiorów siłowych powinna pracować tylko podczas dostatecznie silnego wiatru.

Zastosowanie zespołu wiatrowo-elektrycznego prądu stałego będzie również miało miejsce i wtedy, gdy największym jego obciążeniem będzie np. elektrolizer, zasilający miejscowe urządzenie gazowe (gazownię wodorową).



SILNIKI WIETRZNE

Opracowali mgr inż. Tadeusz Nowiński
i prof. mgr inż. Stanisław Zienkiewicz

Zestawienie ważniejszych oznaczeń

- c_0 — bezwzględna prędkość napływu wiatru na wirnik, w m/sek,
 c_1 — bezwzględna prędkość przepływu wiatru przez wirnik, w m/sek,
 c_2 — bezwzględna prędkość przepływu wiatru poza wirnikiem, w m/sek,
 p — ciśnienie statyczne, w kg/m^2 ,
 p_b — ciśnienie barometryczne, w kg/m^2 ,
 q — ciśnienie dynamiczne, w kg/m^2 ,
 u — prędkość obwodowa wirnika, w m/sek,
 v — składowa obwodowa prędkości wiatru w kierunku przeciwnym prędkości obwodowej u , w m/sek,
 w_0 — względna prędkość napływu wiatru na wirnik, w m/sek,
 w_1 — względna prędkość przepływu wiatru przez wirnik, w m/sek,
 D — średnica zewnętrzna wirnika, w m,
 F_0, F_1, F_2 — przekroje strumienia wiatru przed, w obrębie i poza wirnikiem, w m^2 ,
 N — moc wiatru, w KM lub kW,
 N_i — moc wewnętrzna silnika wietrznego, w KM lub kW,
 N_r — moc rozporządzalna silnika, w KM lub kW,
 N_{th} — moc teoretyczna silnika, w KM lub kW,
 N_u — moc użyteczna na wale wirnika, w KM lub kW,
 N_w — moc silnika idealnego, w KM lub kW,
 P_0 — napór strumienia wiatru o przekroju F_0 , w kg ,
 P_1 — napór strumienia wiatru o przekroju F_1 na wirnik, w kg ,
 R — promień zewnętrzny wirnika, w m,
 S — pole rzutu powierzchni płata, w m^2 ,
 α — kąt natarcia strumienia wiatru na płat,
 γ — ciężar właściwy, w kg/m^3 ,
 η — sprawność ogólna silnika wietrznego,
 η_a — sprawność aerodynamiczna,
 η_d — sprawność dolotowa,
 η_i — sprawność wewnętrzna,
 η_m — sprawność mechaniczna,
 $\mu = \frac{\tau}{g}$ — gęstość, w $\text{kgm}^{-1} \text{sek}^2$,
 $\nu = \frac{1}{\text{tg } \varepsilon}$ — współczynnik doskonałości profilu,
 ε — kąt między wypadkową a składową siły nośnej,
 $\dot{\varepsilon}$ — wyróżnik szybkości wirnika,
 ω — prędkość kątowa obrotu wirnika, w sek^{-1} .

§ 1. Wykorzystanie wiatru w energetyce

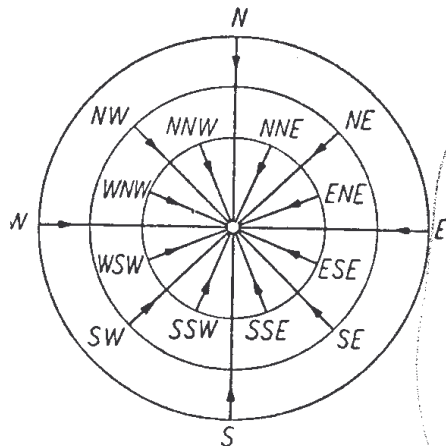
1. Uwagi ogólne

Przyczyną ruchu pewnej masy powietrza jest różnica ciśnień panujących w dwóch różnych obszarach. Różnice ciśnień zmieniają się nieustannie w czasie i w przestrzeni i są wywoływane zmianami w dopływie i odpływie energii z atmosfery otaczającej kulę ziemską. Istnieje wiele odmian ruchu powietrza. Ruch poziomy nazywa się *wiatrem*.

W warunkach pracy silników wietrznych mają znaczenie wiatry dolne, które wieją blisko powierzchni ziemi w kierunku prawie ściśle poziomym.

Prędkość wiatru jest przy ziemi najmniejsza, a wzrasta z wysokością, jak wynika z danych dla obszaru Europy środkowej.

Wzniesienie nad powierzchnią ziemi w m	1	2	5	10	25	50	100	250
Srednia roczna prędkość wiatru w m/sek	3,0	3,5	3,9	4,4	4,9	5,8	6,5	8,3



Rys. 1. Kierunki wiatru

Kierunek wiatru nosi nazwę tej strony, z której wieje. Według międzynarodowego oznaczenia rozróżnia się 16 kierunków wiatru w wycinkach koła po $22,5^\circ$. Cztery główne kierunki oznacza się wielkimi literami: N — północ, E — wschód, S — południe, W — zachód. Sposób oznaczania kierunku wiatru podaje rys. 1. Do oznaczenia kierunku wiatru służy chorągiewka wiatrowa, ustawiona obrotowo nad wskaźnikami stron świata.

2. Pomiar wiatru

Nasilenie wiatru wyznacza się według jego prędkości określonej w m/sek lub podaje się w stopniach skali *Beauforta*. W tablicy I podane są prędkości odpowiadające wartościom skali *Beauforta*.

Prędkość wiatru można ustalić na podstawie kąta wychylenia płytki metalowej zawieszanej wahliwie na osi poziomej wiatromierza *Wilde'a* lub za pomocą wiatromierzy wiatraczkowych, zaopatrzonych w licznik obrotów. Stacje meteorologiczne posługują się wiatromierzami samopiszzącymi, które

Tablica I. Nasilenie i prędkość wiatru

Ocena wzrokowa nasilenia wiatru	Stopień Beauforta	m/sek
Cisza bez wiatru	0	0 ÷ 0,5
Delikatny powiew (dym unosi się prawie prostopadle w górę)	1	0,5 ÷ 1,7
Lekki wiatr, dający się odczuć	2	1,8 ÷ 3,3
Słaby wiatr (poruszający flagi i liście)	3	3,4 ÷ 5,2
Umiarkowany wiatr (rozwijający flagi, poruszający małe gałęzie)	4	5,3 ÷ 7,4
Świeży wiatr (porusza większe gałęzie — niemiły w odczuciu)	5	7,5 ÷ 9,8
Silny wiatr (głośno szumiący)	6	9,9 ÷ 12,4
Ostry wiatr (porusza cieńsze pnie drzew, wzbulza na wodzie przewalające się fale)	7	12,5 ÷ 15,2
Gwałtowny wiatr albo wichur (wstrząsa całym drzewami, wstrzymuje kroczenie przeciw wiatrowi)	8	15,3 ÷ 18,2
Burza (zrywa dachówki, unosi lżejsze przedmioty)	9	18,3 ÷ 21,5
Silna burza (przewraca i łamie drzewa)	10	21,6 ÷ 25,1
Gwałtowna burza, siejąca zniszczenie	11	25,2 ÷ 29,0
Orkan (huragan) wszystko niszczący	12	29 i więcej

notują w sposób ciągły zmiany prędkości wiatru w ciągu doby.

Prędkości wiatru dzieli się na następujące grupy:

cisza i wiatry bardzo słabe	0 ÷ 3 m/sek
wiatry słabe	3 ÷ 5 "
wiatry umiarkowane	5 ÷ 10 "
wiatry silne	10 ÷ 15 "
wiatry b. silne — wichury	ponad 15 "

Przy pomiarach prędkości wiatru zwrócić należy uwagę na wpływ zaburzeń, wywołanych różnymi przeszkodami w terenie, np. budynków, drzew, pagórków itp., na wyniki badań. Przyrządy miernicze należy umieszczać w pewnym oddaleniu od przeszkody; 25÷30-krotne oddalenie w stosunku do wysokości przeszkody wyłącza praktycznie jej wpływ na wyniki pomiaru.

Metody i przyrządy pomiarowe opisane są w dziale pt. „Metrologia techniczna“ w tomie I:2 PTM, str. 676÷677.

3. Powtarzalność wiatrów

Codziennie obserwacje prędkości i kierunku wiatrów, prowadzone systematycznie w ciągu wielu lat, dają materiał do praktycznego wykorzystania energii wiatru w dowolnej miejscowości. Niemniej ważnym przedmiotem obserwacji oprócz prędkości i kierunku wiatru, jest ustalenie, jak często powtarza się ta lub inna grupa wiatrów w ciągu roku, czyli zestawienie danych dotyczących powtarzalności (częstości) wiatru.

Powtarzalnością nazywa się sumę godzin, podczas których w okresie roku sprawozdawczego w określonym punkcie wieje wiatr z jednakową prędkością. Powtarzalność może być podawana w godzinach lub w % całego okresu sprawozdawczego.

Powtarzalność jest zasadniczą wielkością, charakteryzującą wiatr z punktu widzenia energetyki. Wobec zmienności prędkości wiatru ustalenie jego częstości jest zadaniem trudnym, które rozwiązać można tylko na podstawie zmian prędkości notowanych w sposób ciągły przyrządami samopiszącymi.

Jeżeli dane statystyczne podają tylko średnie roczne prędkości wiatru, można do obliczeń wstępnych posługiwać się tablicami powtarzalności *M. M. Pomorcewa* i *Hullena*. Praktyka wykazała, że tablice *Pomorcewa* podają wartości najbardziej zbliżone do rzeczywistych, w zakresie średnich rocznych prędkości mniejszych niż 6 m/sek, natomiast powyżej tej liczby — wartości podawane przez *Hullena*. W tablicy II zestawiono powtarzalność wiatru w procentach okresu rocznego (8760 godzin). Z tablicy tej można odczytać np. dla średniej rocznej prędkości wiatru 5 m/sek, procentowy udział różnych wiatrów:

0—1/2 m/sek — 2% ≈ 175 godzin, 1 m/sek — 4,5% ≈ 394 godzin itd.

Tablica II. Powtarzalność wiatru w % okresu rocznego (8760 godzin)

Prędkość wiatru w m/sek	Dla średniej rocznej prędkości wiatru w m/sek									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
do 1/2	25,5	10,0	5,5	3,5	2,0	1,0	1,5	1,2	1,0	0,7
1	41,0	23,0	12,0	7,0	4,5	2,5	5,5	4,5	3,4	2,8
2	25,0	29,5	19,5	12,5	8,0	5,0	8,5	7,0	6,0	5,0
3	7,5	23,0	22,5	16,5	11,5	8,0	10,0	8,4	7,0	6,3
4	1,0	10,0	19,5	18,5	15,0	11,0	10,5	8,8	8,0	7,0
5	—	4,0	12,0	16,5	16,5	14,0	10,0	8,8	8,0	7,2
6	—	0,5	6,0	12,5	15,0	15,0	9,0	8,5	7,5	7,2
7	—	—	2,0	7,5	12,0	14,0	8,0	7,7	7,4	6,8
8	—	—	1,0	3,5	8,0	11,0	6,5	7,0	7,0	6,5
9	—	—	—	1,5	4,0	8,0	6,0	6,0	6,3	6,2
10	—	—	—	0,5	2,0	5,5	5,5	5,5	5,6	5,6
11	—	—	—	—	1,0	3,0	4,0	4,6	5,0	5,1
12	—	—	—	—	0,5	1,5	3,0	4,0	4,3	4,6
13	—	—	—	—	—	0,5	2,5	3,3	3,8	4,1
14	—	—	—	—	—	—	2,0	2,8	3,2	3,6
15	—	—	—	—	—	—	1,6	2,3	2,7	3,1
16	—	—	—	—	—	—	1,4	1,9	2,3	2,7
17	—	—	—	—	—	—	1,2	1,6	2,0	2,4
18	—	—	—	—	—	—	1,0	1,4	1,7	2,0
19	—	—	—	—	—	—	0,7	1,1	1,5	1,7
20	—	—	—	—	—	—	0,5	0,8	1,3	1,5
21	—	—	—	—	—	—	0,4	0,7	1,0	1,4
22	—	—	—	—	—	—	0,3	0,6	0,8	1,2
23	—	—	—	—	—	—	0,2	0,4	0,6	0,9
24	—	—	—	—	—	—	0,1	0,3	0,4	0,8
ponad 24	—	—	—	—	—	—	0,1	0,8	2,2	3,6

Z danych statystycznych wynika, że Polska jest w znacznym obszarze pod działaniem wiatrów słabych, których średnia roczna prędkość nie przekracza 5 m/sek. Najlepsze warunki wyzyskania energii wiatru istnieją na Pomorzu i Ziemiach Zachodnich; natomiast 60% ciszy i słabych wiatrów znajduje się w rejonie Radom-Sandomierz-Kraków-Częstochowa i Łódź.

4. Zastosowanie silników wietrznych

Silniki wietrzne używane są do:

- napędu młynów oraz urządzeń mechanicznych gospodarstw rolnych,
- przepompowywania wody w celu nawadniania, odwadniania i zasilania wodociągowego,
- napędu prądnic — przeważnie prądu stałego; większe zakłady wietrzne mają prądnice asynchroniczne prądu zmiennego pracujące na wspólną sieć elektryczną,
- wentylacji.

§ 2. Teoretyczne podstawy ogólne

Silnik wietrzny można uważać za akcyjną turbinę osiową pracującą w otwartym strumieniu powietrza. Organem czynnym w zamianie energii wiatru na moment napędowy jest wirnik o osi poziomej zwróconej w kierunku wiatru.

Wielkości energii i mocy wiatru wynikają z następującego wywodu.

Masa powietrza m poruszająca się z prędkością c posiada energię kinetyczną $E = \frac{1}{2} mc^2$ kGm. Energia ta odniesiona do 1 m³ powietrza jest

$$E' = \frac{\mu c^2}{2} = \frac{\gamma c^2}{2g} \text{ kG/m}^2$$

Ciężar właściwy można obliczyć z równania stanu

$$\gamma = \frac{p}{RT}$$

gdzie p — ciśnienie kG/m², R — stała gazowa, która dla powietrza suchego wynosi 29,27, $T = t + 273$ — temperatura bezwzględna powietrza, t — temperatura powietrza °C.

Ciśnienie dynamiczne w strumieniu płynącym z prędkością c :

$$q = \frac{\gamma c^2}{2} = \frac{\mu c^2}{2} \text{ kG/m}^2$$

Jeżeli ciśnienie to działa na przekrój F m² prostopadły do kierunku strug, to moc strumienia powietrza wyraża się iloczynem siły naporu i prędkości:

$$N = P \cdot c = Fqc = \gamma F \frac{c^2}{2g} \cdot c = \frac{\mu F c^3}{2} \text{ kGm/sek} \quad [1a]$$

$$N = \frac{\mu F \cdot c^3}{150} \text{ KM} \quad [1b]$$

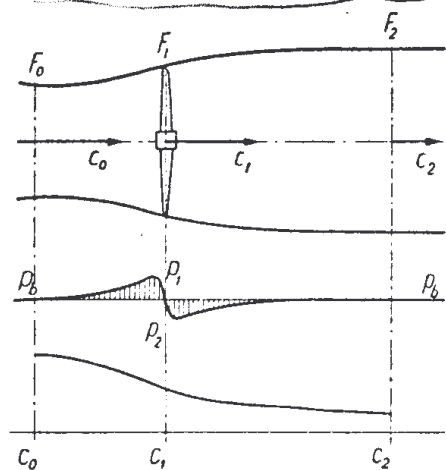
lub

$$N = \frac{\mu F c^3}{204} \text{ kW} \quad [1c]$$

Przy średniej prędkości wiatru $c_0 = 5$ m/sek, dla przeciętnej wartości $\mu = 0,125 = \frac{1}{8} \text{ kGm}^{-1} \text{ sek}^2$ przyjmowanej często w obliczeniach, a odpowiadającej ciśnieniu 700 mm słupa rtęci i temperaturze $t=15^\circ\text{C}$, teoretyczna moc strumienia wiatru o przekroju $F = 100 \text{ m}^2$ wynosi

$$N = \frac{0,125 \cdot 100 \cdot 5^3}{150} = 10,4 \text{ KM}$$

Rozważania ogólne opierają się na założeniach upraszczających bardzo złożone zjawiska przepływu rzeczywistego. Przyjmuje się mianowicie, że wirnik znajduje się w ograniczonym obszarze ustalonego, osiowo-symetrycznego, laminarnego przepływu powietrza uważanego za ośrodek nieściśliwy ($\mu_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu$).



Rys 2. Przepływ strumienia powietrza przez wirnik silnika wietrznego

Wszelkie zmiany energii i natężenia przepływu wzdłuż strug przebiegają zgodnie z prawem Bernoulliego i równaniem ciągłości, z wyjątkiem obszaru biegu wirnika, gdzie ruch staje się niestabilny. Obszar ten symbolizuje pole okręgu F_1 o średnicy D (rys. 2).

Poczynając od przekroju F_0 przed wirnikiem, przez który odbywa się dopływ energii wiatru, przekroje strumienia stopniowo wzrastają aż do wielkości F_1 . Wiąże się z tym spadek prędkości c_0-c_1 i przyrost ciśnienia statycznego p_1-p_0 .

W obszarze ruchu wirnika energia kinetyczna cząstek powietrza zamienia się na użyteczną pracę składowych sił obwodowych występujących na łopatkach wirnika. Wymienionej zamianie energii towarzyszy w obszarze ruchu spadek ciśnienia statycznego $p_0 - p_2$.

Poza obszarem ruchu rosną zarówno przekrój strumienia jak i ciśnienie, a prędkość osiowa przepływu maleje. Występują tu również składowe obwodowe prędkości cząstek powietrza.

Poprzestając na tych założeniach, wyznaczamy prędkość w obszarze ruchu wirnika c_1 , potrzebną do znalezienia mocy teoretycznej silnika. Równania Bernoulliego odnoszą się do strug poza obszarem ruchu wirnika:

$$p_0 + \frac{1}{2} \mu c_0^2 = p_1 + \frac{1}{2} \mu c_1^2$$

$$p_2 + \frac{1}{2} \mu (c_1^2 + v_1^2) = p_0 + \frac{1}{2} \mu (c_2^2 + v_2^2)$$

stąd

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \mu \left[(c_0^2 - c_2^2) + \frac{1}{2} \mu (v_1^2 - v_2^2) \right]$$

Drugi składnik równania uwzględniający stratę wywołaną ruchem okrężnym można pominąć, zgodnie z założeniem osiowej symetrii przepływu.

Napór strumienia na wirnik:

$$P_1 = F_1 (p_1 - p_2) = \frac{1}{2} \mu F_1 (c_0^2 - c_2^2) \quad [2]$$

Napór P_1 jest wywołany zmianą ilości ruchu w całym obszarze przepływu:

$$P_1 = \mu F_1 c_1 (c_0 - c_2) \quad [3]$$

Ze wzorów [2] i [3] mamy:

$$c_1 = \frac{1}{2} (c_0 + c_2) \quad [4]$$

Moc teoretyczna silnika:

$$N_{th} = P_1 c_1 = \mu F_1 c_1^2 (c_0 - c_2) = \frac{1}{4} \mu F_1 (c_0 + c_2)^2 (c_0 - c_2) \quad [5]$$

Pomijając dla prostoty trudno uchwytną teoretycznie i nieznaczną w rzeczywistości różnicę przekrojów strumienia, czyli w założeniu $F_1 = F_0$, określamy początkową moc strumienia w postaci:

$$N_0 = P_0 c_0 = \frac{1}{2} \mu F_0 c_0^2 \cdot c_0 = \frac{1}{2} \mu F_1 c_0^3 \quad [6]$$

Sprawność teoretyczna silnika:

$$\eta_{th} = \frac{N_{th}}{N_0} = \frac{1}{2} (c_0 + c_2) (c_0^2 - c_2^2) : c_0^3 \quad [7]$$

Traktując η_{th} jako funkcję stosunku $\frac{c_2}{c_0}$, można znaleźć analitycznie, że sprawność teoretyczna osiąga maximum przy

$$(\eta_{th})_{max} = \frac{16}{27} = 0,59 \quad [8]$$

Sprawność ogólna (użyteczna) jest gorsza wskutek pominięcia strat. W przepływie rzeczywistym nie istnieje (wskutek lepkości) ograniczenie strumienia do obszaru wg rys. 2, gdyż strumień ten jest unoszony w masie powietrza stanowiącej wiatr. Oprócz tego, ściśle rozgraniczenie przyczyn strat nie jest możliwe, chociaż w oparciu o badania doświadczalne można określić w przybliżeniu sprawność ogólną i moc użyteczną silnika.

Straty te w kolejności ich powstawania są następujące:

1) Jeśli N_1 oznacza straty wynikające z rozproszenia strug wskutek spiętrzenia ciśnienia przed wirnikiem, to moc rozporządzalna strumienia jest $N_0 - N_1 = N_r$, która odniesiona do mocy początkowej strumienia wyraża sprawność dolotową:

$$\eta_d = \frac{N_r}{N_0}$$

zakładając podobnie jak poprzednio $F_1 = F_0$ i uwzględniając zależność [4],

otrzymamy:

$$\eta_d = \frac{P_1 c_1}{P_0 c_0} = \frac{c_1}{c_0} = \frac{c_0 + c_2}{2 c_0} \quad [9]$$

2) Straty wylotowe N_2 pochodzą z energii nie wykorzystanej w wirniku. Moment obciążenia zewnętrznego przeciwdziałający momentowi napędowemu wzbudza, za pośrednictwem łopatek, składowe obwodowe prędkości cząstek powietrza. Energia ruchu okrężnego stanowi jednak drobną część straty energii związanej z prędkością osiową i silną urzliwością przepływu za wirnikiem. Moc, którą mógłby porać wirnik idealny jest zatem $N_r - N_2 = N_w$.

Sprawność wewnętrzną silnika podaje wzór:

$$\eta_i = \frac{N_w}{N_r} \quad [10]$$

3) Straty aerodynamiczne N_3 powstają wskutek oporów łopatek wirnika; wielkości tych strat wahają się w znacznych granicach zależnie od jego konstrukcji. Wchodzi tu w grę opory nie różniące się w istocie fizycznej od oporów występujących na płacie nośnym. Najbardziej istotne są następujące.

Opór tarcia powstaje w warstwie przyściennej i zależy od stanu gładkości powierzchni łopatki. Z oporem tarcia wiąże się opór kształtu wywołany oderwaniem strug na łopacie po stronie podciśnienia. Opory te stanowią tzw. opór profilowy.

Opór indukcyjny wynika z istnienia siły nośnej, a więc różnicy ciśnień po obu stronach płatu. W czasie ruchu łopatki różnica ciśnień wyrównuje się na jej końcach, powstają składowe promieniowe prędkości cząstek powietrza, które wywołują z kolei pasma wirowe powiększające straty energii w strumieniu wylotowym. Należy również uwzględnić opór czołowy piasty.

Opór interferencyjny spowodowany jest wzajemnym oddziaływaniem opływów na sąsiednich łopatkach, a zwłaszcza w częściach przylegających do piasty. Badania doświadczalne pozwalają zmniejszyć ten opór za pomocą doboru liczby charakterystycznej tzw. wyróżnika szybkobieżności.

Uwzględniając te straty moc wewnętrzna wirnika rzeczywistego jest $N_w - N_3 = N_i$, a sprawność aerodynamiczna:

$$\eta_a = \frac{N_i}{N_w} \quad [11]$$

4) Straty mechaniczne N_4 w łożyskach i przekładniach wpływają na moc użyteczną silnika w postaci $N_i - N_4 = N_u$. Stąd sprawność mechaniczna:

$$\eta_m = \frac{N_u}{N_i} \quad [12]$$

Sprawność ogólną silnika wietrznego określa zatem wzór:

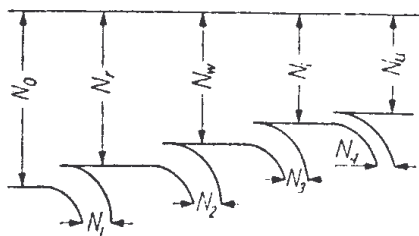
$$\eta = \frac{N_r}{N_0} \cdot \frac{N_w}{N_r} \cdot \frac{N_i}{N_w} \cdot \frac{N_u}{N_i} = \eta_d \eta_i \eta_a \eta_m = \frac{N_u}{N_0} \quad [13]$$

Bilans mocy silnika wietrznego wykonany sposobem Sankeya podaje rys. 3.

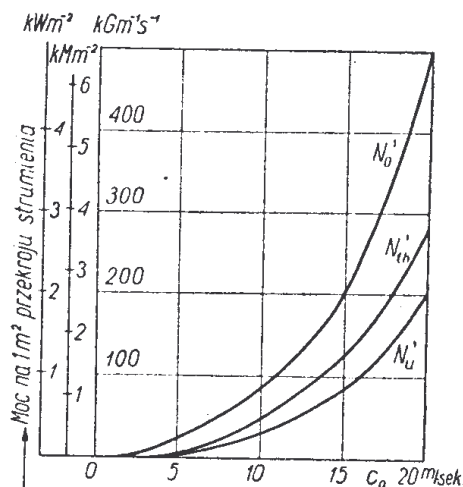
Sprawność ogólna silników wietrznych zależy w znacznej mierze od iloczynu $\eta_i \cdot \eta_a = \frac{N_i}{N_r}$ czyli konstrukcji i wy-

konania wirnika. W rozwiązaniach prostszych, tańszych sprawność wynosi $\sim 0,3$. W starannie, pod względem aerodynamicznym, wykonanych konstrukcjach sprawność może przekraczać 0,4. Podwyższenie stosunku N_i/N_r jest możliwe w oparciu o badania modeli wirników w tunelach aerodynamicznych. Sprawność ogólna zależy również od spełnie-

nia warunku [8], tj. przybliżenia się do $(\eta_d)_{max} = 0,67$. Przeciętna sprawność mechaniczna jest $\eta_{m_i} = 0,8$. Opory mechaniczne są znaczne wskutek dużych nacisków osiowych na wirnik i reakcji wywołanych momentem żyroskopowym wirnika przy oscylacjach kierunku wiatru.



Rys. 3. Wykres bilansu energetycznego silnika wietrznego



Rys. 4. Krzywe mocy jednostkowych

Krzywe mocy jednostkowych $N'_0 = f(c_0)$, $N'_{th} = f(c_0)$ oraz $N'_u = f(c_0)$ w odniesieniu do wykonanego silnika podaje rys. 4.

Wyróżnikiem szybkobieżności nazywa się stosunek prędkości obwodowej profilu łopatki na pewnym promieniu r do prędkości napływu na danym obwodzie:

$$\xi = \frac{r\omega}{c_1} = \frac{u}{c_1} \quad [14]$$

W wyniku badań pewnego wirnika otrzymano krzywą $N_i/N_r = f(\xi)$ (rys. 5).

Ze względu na szybkobieżność dzieli się silniki wietrzne na: a) wolnobieżne $\xi \leq 1,5$ b) średnibieżne $\xi = 1,5 \div 3,5$, c) szybkobieżne $\xi = 3,5 \div 9$.

Przy ustalaniu wymiarów wirnika zaleca się stosować wartość współczynnika sprawności $\eta = 0,3$, osiągalną w rozwiązaniach praktycznych.

Wprowadzając tę wartość do równania:

$$N_u = \eta \mu \frac{\pi D^2}{4} \frac{c_0^3}{150} \text{ KM}$$

otrzymamy wzór praktyczny:

$$N_u = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot D^2 c_0^3 \text{ KM} = 0,147 \cdot 10^{-3} D^2 c_0^3 \text{ kW} \quad [15]$$

Wielkość momentu obrotowego M_k podana w zależności od ciśnienia dynamicznego q wyraża się wzorem:

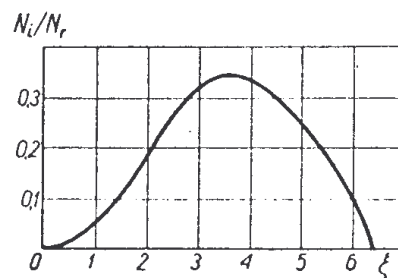
$$M_k = \psi F q \frac{D}{2} \text{ kGm} \quad [16]$$

gdzie $q = \mu \frac{c_1^2}{2} = \gamma \frac{c_1^2}{2g}$, a ψ — współczynnik momentu.

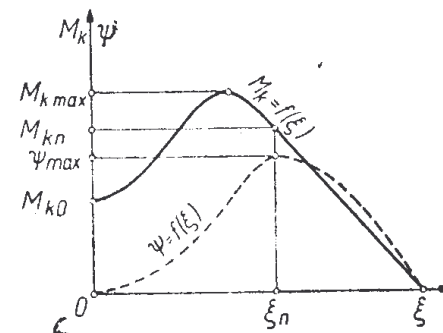
Zamiast momentu M_k podawane są na wykresach przeważnie wielkości współczynnika ψ z równania [16]

$$\psi = \frac{2 M_k}{\mu F c_1^2 D/2} = \frac{2 M_k}{\mu \pi R^3 c_1^2} \quad [17]$$

jak to podaje rys. 6.



Rys. 5. Wykres zależności $N_i/N_r = f(\xi)$



Rys. 6. Wykres współczynnika momentu i współczynnika momentu obrotowego w zależności od ξ

Z krzywych charakterystycznych silnika wietrznego można określić warunki jego normalnej pracy, a więc ξ_n i M_{kn} występujące przy $\eta_{i max}$ oraz moment rozruchowy M_{k0} przy $\omega = 0$, tzn. $\xi = 0$.

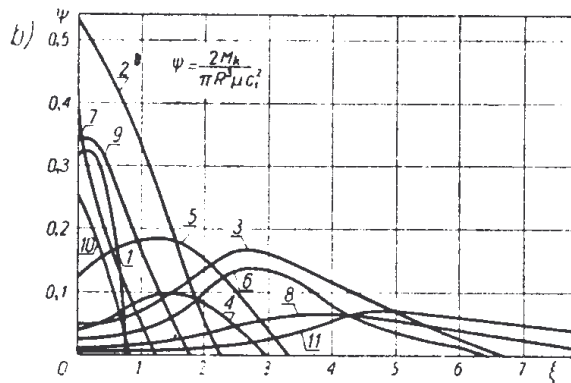
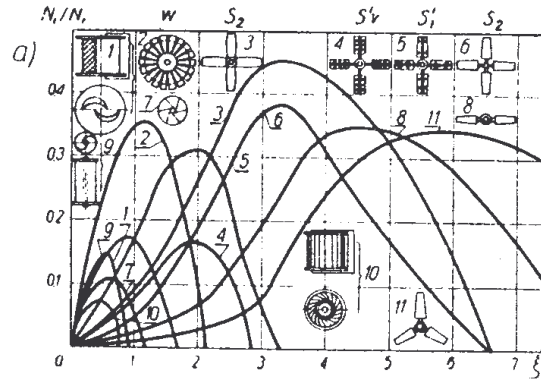
Krzywe charakterystyczne silników wietrznych różnią się od krzywych uzyskanych przy badaniu modeli wirników w tunelu aerodynamicznym. Pochodzi to z różnicy warunków przepływu rzeczywistego i w tunelu. Wpływ na przebieg krzywych charakterystycznych ma również położenie silnika wietrznego w stosunku do przeszkód terenowych. Porównywanie różnych silników wietrznych, szczególnie gdy ich charakterystyki są zbliżone, powinno odbywać się w jednakowych warunkach pracy.

Poszczególnym typom silników wietrznych odpowiadają określone krzywe charakterystyczne (rys. 7).

§ 3. Rodzaje silników wietrznych

Rozróżnia się dwa układy silników wietrznych: a) z wałem poziomym, b) z wałem pionowym.

Najprostszym silnikiem z wałem pionowym jest silnik karuzelowy, który działa niezależnie od kierunku wiatru (rys. 8). Osłona, która zakrywa połowę wirnika, nastawia się samoczynnie za pomocą steru. Do grupy tej zaliczają się silniki 1, 7, 9, 10 pokazane schematycznie na rys. 7.



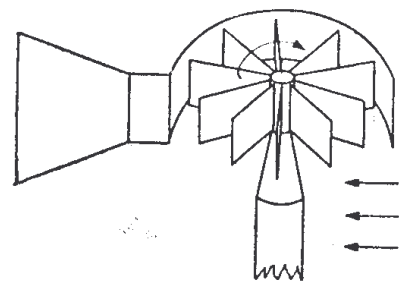
Rys. 7. Krzywe charakterystyczne różnych typów silników wiatrznych a) zależności $N_i/N_r = f(\xi)$, b) — zależności $\psi = f(\xi)$

Kąt ustawienia łopatek w poszczególnych przekrojach maleje ze wzrostem promienia, a więc prędkości obwodowej. Silniki wiatrzne wolnobieżne mają niewielką stosunkowo sprawność, lecz duży moment rozruchowy.

b) Silniki wiatrzne średniobieżne (krzywe 4 i 5 na rys. 7).

Łopatkami wirnika 5 w odróżnieniu od wirnika 4 mają profile opływowe, co ma zasadniczy wpływ na przebieg krzywej sprawności a również i krzywej momentu ψ .

c) Silniki wiatrzne szybkobieżne (krzywe 3, 6, 8, 11 na rys. 7) odznaczają się małą ilością łopatek: 2 do 4,



Rys. 8. Schematy silnika karuzelowego

rys. 8). Osłona, która zakrywa połowę wirnika, nastawia się samoczynnie za pomocą steru. Do grupy tej zaliczają się silniki 1, 7, 9, 10 pokazane schematycznie na rys. 7. Silniki 2, 3, 4, 5, 6, 8, 11 na tym rysunku mają wał poziomy.

a) Silniki wiatrzne wolnobieżne (krzywa 2 na rys. 7).

Wirniki tych silników składają się z dużej liczby łopatek nie dochodzących do osi obrotu, zajmujących powierzchnię pierścieniową. Łopatkami są przeważnie przynitowane do tarczy osadzonej na wale silnika.

które dochodzą do piasty osadzonej na wale silnika. Powierzchnia łopatek jest stosunkowo mała. Sprawność tych wirników w porównaniu z innymi wirnikami jest największa; uzyskuje się ją przez staranne oprofilowanie łopatek, podobnych do śmigieł lotniczych. Wadą tych wirników jest mały moment rozruchowy; dla ułatwienia rozruchu stosuje się często specjalne urządzenia rozruchowe.

Oprócz wymienionych typów silników wiatrznych istnieją małe wiatrzniki tzw. wiatraki, stosowane np. do celów wentylacyjnych w wagonach kolejowych, tramwajowych itp.

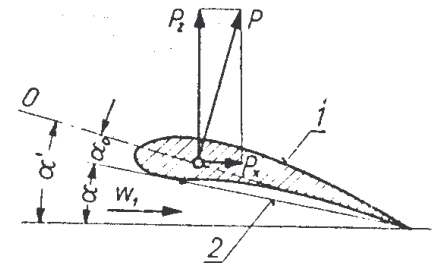
§ 4. Podstawy teoretyczne konstrukcji

1. Zależności ogólne

Przy napływie wiatru na nieruchomy płat o długości L i cięciwie l pod pewnym kątem α , zwanym kątem natarcia, powstają następujące siły (rys. 9): siła oporu P_x i siła nośna P_z . Opór płata jest równy sile, którą wiatr wywiera na płat w kierunku prędkości strumienia. Wypadkową sił P_x i P_z jest siła P .

Cięciwa profilu tworzy z kierunkiem prędkości wiatru w_1 kąt α , który jest dodatni, gdy wiatr napływa ukośnie na dolną część płata jak na rys. 9, a ujemny, gdy strumień powietrza wywiera parcie na górną część płata (grzbiet).

Składowa siła poprzeczna występuje wskutek różnicy ciśnień powietrza na dolną i górną powierzchnię płata. Wielkość siły P_z i P_x określa się w zależności od ciśnienia dynamicznego wiatru na powierzchnię płata według wzorów:



Rys. 9. Schemat sił działających na profil płata 0: — oś zerowej siły nośnej, 1 — grzbiet profilu, 2 — cięciwa, α' — bezwzględny kąt natarcia, α_0 — kąt położenia cięciwy, α — kąt natarcia

$$P_z = C_z \frac{\rho w_1^2}{2} \cdot S \text{ kG} \quad [18]$$

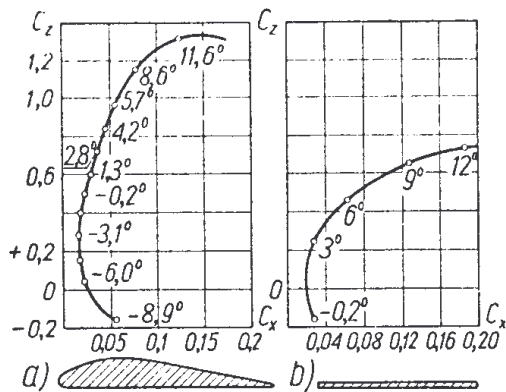
$$P_x = C_x \frac{\rho w_1^2}{2} \cdot S \text{ kG} \quad [19]$$

w których C_z i C_x są współczynnikami siły nośnej i oporu zależnymi od kształtu profilu i kąta natarcia α , $S = L \cdot l \text{ m}^2$ jest polem rzutu płata na płaszczyznę przechodzącą przez cięciwę, gdzie L — długość płata, a l — długość cięciwy profilu.

W instytutach aerodynamicznych przeprowadza się badania na modelach płatów o różnych profilach i wydłużeniach $\lambda = U/L$ (przeważnie $\lambda = 1/5$). Otrzymane w wyniku badań współczynniki C_x i C_z zestawia się w tabelach oraz podaje się na wykresach dla poszczególnych kątów α .

Punkty wynikowe na wykresie tworzą tzw. *krzywą biegunową*, która jest krzywą charakterystyczną badanego profilu jako funkcja C_z/C_x w zależności od α .

Wyniki otrzymane z badań laboratoryjnych ważne są w praktycznych zagadnieniach gdy $c_1 > 3$ m/sek. Na rys. 10a i b podano krzywe biegunowe: a) — płata prostokątnego o profilu opływowym, b) — płaskiej płyty prostokątnej. Liczby podane obok poszczególnych punktów pomiarowych określają kąt natarcia.



Rys. 10. Krzywe biegunowe łopatki kształtu: a) — opływowego, b) — płaskiego

strumieniem powietrza o większej prędkości niż na płat o profilu opływowym.

Stosunek $\frac{C_z}{C_x} = \frac{P_z}{P_x} = v$ określający doskonałość profilu

powinien być zatem możliwie duży.

Podobne płaty umocowane promieniowo w stosunku do poziomej osi obrotu tworzą wirnik. Kąt ϑ ustawienia cięciwy każdego profilu względem płaszczyzny prostopadłej do osi wirnika powinien być odpowiednio dobrany (rys. 11). Wielkość kąta $\vartheta = \beta - \alpha$ ma zasadnicze dla konstrukcji wirnika znaczenie. W trójkącie prędkości (przed napływem na wirnik) bezw. gędna prędkość ma kierunek osiowy, prostopadły do płaszczyzny wirowania środka parcia A. W dalszym przebiegu ruchu zakładamy, że wg [4] i [8] prędkości osiowe

zmieniają się pozostając w określonym stosunku $c_2 = \frac{1}{3} c_0$,

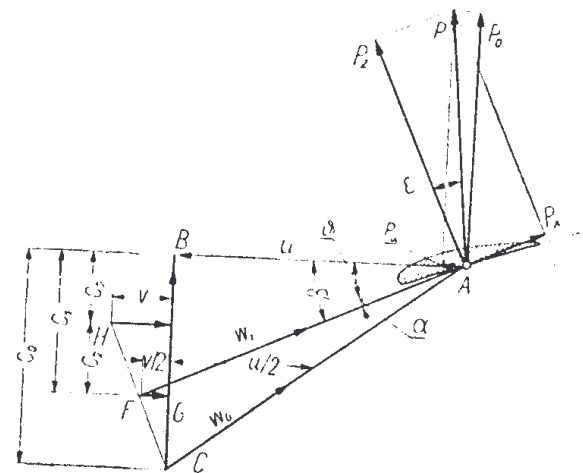
$c_1 = 0,5 (c_0 + c_2)$. Na cząstkę powietrza od chwili zetknięcia z łopatką działa reakcja powodująca odchylenie prędkości

bezwzględnej od kierunku osiowego. Składowa obwodowa tej prędkości bezwzględnej v powoduje zwiększenie oporów indukcyjnego i interferencyjnego.

W celu ograniczenia tych strat kąt ϑ poszczególnego profilu łopatki dobiera się na podstawie warunku $v \cdot u = \text{Const}$ wzdłuż całej łopatki, tzn. od promienia piasty do promienia zewnętrznego R.

Wyróżnik szybkości $\xi = \frac{u}{c_1}$ umożliwia

przy założonej prędkości wiatru c_0 obliczyć prędkość obwodową u w punkcie A dowolnego przekroju płata w odległości r od osi obrotu.



Rys. 11. Trójkąt prędkości na wirującym profilu łopatki i rozkład sił

2. Prędkości i siły występujące na łopatkach wirnika

Na rys. 11 przedstawiono trójkąt prędkości ABC, w którym prędkość obwodowa $u = r \cdot \omega = \xi c$, wyrażona jest odcinkiem AB, prędkość wiatru c_0 odcinkiem CB, a odcinek CA — przedstawia początkową względną prędkość w_0 napływu wiatru. Stosunki między prędkościami osiowymi spełniają przy tym warunki optymalne pracy silnika [4] i [8].

Kąt β można znaleźć wykreślnie. Jak podano poprzednio, cząstka powietrza spływająca z wirnika porusza się z odchyleną od osi wirnika prędkością bezwzględną równą odcinkowi FH, której składowa względem wirnika jest sumą $|u + v|$. Punkt F leży na okręgu opisanym na odcinku AC równym danej prędkości w_0 , w odległości $GB = c_1$ od płaszczyzny wirowania środka parcia profilu oraz wyznacza wielkość i kierunek prędkości względem łopatki $FA = w_1$.

Z wielkości w_1 oraz współczynników C_x i C_z ustalonych dla obranego profilu, o polu S łopatki można obliczyć siły działające na obracającą się łopatkę ze wzorów [18] i [19]. Siła wypadkowa P rozkłada się na siłę obwodową P_u i siłę osiową P_0 ; P_u leży w płaszczyźnie wirnika i powoduje moment napędowy.

Warunek [4] może być dotrzymany przez odpowiednią konstrukcję wirnika. Osiągnąć to można przez dobór odpowiedniej cięciwy łopatki według wzoru

$$l = \frac{4 \pi r v}{i C_{z\infty} w_1} \quad [20]$$

We wzorze tym v i w_1 należy wziąć z wykresu; r oznacza odległość rozważanego profilu od osi obrotu, i liczbę łopatek wirnika, $C_{z\infty}$ — współczynnik siły nośnej przy $\frac{L}{l} = \infty$.

Przeliczenie współczynników C_z i C_x na teoretyczne wartości $\frac{L}{l} = \infty$ odbywa się według następujących wzorów:

$$C_{z\infty} = C_z \quad [21]$$

$$C_{x\infty} = C_x - \frac{C_z^2}{\pi} \frac{l}{L} \quad [22]$$

$$a_{\infty} = a - 57 \frac{C_z}{\pi} \frac{l}{L} \quad (\text{w stopniach}) \quad [23]$$

Ze wzrostem r odległości elementu łopatki od osi obrotu zwiększa się prędkość obwodowa, a w związku z tym kąt natarcia maleje.

Różnica ciśnień, która występuje po obu stronach płata poruszającego się w powietrzu, dąży do wyrównania się na końcach płata, zmniejszając siłę nośną, a więc i moc silnika wietrznego. Stratę tę można uwzględnić wstawiając zamiast rzeczywistej średnicy D , wartość mniejszą według wzoru doświadczalnego

$$D' = \frac{D}{1 + 0,44 \frac{\pi \sin \beta}{i}} \quad [24]$$

i — liczba łopatek, β — kąt z rys. 11 dla profilu płata, tzn. w odległości R od osi obrotu.

Wyróżnik szybkości $\xi = \frac{R \cdot \omega}{c_1}$, z którego przy założonej prędkości wiatru c_1 , można obliczyć prędkość obwodową oraz liczbę obrotów, przyjmuje się na podstawie charakterystyki wirnika wietrznego, założonej orientacyjnie w projekcie. O wyborze typu wirnika decyduje moc silnika i jego przeznaczenie, żądany moment rozruchowy oraz możliwości i koszty jego wykonania.

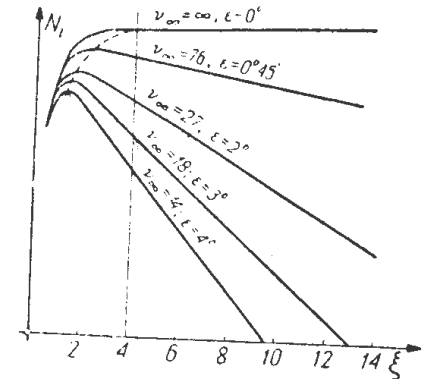
Wyróżnik szybkości ξ uwzględniający prędkość c wiatru występującą najczęściej w danej okolicy, powinien

zapewniać najlepsze wykorzystanie energii wiatru, tzn. by siła obwodowa P_u w poszczególnych przekrojach łopatki osiągała możliwie największe wartości. Moc można wyrazić również iloczynem

$$N_i = P_u \cdot u \quad \text{kGmsek}^{-1}$$

Na podstawie badań różnych profili łopatek, przy różnych wartościach $\nu = \frac{C_{z\infty}}{C_{x\infty}}$, ustalono zależność N_i od ξ , co

przedstawia obrazowo rys. 12. Z wykresu tego widać wyraźnie, jak wielki wpływ na osiągalną moc wirnika wietrznego ma doskonałość profilu płata; gdy ν maleje, maksimum osiągalnej mocy nie tylko maleje, lecz przesuwa się w kierunku mniejszego ξ . Stąd wniosek, że dla wirników wolnobieżnych nie jest celowe stosowanie kosztownych odplywowych profili łopatek, ponieważ nie wpływa to tak istotnie na podniesienie sprawności silnika, jak dla wirników szybkobieżnych przy $\xi > 4$; wirniki wolnobieżne powinny mieć łopatki łączone z blachy.



Wyróżnik szybkości ξ wzduż łopatki rośnie proporcjonalnie z prędkością obwodową, a więc z odległością badanego profilu od osi obrotu. Łopatka pracuje w warunkach podanych odcinkiem charakterystyki, zawartym między wartościami ξ promienia wewnętrznego i promienia zewnętrznego wirnika.

3. Zasada obliczania wirnika

Zadanie sprowadza się zasadniczo do dwóch schematów: 1) — dane c_0 i D , 2) — dane c_0 i N_u .

W drugim przypadku D można obliczyć z wzoru [15] i sprowadzić zadanie do przypadku 1).

Po ustaleniu typu silnika, przyjmuje się najbardziej dogodny wyróżnik szybkości, na podstawie wykresów podanych na rys. 7. Łopatki wirników wolnobieżnych nie dochodzą do piasty, lecz mieszczą się w pierścieniu o promieniu wewnętrznym $R_w = \frac{1}{3} R$. Łopatki wirników szybkobieżnych sięgają przeważnie piasty osadzonej na wale.

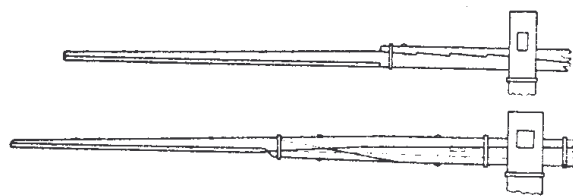
Tablica III. Kąty ustawienia żeber łopatek w wirnikach typu WIME

Średnica wirnika w m	Rozstęp między żebrami w mm	Kąty umocowania żeber w stopniach								
		Numer żebra licząc od wału								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	430	43	35	28	22	17	13	11	10	—
10	480	43	36	29	23	18	15	12	11	10
12	580	43	36	30	24	18	15	12	11	10

Po obraniu profilu łopatki, na podstawie krzywej biegunowej sporządza się wykresy prędkości i obliczenia dla 6÷8 przekrojów rozstawionych równomiernie na długości łopatki. Z trójkątów prędkości można ustalić zmienność kąta natarcia α , a również kąty $\vartheta = \beta - \alpha$ ustawienia profilu w stosunku do płaszczyzny obrotu.

4. Wirniki silników wietrznych dla młynów

Wirniki tych silników składają się przeważnie z 4-ch łopatek umocowanych na wale głównym. W ramionach piasty wiercone są otwory pod odpowiednimi kątami do płaszczyzny obrotu; w otworach zamocowuje się żebra tworzące szkielet łopatki. Długie ramiona mogą się składać



Rys. 13. Dźwigar wirnika składany z dwóch lub trzech części

z dwóch lub trzech części (rys. 13). Żebra wzajemnie połączone podłużnymi listwami tworzą kratownicę łopatki, którą w starych konstrukcjach kryto płótnem żaglowym, malowanym farbą olejną. Obecnie kratownice łopatek wirnika pokrywa się deseczkami grubości około 6 mm. Pokrycie

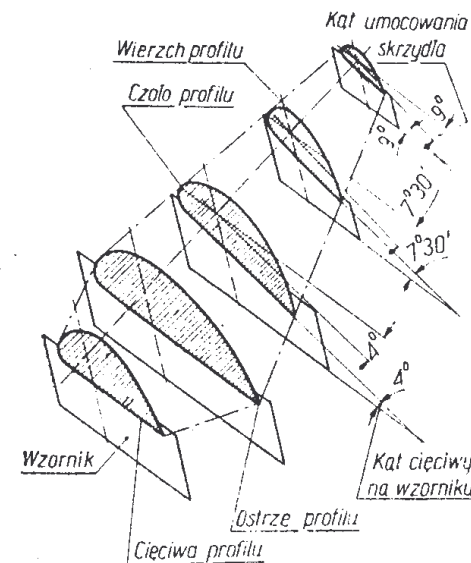
Tablica IV. Główne wymiary części wirnika typu WIME w mm

Części wirnika	Średnica wirnika w m		
	8	10	12
Szerokość łopatki, długość iglic	1200	1500	1800
Odległość osi dźwigara od krawędzi natarcia	400	500	600
Odległość pierwszego żebra od osi	800	1000	1200
Grubość żebra — z przodu	40 × 55	42 × 60	45 × 65
„ „ — z tyłu	38 × 52	40 × 55	43 × 60
Długość desek pokrycia	3300	4100	4900
Grubość „ „	6	6	6
Wymiary przekroju dźwigara	120×240	130×260	160×320

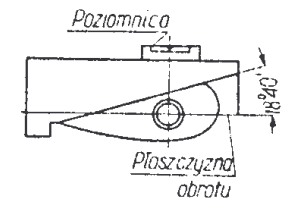
łopatki jest całkowite i powinno być dostatecznie szczelne, bez prześwitów i szczelin, które ujemnie wpływają na sprawność wirnika.

Kąty zamocowania żeber na danej średnicy powinny być jednakowe we wszystkich łopatkach. Wyznaczenie i wiercenie otworów w dźwigarach odbywa się na kozłach za pomocą kątomierzy i specjalnych przyrządów. Dźwigary łopatek wykonane są z równych, suchych sosnowych belek i powinny być wyważone. Kąty ustawienia żeber stosowane w znormalizowanych silnikach wietrznych typu WIME, produkcji radzieckiej zestawione są w tablicy IV, a wymiary głównych

części wirnika w tabl. V. Żebra wykonane są z suchych sosnowych desek 50 mm i zakończone są stożkowo, co umożliwia ustawić żebro, o ile wiercenie wykonano wadliwie, za pomocą klinów pod właściwym kątem. Kliny po umocowaniu przybijają się gwoździami do żebra.



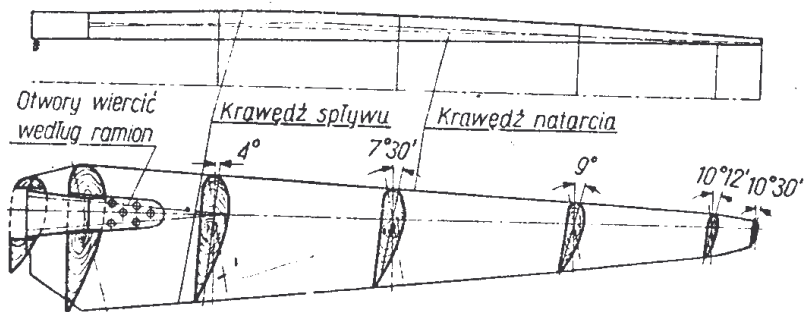
Rys. 14. Schemat wzorników do kontroli obróbki łopatki wirnika



Rys. 15. Wzornik ustawienia łopatki

Tablica V. Dopuszczalne ciśnienie na grunt kg/cm²

Nazwa gruntu	Seisty	Średni
I. Grunty piaszczyste i żwirowe		
Grunt piaszczysty suchy	2,5	2,0
„ „ wilgotny	2,0	1,5
Kürzawka sucha	2,5	2,0
„ „ wilgotna	2,0	1,5
Drobny piasek suchy	3,0	2,0
„ „ wilgotny	2,5	1,5
Piasek średniej grubości	3,5	2,5
Piasek gruby żwirkowaty	4,5	3,5
Żwir	6,0	5,0
II. Grunty gliniaste		
Gлина	6,0 ÷ 2,5	2,5 ÷ 1,0
Gлина piaszczysta	4,0 ÷ 2,5	2,5 ÷ 1,0

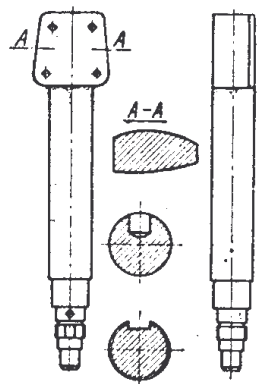


Rys. 16. Drewniana łopátka silnika wietrznego WISCHOM-RD-15

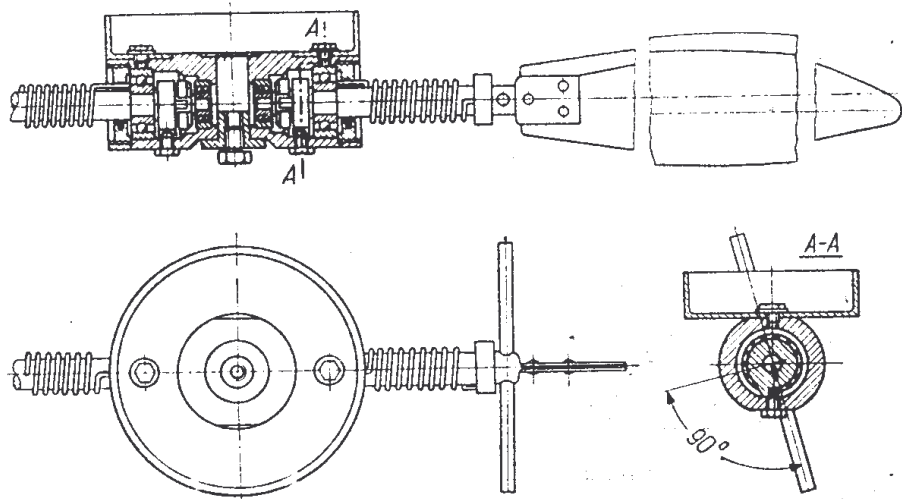
5. Wirniki silników wietrznych

Łopátki metalowe wirników o małych średnicach, wytłacza się w prasach lub wykuwa na zimno; łopátki drewniane skleja się z cienkich desek klejem kazeinowym i obrabia na kopiarkach lub ręcznie według wzorników (rys. 14). Wzornik rys. 15 służy do ustawienia łopátki pod właściwym kątem do płaszczyzny obrotu wirnika. Po obróbce i wygładzeniu powierzchni łopatek pokrywa się ją emalią lub lakierem wodoodpornym.

Drewnianą łopatkę silnika wietrznego WISCHOM RD — 15 przedstawia rys. 16, konstrukcję dźwigara rys. 17.



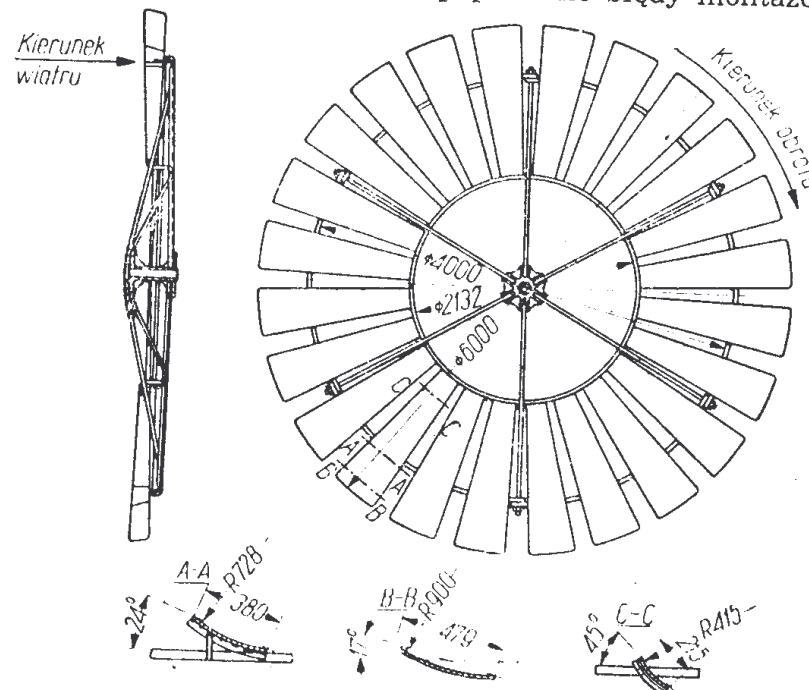
Rys. 17. Dźwigar łopátki



Rys. 18. Obrotowe zamocowanie łopatek wirnika

Piasta wirnika i umocowanie w niej łopatek stanowi odpowiedzialną i złożoną część silnika wietrznego (rys. 18).

Regulacja mocy silnika odbywa się w tej konstrukcji wirnika za pomocą przekręcenia łopatek na czopach umocowanych w łożyskach kulkowych piasty. Montaż tego urządzenia wymaga dokładności, ponieważ popełnione błędy montażowe,



Rys. 19. Wirnik wolnobieżny wielołopatkowy

mogą utrudnić przekręcenie łopatek pod wpływem regulatora, co grozi rozbieganiem się wirnika i jego zniszczeniem.

Konstrukcja wirnika wolnobieżnego przedstawiona jest na rys. 19. Łopátki wytłacza się z blachy ocynkowanej. Dla średnic $D \leq 5$ m stosuje się blachę o grubości około 1,25 mm.

6. Uwagi ogólne

Przy budowie wirników silników wietrznych o dużej mocy przy $D = 50 \div 100$ m zachodzą dość znaczne trudności rozwiązania ułożenia wału silnika i głowicy obrotowej, w której umieszczony jest cały mechanizm z przekładnią i prądnicą.

Bardzo ważnym zagadnieniem jest smarowanie. Zbiorniki smaru stałego i oleju powinny być szczelne i działać niezawodnie we wszystkich położeniach wirnika, które mogą się zmieniać w stosunku do poziomu w niektórych systemach regulacji. Smar powinien być dostosowany symi właściwościami do zmiennej temperatury otoczenia. Zwrócić również należy uwagę na niebezpieczeństwo oblodzenia wirnika, które szczególnie zagraża wirnikom

o wielkiej średnicy, ponieważ dochodzą do warstw powietrza o większej wilgotności; aby temu zapobiec stosuje się różne sposoby nagrzewania łopatek w miejscach narażonych na oblodzenie. Należy również zwrócić uwagę, by podczas postoju wirnik równomiernie pokrywał się szronem lub lodem, co uzyskać można przez okresowe pokręcanie wirnika. Nierównomierność pokrycia lodem może spowodować po uruchomieniu wirnika niebezpieczeństwo naruszenia równowagi dynamicznej; tu również stosuje się nagrzewanie łopatek.

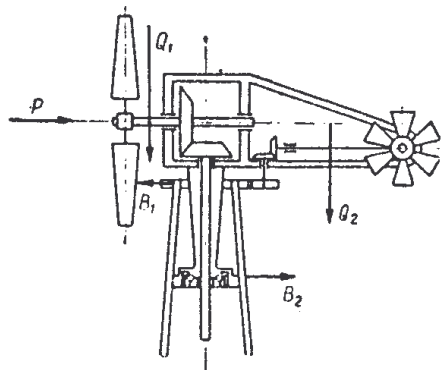
§ 5. Regulacja

Urządzenia regulacyjne silników wietrznych mają na celu: 1) ustawienie osi wirnika w kierunku wiatru, 2) dostosowanie liczby obrotów obciążenia oraz zabezpieczenie wirnika przed niszcącym działaniem wiatrów burzowych.

Prawidłowa konstrukcja silnika wietrzego powinna zapewniać pracę przy prędkościach wiatru dochodzących do $c = 20$ m/sek oraz bezpieczeństwo całej konstrukcji przy burzach $c = 30 \div 40$ m/sek.

1. Nastawianie silnika względem kierunku wiatru

W silnikach małych ($D < 10$ m) najczęściej stosuje się samoczynne nastawianie obrotowej głowicy za pomocą steru kierunkowego, zamocowanego na długim ramieniu. Stare wirniki młyńskie nastawiane są ręcznie, przez



Rys. 20. Schemat ustawienia wirnika silnikowego do kierunku wiatru za pomocą silników nastawczych

przekręcanie całego mlyna, osadzonego obrotowo na pionowym czopie.

Wirniki większe ($D > 12$ m) sterowane są za pomocą małych silników wietrznych, ustawionych w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny obrotu wirnika; 1 lub 2 silniki nastawcze, przekazują ruch za pośrednictwem odpowiedniej przekładni zębatej do mechanizmu obracającego ruchomą kabinę lub cały budynek około osi pionowej (rys. 20).

Silniki o dużej mocy ($D > 30$ m) wyposażone są przeważnie w sterowane za pomocą serwomotorów (siłowników) urządzenia elektryczne, które obracają głowicę w pożądanym kierunku.

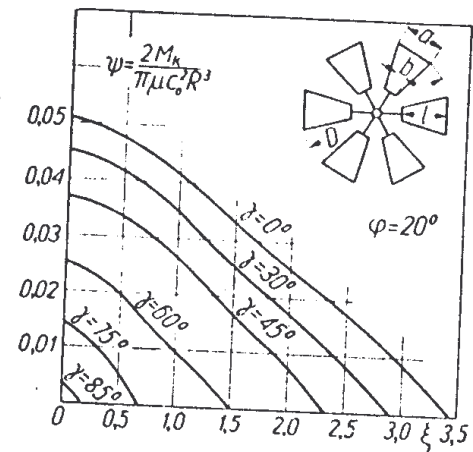
Ster powinien wolno obracać głowicę, by nie powodować zbyt dużych obciążeń w wale i łożyskach silnika z powodu reakcji żyroskopowych wirującego wirnika. Dlatego umie-

szcza się stery kierunkowe na stosunkowo długich ramionach lub stosuje się elastyczne połączenia (sprężynowe).

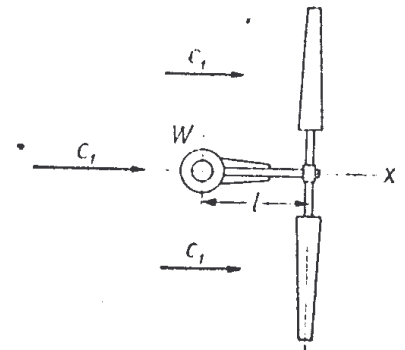
Najczęściej ster posiada obrys równobocznego trapezu o poziomej osi symetrii; wysokość równobocznego trapezu o bliższa do wirnika wynosi około $0,175 D$, podstawa większa około $0,35 D$. Wielkość steru powinna być tak dobrana, aby wychylenia wirnika nie przekraczały 10° .

Silniki nastawcze najczęściej składają się z dwóch wirników jednakowych wymiarów i konstrukcji, o średnicy $D_n = (0,2 \div 0,3) D$. Łopatki wirników płaskie, o kształcie trapezowym, zaklinowane bywają pod kątem 20° lub 30° . Krzywe charakterystyczne tych silników podaje rys. 21. Wy-

miary skrzydeł: $a = l = 2b = \frac{1}{3} D_n$. W niektórych konstrukcjach stosują samonastawienie się wirnika silnika do kierunku wiatru, bez pomocy sterów lub silników na-



Rys. 21. Krzywe charakterystyczne momentów obrotowych silnika nastawczego w zależności od różnych kątów i nachyleń kierunku wiatru do płaszczyzny obrotów



Rys. 22. Schemat samonastawiania się wirnika do kierunku wiatru przez umieszczenie wirnika za wieżą W

stawczych. W konstrukcjach tych wirnik silnika umieszczony jest nie przed, lecz za wieżą (rys. 22). Mimo pewnych zalet konstrukcja taka posiada wiele wad, między innymi: a) koło moment reakcji żyroskopowej utrudnia samonastawianie się wirnika i najczęściej dla pewności stosowano dodatkowy silnik nastawczy, c) przepływ wiatru przez wirnik silnika, jest częściowo zniekształcony i hamowany przez wieżę.

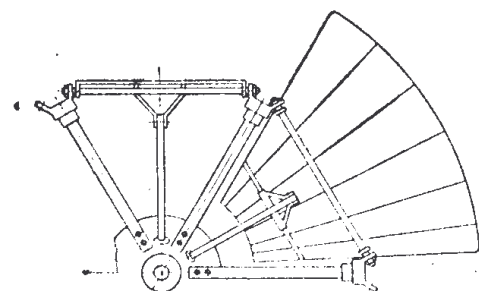
2. Regulacja liczby obrotów

Utrzymanie mniej więcej stałej liczby obrotów koła wietrzego przy zmiennej prędkości wiatru, ważne jest ze

względem na pracę maszyn napędzanych i na wytrzymałość łopatek. Jest wiele systemów regulacji silników wietrznych; jedne zabezpieczają wirnik przed niebezpieczeństwem wiatrów burzowych, inne nie zapewniają całkowicie bezpieczeństwa przy nadmiernym wzroście prędkości wiatru. W tych przypadkach konieczne jest zastosowanie dodatkowych urządzeń uruchamianych ręcznie, bądź mechanicznie a najlepiej również zautomatyzowanych, za pomocą których można wyłączyć wirnik z pod działania wiatru. Uzyskuje się to przede wszystkim przez ustawienie wirnika silnika w płaszczyźnie równoległej do kierunku wiatru.

W dawniejszych konstrukcjach liczbę obrotów regulowano albo przez zmniejszenie pola powierzchni łopatek za pomocą częściowego zdejmowania pokrycia lub przez ustawienie wirnika ukośnie do kierunku wiatru. W późniejszych wykonaniach część pokrycia skrzydeł składa się z ruchomych deseczek, które pod działaniem urządzeń regulujących ustawiały się równoległe do kierunku wiatru. W ten sposób malała siła naporu a równocześnie powstawały dodatkowe opory hamujące ruch wirnika.

Opisane zasady regulacji liczby obrotów wystarczały do silników młyńskich, lecz okazały się nieodpowiednie w większych silnikach wietrznych przeznaczonych do napędu prądnic. Wolnobieżne silniki wietrzne o dużej ilości łopatek, wymagały nowego systemu samoczynnej regulacji.



Rys. 23. Schemat regulacji Haladaya

rotów powoduje obrót łopatek. Można też wykonać to ręcznie, za pomocą mechanizmu poruszanego z dołu wieży.

System *Eclipse*, który wyparł prawie całkowicie system *Haladaya* polega na zmianie ustawienia płaszczyzny wirnika względem kierunku wiatru. Rozróżnia się dwie odmiany regulacji *Eclipse*: 1) ze sterem regulacyjnym (rys. 24), 2) mimośrodowym zawieszeniem wirnika (rys. 25).

W pierwszej — zmiana położenia wirnika względem kierunku wiatru następuje pod wpływem naporu powietrza na

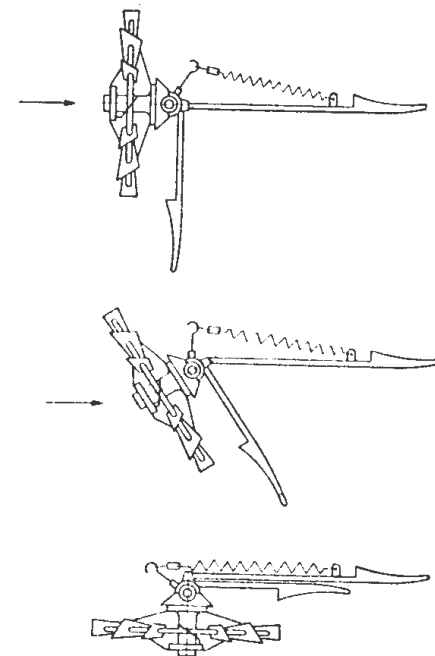
System *Haladaya* (rys. 23) polega na wyłączeniu pewnej liczby łopatek spod działania wiatru. Wyłączanie łopatek odbywa się grupami, położonymi symetrycznie w stosunku do osi obrotu. Do regulacji samoczynnej wyzyskana jest siła odśrodkowa, odpowiednio obliczonych ciężarów, która przy pewnej liczbie ob-

ster regulacyjny, który wystaje poza średnicę wirnika i ustawiony jest równoległe do płaszczyzny obrotu. W warunkach normalnej pracy silnika napór wiatru na ster regulacyjny równowagi sprężyna. Pole powierzchni steru wynosi zazwyczaj $0,02 \div 0,04$ przekroju strumienia powietrza przepływającego przez wirnik. W celu wyłączenia silnika dociąga się za pomocą linki ster regulacyjny do steru kierunkowego, przez co wirnik silnika ustawia się równoległe do wiatru. Pęknięcie sprężyny steru regulującego nie jest niebezpieczne, gdyż powoduje wyłączenie silnika. Drugą odmianą regulacji *Eclipse* polega na tym, że napór wiatru na wirnik działający na ramieniu *e* względem osi obrotu *A* równowagi się siłą sprężyny. Przy zwiększonym naporze wiatru, płaszczyzna wirnika silnika ustawia się pod pewnym kątem do kierunku wiatru, skutkiem czego liczba obrotów może pozostawać mniej więcej stała niezależnie od wzrostu prędkości wiatru.

Mimośrodowe zawieszenie wirnika zastosować można również w płaszczyźnie pionowej, jak to przedstawiono na rys. 26.

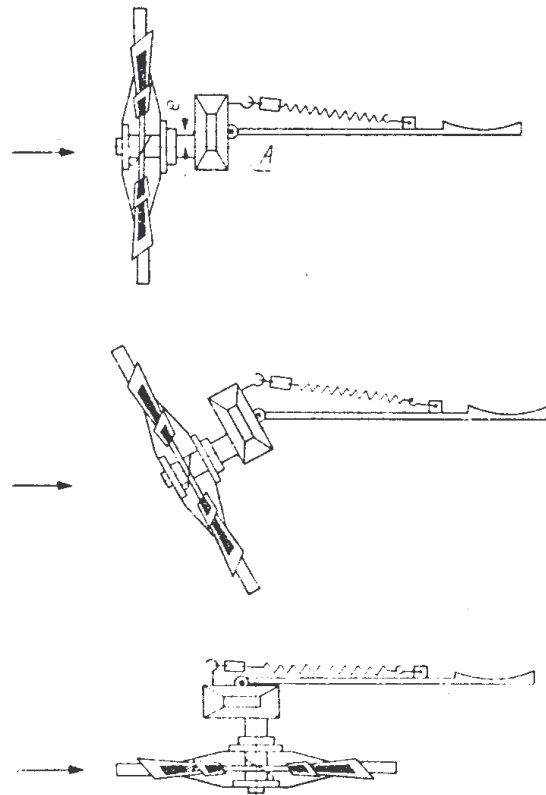
System regulacji *Eclipse* odznacza się prostotą konstrukcji i pewnością działania; stosowany do silników wolnobieżnych małej mocy zmniejsza moment przy wzroście siły wiatru i zabezpiecza silnik przed rozbieganiem się. System ten nie znalazł zastosowania do regulacji silników o większej mocy, ponieważ konstrukcja wypada zbyt ciężka.

W systemie *Billau* (rys. 27) stosuje się na końcach łopatek specjalne hamulce aerodynamiczne, które w normalnych warunkach pracy ustawione są równoległe do kierunku prędkości obwodowej. Przy wzroście liczby obrotów, siły odśrodkowe działające na hamulce pokonują siły oporu sprężyn i wychylają klapy z położenia normalnego, ustawiając je wzdłuż łopatki. Na skutek wychylenia się hamulców zwiększa się opór wirnika co powoduje zmniejszenie liczby



Rys. 24. Schemat regulacji *Eclipse* ze sterem regulacyjnym

obrotów w granicach $10 \div 15\%$. Hamulce aerodynamiczne umieszczają się w odległości $\frac{2}{3} R$ od osi obrotu. System Billau



Rys. 25. Schemat regulacji Eclipse z mimośrodowym umocowaniem wirnika

Regulacja przez zmianę kąta ustawienia łopatek

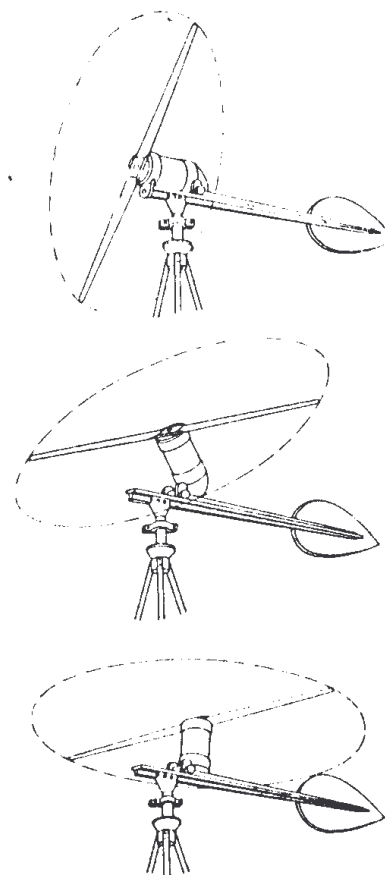
W związku z budowanymi obecnie szybkoobrotowymi silnikami, o małej liczbie łopatek, najbardziej korzystna okazała się regulacja liczby obrotów przez obrót łopatek około osi podłużnej, ponieważ spełnia ona następujące warunki:

- zapewnia rozruch silnika nawet przy małych prędkościach wiatru,
- zapewnia normalną regulację mocy silnika,
- ogranicza moc i liczbę obrotów przy dużych prędkościach wiatru,
- powoduje zatrzymanie wirnika przy wiatrach burzowych. Obrót łopatek wymaga stosunkowo małej pracy, ponieważ występujące przy tym momenty obrotowe, mogą być

zredukowane przez odpowiednią konstrukcję łopatek. Małe masy i niewielka praca wymagają niewielkich urządzeń regulacyjnych.

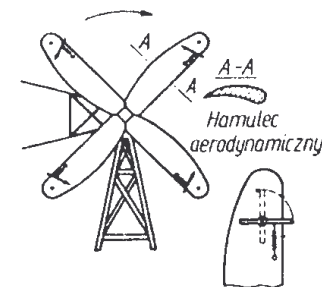
System Billau stosowany jest do regulacji silników szybkoobrotowych przy $\xi > 4$ i średnicach $D < 8$ m; nie chroni silnika wietrznego od przeciążeń osiowych, ani od zniszczenia wirnika przy prędkościach wiatru większych niż 20 m/s. System Perli (rys. 28) jest odmianą regulacji Billau, z tą różnicą, że hamulce aerodynamiczne umieszczone są na końcach łopatek. Zakres zastosowania tego systemu $\xi > 4,5$, $D < 10$ m. Ponieważ system ten nie zabezpiecza przed rozbieganiem się wirnika, podobnie jak i system Billau, należy stosować dodatkowe zabezpieczenie na wypadek wiatrów burzowych ($c_0 = 20 \div 40$ m/sek).

Wadą tego systemu jest konieczność większego odsunięcia wirnika od wieży — niż u wirników o łopatkach nieruchomych.

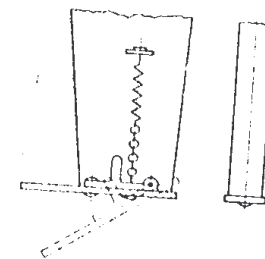


Rys. 26. Schemat regulacji Eclipse z poziomą osią obrotu

Wadą tego systemu jest konieczność większego odsunięcia wirnika od wieży — niż u wirników o łopatkach nieruchomych.



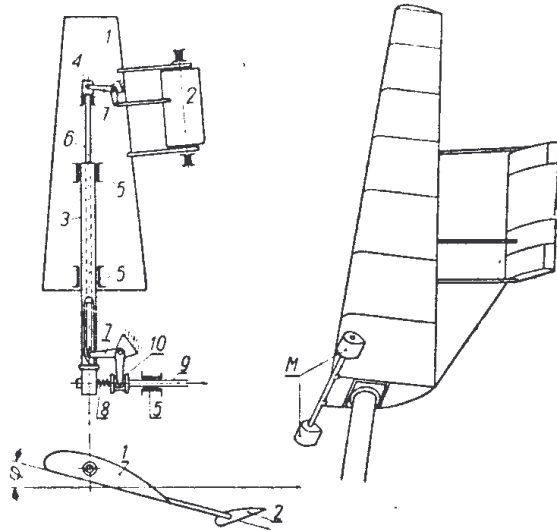
Rys. 27. Schemat regulacji Billau



Rys. 28. Schemat regulacji Perli

Dla wirników o średnicy $D < 8$ i $\xi > 4$ stosuje się system Grohmana, polegający na obracaniu części końcowych łopatek do położenia równoległego do prędkości wiatru. Obrót części końcowych łopatek następuje pod wpływem siły odśrodkowej ciężarów regulacyjnych przy wzrastającej liczbie obrotów wirnika. Ten system utrzymuje mniej więcej stałe obroty silnika w granicach $5 \div 12\%$, zabezpiecza silnik od przeciążeń i charakteryzuje się dość dużym momentem rozruchowym. Jest prosty i tani, nie zabezpiecza jednak przed rozbieganiem koła przy prędkościach wiatru $c_0 > 20$ m/sek, dlatego wymaga dodatkowych urządzeń wyłączających wirnik spod działania wiatru.

System Sabinina i Krasowskiego (rys. 29) polega na obracaniu łopatek za pomocą przymocowanych do nich skrzydełek stabilizacyjnych o powierzchni $(0,22 \div 0,3) F_s$; F_s — powierzchnia łopatki. Większe wartości dają czulszą regulację,



Rys. 29. Schemat regulacji Sabinina — Krasowskiego; 1 — łopatka, 2 — stabilizator, 3 — dźwigar, 4 — ciężar, 5 — łożysko, 6 — cięgi, 7 — dźwignia kątowna, 8 — sprężyna, 9 — wał silnika, 10 — tuleja, M — ciężary wyrównawcze

W silniku wietrznym WIME D-30 zastosowano system Sabinina do obracania tylko części końcowej łopatki. Długość nastawialnej części łopatki wynosi $1/3$ całkowitej długości. Liczba obrotów zmienia się w granicach 2—10% liczby normalnej.

§ 6. Głowice silników wietrznych

Głowicą silnika wietrznego nazywa się tę część urządzenia, w której mieszczą się łożyska wału oraz przekładnie zębate. Głowica może być osadzona obrotowo na wieży stałej lub umocowana na stałe w wieży obrotowej. W silnikach wietrznych o większej mocy głowica obrotowa stanowi okazałych wymiarów kabinę o kształtach opływowych, w której mieszczą się łożyska wału, przekładnia, prądnica i mechanizm do obrotu głowicy.

Zależnie od rodzaju odbiorników mocy, silniki wietrzne przekazują ruch za pomocą przekładni na wał pionowy lub poziomy. Elektrownie wietrzne posiadają prądnice o wale poziomym w głowicy obrotowej. Napęd urządzeń młyńskich, pomp oraz innych urządzeń mechanicznych odbywa się najczęściej za pośrednictwem wału pionowego.

Głowice silników wietrznych o małej mocy przedstawione są na rys. 30 i rys. 31. Przekładnie stożkowe zębate, wykonane są przeważnie z żeliwa.

Silniki szybkoobrotowe o małym momencie rozruchowym posiadają na wale poziomym lub pionowym odśrodkowe samoczynne sprzęgło tarciove, które włącza odbiornik mocy po uzyskaniu przez silnik pełnej liczby obrotów.

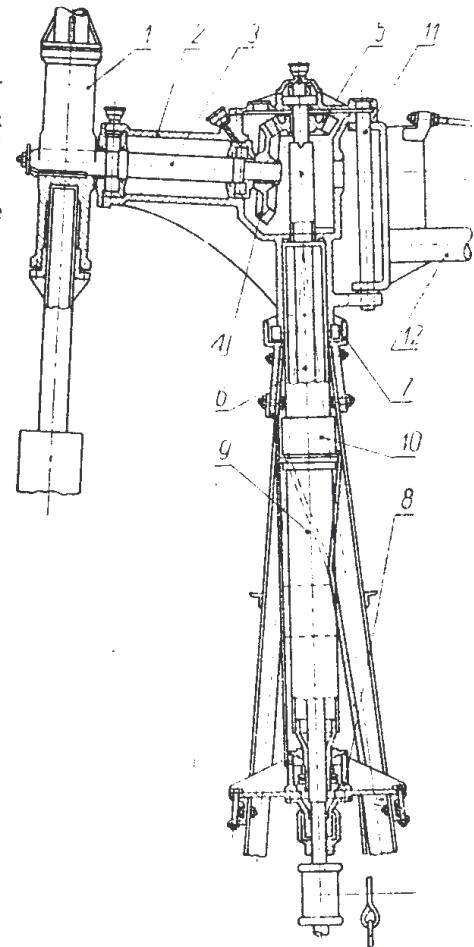
Opis części głowic i mechanizmów umieszczono w rozdziale 8 i w rozdziale 9.

§ 7. Wieże

Wysokość wieży zależy od średnicy wirnika silnika wietrznego i od miejsca ustawienia urządzenia. Silniki wietrzne ustawia się zasadniczo poza obrębem osiedli, z wyjątkiem instalacji mniejszej mocy, które służą do zasilania radiowęzłów. Silniki takie montowane są na dachach najwyższych budynków okolicy.

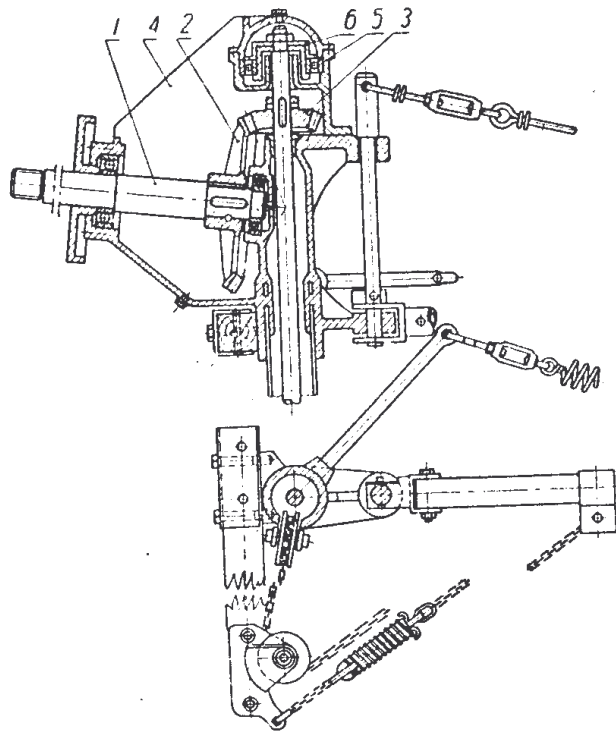
Wirnik powinien się znajdować na 2÷3 m powyżej najwyższej przeszkody, znajdującej się w promieniu 300 m od silnika (rys. 32). Rozstawienie nóg wieży $b = (0,22 \div 0,25) H$ przy $H > 10$ m, $b = 2a = 0,3 H$ przy $H < 10$ m. Gdy ustawia się kilka silników wietrznych, wtedy wzajemna odległość powinna być większa niż 15 D. Podwyższenie wieży umożliwia wyzyskanie większej energii wiatru, lecz powiększa koszt budowy.

Istnieją różne systemy wież, koszt wieży jest naj-



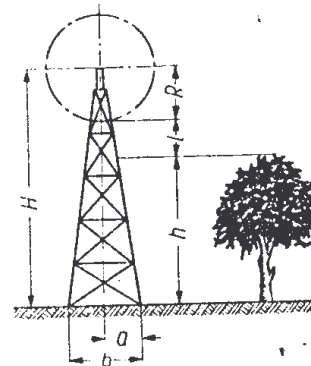
Rys. 30. Głowica silnika wietrznego WIME-D-15; 1 — dźwigar, 2 — ka-dłub, 3 — wał, 4 i 5 — koła stożkowe, przekładni zębatej, 6 — wał pionowy, 7 — łożysko górne głowicy, 8 — łożysko dolne głowicy, 9 — rura oporowa, 10 — tuleja, 11 — zaczep steru, 12 — dźwigar steru

mniejszy, gdy belki przekątne pracują na rozciąganie. Wieże budowane są ze stali, żelbetu i drewna.



Rys. 31. Głowica silnika wietrznego WISCHOM-PD-5; 1 — wał silnika, 2 i 3 koła stożkowe przekładni zębatej, 4 — kadłub głowicy, 5 — łożysko górne głowicy

pracy wieży drewnianej, wynosi około 30 lat, wieży stalowej około 50 lat. Wieże drewniane spotyka się w okolicach bogatych w lasy, odległych od ośrodków przemysłowych, z których transport części gotowych wieży stalowej jest zbyt kosztowny. Wieże drewniane należy pokrywać co 3 ÷ 4 lata karbolineum; farby olejne nie nadają się do konserwacji. Podstawa wieży jest szczególnie narażona na butwienie i dlatego poleca się nogi wieży drewnianej umocować w szynach żelaznych na 1/2 m powyżej poziomu ziemi. Szyny zalewa się cementem w fundamencie betonowym.



Rys. 32. Określenie wysokości wieży

Ważnym czynnikiem jest wybór materiału konstrukcyjnego, który zależy od warunków klimatycznych i wielkości silnika wietrznego. W okolicach suchych zaleca się konstrukcje stalowe, natomiast w rejonach nadbrzeżnych — żelbetowe, odporne na korozję. Wieże betonowe mają kształt cylindryczny, który wpływa na zmniejszenie ich oporu.

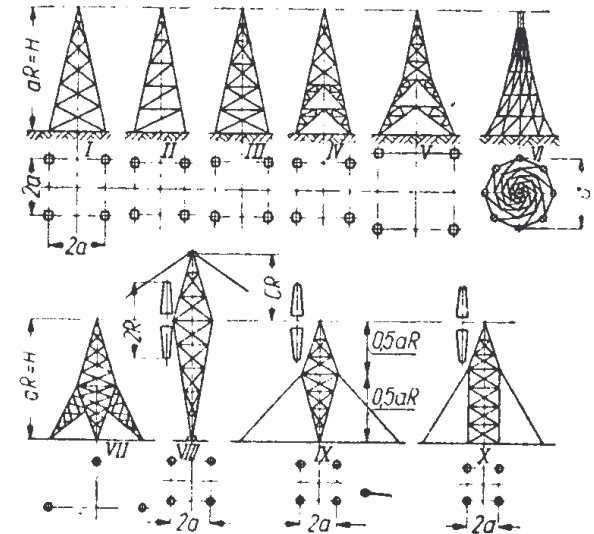
Wieże drewniane stosowane są do małych silników wietrznych. Należy zwrócić uwagę przy budowie, by budulec był w dobrym gatunku. Okres

Rys. 33 — przedstawia dziesięć różnych schematów konstrukcji wież; pierwsze siedem tworzą grupę A, wieża VIII zalicza się do grupy B, IX i X stanowią grupę C.

Wieże I—III stosuje się zwykle do silników o mocy $N_e < 10$ KM.

Wieże IV—VIII są typowe w tej grupie dla silników o mocy większej.

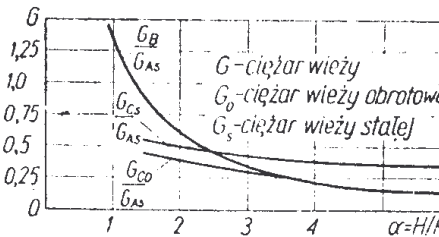
Grupę B i C stanowią wieże masztowe umocowane za pomocą lin naciagowych. Na rysunku 34 przedstawiono wykresowo stosunek ciężaru wieży masztowej (IX, X, XI) do ciężaru wieży z grupy A w zależności od H/R



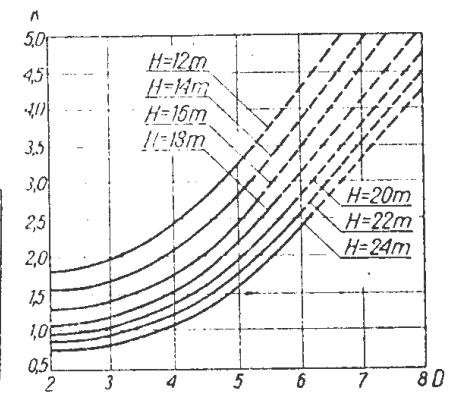
Rys. 33. Schematy konstrukcyjne wież

Pierwszy wskaźnik u dołu litery G wskazuje grupę, drugi:

o — wieża obrotowa, s — wieża stała z obrotową kabiną. Orientacyjny ciężar wieży stalowej grupy A można obliczyć z wzoru



Rys. 34. Wykres porównawczy wież



Rys. 35. Wykres współczynnika K

$$G = \frac{K}{10} (16,5 HR^2 + 0,723 H^3 + 5,3 R^3) \text{ kG} \quad [24]$$

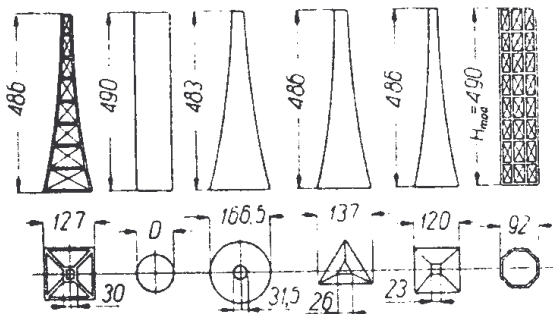
gdzie H — wysokość wieży w m, R — promień koła wirnika w m, K — współczynnik z rys. 35.

Napór wiatru na wieżę oblicza się na podstawie wyników badań przeprowadzonych na modelach wież w tunelu aero-

dynamicznym. Wieże należy liczyć na wytrzymałość pod obciążeniem wiatru przy prędkości $c_0 = 40$ m/sek, na moment skręcający i napór wiatru na wirnik wyłączony z pracy przy wietrze burzowym. Napór wiatru

$$P = R_x \left(\frac{H}{H_m} \right)^2 \cdot c_0^2 \quad [25]$$

gdzie H — wysokość wieży w m, H_m — wysokość modelu w m, R_x — współczynnik zależny od kształtu i budowy wieży, ustalony doświadczalnie.



Rys. 36. Modele typowych wież

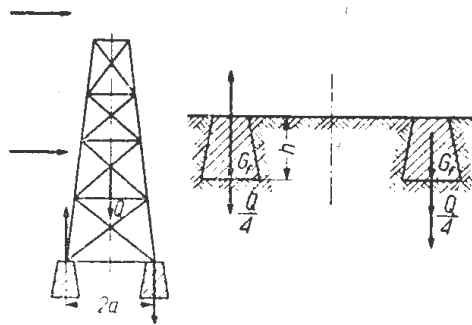
- a) wieża kwadratowa
- b) „ pełna okrągła
- c) „ pełna stożkowa
- d) „ trójkątna pełna krawędzią do wiatru
- e) „ trójkątna pełna krawędzią od wiatru
- f) „ czworokątna pełna — krawędzią lub ścianą pod wiatr
- g) „ sześciokątna kratowa

Współczynniki te oraz wysokość H_x położenia środka naporu wypadkowego P dla kilku typowych modeli wież według rys. 36 są następujące:

R_x	H_x
0,00085	0,428H
0,00105	0,500H
0,00130	0,412H
0,00170	0,320H
0,029	0,285H
0,0024	0,298H
0,0014	0,494H

Fundament pod wieżę wykonuje się jak przedstawiono na rys. 37. Podstawa fundamentu powinna mieć taką powierzchnię by nacisk jednostkowy nie przekraczał liczb podanych w tabeli VI.

Nacisk jednostkowy oblicza się z siły P_f , na które składa: ciężar całości urządzenia Q , ciężar fundamentu G_f , oraz reakcje zginającego momentu M , wywołanego naporem wiatru.



Rys. 37. Fundament wieży

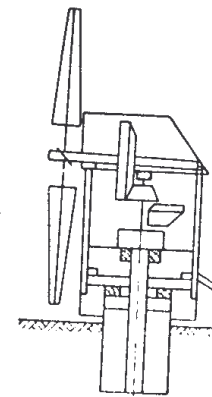
Dla wieży kwadratowej, przy działaniu wiatru wzdłuż przekątnej

$$P_f = \frac{Q}{4} + G_f + \frac{M}{2,8B} \quad [26]$$

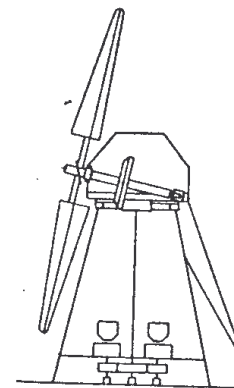
Głębokość fundamentu h powinna być większa niż głębokość zamarzania gruntu.

§ 8. Młyny wietrzne

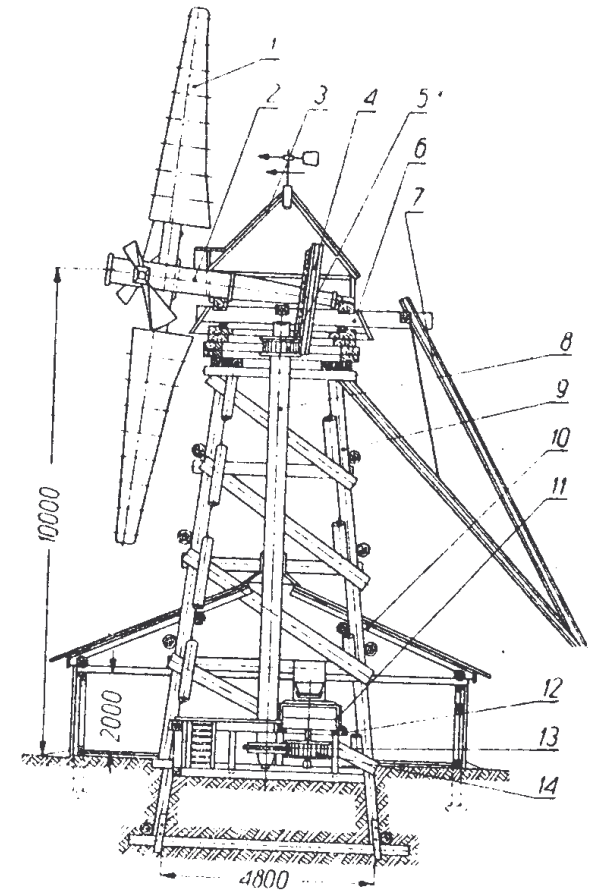
Rozróżnia się dwa zasadnicze typy młynów wietrznych: 1) obrotowy (rys. 38), 2) stały z obrotową głowicą (rys. 39).



Rys. 38. Schemat młyna obrotowego (koźłowego)

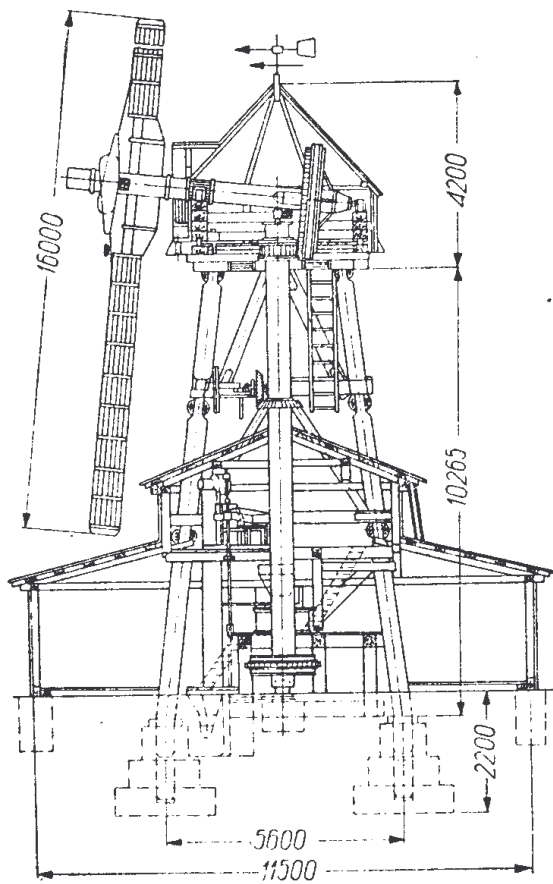


Rys. 39. Schemat młyna z obrotową głowicą



Rys. 40. Młyn wietrzny typu WIME: 1 — wirnik, 2 — wał główny, 3 — głowica, 4 i 5 — koła przekładni, 6 — rama głowicy, 7 — wodzidło, 8 — wał pionowy, 9 — wieża, 10 — budynek młyna, 11 — żarna, 12 — podstawa, 13 i 14 — koła przekładni dolnej

Młyny obrotowe są starej konstrukcji; obracają się na stałym czopie dębowym, którego oś przechodzi przez środek ciężkości młyna. Nastawienie wirnika do kierunku wiatru odbywa się ręcznie, przez obrót młyna za pomocą umocowanej do niego belki o odpowiedniej długości. Istnieją też młyny obrotowe, które zbudowane są na podstawie w kształcie pierścienia; pierścień podstawowy spoczywa na rolkach, umożliwiając obrót całego budynku.



Rys. 41. Młyn wietrzny WIME-D-16

się z trzech żerdzi. W obudowanej dolnej części wieży drewnianej poniżej zasięgu łopatek znajduje się pomieszczenie młyna.

Rys. 41 — przedstawia uniwersalny typ młyna wietrzego WIME-16. Średnica koła $D = 16$, ilość łopatek $i = 4$, szerokość łopatek $b = 2$ m, moc $N_u = 25$ KM przy $c_0 = 8$ m/sek, $\eta = 0,30$, $\xi = 2,9$, $n = 26$ obr/min.

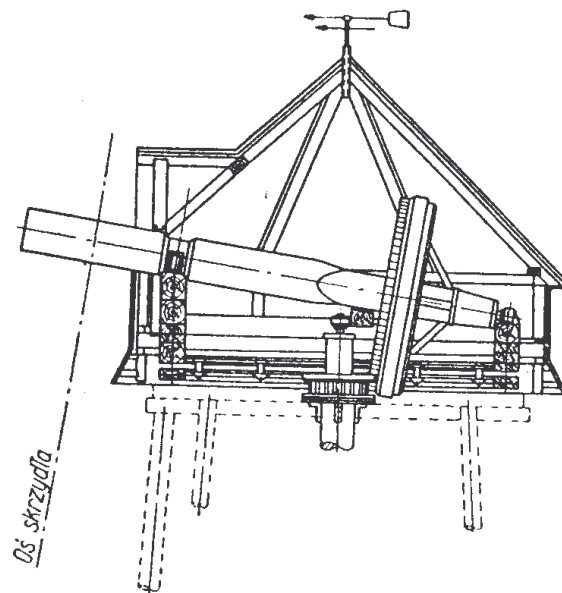
Młyny stałe z obrotową głowicą, tzw. holenderskie, wymagają mniejszych sił do obracania głowicy i umożliwiają umieszczenie wirnika na wyższym poziomie.

Przekładnia zębata z wału poziomego na wał pionowy jest stożkowa. Typową konstrukcją młyna wietrzego stanowi młyn typu WIME (rys. 40) opracowany do seryjnej produkcji w ZSRR.

Wirnik silnika ma cztery łopatki z profilem pół-opływowym. Wał główny nachylny jest do poziomu pod kątem $5 \div 8^\circ$, ze względu na pochylenie nóg wieży. Uruchomienie, zatrzymanie silnika oraz zabezpieczenie przeciwburzowe odbywa się przez obrót głowicy za pomocą ręcznego wodzidła. Wodzidło składa

Nastawienie głowicy do kierunku wiatru odbywa się za pomocą specjalnej przekładni. Opis budowy łopatki podano w § 4 p. 4

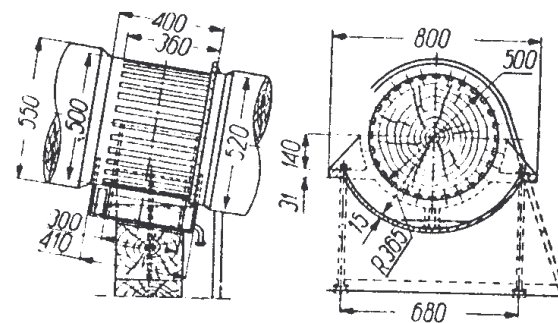
Głowica młyna WIME zbudowana jest na ramie (rys. 42) składającej się z dwóch belek podłużnych i dwóch poprzecznych, na których umocowane są łożyska wału poziomego i pionowego. Od dolnej strony ramy umocowana jest obręcz, która spoczywa na rolkach spoczywających na rolkach obręczy przytwierdzonej do wieży.



Rys. 42. Głowica młyna WIME-D-16

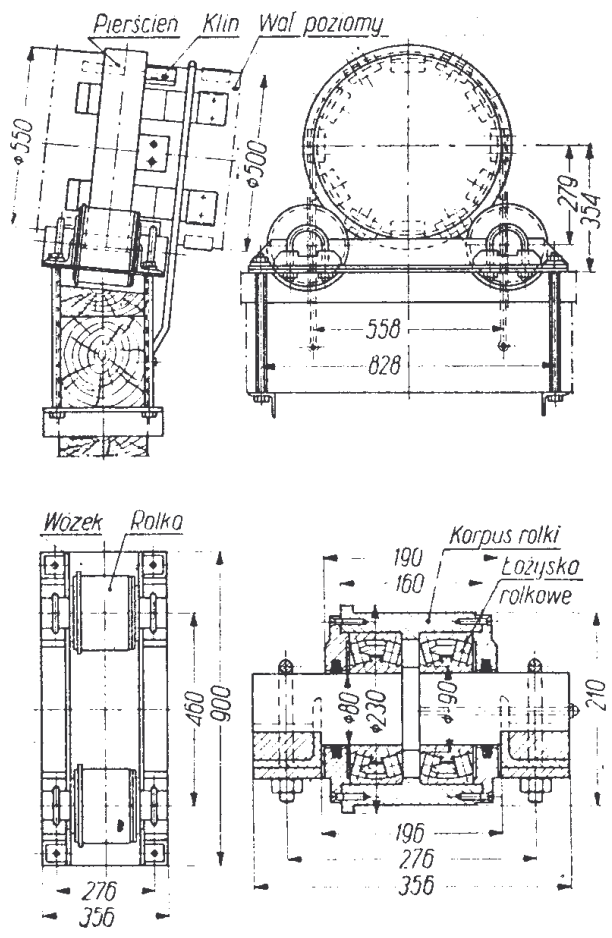
Konstrukcja poszczególnych części silników wietrznych dostosowanych do młynów jest przeważnie oparta na tych samych rozwiązaniach.

Wał wykonany jest z pełnego kłosa dębowego o średnicy 550 mm. Łożysko przednie jest żeliwne i posiada zbiornik oleju, z którego smar podawany jest czerpakiem, umocowanym do przedniej części czopa, zaopatrzonego na powierzchni w stalowe listewki (rys. 43). Lepsze rozwiązanie przewiduje łożyska rolkowe (rys. 44). Pierścień naciągnięty na wał



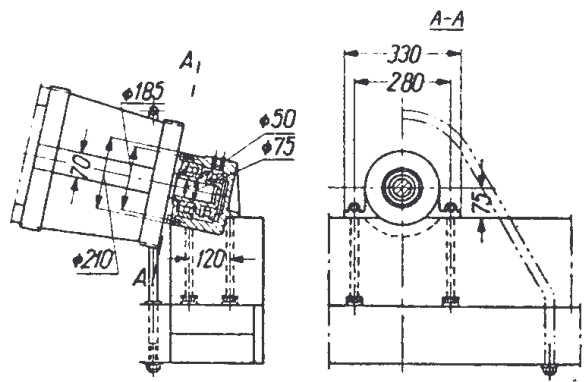
Rys. 43. Przednie łożysko wału głównego

toczy się na dwóch rolkach, których osie podparte są w łożyskach rolkowych. Łożysko tylne — kulkowe promieniowo-oporowe, umocowane jest w kadłubie żeliwnym (rys. 45) przytwierdzonym do ramy czterema śrubami.



Rys. 44. Przednie łożysko rolkowe wału głównego

wał 7 za pośrednictwem pary kół walcowych o zębach prostych przekazywany jest na koło 9, które zazębia się wewnątrz z zębatką przymocowaną do obręczy głowicy i powoduje jej obrót. Koła cierne 2 i 3 można włączyć lub wyłączyć za pomocą dźwigni 10. Ręczny mechanizm łańcuchowy 11 i 12 służy do ustawienia wirnika silnika do kierunku wiatru. Urządze-



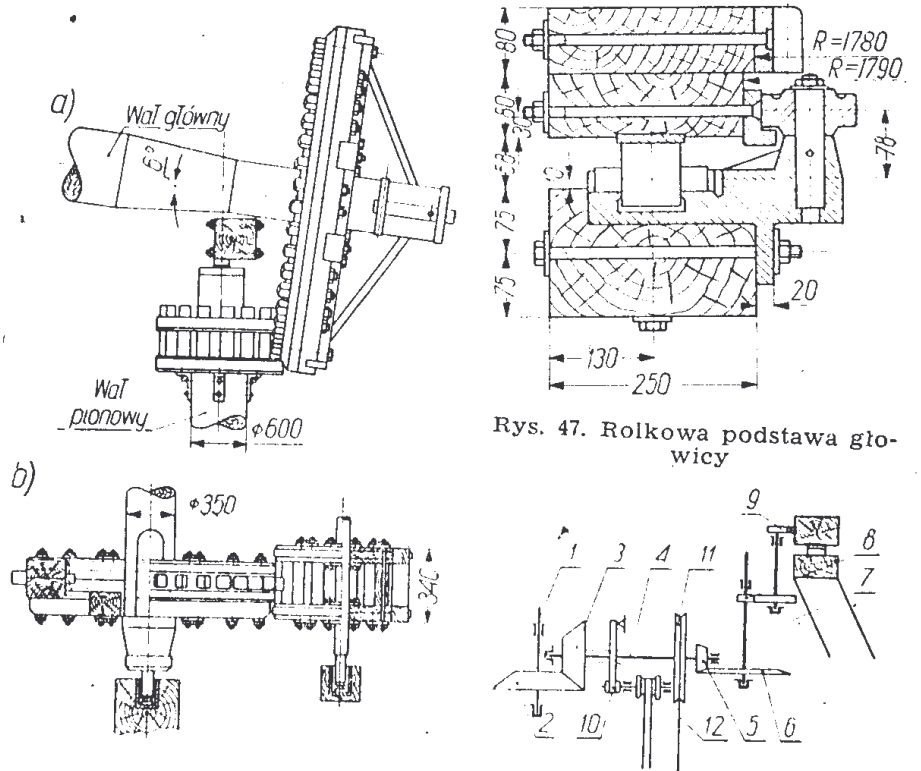
Rys. 45. Tylnie łożysko kulkowe wału głównego

Przekładnia w konstrukcji drewnianej jest normalnym rozwiązaniem stosowanym w młynach wietrznych (rys. 46). Stosunek przełożenia górnej pary kół 1:3, dolnej pary 1:2,34. Całkowite przełożenie wynosi 1:7.

Rolkowa podstawa głowicy składa się z 16 rolek oporowych poziomych i 8 rolek kombinowanych z rolek poziomych i pionowych (rys. 47).

Mechanizm obrotowy głowicy (rys. 48) działa w sposób następujący: z wału pionowego 1, na którym umocowane jest cierne koło stożkowe 2 współpracujące z kołem 3 przenosi się ruch na wał poziomy 4. Z końca tego wału, za pomocą kół stożkowych 5 i 6 obracany jest wał pionowy 7. Obrót

nie umożliwia samoczynne zmiany położenia wirnika, względem kierunku wiatru w przypadku burzy. Koła cierne 2 i 3 nie dają zupełnej pewności; działają dobrze, gdy opory obrotu głowicy nie przekraczają pewnej wielkości. W przeciwnym przypadku zachodzi ślizganie się drewnianych kół, co może nawet spowodować zapalenie i grozi pożarem. Dlatego w nowszych konstrukcjach drewniane koła tarcie zastąpiono stożkowymi kołami zębatymi 1:2 (małe kółko na wale pionowym). Rozwiązanie takie wymaga włączenia kół w stanie spoczynku, względnie za pośrednictwem specjalnego sprzęgła, łączącego części dzielonego wału 4.



Rys. 47. Rolkowa podstawa głowicy

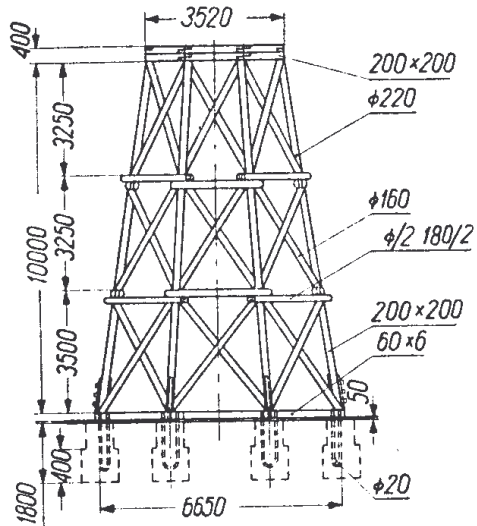
Rys. 46. Przekładnie w konstrukcji drewnianej: a) - górna, b) - dolna

Rys. 48. Schemat mechanizmu obrotu głowicy

Wieża silnika WIME D-16 zbudowana jest na 8-nogach (rys. 49) co daje dużą odporność na działanie momentu skręcającego i umożliwia przybliżenie wirnika do łożyska przedniego.

Z nowszych konstrukcji silników wietrznych dla młynów na uwagę zasługują następujące typy: UNDIM D-10 (rys. 50), CAGI D-10 (rys. 51) oraz udoskonalony WIME D-16 (rys. 52) wszystkie budowane w 1945 r. UNDIM D-10 — według projektu S. B. Perli posiada konstrukcję mieszaną drewniano-stalową. Regulacja obrotów samoczynna za pomocą kłap hamulcowych, umieszczonych poprzecznie na końcu skrzydeł.

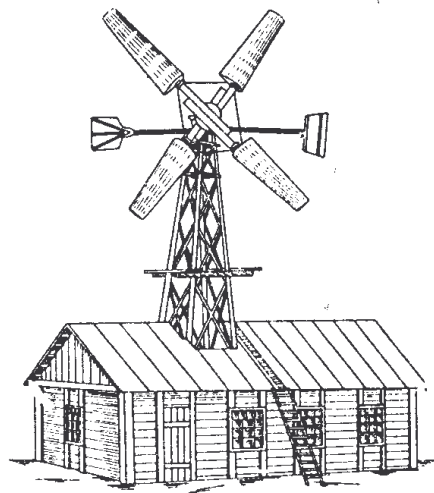
Obrotowa głowica żeliwna mieści przekładnię zębatą oraz łożyska kulkowe wału głównego i pionowego.



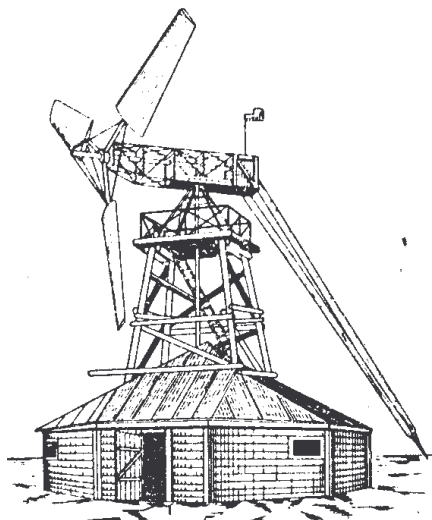
Rys. 49. Wieża drewniana ośmiokątna

CAGI D-10 posiada trójłopatkowy wirnik o profilu opływowym łopatek. Do przeniesienia ruchu z wału poziomego silnika na wał pionowy — zastosowano reduktor samochodowy. Obrotową głowicę nastawia się na kierunek wiatru ręcznie za pomocą wodzidła. W dolnej części wału pionowego osadzone jest koło pasowe, z którego napęd przechodzi na wały pionowe kamieni młyńskich.

WIME D-16 z r. 1945 zastosowano do młyna, zbudowanego w kształcie cylindrycznym z cegły. Maszyny młyńskie roz-



Rys. 50. Młyn wietrzny typu UNDIM-D-10



Rys. 51. Młyn wietrzny typu CAGI-D-10

mieszczono na I i II piętrze; na parterze jest odbiór mąki. W celu wykorzystania silnika wietrznego do napędu różnych maszyn rolniczych, istnieje dodatkowa przekładnia z wyprowadzonym z parteru na zewnątrz kołem pasowym. Na III piętrze znajdują się prądnica i akumulatornia, które służą do oświetlenia młyna. Regulacja liczby obrotów odbywa się za pomocą poprzecznie umieszczonych hamulców aerodynamicznych, które ustawiają się prostopadle do kierunku prędkości obwodowej — pod działaniem sił odśrodkowych.

§ 9. Nowoczesne silniki wietrzne

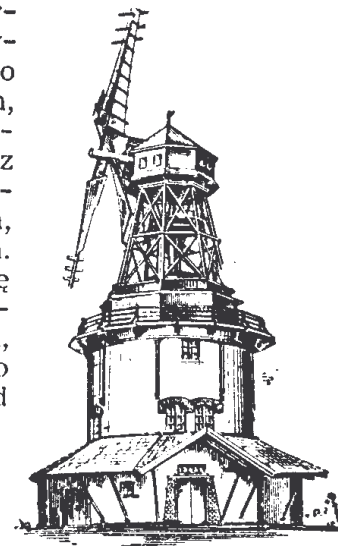
Nowoczesne większe silniki wietrzne konstrukcji szybkobieżnej służą do napędu prądnic prądu stałego lub prądu zmiennego. Przy prądzie stałym stosuje się zawsze baterie akumulatorów, które służą do wyrównania zmienności energii dostarczonej przez wiatr. Prądnice asynchroniczne, pracujące na wspólną sieć elektryczną z innymi elektrowniami, wymagają czulej regulacji i dlatego są rzadziej stosowane.

Prądnica prądu stałego może pracować przy zmiennej liczbie obrotów i zmiennej mocy. W czasie słabego wiatru, który nie wystarcza do napędu maszyn młyńskich, można je wyłączyć, a silnik wietrzny napędza tylko prądnicę ładującą akumulatory. Podczas nadwyżki energii wiatru w stosunku do zużycia przez maszyny — można dodatkowo obciążyć silnik przez włączenie prądnicy. Prądnica prądu stałego czerpie prąd z akumulatorów, pracuje jako silnik i może uzupełniać niedobór energii wiatru.

Silniki wietrzne zależnie od mocy dzieli się na grupy: do 2 kW, od 2 ÷ 100 kW, od 100 ÷ 1000 kW, ponad 1000 kW.

1. Silniki wietrzne o mocy do 2 kW

Małe silniki o mocy 100 ÷ 2000 W przeznaczone są do ładowania baterii akumulatorów i oświetlenia mieszkań w okolicach nie zelektryfikowanych. Silniki tego typu są szybkobieżne ($\xi \approx 6$) i posiadają wirniki o dwóch wąskich łopatkach; najczęściej spotykane napędzają prądnicę 100 W, 12 Volt bezpośrednio sprzężoną z wałkiem silnika. Prądnica pracuje na baterię akumulatorów o pojemności około 130 Ah. Regulacja liczby obrotów odbywa się za pomocą systemu Eclipse — lub przez zmianę kąta ustawienia łopatek.



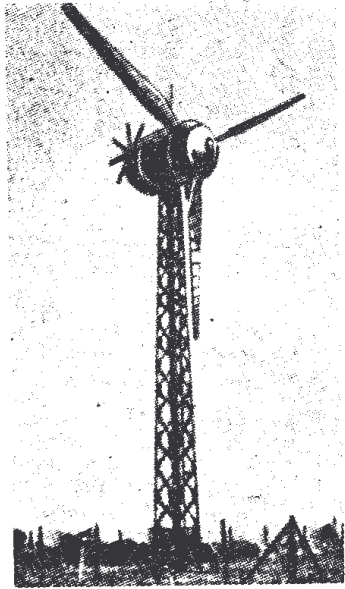
Rys. 52. Udoskonalony młyn wietrzny typu WIME-D-16

2. Silniki wietrzne o mocy od 2 ÷ 100 kW

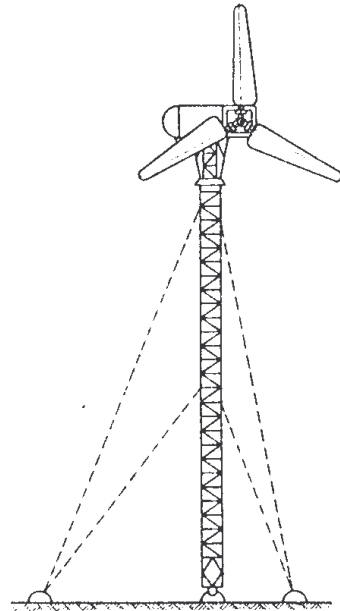
Silniki tej wielkości są najbardziej rozpowszechnione. Do tej grupy należą omówione w rozdziale 8 silniki do młynów i stosowane do celów rolniczych (np. typ WIME o średnicy 12, 16 i 30 m).

Niemieckie konstrukcje mają przeważnie prądnicę w głowicy obrotowej. Rys. 53 przedstawia silnik trójłopatkowy o średnicy $D = 15$ m, wysokość wieży $H = 15$ m, $\xi = 6$ przy pełnym obciążeniu. Regulacja liczby obrotów odbywa się przez obrót łopatek około osi podłużnej. Łopatki mają kształt trapezowy o podstawie większej przy piąście. Gru-

bość łopatki $\delta = \frac{1}{5} b$ (b — szerokość łopatki).



Rys. 53. Silnik wietrzny
 $D = 15$ m, $i = 6$



Rys. 54. Silnik wietrzny
25 kW, $D = 21$ m

Nastawienie na wiatr jest samoczynne, ponieważ wirnik umieszczony jest „za wieżą”. Dla pewności nastawienia zastosowano dwa dodatkowe nastawcze wirniczki, które poruszają mechanizm obracający głowicę. Głowica posiada kształt cylindrycznej kabiny o zakończeniach stożkowatych. Pod-

stawa kabiny opiera się na łożysku kulkowym, którego pierścien jest tak wielki, że umożliwia dostęp do kabiny od strony wieży. W kabinie znajduje się: ułożyskowanie wału wirnika silnika, dwustopniowa przekładnia, prądnica oraz mechanizm regulujący. Przełożenie przekładni 1 : 34. Regulacja polega na obrocie łopatek około ich podłużnej osi, i działa samoczynnie pod wpływem regulatora. Specjalny mechanizm ręczny służy do obrócenia łopatek aż przyjmą położenie równoległe do kierunku wiatru, w celu wyłączenia silnika z pracy.

Rys. 54 przedstawia silnik o mocy 25 kW, $D = 21$ m; wirnik trójłopatkowy. Łopatki aerodynamiczne dobrze profilowane.

Regulacja przez zmianę kąta ustawienia łopatek, przez obracanie około ich osi podłużnej, umożliwia również wyłączenie silnika z pracy w wypadku wiatru burzowego lub zwarcia. Wyłączanie silnika i ponowne włączanie jest całkowicie zautomatyzowane zależnie od siły wiatru. Wirnik silnika umieszczony z tyłu obrotowej kabiny jest samonastawny na wiatr. W kabinie znajduje się, oprócz łożysk wału silnika, dwustopniowa przekładnia zębata i mechanizm regulujący. Wieża w kształcie masztu umocowana jest linami.

3. Silniki wietrzne o mocy 100 ÷ 1000 kW

Są to silniki najmniej rozpowszechnione, ponieważ są za wielkie do obsługi pojedynczych urządzeń mechanicznych gospodarstw rolnych, a za małe do włączenia do pracy na wspólną sieć elektryczną.

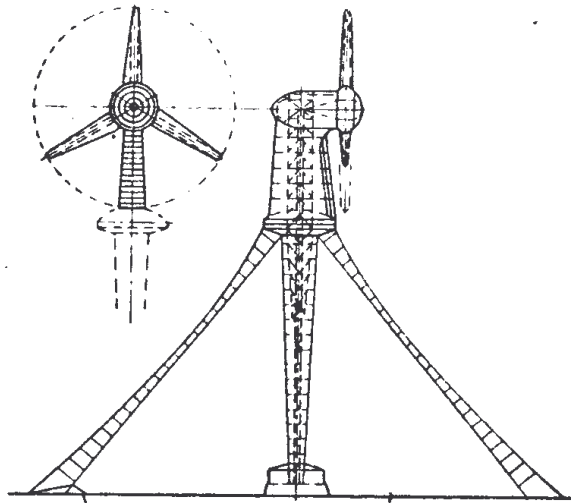
Jako przykład budowy silnika tej grupy może służyć silnik zastosowany w elektrowni wietrznej w Bałakławie na Krymie, o mocy 100 kW. Miejsce ustawienia znajduje się 266 m nad poziomem morza. Siłownia zasila sieć elektryczną okręgu Sewastopol-Bałakława. Urządzenie zbudowane w r. 1931 uważane było jako próbne. Na szczycie stalowej wieży znajduje się obrotowa kabina, z umieszczonym na przodzie dwułopatkowym wirnikiem. W kabinie znajduje się przekładnia zębata i prądnica. Średnica koła $D = 30$ m, długość nośna łopatki 11 m. Łopatki mają kształt trapezowy, o podstawie 2 m na profilu wewnętrznym i 1 m na końcu, grubość skrzydła przy podstawie $b = 0,68$ m. Regulacja liczby obrotów następuje wskutek zmiany kąta ustawienia łopatek, przez ich samoczynny obrót na dźwigarze umocowanym w piąście wirnika. Dźwigary wykonane są z rur. Wał silnika połączony jest z wałem asynchronicznej prądnicy za pomocą sprzęgła i dwustopniowej przekładni o łącznym przełożeniu 1 : 21,4. Włączanie prądnicy do sieci odbywa się automatycznie. Do nastawienia wirnika silnikowego na kierunek wiatru, służy ramię konstrukcji kratowej, umocowane jednym końcem do obrotowej kabiny, drugi koniec spoczywa na wózku, poruszającym się po torze kołowym. Silnik elektryczny napędzający wózek, sterowany jest od małego wiatraczka, umieszczonego na wałku prostopadłym do płaszczyzny wirnika silnika wietrzego, silnik ten może być sterowany ręcznie, w celu wyłączenia urządzenia spod działania wiatru na wypadek burzy.

4. Silniki wietrzne o mocy ponad 1000 kW

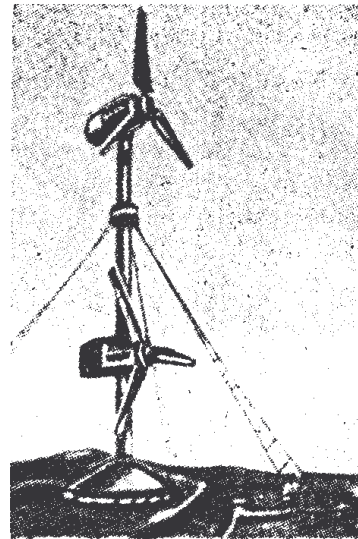
Rys. 55 przedstawia elektrownię wietrzną konstrukcji niemieckiej. Wieża lekko stożkowa typu masztowego umocowana jest trzema linami. Na szczycie wieży umieszczona jest obrotowa kabina. W celu zapewnienia dobrego prowadzenia, nośne i przewodnikowe łożyska kabiny są w dość znacznej odległości około 64 m. Wirnik silnika o średnicy $D = 130$ m, trójłopatkowy rozwija moc 1200 kW. Nastawienie na wiatr jest samoczynne, ponieważ wirnik umieszczony jest z tyłu kabiny. Regulacja liczby obrotów przez zmianę kąta nastawienia łopatek. Za pomocą czterech przekładni moc z wału silnika przenosi się na cztery prądnice synchroniczne.

Rys. 56 przedstawia dwusilnikową elektrownię wietrzną wybudowaną w górach Aj-Petri na Krymie (ZSRR), o mocy około 10000 kW. Dolną część wieży obrotowej stanowi tłok, zanu-

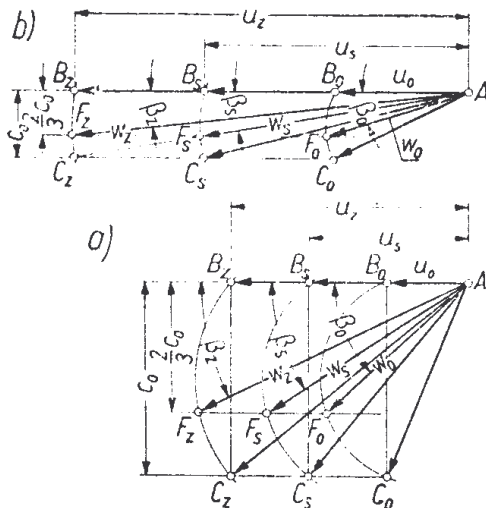
rzony w cylindrze wypełnionym mieszaniną oleju i kalafonii. Cały ciężar wieży wywołuje w cylindrze ciśnienie 350 at. Wieża umoc-



Rys. 55. Silnik wietrzny MAN-1200 kW, D = 130 m



Rys. 56. Silnik wietrzny 10000 kW w Aj-Petri ZSRR



Rys. 57. Wykresy prędkości: a) — łopatkę wirnika wolnobieżnego, b) — łopatkę wirnika szybkobieżnego

wych z wirnikowymi pompami, które przy ciśnieniu 37 at do dysz kół turbin Peltona. Na wale turbiny osadzona jest prądnicą prądu zmiennego. W ten sposób rozwiązane przeniesienie mocy z wału silnika na wał prądnicę posiada przełożenie 1:30 i umożliwia utrzymanie stałej liczby obrotów.

Przykład. Obliczyć przekroje łopatek wirnika przy wietrze $c_0 = 6$ m/sek, $N_u = 20$ KM oraz ustalić kształt łopatek: a) wirnika wol-

wana jest 3 liniami naciągowymi, które są podwieszane na linach nośnych. Ponieważ przy nastawianiu na kierunek wiatru obraca się cała wieża, liny naciągowe zaczepione są w pierścieniu, osadzonym na 3/4 wysokości wieży. Średnica zewnętrzna wieży wynosi 6,5 m, wewnątrz znajdują się schody i dwa dźwigi. Na wysokości 65 m znajduje się kabina dolnego silnika, na wysokości 158 kabina górnego. Wirniki o średnicy 80 m mają po trzy nastawne łopatek. Nastawianie łopatek odbywa się za pomocą serwomotoru. Łopatek są zaopatrzone w elastyczne zderzaki hydrauliczne, które amortyzują nagłe podmuchy wiatru. Wały silników połączone są za pomocą sprzęgieł tarczowych, które amortyzują nagłe podmuchy wiatru. Wały silników połączone są za pomocą sprzęgieł tarczowych, które amortyzują nagłe podmuchy wiatru.

nobieżnego $\xi = 1,2$, $i = 20$ łopatek, b) wirnika szybkobieżnego $\xi = 6$, $i = 4$ łopatek. Gęstość powietrza $\mu = \frac{1}{8}$ kGm⁻⁴sek²

Prędkość obwodowa na promieniu zewnętrznym R wirnika

$$u_z = \xi c_0 = \begin{matrix} \text{a)} & \text{b)} \\ 1,2 \cdot 6 = 7,2 & 6 \cdot 6 = 36 \text{ m/sek} \end{matrix}$$

$$\text{Średnica wirnika } D = \sqrt{\frac{N_u \cdot 1000}{0,2 c_0^3}} = \begin{matrix} 21,7 & 21,7 \text{ m} \end{matrix}$$

$$\text{Wymiar zaokrąglony } D = \begin{matrix} 22 & 22 \text{ m} \end{matrix}$$

$$\text{Liczba obrotów } n = \begin{matrix} 6,25 & 31,5 \text{ min}^{-1} \end{matrix}$$

$$\text{Z wykresu prędkości dla } r_z = R = 11 \text{ m} \quad \begin{matrix} \text{rys. 57a} & \text{rys. 57b} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} u_z & = & 7,2 & 36 \text{ m/sek} \\ v_z & = & 2,0 & 0,6 \text{ ,,} \\ w_z & = & 9,2 & 3,7 \text{ ,,} \\ \text{tg } \beta_z = \frac{v_z}{u_z + \frac{v_z}{2}} & = & 0,485 & 0,1105 \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \beta_z & = & 25^{\circ}54' & 6^{\circ}18' \\ C_{z\infty} = C_z & = & 0,71 & 0,62 \end{matrix}$$

$$l_z = \frac{4 \pi r_z \cdot v_z}{i C_{z\infty} w_z} = \begin{matrix} 2,12 & 0,9 \text{ m} \end{matrix}$$

$$\text{dla } r_0 = R_w = \frac{1}{3} R = 3,7 \text{ m} \quad \begin{matrix} u_0 = \frac{r_0 \cdot \pi \cdot n}{30} & = & 2,41 & 12,25 \text{ m/sek} \\ v_0 & = & 3,80 & 1,2 \text{ ,,} \\ w_0 & = & 6,0 & 13,5 \text{ ,,} \end{matrix}$$

$$\text{tg } \beta_0 = \frac{v_0}{u_0 + \frac{v_0}{2}} = \begin{matrix} 0,927 & 0,311 \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \beta_0 & = & 42^{\circ}48' & 17^{\circ}18' \\ C_{z\infty} = C_z & = & 0,71 & 0,62 \end{matrix}$$

$$l_0 = \frac{4 \pi r_0 v_0}{i C_{z\infty} w_0} = \begin{matrix} 2,07 & 1,67 \text{ m} \end{matrix}$$

$$\text{dla } r = R_s = \frac{R_0 + R_z}{2} = 7,35 \quad \begin{matrix} u_s = \frac{R_s \cdot \pi \cdot n}{30} & = & 4,83 & 24,3 \text{ m/sek} \\ v_s & = & 2,6 & 0,72 \\ w_s & = & 7,3 & 22,5 \end{matrix}$$

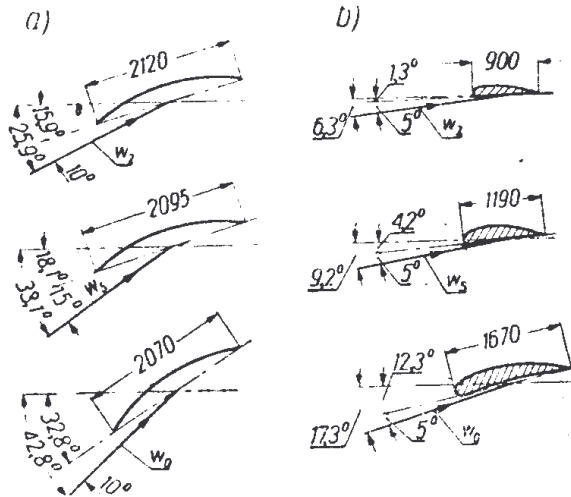
$$\text{tg } \beta'_s = \frac{v_s}{u_s + \frac{v_s}{2}} = \begin{matrix} 0,653 & 0,162 \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \beta'_s & = & 36^{\circ}6' & 9^{\circ}12' \\ C_{z\infty} = C_z & = & 0,71 & 0,62 \end{matrix}$$

$$l_s = \frac{4 \pi R_s u_s}{i C_{z\infty} \cdot w_s}$$

a)	b)
= 2,31	1,19
= 10°	5°

Wartości C_z odpowiadające największej doskonałości profilu zaczerpnięto z tablicy 6, tom XIII, "Maszynostrojenie".



Rys. 58. Profile łopatk a) — wirnika wolnobieżnego, b) — wirnika szybkobieżnego

Cięciwę łopatk l można zmieniać w niewielkich granicach przez dobór odpowiedniego współczynnika C_z , którego wartość zależy od kąta natarcia α . W przykładowym obliczeniu cięciwa średnia $l_s = 2310$ mm łopatk wolnobieżnej nie jest średnią arytmetyczną wartości krańcowych $l_m =$

$$l_z + l_0 = \frac{2120 + 2070}{2} = 2095 \text{ mm, co utrudnia oszczędny wykrój blachy.}$$

Dla długości $l_m = 2095$ mm, $C_z = 0,79$ a odpowiedni kąt natarcia $\alpha_m = 15^\circ$ — jak to uwzględniono na rys. 58a.

Rys. 58 a i b przedstawia trzy zasadnicze przekroje łopatk. Na rysunku konstrukcyjnym podaje się większą ilość przekrojów, w których kąt α , β i θ oraz szerokość l można ustalić według metody zastosowanej w przykładzie.

Literatura

- I. Szowheniw: Silniki wietrzne. Polski Komitet Energetyczny. Warszawa 1932.
- A. Betz: Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. Vandenhock. Göttingen 1926.
- K. Bilau: Windausnutzung für die Krafterzeugung. P. Parey. Berlin 1942.
- E. M. Fatiejew: Wietrodwigatieli w sielskom chozajstwie. Sielchoz-giz. 1939.
- E. M. Fatiejew: Wietrodwigatieli. Gosenergoizdat 1946.
- E. M. Fatiejew: Wietrodwigatieli i wietroustanowki. Sielchoz-giz 1948.
- H. Lancy: Les Aeromoteurs Modernes. Girandot. Paris 1947.
- C. Szczeciński: Meteorologia na usługach lotnictwa. Warszawa 1952.
- I. T. Tazijew: Energia wietra. Baza elektrofikacji sielskowo chozajstwa. Gosenergoizdat 1952.
- C. Witoszyński: Aerodynamika. Warszawa 1928.
- H. Witte: Windkraftwerke. A Lang. Pösneck 1950.
- N. E. Zukowskij: Wietrjanaja mielnica. Zbiór prac Zukowskiego t. VI. 1937.
- Maszynostrojenie. t. XII. rozdz. VI. Wietrodwigatieli. W. N. Prokofjew 1948.

DZIAŁ III

KOTŁY I SILNIKI PAROWE

wionych posobnie silników: turboodrzutowego i strumieniowego. Układ taki umożliwia znacznie zwiększyć ciąg silnika (o 30 ÷ 40% w warunkach statycznych) kosztem zwiększonego zużycia paliwa (100 ÷ 150%). Istota pomysłu w tym przypadku polega na zwiększeniu obciążenia cieplnego czynnika roboczego już za turbiną, a więc za elementem najbardziej czułym na działanie wysokich temperatur.

Lepsze efekty (narażając się na większe trudności konstrukcyjne) można osiągnąć realizując drugi rodzaj silników zespolonych, a mianowicie, ustawiając silnik turboodrzutowy w silnik strumieniowy (rys. XIII,63). Układ taki pozwala w znacznie większym stopniu wykorzystać możliwości silnika strumieniowego, który w tym rozwiązaniu nie jest ograniczony przepustowością silnika turboodrzutowego (maksymalny przyrost ciągu rzędu 300%). Istnieją podobne rozwiązania, w których zadanie silnika turboodrzutowego (nadanie prędkości silnikowi strumieniowemu) spełniają silniki pulsacyjne lub raketowy.

10. Zakończenie

Przegląd osiągnięć silników odrzutowych zestawiono w tablicy XIII-3. Wynika z niej, co już zostało podkreślone poprzednio, że jakościowa zmiana pewnych wielkości charakteryzujących silnik wiąże się ze zmianą rodzaju silnika. Każdy rodzaj silnika cechuje charakterystyczna dla niego właściwość decydująca o jego przydatności w określonych warunkach zastosowania.

Omówione silniki odrzutowe napędzane paliwem chemicznym umożliwiają wykonanie stawianych przed nimi zadań związanych z napędem samolotów i zdalnie kierowanych pocisków. Nie będą one jednak w stanie sprostać przyszłym potrzebom, które wynikną w związku z rozwojem lotów kosmicznych. W tym przypadku, szczególnie od silnika marszowego napędzającego pojazd międzyplanetarny (lub korygującego jego lot) wymagać się będzie nie tyle wielkiego ciągu (który jest potrzebny jedynie przy starcie), ile długiego czasu pracy. Przy tak postawionym zagadnieniu o przydatności silnika do tych celów decydować będzie przede wszystkim wartość ciągu jednostkowego. Jak wiadomo, wzrost ciągu jednostkowego można uzyskać przez podwyższenie temperatury czynnika termodynamicznego lub przez zmniejszenie jego ciężaru molowego.

Obydwie te wielkości są ze sobą w pewnych warunkach ściśle związane, gdyż temperatura gazu ma duży wpływ na jego strukturę chemiczną. Już temperatury rzędu kilku tysięcy stopni wywołują dysocjację cząstek na atomy. Przy jeszcze wyższych temperaturach, wskutek oddania przez atom części elektronów, następuje jego podział na elektrony i dodatnio naładowaną resztę. W miarę wzrostu temperatury liczba oddzielnych elektronów w gazie rośnie i gaz staje się przez to coraz bardziej zjonizowany. Taką mieszaninę zjonizowanych atomów i wolnych elektronów nazywa się plazmą. Wykorzystując przewodność elektryczną plazmy można na nią wpływać za pomocą pola elektromagnetycznego. Ma to duże zalety, gdyż wtedy do przyspieszenia i kształtowania wypływu niepotrzebne są materialne ścianki silnika. Na gruncie tych właśnie rozważań i pomysłów powstały idee silników jądrowych, plazmowych i jonowych, stanowiących jakościowo nowy rodzaj napędu odrzutowego. Głównym źródłem energii w tym napędzie jest energia jądrowa i słoneczna.

Literatura

1. Driggs I. i Lancaster O.: Gas Turbines for Aircraft. The Ronald Press Company. New York 1955.
2. Кузьмин Г. А.: Конструкция авиационных двигателей. Оборонгиз, Москва 1962.
3. Stieczkin B. i inni: Teoria silników odrzutowych. Wyd. MON, Warszawa 1961.
4. Wójcicki S. Silniki pulsacyjne strumieniowe raketowe. Wyd. MON, Warszawa 1962.

Rozdział XIV

Silniki wiatrowe

Opracował doc. dr inż. Zbigniew Osinski

Wykaz ważniejszych oznaczeń

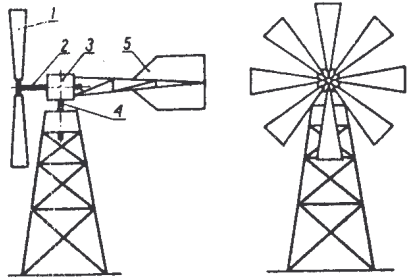
C_x - współczynnik aerodynamiczny oporu czołowego	R - promień wirnika, m
C_y - współczynnik aerodynamiczny siły nośnej	u - prędkość obwodowa, m/s
D - średnica wirnika, m	W - siła aerodynamiczna, kG
e - współczynnik zahamowania	v - prędkość wiatru, m/s
E - energia kinetyczna, kGm	Z - wyróżnik szybkobieżności
F - powierzchnia odniesienia, m ²	α - kąt natarcia profilu
H - wysokość, m	η - sprawność
L - praca, kGm	φ - kąt zaklinowania profilu
M - moment, kGm	γ - kąt ustawienia wirnika
N - moc, KM	ξ - współczynnik wykorzystania energii wiatru
n - prędkość obrotowa, obr/min	μ - odwrotność doskonałości profilu
P_x - opór czołowy, kG	ρ - gęstość powietrza
P_y - siła nośna, kG	ω - prędkość katowa
r - promień dowolnego przekroju wirnika, m	

1. Zasada działania silnika wiatrowego

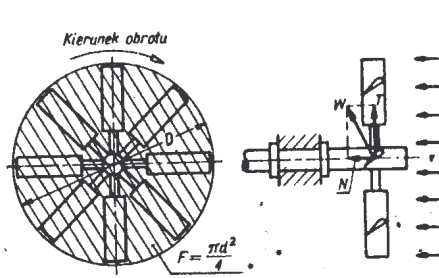
Silnik wiatrowy jest to silnik wirnikowy zamieniający energię kinetyczną wiatru na pracę. Według położenia osi wirnika w stosunku do kierunku przepływu osrodka (wiatru) można silniki wiatrowe podzielić na dwie kategorie:

a) Silniki wiatrowe o osi wirnika równoległej do kierunku przepływu

Wirnik tworzą łopaty, które za pośrednictwem piasty są osadzone na wale. Płaszczyzna wirnika jest prostopadła do kierunku przepływu. Silniki takie popularnie nazywa się wiatrakami. Schemat ogólny budowy silnika wiatrowego tego typu jest przedstawiony na rys. XIV,1. Koło 1 jest osadzone na poziomym czasem lekko nachylonym wale 2. Wal obraca się w łożyskach umieszczonych w obudowie 3. W obudowie tej mieści się przekładnia zębata przenosząca ruch wału wirnika na wał pionowy 4. Wal ten napędza umieszczoną na dole maszynę roboczą, którą najczęściej jest prądnica. Razem z wałem i kołem zmontowany jest ster kierunkowy 5. Wirnik silnika wraz z osią i obudową obraca się wokół osi pionowej wieży.



Rys. XIV,1. Schemat silnika wiatrowego skrzydłowego

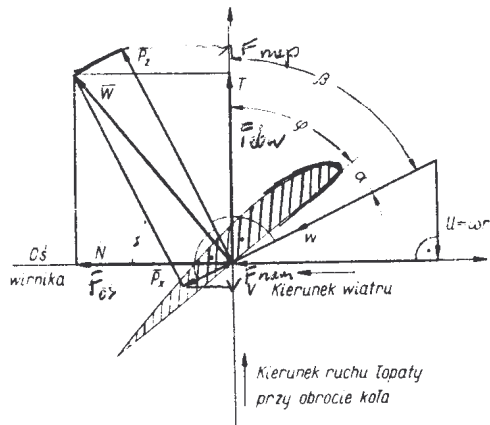


Rys. XIV,2. Powstanie momentu obrotowego na wirniku silnika wiatrowego skrzydłowego

b) Silniki wiatrowe o osi wirnika prostopadłej do kierunku przepływu

W kategorii tej można rozróżnić trzy grupy: silniki bębnowe o osi poziomej, silniki karuzelowe o osi pionowej oraz silniki rotorowe (Savoniusa). Wskutek małej sprawności zastosowanie tej kategorii silników jest znikome, toteż w dalszym ciągu będą omawiane jedynie silniki o osi wirnika równoległej do kierunku wiatru.

Moment obrotowy wirnika wiatrowego powstaje w wyniku działania wiatru na łopaty wirnika (rys. XIV,2). Siła aerodynamiczna W może być rozłożona na składową styczną do płaszczyzny wirnika T i normalną N . Składowa styczna powoduje obrót, składowa normalna wywołuje nacisk osiowy, który przejmowany jest przez łożyska. Rozkład siły aerodynamicznej przedstawia rys. XIV,3. Cięciwa profilu łopaty w pewnym przekroju odległym o r od osi wirnika tworzy z płaszczyzną wirnika kąt zaklinowania φ . Prędkość wiatru v ma kierunek prostopadły do płaszczyzny wirnika. Uwzględniając prędkość obwodową profilu ωr wynikającą z ruchu obrotowego koła z prędkością ką-



Rys. XIV,3. Siły aerodynamiczne na profilu skrzydła

tową ω otrzymuje się prędkość względną w strugi powietrza w stosunku do cięciwy profilu. Prędkość ta tworzy z cięciwą profilu kąt natarcia α . W wyniku przepływu powietrza powstaje siła aerodynamiczna W , którą można rozłożyć na siłę nośną P_z i opór czołowy P_x . Siły te wyznacza się w oparciu o znajomość charakterystyki profilu z wzorów (patrz rozdział IV Tom I)

$$P_z = C_z \rho \frac{v^2}{2} F \text{ kG}$$

$$P_x = C_x \rho \frac{v^2}{2} F \text{ kG} \quad [1]$$

gdzie: C_z – współczynnik aerodynamiczny siły nośnej, C_x – współczynnik aerodynamiczny oporu czołowego, ρ – gęstość powietrza w $\text{kG} \cdot \text{s}^3/\text{m}^4$, F – powierzchnia odniesienia równa na ogół powierzchni opływającego płata w m^2

Dla uzyskania prawidłowej pracy łopaty należy cięciwę profilu ustawić pod odpowiednim kątem zaklinowania φ tak, aby uzyskać właściwy kąt α . Kąt ten dobiera się najczęściej jako równy lub bliski kątowi maksymalnej doskonałości profilu (patrz rozdz. IV. Tom I). Jak widać z rys. XIV,3 trójkąt prędkości jest inny dla każdego promienia r , ze względu na zmianę prędkości obwodowej wraz ze zmianą promienia. Aby

otrzymać właściwy kąt α należy więc zmieniać kąt zaklinowania φ wzdłuż rozpiętości. Łopata wiatraka jest więc zwichrowana. Kąt φ jest największy u nasady, a następnie maleje.

Charakterystyczną wielkością silnika wiatrowego łopatowego jest tak zwany wyróżnik szybkości. Jest to stosunek prędkości obwodowej końca łopaty ωR do prędkości wiatru v

$$Z = \frac{\omega R}{v} \quad [2]$$

Zależnie od wartości wyróżnika rozróżnia się:

- silniki wiatrowe wolnobieżne – $Z \leq 1,5$,
- silniki wiatrowe średnobieżne $1,5 < Z \leq 3,5$,
- silniki wiatrowe szybkobieżne $Z > 3,5$.

Wyróżnik szybkości wpływa silnie na konstrukcję silników wiatrowych i ich cechy. Silniki wolnobieżne mają dużą liczbę łopat, zaś szybkobieżne mają liczbę łopat małą.

2. Zastosowanie

a) Napęd mniejszych zakładów przemysłowych lub rzemieślniczych np. stolarnie, tartaki, młyny, ślusarnie itp.

b) Melioracje gruntów

Stosuje się silniki o dużej liczbie łopat napędzające pompy wodne lub podnośniki wodne ślimakowe. Napęd może być bezpośredni lub za pośrednictwem zespołów prądotwórczych.

c) Wytwarzanie energii elektrycznej

W tym zakresie zastosowanie silników wiatrowych jest najszerze. Stosuje się zespoły o różnej mocy poczynając od 50 W do 1000 i więcej KW. Silniki wiatrowe mniejszej mocy są stosowane do indywidualnego zasilania w energię elektryczną gospodarstwa domowego na terenach nieelektryfikowanych. Umożliwia to bowiem oświetlenie, radiofonizację oraz napęd niedużych maszyn gospodarczych, rzemieślniczych lub rolniczych i pomp wodnych. Silniki większej mocy zasilają sieci energetyczne.

3. Moc i sprawność

Energia kinetyczna wiatru przepływającego z prędkością v przez płaszczyznę omiataną skrzydłami wirnika może być wyznaczona z wzoru (rys. XIV,4)

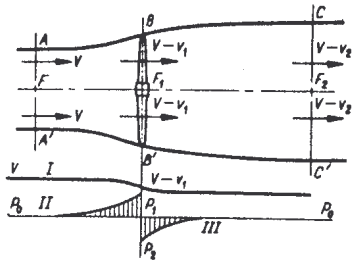
$$P = \frac{\rho F v^3}{2} \text{ kG} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad [3]$$

gdzie: v – prędkość wiatru w m/s, ρ – gęstość powietrza w $\text{kG} \cdot \text{s}^3/\text{m}^4$, F – powierzchnia odniesienia w m^2 .

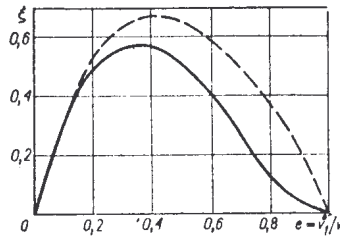
$$F = \frac{\pi D^2}{4} \quad [4]$$

gdzie D – średnica wirnika w m.

Idealny wiatrak pracujący bez strat nie może wykorzystać tej energii w całości, gdyż wymagałoby to pełnego zahamowania strugi powietrza. Dla utrzymania przepływu powietrza struga powietrza musi przepływać przez wirnik ze skończoną prędkością,



Rys. XIV,4. Przepływ strugi powietrza przez wirnik wiatraka



Rys. XIV,5. Zależność idealnego współczynnika wykorzystania energii wiatru od współczynnika zahamowania

a więc zabierając ze sobą część niewykorzystanej energii kinetycznej. Dla oceny wykorzystania energii kinetycznej wiatru stosuje się idealny współczynnik wykorzystania wiatru

$$\xi_1 = \frac{L_1}{E} \quad \text{Wykorzyst. energii} \quad \text{Energia całkowita} \quad [5]$$

Jest to stosunek pracy uzyskanej w wiatraku idealnym (to jest tej części energii kinetycznej wiatru, która została zamieniona na pracę) do całkowitej energii wiatru przepływającego przez powierzchnię F . Obliczenie energii wykorzystanej przeprowadza się na podstawie teorii wiatraka Sabinina (1). Zgodnie z tą teorią

$$\xi_1 = 4e \frac{1-e}{1+e} \quad [6]$$

przy czym e jest współczynnikiem zahamowania wiatru. Jest to stosunek spadku prędkości wiatru na wirniku v_1 do prędkości wiatru

$$e = \frac{v_1}{v} \quad [7]$$

zależność ξ_1 od e przedstawia rys. XIV,5. Maksimum współczynnika wykorzystania wynosi $\xi_{1,max} = 0,687$ i odpowiada mu wartość $e = 0,414$.

Rzeczywisty współczynnik wykorzystania energii wiatru w wiatraku wyznacza się z wzoru

$$\xi = \xi_1 \left[1 - \left(\frac{r_0}{R} \right)^2 - \bar{T}_J - \bar{T}_p - \bar{T}_m \right] \quad [8]$$

$$\text{lub} \quad \xi = \xi_1 \eta \quad [9]$$

przy czym η jest sprawnością wiatraka rzeczywistego i określa stosunek wykorzystania energii wiatru w silniku rzeczywistym w stosunku do wykorzystania w silniku idealnym (1)

$$\eta = 1 - \left(\frac{r_0}{R} \right)^2 - \bar{T}_J - \bar{T}_p - \bar{T}_m \quad [10]$$

Człon $\left(\frac{r_0}{R} \right)^2$ przedstawia zmniejszenie energii wykorzystanej na skutek zmniejszenia powierzchni przepływu o powierzchnię piasty wirnika.

$\bar{T}_J, \bar{T}_p, \bar{T}_m$ przedstawiają względne straty energii obliczone jako stosunki strat energii do energii wykorzystanej w wiatraku idealnym, przy czym straty te określa się następująco:

a. Straty wywołane oporem indukowanym profilem

$$\bar{T}_J = \frac{e}{1-e} \left[\frac{8 \sqrt{1 + \left(\frac{1-e}{Z} \right)^2}}{(1+e) iZ} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{iZ}{\pi \left(1 - \frac{e}{2} \right)} \right)^2}} \right] \quad [11]$$

b. Straty wywołane oporem profilowym

$$\bar{T}_p = 2\mu' \left[\frac{1-e}{Z} + \frac{Z}{3(1-e)} \right] \quad [12]$$

c. Straty wywołane zawirowaniem strugi za wiatrakiem

$$\bar{T}_m = \frac{\xi_1 \eta_e^2}{2Z^2} \ln \frac{R}{r_0} \quad [13]$$

We wzorach powyższych oprócz określonych już wartości występują następujące: η_e – sprawność elementarnego wiatraka rzeczywistego, średnia dla łopaty (wiatrakiem elementarnym nazywa się nieograniczenie mały wycinek pierścieniowy wirnika)

$$\eta_e = \frac{1 - \mu z_u}{1 + \frac{\mu}{z_u}} \quad \text{dla } \begin{matrix} \text{Zawrotu} \\ \text{łobuzników} \end{matrix} \quad [14]$$

$\mu = \frac{C_x}{C_z}$ – wartość odwrotności doskonałości profilu w określonym przekroju łopaty, i – liczba łopat, $\mu' = \left(\frac{C_x}{C_z} \right)_{sr}$ – wartość odwrotności doskonałości profilu średnia dla łopaty (średnia arytmetyczna),

$$z_u = \frac{z}{1-e} \quad [15]$$

$z = \frac{wr}{v}$ – wyróżnik szybkobieżności w dowolnym przekroju wiatraka.

W obliczaniu silników wiatrowych stosuje się tzw. moment bezwymiarowy, równy momentowi silnika wiatrowego podzielonemu przez energię strugi wiatru

$$\bar{M} = \frac{M}{\pi R^3 \rho \frac{v^3}{2}} \quad \text{Z współczynnikiem momentu dwrotnego} \quad [16]$$

Moment ten wyznacza się z wzoru

$$\bar{M} = \frac{4e}{z_u} \frac{1-e}{1+e} (1+\mu) \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - 2\mu \left(\frac{z_u}{3} + 1 - \frac{r_0}{R} \right) \quad [17]$$

Moc silnika wiatrowego

$$N = 4 \frac{1-e}{1+e} \left[\left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - 2\mu \frac{z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right] \pi R^2 \rho \frac{v^3}{2} \text{ kGm/s} \quad [18]$$

Do obliczeń konieczna jest znajomość związku między podstawowymi parametrami silnika wiatrowego a mianowicie współczynnikiem zahamowania strugi e , liczbą łopat i

i współczynnikiem siły nośnej C_z . Dla danego przekroju łopaty położonego na promieniu r związek ten jest określony równaniem

$$ibC_z = 8\pi r \frac{e}{(1+e)(1-e)^2} \frac{1}{(z_u + \mu)\sqrt{1+z_u^2}} \quad [19]$$

$z_u = \frac{z}{r-e}$
 $\mu = \frac{C_x}{C_z}$

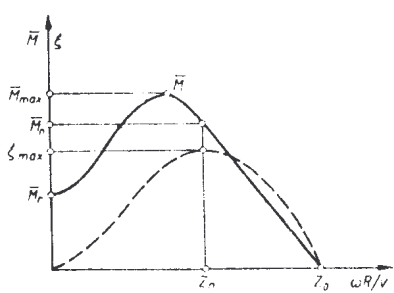
gdzie b – szerokość łopaty w danym przekroju.

4. Charakterystyka silnika wiatrowego

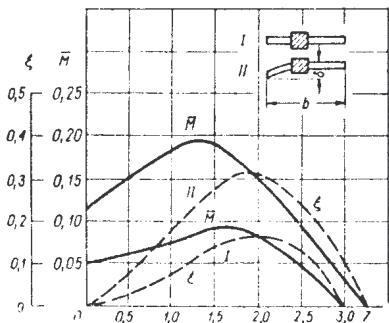
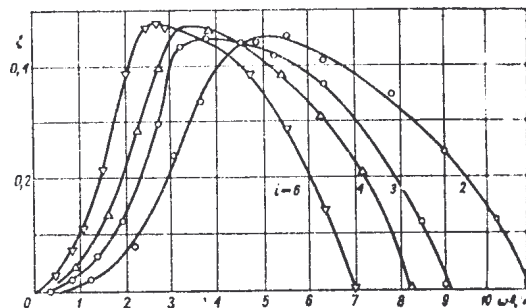
Charakterystyką silnika wiatrowego nazywa się zależność współczynnika wykorzystania wiatru ξ i bezwymiarowego momentu \bar{M} , od wyróżnika szybkobieżności. Charakterystyki można obliczyć korzystając z zależności teoretycznych. Charakterystyki otrzymuje się także drogą doświadczalną przez badanie silników wiatrowych w tunelu aerodynamicznym.

Typowa charakterystyka jest przedstawiona na rys. XIV,6.

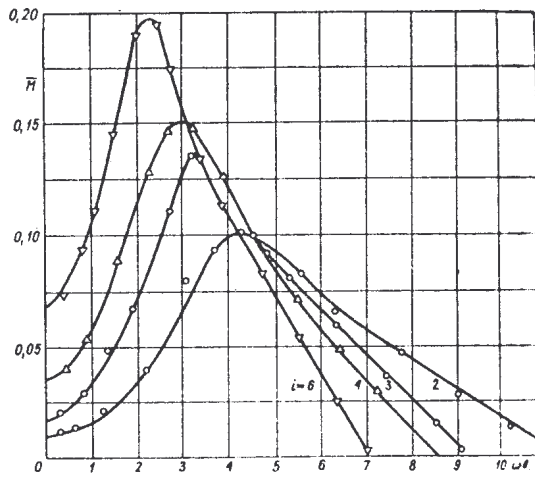
Przebieg charakterystyki pozwala dobrać najwłaściwszy stan pracy oraz ocenić własności wiatraka. Użyte na rysunku oznaczenia: \bar{M}_r – moment rozruchowy, \bar{M}_{max} –



Rys. XIV,6. Charakterystyka silnika wiatrowego



Rys. XIV,7. Porównanie charakterystyki dwóch silników wiatrowych



Rys. XIV,8. Charakterystyki silników wiatrowych o różnej liczbie łopatek

moment maksymalny, \bar{M}_n – moment nominalny odpowiadający pracy z maksymalnym wykorzystaniem energii wiatru, Z_n – wartość wyróżnika szybkobieżności odpowiadająca nominalnej pracy z momentem nominalnym \bar{M}_n i maksymalnym wykorzystaniem energii wiatru, Z_0 – synchroniczna wartość wyróżnika szybkobieżności, przy której wykorzystanie energii wiatru jest zerowe.

Na charakterystykę wiatraka mają wpływ: profil łopaty, liczba łopatek i kąt zaklinowania. Wpływ ten przedstawiono na kilku przykładach. Na rys. XIV,7 przedstawiono charakterystyki dwóch wersji 4-łopatkowego silnika wiatrowego. W I wersji łopaty zostały wykonane w kształcie płyt o stałej szerokości o stałym kącie zaklinowania równym 14° . W II wersji łopaty miały wygięty profil zwichrowany. Kąty zaklinowania i strzałkę szkieletową profilu przedstawia tabl. XIV-1.

Tablica XIV-1. Przykładowe wartości kątów zaklinowania i strzałki szkieletowej profilu

	$\frac{r}{R}$				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
φ	29°15'	25°57'	22°23'	18°11'	15°15'
$\frac{\delta}{b}$	0,0535	0,0367	0,0268	0,0214	0,0168

Silnik w drugiej wersji cechuje lepsze wykorzystanie energii wiatru. Maksymalny współczynnik wykorzystania wynosi $\xi_{max} = 0,316$, podczas gdy w I wersji $\xi_{max} = 0,17$.

Wpływ liczby łopatek pokazuje rys. XIV,8. Przedstawia on charakterystyki silnika wiatrowego o różnych liczbach łopatek. Widoczne jest, że liczba łopatek nie ma zasadniczego wpływu na wartość ξ_{max} a więc na moc wiatraka. Charakterystyki przemieszczają się natomiast wzdłuż osi Z . Silniki o małej liczbie łopatek osiągają ξ_{max} przy większych Z . Moment silnika wiatrowego jest większy dla silników wiatrowych o małej liczbie łopatek. W szczególności większy jest moment rozruchowy.

Dla porównania różnych wirników przedstawiono na jednym rysunku charakterystyki szeregu typowych wirników (rys. XIV,9).

5. Dobór profilu łopaty

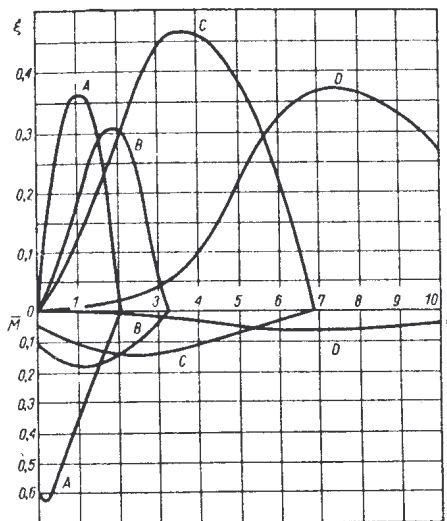
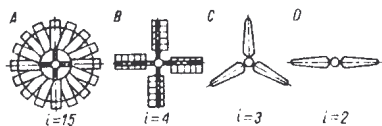
Na łopaty stosowane są profile płytkowe bądź profile lotnicze o dużej nośności. Profile płytkowe mogą mieć kształt płyt płaskich, kołowych i parabolicznych. Własności profili kołowych przedstawia rys. XIV,10.

Profile płytkowe są proste w wykonaniu i stosowane w silnikach wiatrowych średnio-bieżnych o dużej liczbie łopatek, dla których nie ma tak wielkiego znaczenia doskonałość profilu. Ulepszone profile płytkowe stosowane w wiatrakach są przedstawione na rys. XIV,11. Na rys. XIV,11a przedstawiono profil Sabinina (1926 r.), XIV,11b – profil K. Bilau (1935 r.), XIV,11c – zmodernizowany profil łopaty wiatraka holenderskiego systemu Adriaan'a (1928 r.)

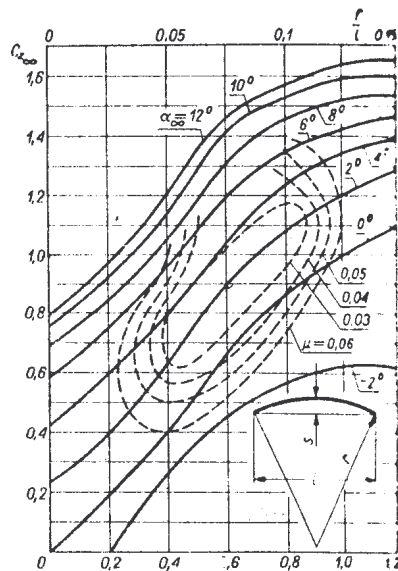
Na łopaty szybkobieżnych wiatraków stosuje się profile lotnicze stosunkowo grube (ze względów konstrukcyjnych) o dużej nośności i dużej doskonałości. Stosowano następujące profile: NACA 4412, Göttingen 625, CAGI 909 i 910, MAI 730 i 796. Podobnym profilem jest profil Espero opracowany w CAGI.

Do obliczeń aerodynamicznych potrzebna jest znajomość charakterystyki profilu. W zasadzie konieczna jest znajomość współczynnika siły nośnej C_z oraz odwrotności doskonałości $\mu = \frac{C_x}{C_z}$ w zależności od kąta natarcia.

Dla porównania profili przedstawiono charakterystykę profili płytkowych i profilu Göttingen 625 (rys. XIV,12).



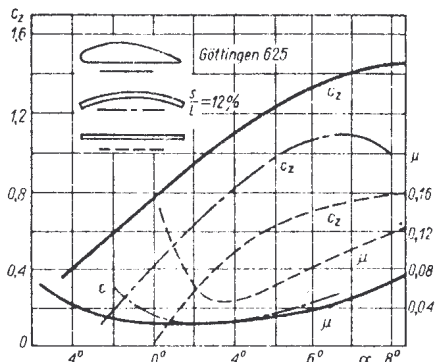
Rys. XIV,9. Charakterystyki silników wiatrowych o różnych wirnikach



Rys. XIV,10. Charakterystyki profili płytkowych



Rys. XIV,11. Znormalizowane profile wiatraków



Rys. XIV,12. Porównanie własności profilu Göttingen 625 i profili płytkowych

6. Obliczenie aerodynamiczne wirnika

Danymi wyjściowymi do obliczeń wirnika są: moc N KM, prędkość wiatru v , wyróżnik szybkobieżności Z , współczynnik wykorzystania energii wiatru ξ . Ustalić należy średnicę wirnika D oraz liczbę i i kształt łopat wirnika.

Średnicę oblicza się wychodząc z wzoru na moc silnika wiatrowego

$$N = \frac{\rho F v^3 \xi}{2 \cdot 75} = \frac{\rho \pi D^2 v^3 \xi}{1530} \text{ KM} \quad [20]$$

Przyjmując dla normalnych warunków $t_0 = 15^\circ\text{C}$, $h_0 = 760$ mm, wartość $\rho = 0,125 \frac{\text{kg} \cdot \text{s}^4}{\text{m}^4}$ otrzymuje się po przekształceniu wzoru [20] wzór na średnicę wirnika

$$D = \sqrt{\frac{1530 N}{v^3 \xi}} \quad [21]$$

Dla innej temperatury t i ciśnienia atmosferycznego h można uwzględnić poprawkę. Wzór poprawiony ma postać

$$D = \sqrt{\frac{1530 N}{v^3 \xi}} \sqrt{\frac{760(273+t)}{h \cdot 288}} \quad [22]$$

Prędkość wiatru przyjmuje się z reguły między 8 a 14 m/s (patrz p. 10). Zamiast przyjęcia wartości wyróżnika szybkobieżności można przyjąć liczbę obrotów i wyróżnik wyznacza się wtedy z wzoru

$$Z = \frac{\pi n R}{30 v} = \frac{v}{v} \quad [23]$$

Następnie przyjmuje się profil łopaty. Na ogół przyjmuje się na końcu łopaty profil o grubości względnej $\delta = (0,1 \div 0,15) b$ (b – szerokość łopaty).

Grubość profilu powinna rosnąć w miarę zbliżania się ku piąście. Stosowane największe grubości (w łopatach przestawialnych) wynoszą $(0,2 \div 0,35) b$.

Przyjmuje się kilka wartości współczynnika zahamowania e np. 0,3, 0,35, 0,4 i oblicza się współczynnik wykorzystania idealnego wiatraką ξ_i z wzoru (6). Następnie oblicza się wartości rzeczywistego współczynnika wykorzystania z wzoru [8], korzystając przy tym z wzorów [11], [12], [13] oraz wykreśla się zależność ξ od e i wyznacza się w ten sposób ξ_{max} i odpowiednią wartość e_{opt} . Dalsze obliczenia prowadzi się dla tej właśnie optymalnej wartości e . Obiera się kilka przekrojów łopaty określonych względnym promieniem $\frac{r}{R}$ np. $\frac{r}{R} = 0,2, 0,4, 0,8, 1$. Dla każdego z tych przekrojów oblicza się wartość $K = i b C_z$ z wzoru [19]. Wartość C_z ustala się z charakterystyki profilu obierając kąt natarcia odpowiadający minimalnej wartości μ . Liczbę łopat przyjmuje się. Stąd można ustalić szerokość łopaty $b = \frac{K}{i C_z}$.

Obliczone wartości b należy skontrolować. Szerokość łopaty przy piąście może wyjść za duża. Powinna ona wynosić

$$b_p = (1,3 \div 2,0) b_k$$

gdzie: b_p – szerokość łopaty przy piąście (najczęściej jest to przekrój określany promieniem $\frac{r}{R} = 0,2$), b_k – szerokość na końcu łopaty.

Najczęściej przyjmuje się trapezowy obrys łopaty. Szerokość w dowolnym przekroju wynosi wtedy

$$b_n = b_k + \frac{b_p - b_k}{m - 1} (n - 1) \quad [24]$$

gdzie: m – liczba przekrojów (równo rozstawionych wzdłuż łopaty), n – nr kolejnego przekroju licząc od końca.

Po ostatecznym określeniu szerokości łopaty należy wprowadzić poprawkę na wartość C_z , korzystając z wzoru

$$C_z = \frac{K}{ib} \quad [25]$$

Po określeniu C_z określa się kąt natarcia α i wyznacza się kąt β z trójkąta prędkości (rys. XIV,3)

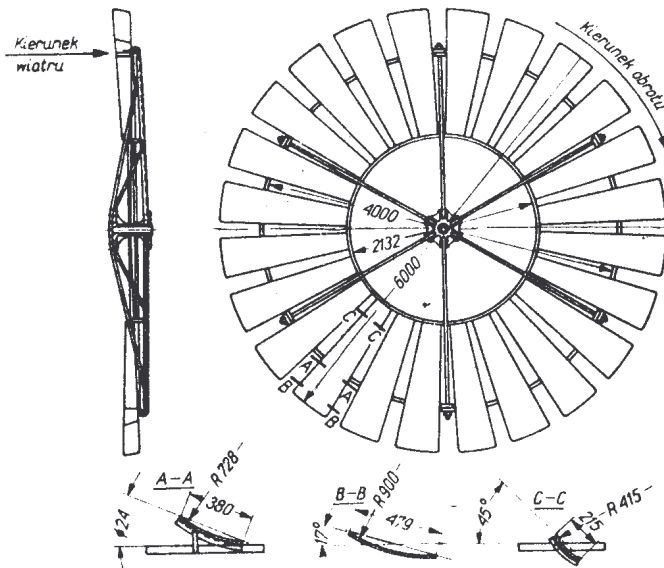
$$\beta = \arctg z_u \quad [26]$$

Stąd oblicza się kąt zaklinowania łopaty w danym przekroju

$$\varphi = \beta - \alpha \quad [27]$$

7. Konstrukcja łopat

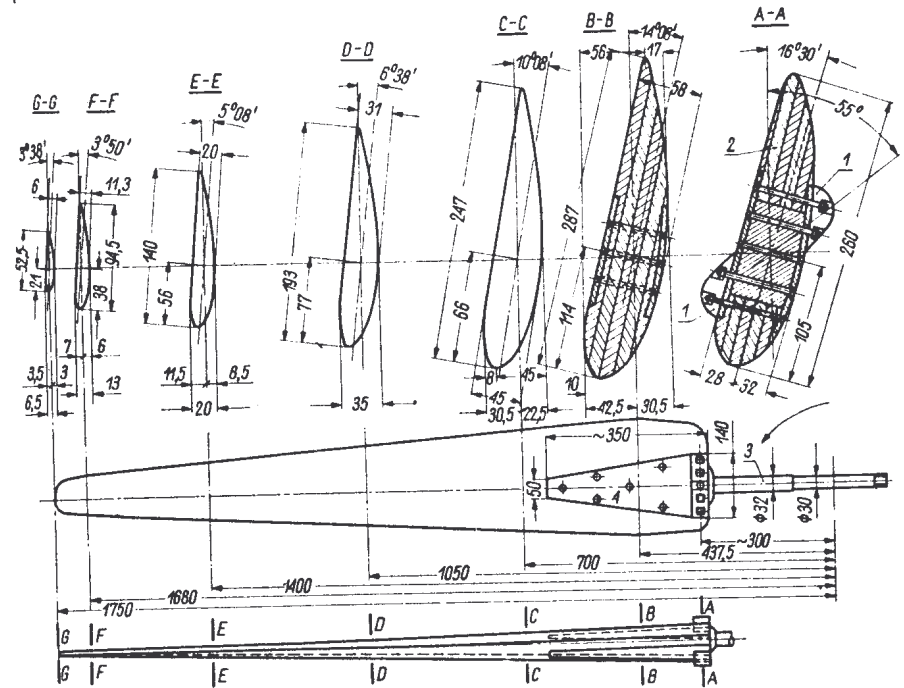
Wirniki silników wiatrowych wolnobieżnych mają dużą liczbę łopat. Łopaty ich są wykonane w postaci profili płytowych z blachy. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego takiej łopaty jest przedstawiony na rys. XIV,13. Łopaty są tłoczone z cienkiej blachy. Stosowano np. w silniku TB-8 prod. radz. blachę stalową ocynkowaną gr. 1,25 mm. Łopaty są zamontowane na szkieletie złożonym z pierścienia wewnętrznego i zewnętrznego oraz ramion łączących pierścienie z piastą.



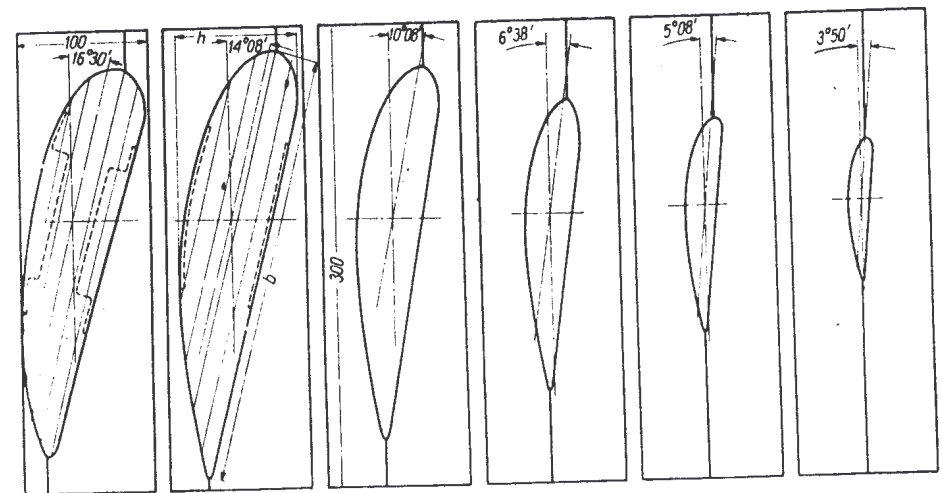
Rys. XIV,13. Wirnik wielołopatowy

Wirniki szybkobieżne o małej liczbie łopat mogą mieć łopaty drewniane lub metalowe. Przykład drewnianej łopaty silnika wiatrowego produkcji radzieckiej jest przedstawiony na rys. XIV,14. Łopaty są wykonane z cienkich desek sklejenych klejem kazeinowym. Po sklejeniu poddaje się je obróbce na kopiarkach lub obrabia się ręcznie z pomocą wzorników ułatwiających uzyskanie właściwego profilu w każdym przekroju oraz odpowiedniego zwichrowania. Przykład wykonania wzorników patrz rys. XIV,15. Powierzchnia

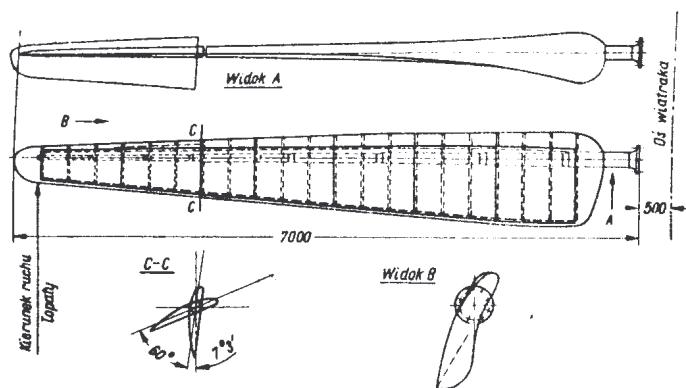
59,33



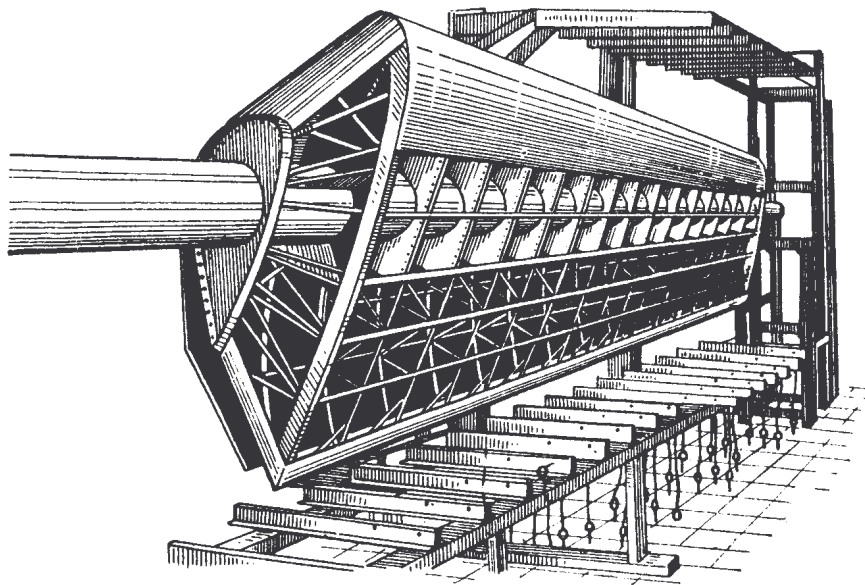
Rys. XIV,14. Drewniana łopata wirnika



Rys. XIV,15. Wzornik do wykonania drewnianej łopaty wirnika



Rys. XIV,16. Metalowa łopata wirnika

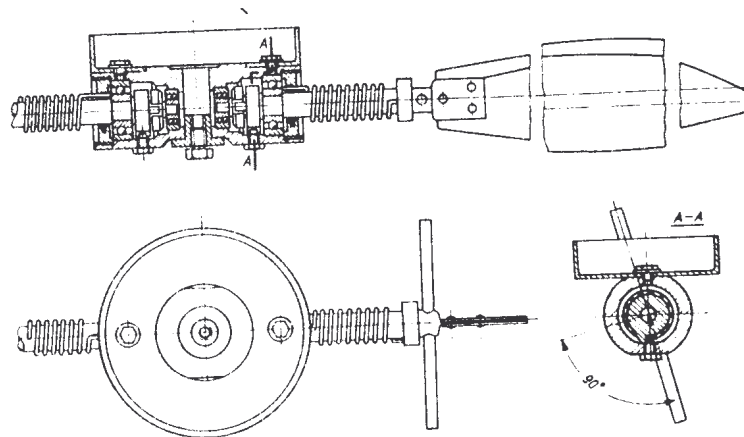


Rys. XIV,17. Wykonanie metalowej łopaty wirnika

łopaty powinna być gładka. Pokrywa się ją emalią, lakierem lub masami plastycznymi. Łopaty bardzo dużych silników wiatrowych są wykonywane jako cienkościennie metalowe konstrukcje dźwigarowe lub skorupowe.

Przykład konstrukcji metalowej (Norwind G. m. b. H) jest przedstawiony na rys. XIV,16. Centralny dźwigar rurowy o stopniowo zmniejszającej się średnicy dźwiga żebra, na których spoczywa pokrycie z cienkiej blachy aluminiowej lub stalowej. Dźwigar zamocowany jest do piasty bądź na stałe za pomocą kołnierza, bądź w przypadku łopat przestawialnych jest osadzony w łożyskach tocznych. Inny przykład takiej łopaty w trakcie wykonywania jest przedstawiony na rys. XIV,17.

Przykład obrotowego osadzenia jest przedstawiony na rys. XIV,18.



Rys. XIV,18. Obrotowe zamocowanie łopat wirnika

8. Konstrukcja głowicy i układu przenoszenia napędu

Przeniesienie napędu od wirnika do maszyny napędzanej odbywa się na ogół za pośrednictwem układów mechanicznych. Rozpowszechnione są dwa układy:

a) **Napęd mechaniczny korbowy lub mimośrodowy zamieniający ruch obrotowy wału wirnika na ruch postępowy.** Taki układ stosuje się w silnikach wiatrowych napędzających pompy.

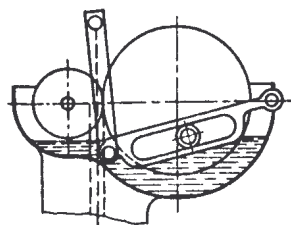
b) **Przekładnie zębate.** Ten układ stosuje się w silnikach napędzających prądnice. Istnieje duża różnorodność rozwiązań.

Jedno z rozwiązań pierwszego rodzaju napędu przedstawia rys. XIV,19. Para kół zębatych redukuje prędkość obrotową. Większe z kół za pośrednictwem rolki napędza kulisę wykonującą ruch wahadłowy. Kulisa ta za pośrednictwem popychacza porusza drąg napędzający tłok pompy znajdującej się u podstawy wieży.

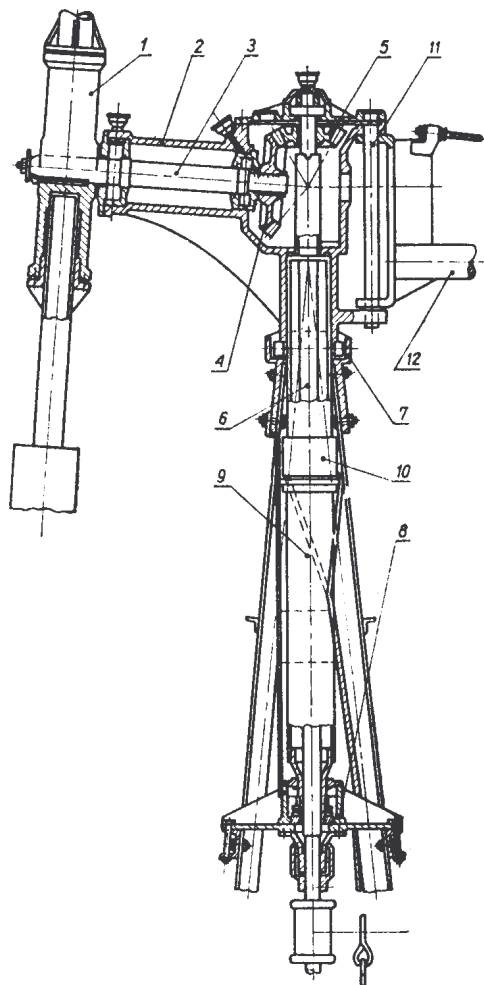
Układ typu drugiego jest przedstawiony na rys. XIV,20. Napęd z poziomego wału wirnika jest przenoszony na wał pionowy za pomocą przekładni stożkowej. Wał pionowy

poprzez przekładnię zębatą lub pasową znajdującą się u podstawy wieży napędza najczęściej prądnice, a czasem wprost maszyny robocze, między innymi także i pompy wodne.

Inny przykład napędu przedstawia rys. XIV,21. Wał wirnika za pośrednictwem dwustopniowej przekładni zębatej napędza prądnice umieszczoną w głowicy.

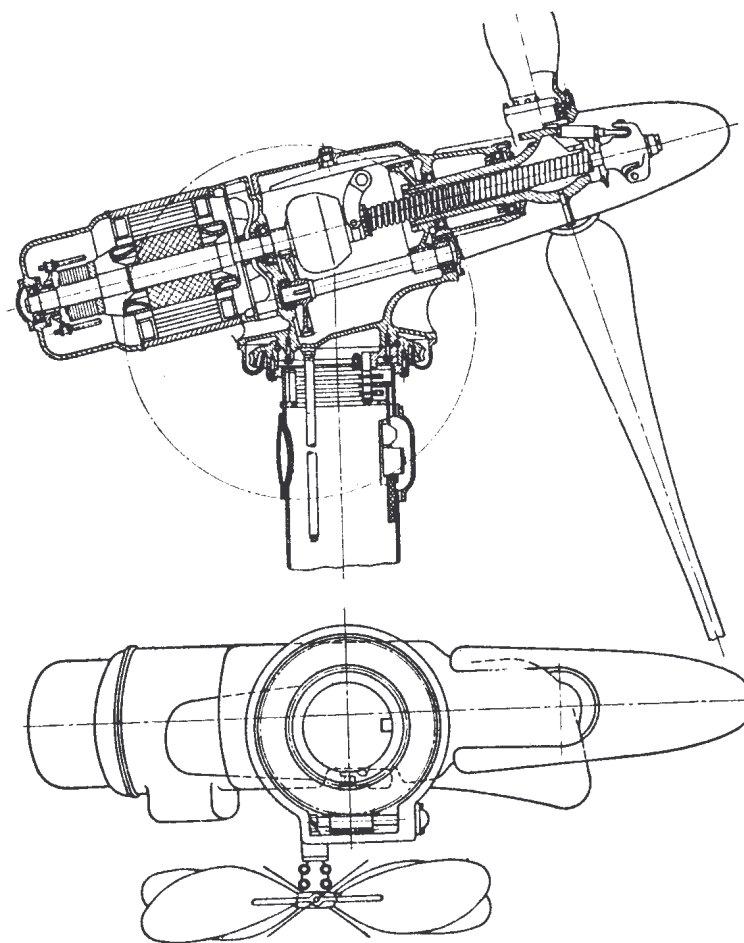


Rys. XIV,19. Mechanizm zamiany ruchu obrotowego na postępowy



Rys. XIV,20. Głowica silnika wiatrowego WIME D-15

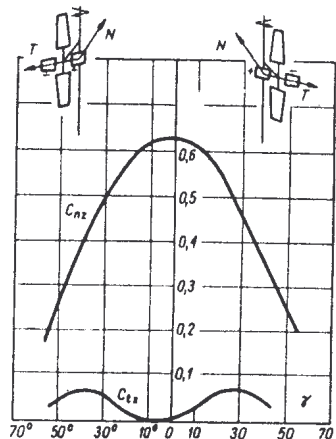
Głowica wiatraka obraca się dla ustawienia wirnika pod wiatr. Obrót ten jest umożliwiony np. w przypadku głowicy z rys. XIV,20, dzięki oparciu jej na rurze łożyskowanej w dwóch łożyskach tocznych. W przypadku przedstawionym na rys. XIV,21 głowica łożyskowana na głównej części słupa obracana jest za pomocą przekładni ślimakowej.



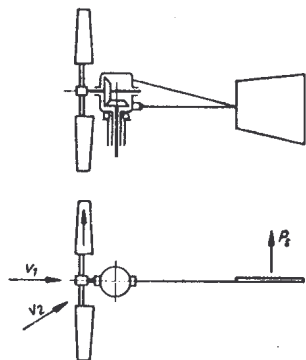
Rys. XIV,21. Głowica silnika wiatrowego Allgaier

9. Urządzenie do ustawiania silnika pod wiatr

Dla pełnego wykorzystania energii wiatru konieczne jest ustawienie płaszczyzny wirnika prostopadłe do kierunku wiatru. Przy ustawieniu skośnym płaszczyzny wirnika do kierunku wiatru można napór wiatru rozłożyć na dwie składowe: normalną do płaszczyzny wirnika i styczną. Dla przykładu przedstawiono na rys. XIV,22 doświadczalnie ustalone krzywe zależności zastępczych aerodynamicznych współczynników tych sił C_{nz} i C_{tz} od kątów jakie tworzy oś wirnika z kierunkiem wiatru uzyskane przy dmuchaniu całego wirnika w tunelu aerodynamicznym. Widoczne jest, że odchylenie osi wirnika od kierunku wiatru wywołuje silny spadek naporu osiowego N , a zatem i spadek mocy. W wiatrakach starego typu (młynach) obrót dokonywany był przez obsługującego. Obracano cały wiatrak lub tylko głowicę wiatraka z wirnikiem (wiatraki holenderskie). W nowych typach obracanie odbywa się zawsze automatycznie. Osiągnąć to można kilkoma sposobami:



Rys. XIV,22. Zależność zastępczych współczynników siły nośnej i oporu czołowego od kąta γ zawartego między osią wirnika i kierunkiem wiatru



Rys. XIV,23. Ustawienie wirnika do wiatru za pomocą steru kierunkowego

a) **Ustawienie wirnika za pomocą steru kierunkowego.** Ster kierunkowy w postaci płytki pionowej jest ustawiony za głowicą wirnika (rys. XIV,23). Przy zmianie kierunku wiatru na powierzchnię steru działa siła aerodynamiczna powodująca obrót głowicy wraz z wirnikiem.

Jeżeli napęd jest przenoszony z wału wirnika na wał pionowy za pomocą przekładni stożkowej, to reakcja międzyzębna usiłuje obrócić głowicę wokół osi pionowej. Wtedy ster jest ustawiony w pozycji odchylonej od osi wirnika, dla skompensowania powyższego momentu. W przypadku stosowania bocznego steru regulacyjnego należy w ten sam sposób skompensować jego moment.

Siła działająca na ster kierunkowy może być wyznaczona z wzoru

$$P_s = C_R F_x \frac{\rho v^2}{2} \left(\frac{1-e}{1+e} \right)^2 \quad \text{kG} \quad [28]$$

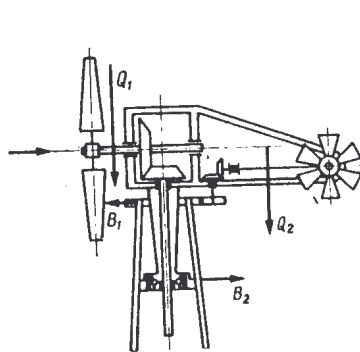
gdzie: C_R – współczynnik aerodynamiczny siły na sterze, F_x – powierzchnia steru, v – prędkość wiatru w m/s, $\left(\frac{1-e}{1+e} \right)^2$ – współczynnik uwzględniający zmniejszenie prędkości za wirnikiem.

Wielkość steru powinna być tak dobrana, aby nie dopuścić do ochyleń płaszczyzny wirnika większych od 10° . Ster kierunkowy reaguje szybko na zmianę kierunku wiatru, co powoduje powstanie znacznych momentów żyroskopowych. Toteż ten sposób regulacji stosowany jest na ogół przy niedużych średnicach wirników.

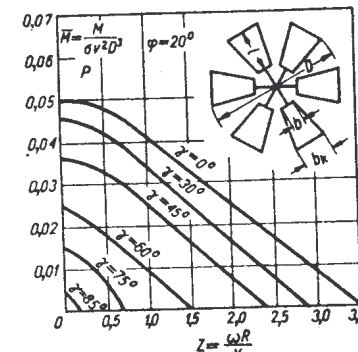
b) **Ustawienie za pomocą pomocniczych silników wiatrowych.** Jeden lub dwa wirniki pomocnicze są ustawione za głównym wirnikiem, przy czym ich płaszczyzny są prostopadłe do płaszczyzn wirnika głównego. Po zmianie kierunku wiatru wirniki te obracają się napędzając przekładnię zębatą, obracającą z kolei głowicę wiatraka (rys. XIV,24). Dobór odpowiedniego przełożenia tej przekładni zapewnia odpowiednią prędkość obrotową głowicy chroniąc wirnik przed nadmiernymi momentami żyroskopowymi.

Na rys. XIV,25 przedstawiono przykład charakterystyki pomocniczego silnika wiatrowego nastawczego w zależności od kąta jaki tworzy kierunek wiatru z osią jego wirnika. Zwykle przyjmuje się średnicę silnika pomocniczego około 0,15 do 0,2 średnicy silnika

głównego. Liczbę łopat przyjmuje się 4 do 6. Zalecane wymiary łopat: Szerokość na końcu $b_k = \frac{D}{3}$, szerokość przy piąście $b_p = \frac{D}{6}$. Długość $l = \frac{D}{3}$. Przekładnię dobiera się tak, aby prędkość kątowna obrotu wokół osi pionowej wynosiła 0,05 1/sek.



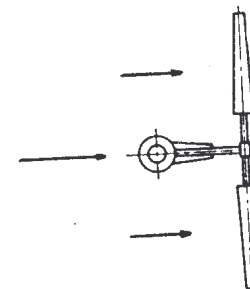
Rys. XIV,24. Ustawienie wirnika za pomocą pomocniczego silnika wiatrowego



Rys. XIV,25. Charakterystyka silnika nastawczego

c) **Ustawienie za pomocą umieszczenia wirnika za osią obrotu głowicy.** Umieszczenie wirnika za osią obrotu głowicy jest przedstawione na rys. XIV,26. Wirnik umieszczony być musi dość daleko od osi obrotu. Zmiana kierunku wiatru powoduje wystąpienie momentu, który ustawia płaszczyznę wirnika prostopadłe do kierunku wiatru. System ten jakkolwiek prosty ma poważną wadę jaką jest duża prędkość kątowna obrotu, wywołana małą stosunkowo odległością wirnika od osi obrotu. Drugą wadą jest niezrównoważenie statyczne głowicy.

d) **Ustawienie pod wiatr za pomocą silownika.** Stosuje się w silnikach wiatrowych o bardzo dużej mocy (dla $D > 30$ m). Zmiana kierunku wiatru powoduje wychylenie się tak zwanej chorągiewki wiatrowej, która włącza silnik elektryczny. Silnik za pośrednictwem przekładni mechanicznej obraca głowicę. Wyłączenie silnika następuje po osiągnięciu właściwego położenia głowicy.



Rys. XIV,26. Ustawienie wirnika do wiatru za pomocą umieszczenia wirnika za osią obrotu głowicy

10. Regulacja

Stałe zmiany prędkości wiatru powodują zmianę prędkości silnika wiatrowego. Toteż konieczne jest regulowanie mocy i prędkości obrotowej silników wiatrowych. Moc nominalną wiatraka dobiera się dla nominalnej prędkości wiatru ustalonej w zależności od średniej rocznej prędkości. Zalecić można $v = 8$ m/s przy średniej rocznej do 5 m/s, $v = 10$ m/s przy średniej rocznej do 7 m/s i $v = 14$ m/s przy średniej rocznej do 7 m/s. Przyjęcie mocy nominalnej dla większych prędkości wiatru jest niecelowe ze względu na znaczne niedobory mocy występujące przy mniejszych prędkościach oraz ze względów wytrzymałościowych.

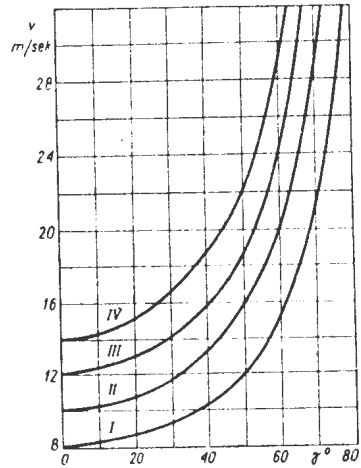
Regulacja może być wykonywana różnymi sposobami.

a) **Regulacja przez zmianę powierzchni czynnej łopaty**
Ten sposób stosowany w starszych typach silników (w wiatrakach) polegał na tym, że skrzydło było pokryte płótnem żaglowym, które można było zwijać. Inny sposób

to pokrycie łopaty deszczulkami, które także można było zdejmować. Pewne odmiany tej regulacji polegały na wykonaniu pokrycia łopat z ruchomych segmentów, które można było przez obrót wyłączyć z pracy. Regulacja opisanego typu jest niewygodna i na ogół wymaga zatrzymania silnika do zmiany powierzchni, nie zapewnia więc ciągłej zmiany mocy.

b. Regulacja przez zmianę położenia płaszczyzny wirnika w stosunku do kierunku wiatru

Regulacja polega na tym, że podczas wzrostu prędkości wiatru większej od nominalnej, płaszczyznę wirnika ustawia się skośnie do kierunku wiatru. Następuje przy tym zmiana współczynnika wykorzystania ξ . Jednocześnie zmienia się moduł szybkobieżności. Należy tak dobrać kąt pochylenia płaszczyzny wirnika γ w stosunku do płaszczyzny prostopadłej do kierunku wiatru, aby zachować stałą prędkość obrotową i stałą moc. W oparciu o doświadczalnie uzyskane charakterystyki wiatraka w zależności od γ , można ustalić odpowiednie kryteria doboru kąta γ . Przedstawiono je w postaci wykresnej na rys. XIV,27, jako wykres zależności kąta γ od prędkości wiatru. Każda krzywa odpowiada pewnej nominalnej prędkości wiatru.



Rys. XIV,27. Krzywa doboru kąta pochylenia wirnika w zależności od prędkości wiatru dla uzyskania stałej mocy i liczby obrotów

Regulację tego typu stosuje się przede wszystkim w silnikach wolnobieżnych. Jest ona realizowana automatycznie, przy czym stosowane są dwa sposoby:

1) Regulacja z zastosowaniem steru bocznego (rys. XIV,28)

Wirnik wiatraka jest zamocowany przegubowo. Siła aerodynamiczna działająca na powierzchnię steru usiłuje obrócić wirnik w lewo, sprężyna ciągnie w prawo. Zwiększenie prędkości wiatru powoduje zwiększenie siły aerodynamicznej na sterze i

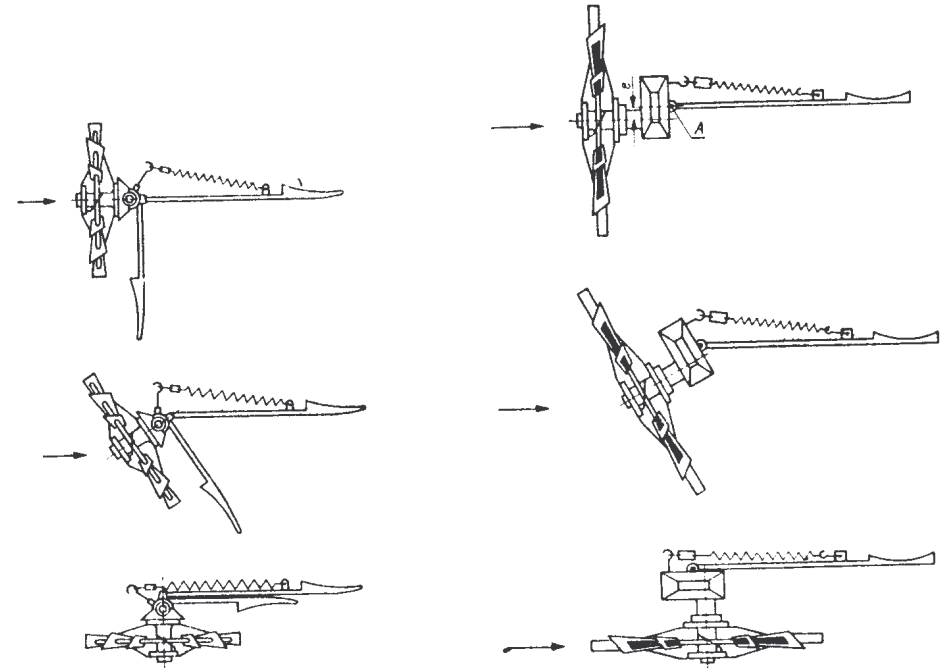
2) Regulacja z zastosowaniem mimośrodowego osadzenia wirnika (rys. XIV,29)

Obrót w lewo uzyskiwany jest tu dzięki momentowi sił aerodynamicznych działających na wirnik względem osi przegubu.

c. Regulacja za pomocą zmiany kąta natarcia łopat

Zmiana kąta natarcia łopat wywołuje zmianę siły nośnej, a zatem zmianę współczynnika wykorzystania ξ . W warunkach nominalnych kąt natarcia łopaty jest dobrany z warunków optimum doskonałości profilu. Przy zwiększeniu prędkości wiatru obrócenie łopaty powoduje zmianę kąta natarcia. Na ogół kąt natarcia zmniejsza się powodując spadek siły nośnej, a zatem i siły obwodowej. W niektórych urządzeniach stosuje się zwiększenie kąta natarcia, co powoduje na ogół nieznaczny wzrost siły nośnej i znaczny wzrost siły oporu czołowego, a zatem spadek siły T i momentu. System ten jest mniej korzystny, gdyż powoduje wzrost siły osiowej N , a więc i obciążenia wirnika (rys. XIV,3). Ten sposób regulacji stosowany jest w silnikach szybkobieżnych o małej

liczbie łopat. W silnikach o dużych średnicach obraca się nie cała łopata, a tylko jej koniec. Zmiana kąta natarcia odbywa się automatycznie, przy czym realizowane to może być w różny sposób.



Rys. XIV,28. Regulacja za pomocą steru bocznego

Rys. XIV,29. Regulacja za pomocą mimośrodowego umocowania wirnika

1) Zmiana kąta natarcia za pomocą regulatorów bezwładnościowych

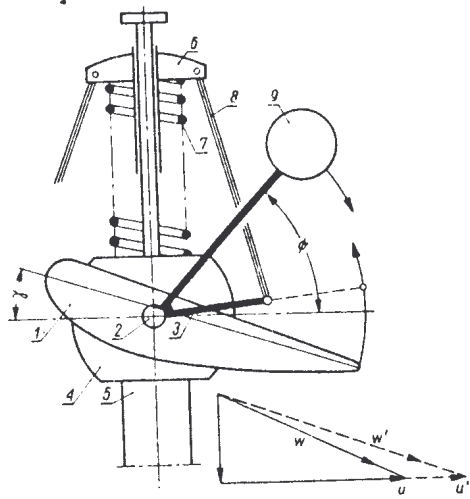
Jeden z przykładów takiej regulacji jest przedstawiony na rys. XIV,30. Masa bezwładna 9 przy zwiększeniu liczby obrotów łopaty usiłuje obrócić łopatę w prawo. Obrót w lewo następuje pod działaniem sprężyny.

2) Zmiana za pomocą regulatorów bezwładnościowych z użyciem stabilizatora

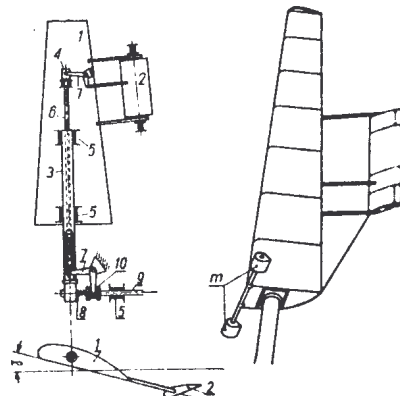
Schemat takiej regulacji systemu Sabinina jest przedstawiony na rys. XIV,31. Stabilizator jest umieszczony za łopata utrzymując ją pod odpowiednim kątem natarcia. Zmiana kąta pochylenia stabilizatora powoduje zmianę momentu aerodynamicznego i obrót łopaty. Zmianę kąta β uzyskuje się przez zmianę położenia masy bezwładnej 4 związanej ze zmianą prędkości obrotowej wirnika. Masa oddala się od osi obrotu przy zwiększaniu prędkości obrotowej. Do osi jest ściągana przez sprężynę 8. W innych rozwiązaniach zaś za pomocą ciężaru. Ponieważ bezwładność łopaty powoduje także jej obrót, dodano masy kompensacyjne m .

3) Zmiana kąta natarcia przez wykorzystanie bezwładności łopaty

W niektórych rozwiązaniach regulację uzyskuje się przez wykorzystanie bezwładności łopaty, która usiłuje obrócić się przy zmianie prędkości kątowej. Dodanie od-

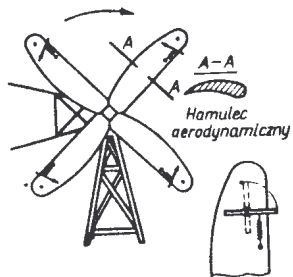


Rys. XIV,30. Regulacja przez obrót łopaty z zastosowaniem regulatora bezwładnościowego



Rys. XIV,31. Regulacja przy użyciu stabilizatorów (Sabinina-Krasowskiego)

powiednio położonych mas kompensacyjnych, których działanie na obrót jest przeciwnie pozwala uzyskać utrzymywanie stałej prędkości kątowej. System ten jest mało wypróbowany.



Rys. XIV,32. Schemat regulacji za pomocą hamulców aerodynamicznych (System Billau)

d. Regulacja za pomocą hamulców aerodynamicznych

Na końcach skrzydeł umieszcza się hamulce aerodynamiczne. Przy zwiększeniu liczby obrotów hamulce wychylają się dzięki wyzyskaniu ich bezwładności. Powrót ich do położenia normalnego (przylegają wtedy do płaszczyzny łopat) odbywa się za pomocą sprężyn. Schemat takiej regulacji systemu Billau przedstawia rys. XIV,32.

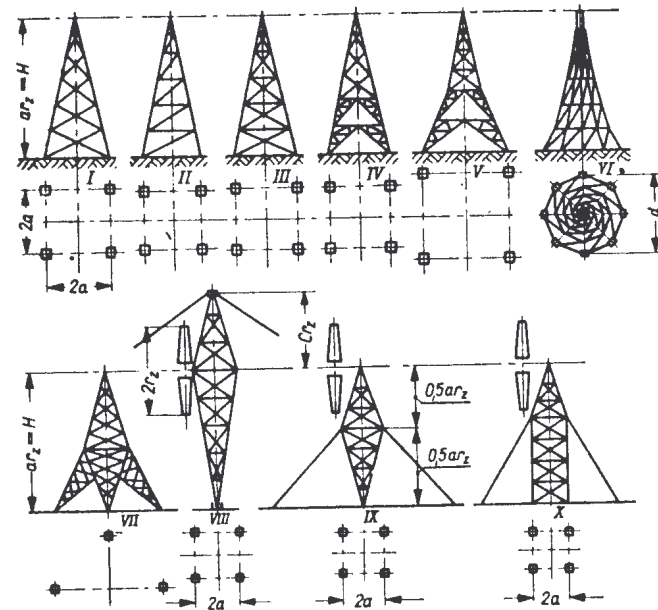
11. Konstrukcja wieży

Wieża, na której ustawia się silniki wiatrowe winna być odpowiednio wysoka. Silnik powinien pracować w potoku niezaburzonym, toteż należy go umieścić ponad przeszkodami terenowymi. Najmniejsza wysokość wieży liczona od podstawy do osi wirnika wynosi

$$H = h + c + R \quad \text{m} \quad [29]$$

gdzie: h – wysokość najwyższych przeszkód terenowych w otoczeniu silnika (drzew, budowli itp.), c – odległość między najwyższymi punktami przeszkód z najniższym punktem wirnika (wynosi ona 1,5 do 2 m), R – promień wirnika.

Typowe konstrukcje wież są przedstawione na rys. XIV,33.



Rys. XIV,33. Schematy konstrukcyjne wież

12. Przegląd typów silników wiatrowych

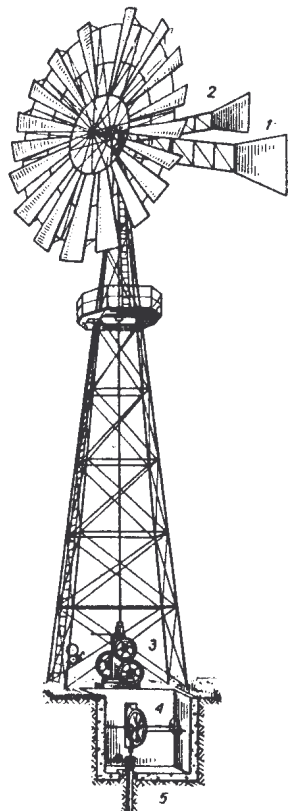
Konstrukcję wolnobieżnego silnika wiatrowego o dużej liczbie łopat produkcji radzieckiej typ TW – 8 przedstawia rys. XIV,34. Podobny silnik mniejszych rozmiarów produkcji amerykańskiej „Stover” przedstawia rys. XIV,35. Na rys. XIV,36 jest przedstawiony szybkobieżny trójłopatkowy silnik wiatrowy produkcji radzieckiej WIME D-12. Regulacja tego silnika odbywa się za pomocą stabilizatorów. Obraca się końcową część łopaty.

Na rys. XIV,37 wygląd silnika wiatrowego produkcji radzieckiej Ufimcewa Wietczynkina D-10. Zdjęcie szybkobieżnego silnika mniejszych rozmiarów produkcji niemieckiej Allgeier przedstawia rys. XIV,38.

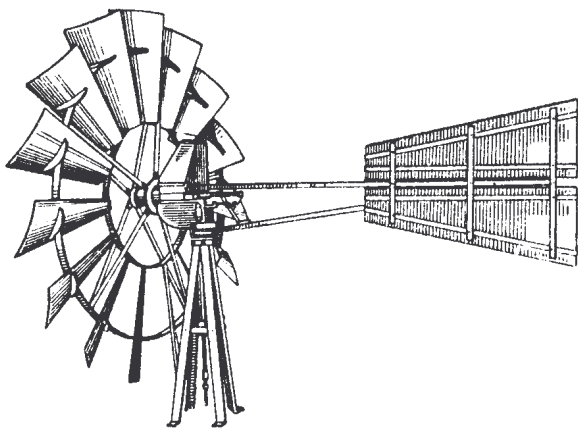
Silnik wiatrowy dużej mocy produkcji radzieckiej CAGI D-30 przedstawiony jest na rys. XIV,39. Zespół prądotwórczy i mechaniczny silnika są umieszczone w kabine na szczycie wieży. Kabina jest podparta wysięgnikiem kratowym opartym na wózku łączącym się przy obrocie po szynie kolejowej tworzącej tor kołowy o promieniu 20,5 m. Rys. XIV,40 przedstawia konstrukcję silnika wiatrowego o bardzo dużej mocy (1200 KM) produkcji niemieckiej MAN.

Specjalną konstrukcją posiada silnik wiatrowy produkcji angielskiej Andreau de Havilland (rys. XIV,41). Na rys. XIV,42 jest przedstawiony schemat przeniesienia napędu. Łopaty wirnika są wewnątrz puste (konstrukcja skorupowa). Wirnik tworzy pompę wysysającą powietrze z rury stanowiącej wieżę silnika. Przepływające powietrze napędza turbinę powietrzną, która obraca wał generatora.

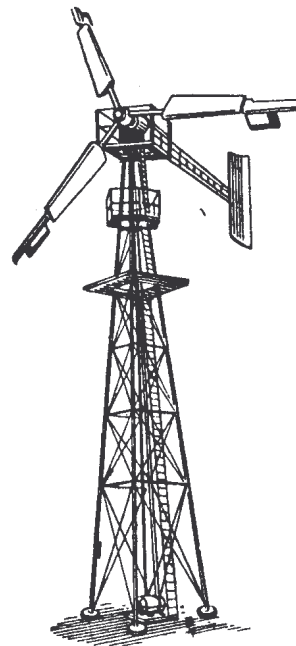
Dla orientacji podano dane charakterystyczne produkowanych silników wiatrowych w tablicy XIV-2. Tablica ta zawiera dane dotyczące najbardziej typowych konstrukcji silników wiatrowych.



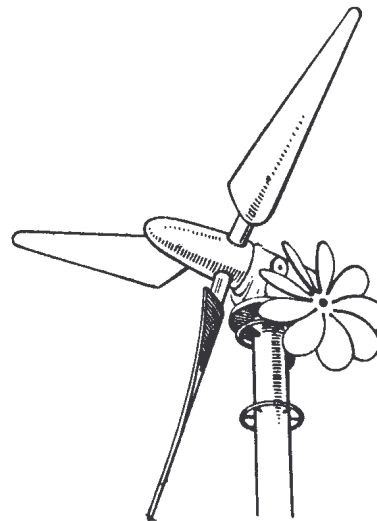
Rys. XIV,34. Silnik wiatrowy produkcji radzieckiej TW-8



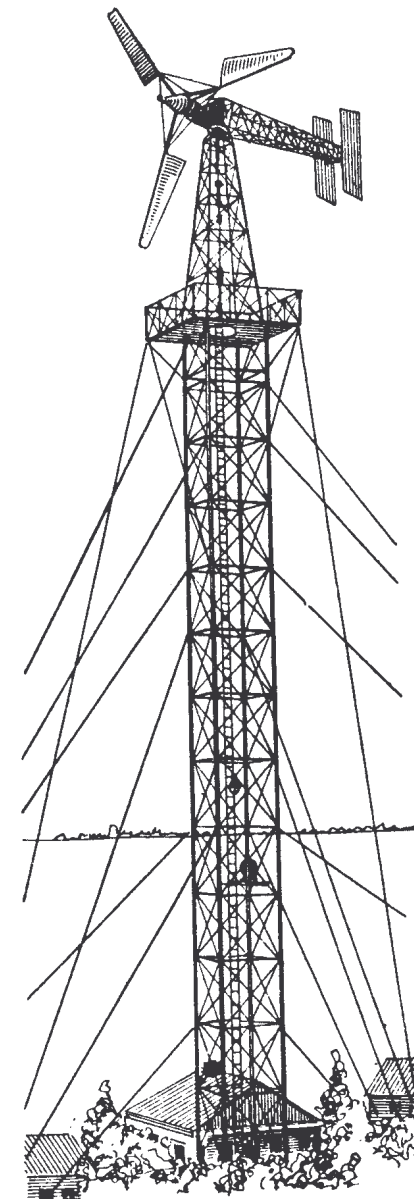
Rys. XIV,35. Silnik wiatrowy „Stover”



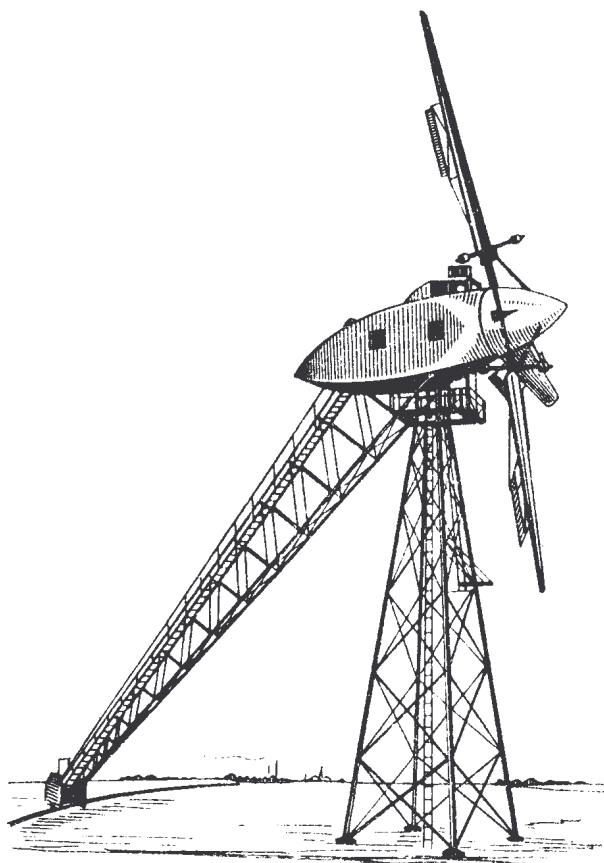
Rys. XIV,36. Silnik wiatrowy WIME D-12



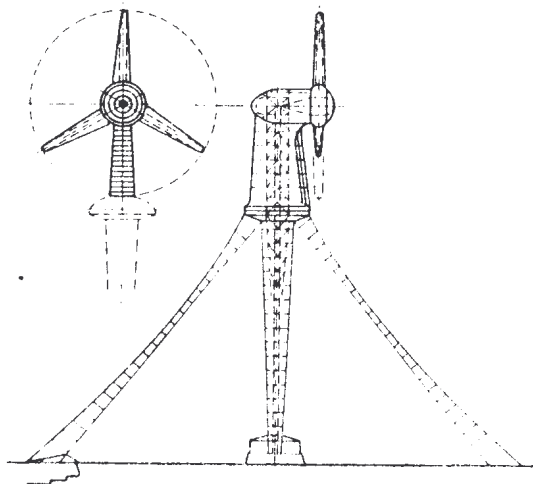
Rys. XIV,38. Silnik wiatrowy Allgeier



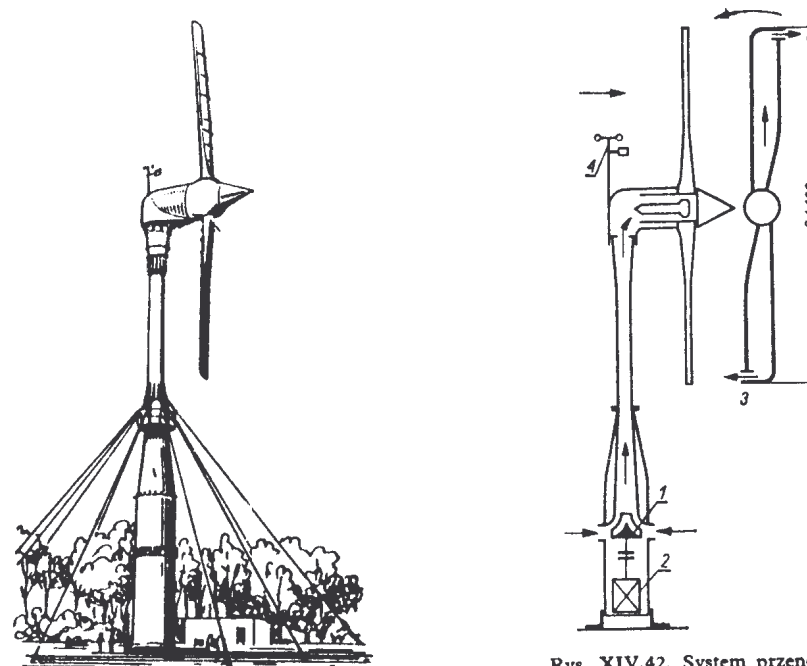
Rys. XIV,37. Silnik wiatrowy Ufimcewa - Wietczynkina D10



Rys. XIV,39. Silnik wiatrowy CAGI



Rys. XIV,40. Silnik wiatrowy MAN



Rys. XIV,41. Silnik wiatrowy Andreau - de Havilland

Rys. XIV,42. System przenoszenia napędu w SW Andreau - de Havilland

13. Obliczenia wytrzymałościowe elementów konstrukcyjnych silników wiatrowych

a. Łopaty

Nie można podać opracowanych zasad obliczenia łopat, a w szczególności ustalenia współczynników bezpieczeństwa. Niektóre informacje patrz (1). Przy obliczeniach należy opierać się na zasadach obliczeń skrzydeł samolotów lub łopat śmigłowców, których tu z braku miejsca podać nie można. Należy przy tym wychodząc z własności profilu użytego na łopate ustalić rozkład siły nośnej i oporu czołowego. Uwzględnić należy przy tym zmianę prędkości przepływu wzdłuż promienia wirnika. Do obliczeń bierze się pod uwagę zasadniczo przeciętną prędkość wiatru z uwzględnieniem przeciążenia wywołanego podmuchami.

Wyznaczony (z reguły w sposób przybliżony) rozkład sił aerodynamicznych pozwala na określenie momentów gnących i skręcających łopate. Oprócz sił aerodynamicznych należy uwzględnić przy obliczeniu moment żyroskopowy powstający przy obrocie wirnika ustawiającego się do wiatru. Obliczenie wytrzymałości elementów łopaty: dźwigarów, żeber i pokrycia zależy od jej konstrukcji.

b. Głowica

Dla obliczenia głowicy należy wyznaczyć następujące obciążenia: a) siłę czołową działającą na powierzchnię wirnika, b) ciężary wirnika i steru, c) moment sił żyroskopowych.

Na działanie tych sił oblicza się konstrukcję głowicy, wał poziomy i łożyska.

Tablica XIV-2. Dane charakterystyczne niektórych typów silników wiatrowych

Lp.	Silnik	Kraj	D m	Liczba łopat	N kW	F m³	Ciężar silnika kG	Ciężar wieży kG	Wysokość wieży m	n obr/min	Ciężar jedn. SW kg/m³	Uwagi
1	TW-5	ZSRR	5	18		19,6	1291	1198	15		66	
2	TW-8	ZSRR	8	18		50,3	1950	1900	15		38,8	rys. XIV,34
3	Samson	USA	3,05	18		7,3	267	—			35,6	
4	Samson	USA	4,9	24		18,8	1010	—			54	
5	Stover	USA	3,05	18		7,3	252	—			34,5	rys. XIV,35
6	Star	USA	4,3	18		14,5	772	—			53	
7	Aeromotor	USA	3,05	18		7,3	262	—			36	
8	Aeromotor	USA	4,5	18		18,8	950	495	16,2		50,5	
9	Herkules	W. Bryt.	3,05	18		7,3	254	640	15,2		35	
10	Herkules	W. Bryt.	4,9	18		18,8	320	980	15,2		49	
11	Herkules	W. Bryt.	5,5	18		23,7	1000	1040	15,2		42	
12	WIME D-3	ZSRR	3	3		7,07	44,4	15,3	4		6,25	łopatki ze sto- pów lek- kich lotnicz.
13	WIME D-5	ZSRR	5	3		19,6	575	1300	15		29,4	
14	WIME D-12	ZSRR	12	3		113	2755	1682	16		24,3	rys. XIV,36
15	WIME D-30	ZSRR	30	3		707	33900	15170	25		48	
16	CWEI D-12	ZSRR	12	3		113	2944	2553	12		26	
17	CAGI D-30	ZSRR	30	3		707	33900	15170	25		48	rys. XIV,37
18	Ufimcewa i Wietczynkina	ZSRR	10	3	3,5	78,5	1958	—	40	50	25	rys. XIV,37
19	PD-3	ZSRR	3	2		7,07	26	14	4		2,7	
20	Allgaier	NRF	10	3	6							rys. XIV,21 rys. XIV,38 rys. XIV,41
21	Nordwind GmbH	NRF	15	3	20					185		rys. XIV,42
22	Andreu - de Havilland	W. Bryt.		2	100			1090	16,2			
23	Smith-Putnam	USA	53	2	1250							
24	MAN	NRF	130	3	1200							rys. XIV,40

c. Wieża

Obliczenie wieży przeprowadza się wg zasad stosowanych w obliczeniu konstrukcji stalowych.

Obciążenie wieży pochodzi od: 1) siły czołowej działającej na wirnik, 2) ciężarów wirnika i głowicy, 3) ciężaru własnego konstrukcji wieży, 4) naporu wiatru na wieżę.

Obliczenie naporu można oprzeć na wynikach badań tunelowych (1). Napór określa się wzorem

$$P = R_x \frac{H}{H_m} v^2 \frac{m^2}{s^2} \quad [30]$$

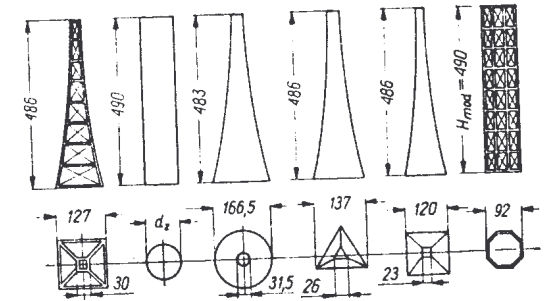
gdzie: R_x – współczynnik oporu czołowego modelu, H – wysokość wieży, H_m – wysokość modelu, v – prędkość wiatru.

Wartości R_x podane są w tablicy XIV-3, dla modeli przedstawionych na rys. XIV,43. W teście tablicy podano położenie wypadkowej naporu.

Prędkość wiatru v przyjmuje się dla warunków burzowych 40 ÷ 50 m/sek. W ramach obliczeń wieży należy także dobrać i obliczyć jej fundamenty.

Tablica XIV-3. Wartości współczynników oporu czołowego wież wiatraków

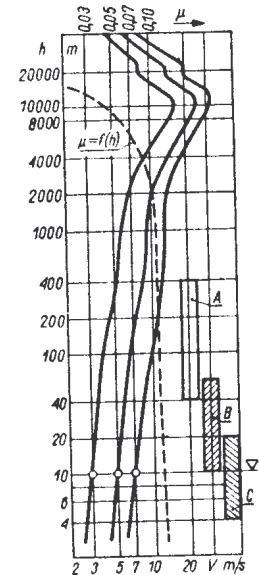
	R_x	H_x
a) wieża kwadratowa	0,00085	0,428 H
b) wieża pełna okrągła	0,00105	0,500 H
c) wieża pełna stożkowa	0,00130	0,412 H
d) wieża trójkątna pełna – krawędzią do wiatru	0,00170	0,320 H
e) wieża trójkątna pełna – krawędzią od wiatru	0,029	0,0285 H
f) wieża czworokątna pełna krawędzią lub ścianą pod wiatr	0,0024	0,298 H
g) wieża sześciokątna kratowa	0,0014	0,494 H



Rys. XIV,43. Modele wież zbadane w tunelu aerodynamicznym

Tablica XIV-4. Wartości rocznych średnich prędkości wiatru dla terenu Polski

Średnia roczna prędkość wiatru w m/s	Moc turbiny o średnicy 10 m (kW) obliczona dla wyszczególnionych prędkości
Śnieżka	7,0
Kasprowy Wierch	5,55
Hel	—
Poznań	1,83
Łódź	1,31
Chełm	1,24
Gdynia	1,27
Swinoujście	1,15
Poświętno	1,16
Suwałki	1,00
Warszawa	—
Toruń	0,79
Gdańsk	0,77
Biała Podlaska	0,68
Wrocław	0,65
Przemysł	0,52
Szczytno	0,45
Tarnów	0,43
Zielona Góra	0,37
Gorzów	0,39
Kielce	0,38
Szczecinek	0,36
Kłodzko	0,35
Koło	0,31
Zgorzelec	0,28
Racibórz	0,23
Krynica	0,21
Opole	0,17
Kraków	0,12
Cieszyn	0,12
Puławy	0,09
Zakopane	0,09

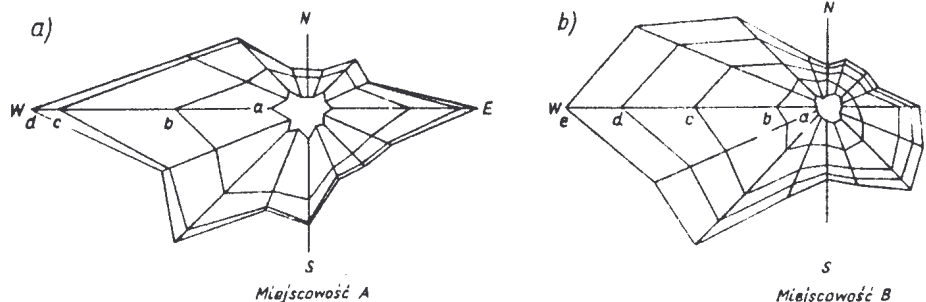


Rys. XIV,44. Zależność prędkości wiatru od wysokości

14. Informacje meteorologiczne

Podstawą działania silników wiatrowych jest istnienie wiatru. Wiatrem nazywa się poziomy ruch powietrza związany z różnicą ciśnień atmosferycznych w różnych miejscach atmosfery. Rozróżnia się przy tym wiatry typowe dla pewnych szerokości geograficznych wiejące w sposób ciągły oraz wiatry zmienne. Do pierwszych należą np. pasaty — wiatry wiejące w strefach podzwrotnikowych od biegunów w stronę równika z odchyleniem na zachód na półkuli północnej, a na wschód na półkuli południowej. Do tych samych wiatrów należą wiatry polarne wiejące od biegunów. Polska leży w strefie wiatrów zmiennych. W pobliżu mórz występują stałe wiatry zwane bryzami, wiejące w dzień od strony morza ku lądowi, w nocy odwrotnie. W rejonach górskich wiatry wieją w dzień od gór ku równikom, w nocy odwrotnie. Wiatry nieregularne typowe dla naszej szerokości geograficznej związane są z przesuwanymi się wyżami i niżami barometrycznymi.

Prędkość wiatru ulega stałym wahaniom, toteż stosuje się średnią prędkość okresową np. godzinową, dobową, roczną itp. Pomiar prędkości wiatru oparte są na stałych obserwacjach prowadzonych przez stacje meteorologiczne. Wartości średnich rocznych prędkości wiatru dla terenu Polski podaje tablica XIV-4.



Rys. XIV,45. Typowy rozkład kierunku i prędkości wiatru dla danej miejscowości

Prędkość wiatru zależy od wysokości. Zależność tę przedstawia rys. XIV,44. Na wykresie przedstawiono zalecane wysokości wież dla trzech kategorii silników wiatrowych mocy bardzo dużej, średniej i małej.

Charakterystykę kierunków wiatrów ustala się za pomocą rozkładu na kierunki tzw. róży wiatrów. Wskazuje ona czas trwania wiatru o danym kierunku i prędkości w danej miejscowości.

Przykład takiego rozkładu wiatrów przedstawia rys. XIV,45.

15. Lokalizacja silnika wiatrowego

Projektując siłownię wiatrową należy zapoznać się z charakterystyką wiatrową danej okolicy, biorąc pod uwagę przede wszystkim średnią wartość prędkości, powtarzalność wiatru oraz jego kierunki. Wybór miejsca pod silnik wiatrowy powinien być uzależniony od charakterystyki terenu i istniejących przeszkód terenowych zaburzających przepływ wiatru. Należy dążyć do tego, aby był zapewniony przepływ niezaburzony wiatru o kierunku poziomym. Należy unikać stawiania silników wiatrowych na stromych wzniesieniach cechujących się wznoszącymi lub opadającymi wiatrami lokalnymi.

Sąsiednie silniki wiatrowe winny być umieszczone w odległości nie mniejszej jak piętnaście średnic wirnika. Należy oczywiście wziąć pod uwagę cechy podłoża ze względu na fundamentowanie wieży.

16. Współpraca silnika wiatrowego odbiornika energii — akumulatory energii

Zmienność prędkości wiatru powoduje zmiany energii dostarczanej przez silnik. Regulacja mocy, o której mowa była w p. 11 ogranicza moc przy dużych prędkościach. Jednak przy małych prędkościach energia dostarczona przez silnik wiatrowy może być niedostateczna. Występujące zaniki wiatru powodują zanik produkcji energii.

Druga strona problemu regulacji to ilość energii pobieranej przez urządzenie napędzane przez silniki wiatrowe. Energia ta może także być zmienna. W związku z tym w pracy zespołu wiatrowego występują okresy, w których istnieje nadmiar energii i okresy, w których występuje niedomiar energii. Dla uniknięcia trudności związanych z tym zjawiskiem stosuje się różne akumulatory.

a. Akumulatory bezwładnościowe

Stosuje się tarcze wirujące magazynujące energię w postaci energii kinetycznej. Tarcza musi być połączona odpowiednim sprzęgłem z wałem. W okresie nadmiaru energii tarcza rozpędza się zwiększając swą energię kinetyczną, w okresie niedoboru oddaje ją na wał. Dla zmniejszenia strat tarcia o powietrze tarczę zamyka się w zbiorniku próżniowym. Ten rodzaj akumulatora wyrównuje energię w krótkich okresach czasu i nie jest w stanie zapewnić pracy urządzeń podczas dłuższej ciszy.

b. Akumulatory elektryczne

Stosuje się baterie akumulatorów ładowanych w czasie nadmiaru energii i oddających energię podczas niedoboru. System ten jest najbardziej rozpowszechniony i zapewnić może pracę urządzeń napędzanych przez dłuższy okres.

c. Akumulatory hydrauliczne

Stosuje się pompę wodną, która przepompowuje wodę do zbiornika położonego wyżej. Urządzenie celowe, gdy siłownia wiatrowa służy do nawadniania, gdyż magazynowana woda może być użyta w okresie ciszy. Można także wodę tę wykorzystać do oddania energii w okresie ciszy za pomocą turbiny wodnej. Urządzenie jest kosztowne, wymaga dużego zbiornika i ma małą sprawność.

d. Akumulatory powietrzne

Nadmiar energii zużywa się na sprężenie powietrza. Powietrze to może być użyte do napędu maszyn roboczych. System korzystny jeżeli siłownia wiatrowa ma za zadanie napęd maszyn roboczych.

e. Akumulatory cieplne

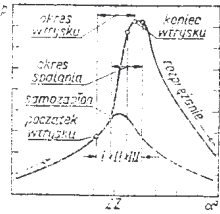
Nadmiar energii służy do ogrzewania wody za pośrednictwem grzejników elektrycznych. Woda może być użyta do celów ogrzewniczych. Można też produkować parę, którą stosuje się do celów ogrzewniczych technologicznych lub do napędu silników lub turbin parowych.

Literatura

1. W. Jagodziński: Silniki wiatrowe. WNT, Warszawa 1959.
2. K. Schneider Carius: Meteorologische Betrachtungen zu der Ausnutzung von Luftströmungen für Zwecke der Windkraftnutzung 1955.
3. E. M. Фатеев: Ветродвиатели и ветроустановки. Москва 1958.

trzy okresy uwidocznione na wykresie indykatorowym, podającym przebieg zmian ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego (rys.):

1) okres opóźnienia samozapłonu I — wtryskiwane do komory spalania paliwo styka się z powietrzem rozgrzanym do temp. sprężania, wynoszącej 450 do 650°C. W okresie tym występują w paliwie przemiany fizyczne (nagrzewanie i odparowanie) i bardziej od nich miarodajne przemiany chemiczne (egzotermiczne reakcje przygotowujące paliwo do samozapłonu), od których zależy głównie czas opóźnienia;



2) okres rozprzestrzeniania się płomienia II — po pojawieniu się płomienia (zazwyczaj w miejscach stykania się strumienia paliwa z otaczającym powietrzem) rozprzestrzenia się on do chwili ogarnięcia całego strumienia, co następuje z reguły przed zakończeniem wtryskiwania;

3) końcowy okres spalania III — pozostała część dawki paliwa zapala się w miarę wtryskiwania, spalając się jeszcze po zakończeniu wtrysku do chwili, gdy w cylindrze pozostaną już tylko drobne resztki paliwa, których dopalanie (nie objęte okresem właściwego spalania) trwa niekiedy do końca suwu rozprężania.

Szybkość spalania regulowana m.in. doborem kątów wtrysku (→ wtrysk paliwa, fazy) powinna być dobrana w ten sposób, aby ciśn. spalania utrzymywało się bez zmiany, bądź też nie przekroczyło założonej wartości, która wynosi w silnikach z zapłonem samoczynnym 55 do 90 kG/cm², w silnikach z doładowaniem zaś może wynieść powyżej 100 kG/cm². Spalanie zbyt szybkie powoduje nadmierne wzrost ciśn. i twardy bieg silnika, zbyt powolnemu natomiast towarzyszy długotrwałe dopalanie resztek paliwa, spadek mocy, wzrost jednostkowego zużycia paliwa i zbyt wysoka temp. spalin.

W silniku z zapłonem samoczynnym występuje ponadto niebezpieczeństwo spalania niezupełnego, połączonego z wydzielaniem się sadzy (→ spalanie) zanieczyszczającej ścianki cylindra i głowicy i powodującej tzw. dymienie z przewodu wydechowego silnika. Stan obciążenia silnika, przy którym pojawiają się w spalinach pierwsze widoczne oznaki dymienia, nosi nazwę granicy dymienia. W celu zapobieżenia dymieniu, które występuje najczęściej w szybkoobrotowych silnikach trakcyjnych pracujących pod prawie pełnym obciążeniem, reguluje się pompy wtryskowe w ten sposób, żeby przy największej mocy użytecznej silnika i przy znamionowej prędkości obrot. obciążenie silnika odpowiadało granicy dymienia.

Poniżej podano przeciętny procentowy skład spalin silników z zapłonem samoczynnym pra-

cujących przy biegu jałowym i pełnym obciążeniu

Składnik	CO ₂	H ₂ O	O ₂	CO	N ₂
Bieg jałowy	4,5	4	14	0,2	77
Pełne obciążenie	7	6	10	0,1	77

Lit. 122, 124, 126, 268

silnik spalinowy z tłokiem obrotowym → silnik spalinowy (tłokowy) obrotowy.

silnik stacjonarny — silnik spalinowy tłokowy.

silnik strumieniowy → silnik odrzutowy.

silnik średnioprężny → silnik (spalinowy tłokowy) z głowicą żarową.

silnik tandem → silnik parowy (tłokowy), układy.

silnik tłokowy → maszyna tłokowa.

silnik turbogazowy → turbina gazowa.

silnik turbodrzutowy → silnik odrzutowy.

silnik turbospalinowy → turbina gazowa.

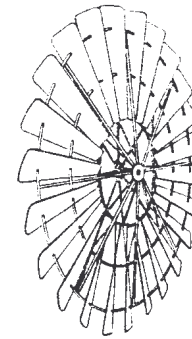
silnik turbośmigłowy → silnik odrzutowy.

silnik Wankla → silnik spalinowy (tłokowy) obrotowy.

silnik wiatrowy — silnik przepływowy przetwarzający energię kinetyczną wiatru w pracę mechaniczną. Obecnie stos. się prawie wyłącznie s.w., których osi zajmuje podczas pracy położenie równoległe do kierunku wiatru. Elementem przejmującym energię wiatru jest w takim silniku wirnik utworzony z układu łopatek zamocowanych promieniowo w piaskie i osadzony na poziomym (lub z lekką pochylonym) wale. Wał jest ułożyskowany w głowicy osadzonej obrotowo na wieży lub maszcie odpowiedniej wysokości. Poza tym w skład s.w. wchodzi: urządzenie kierunkowe do samoczynnego nastawiania wirnika pod wiatr, tj. osi równoległe do kierunku wiatru (→ silnik wiatrowy, nastawianie pod wiatr), urządzenia regulacyjne (→ silnik wiatrowy, regulacja) oraz zespół przeniesienia napędu. S.w. o osi wału ustawionej prostopadle do kierunku wiatru — poziome (silniki bębnowe) oraz pionowe (silniki karuzelowe i rotory) — wobec małej sprawności i innych niekorzystnych cech nie znalazły szerszego zastosowania.

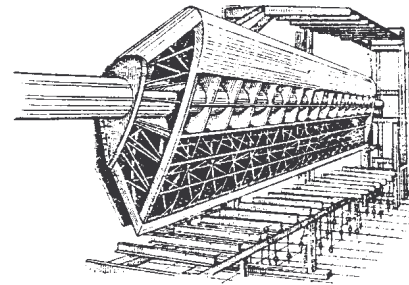
S.w. dzieli się w zależności od wartości wyróżnika szybkoobrotowości (→ silnik wiatrowy, wyróżnik szybkoobrotowości) na wolnobieżne, średnioobrotowe i szybkoobrotowe, z czym związana jest budowa wirnika. S.w. wolnobieżne, zwane turbinami wiatrowymi, mają wirnik o wielu (12 do 40) łopatkach (rys. 1) drewnianych lub z ocynkowanej blachy stalowej. Silniki te odznaczają się dużym momentem rozruchowym, wobec czego nadają się szczególnie do napędu maszyn uruchamianych pod obciążeniem (np. pomp tłokowych).

Wirniki s.w. średnioprężnych mają 4 do 7 łopatek. W silnikach wiatraków (→ siłownia wiatrowa) wirnik ma cztery łopaty (skrzydła), których drewniany szkielet o konstrukcji zębowej jest pokryty cienkimi deszczułkami lub płótnem żaglowym. Łopaty nowszych silników średnioobrotowych są niekiedy wykonane z odpowiednio wygiętej blachy stalowej, ale części mają kształty opływowe. Silniki te stanowią przejście do silników szybkoobrotowych — śmigłowych.



Rys. 1

Wirnik tych ostatnich ma kształt podobny do śmigła lotniczego z trzema lub dwiema (wyjątkowo jedną) łopatkami o kształtach opływowych. drewnianymi lub metalowymi. Łopaty bardzo dużych s.w. mają konstrukcję dźwigniową, pokrytą blachą, jak np. na rys. 2, przedstawiającym taką łopatę w trakcie montażu. Silniki śmigłowe w porównaniu z innymi s.w. mają największą sprawność aerodynamiczną, ale mały



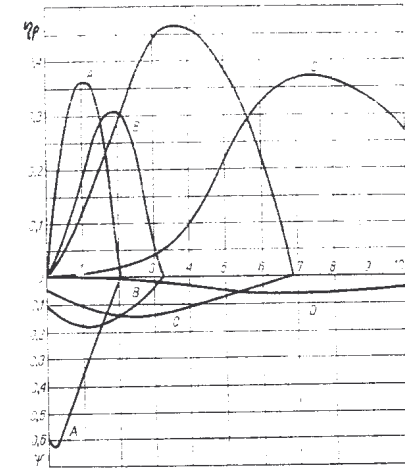
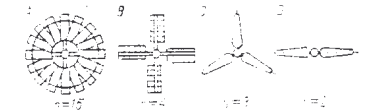
Rys. 2

moment rozruchowy, wskutek czego, w przypadku gdy napędzają maszyny, których rozruch odbywa się pod obciążeniem, trzeba stosować odpowiednie środki (np. włączać silnik dopiero, gdy uzyska dostatecznie dużą prędk. obrot.) lub specjalne urządzenia rozruchowe. Lit. 32, 102

silnik wiatrowy, charakterystyka — wykresnie przedstawiona zależność sprawności przepływowej η_p (→ silnik wiatrowy, moc) lub współczynnika momentu obrotowego ψ (→ silnik wiatrowy, moment obrotowy) od wyróżnika szybkoobrotowości Z (→ silnik wiatrowy, wyróżnik szybkoobrotowości).

Charakterystyki silnika wiatrowego umożliwiają dobór najwłaściwszych warunków pracy wirnika oraz ocenę jego właściwości. Charakterystyki wykresne przedstawiają się na podstawie bądź zależności teoretycznych, bądź badań wirników w

tunele aerodynamicznym. Na rys. przedstawiono dla porównania zestawienia charakterystyk



$\eta_p = f(Z)$ i $\psi = f(Z)$ wirników o różnej liczbie łopatek. Lit. 32, 102

silnik wiatrowy, moc — moc, którą silnik wiatrowy może w określonych warunkach rozwinąć teoretycznie lub rozwija w rzeczywistości. Odpowiednio do tego stos. się następujące określenia mocy:

1. Moc teoretyczna (moc strumieniowa) N_t — moc, którą można by uzyskać z przetworzenia energii wiatru w silniku doskonałym

$$N_t = \frac{\rho A}{4} (v + v_0)^2 (v - v_0)$$

gdzie: A — pole koła omiatanego przez łopaty silnika, ρ — gęstość powietrza, v — prędkość wiatru przed wirnikiem silnika, v_0 — prędkość wiatru za wirnikiem.

Moc teoretyczna stanowi tylko część mocy wiatru N_w (tj. mocy strumienia powietrza przepływającego z prędkością v przez przekrój o polu A) wynoszącej

$$N_w = \frac{\rho A v^3}{2}$$

Stosunek

$$\frac{N_t}{N_w} = \eta_s = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_0}{v}\right)^2 \left(1 - \frac{v_0}{v}\right)$$

nazywa się sprawnością strumieniową lub

współcz. teoretycznego wykorzystania energii wiatru. Sprawność ta zależy od stosunku $\frac{v_0}{v}$ i jej wartość maksymalna wynosi 0,687.

2. **Moc aerodynamiczna** N_a — moc przejęta przez łopaty silnika wiatrowego i przekazana na wał wirnika

$$N_a = \eta_a \cdot N_t = \eta_s \cdot \eta_a \cdot N_t$$

gdzie η_a — sprawność aerodynamiczna silnika wiatrowego, która jest miarą strat aerodynamicznych, na które składają się: a) straty wskutek tarcia powietrza o powierzchnie łopat; b) straty indukcyjne (wskutek wyrownywania się ciśn. powietrza po obu stronach łopat); c) straty wskutek zawrócania strumienia powietrza za wirnikiem; d) straty wskutek niewykorzystania środkowej części wirnika; e) straty wskutek częściowego odpływu powietrza na zewnątrz wirnika i wirowych zaburzeń strug powietrza za wirnikiem; f) straty wskutek wzajemnego oddziaływania łopat (głównie w silnikach wielołopatowych). Sprawność aerodynamiczna wynosi 0,5 do 0,8 i więcej, zależnie od typu silnika. Iloczyn

$$\eta_s \cdot \eta_a = \eta_p$$

nazywa się sprawnością przepływową lub współcz. aerodynamicznym wykorzystania energii wiatru.

3. **Moc użyteczna** N_u — moc przekazywana przez silnik wiatrowy odbiornikowi mocy

$$N_u = \eta_m N_a = \eta_s \cdot \eta_a \cdot \eta_m \cdot N_t = \eta_u \cdot N_t$$

gdzie: η_m — sprawność mechaniczna, która jest miarą strat wskutek tarcia w łożyskach, strat w przekładniach itp., η_u — sprawność użyteczna albo ogólna. Sprawność mechaniczna η_m wynosi 0,7 do 0,85, a szczytowa wartość sprawności użytecznej η_u ok. 0,4. Lit. 32, 102

silnik wiatrowy, moment bezwymiaryowy → silnik wiatrowy, moment obrotowy.

silnik wiatrowy, moment obrotowy — moment rozwijany przez silnik wiatrowy na wał napędowy. Moment ten jest równy

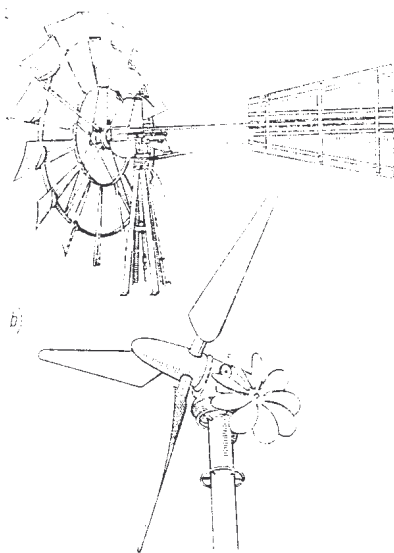
$$M_0 = v \frac{\rho v^2}{2} A \frac{D}{2}$$

gdzie: ρ — aerodynamiczny współcz. momentu obrotowego (krócej współcz. momentu obrotowego) wirnika przy ramieniu $D/2$ (niekiedy nazywany momentem bezwymiaryowym), ρ — gęstość powietrza, v — prędkość wiatru, A — pole omytane łopami wirnika, D — średnica wirnika. Współcz. ρ zależy od konstrukcji wirnika i wyróżnika szybkoobrotowości silnika wiatrowego (→ silnik wiatrowy, charakterystyka). Lit. 32, 102

silnik wiatrowy, nastawianie pod wiatr — ustawianie płaszczyzny obrotu wirnika silnika wiatrowego prostopadle do kierunku wiatru, w celu pełnego wykorzystania energii wiatru. W wia-

trakach wiejskich (→ silownia wiatrowa) stos. się nastawianie ręczne przez obrót całego wiatraka lub tylko jego górnej części — głowicy. Takie nastawienie jest mozolne, a wobec braku ciągłości związane ze stratami energii. Nastawianie pod wiatr nowoczesnych silników wiatrowych jest dokonywane samoczynnie przez jedno z następujących urządzeń (lub sposobów):

1. Ster kierunkowy w postaci pionowej płyty, ustawiony za głowicą i sztywno z nią połączony (rys. a). Przy zmianie kierunku wiatru na powierzchni steru działa siła aerodynamiczna po-



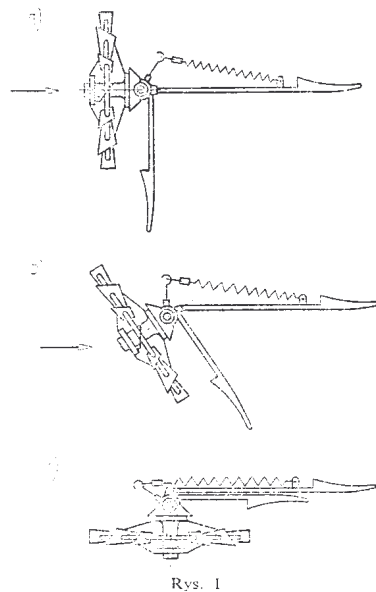
wodząca obrót głowicy wraz z wirnikiem; są stos. również stery o dwóch płytach. Nastawianie sterem kierunkowym stcs. się w małych i średnich silnikach wiatrowych, zwłaszcza wielołopatowych.

2. Pomocniczy silnik wiatrowy o dwóch (niekiedy o jednym) wirnikach osadzonych na wspólnym poziomym wale, umieszczonym za wirnikiem głównym prostopadle do jego osi (rys. b). W razie zmiany kier. wiatru pomocniczy silnik wiatrowy zaczyna się obracać, napędzając przekładnię zębatą, obracającą z kolei głowicę. Urządzenia tego typu są stos. w silnikach wiatrowych małej i średniej mocy.

3. Ustawienie wirnika silnika wiatrowego za głowicą (w kierunku wiatru) w dość dużej odległości od jej osi obrotu. Przy zmianie kier. wiatru występuje moment, który zwraca płaszczyznę wirnika prostopadle do nowego kierunku. Sposób ten bardzo prosty, ma jednak wiele wad (odsunięcie wirnika dość daleko poza wieżę, duży moment żyroskopowy utrudniający samonastawianie, zniekształcenie i hamowanie strumienia wiatru przez wieżę) i dlatego jest rzadko stos., i to tylko w silnikach największej mocy.

4. Zastosowanie silnika elektr. włączanego i wyłączonego przez chorągiewkę nastawczą umieszczoną na głowicy. Zmiana kier. wiatru powoduje odchylenie chorągiewki od położenia równoległego do osi wirnika, a to z kolei — zamknięcie przez ruchomy styk obwodu przedkabinika i uruchomienie silnika elektr. w odpowiednim kierunku. Silnik za pośrednictwem przekładni ślimakowej obraca głowicę aż do ustawienia wirnika silnika wiatrowego pod wiatr, po czym zostaje wyłączony. Nastawianie silnikiem elektr. stos. się w silnikach wiatrowych bardzo dużej mocy. Lit. 32, 102

silnik wiatrowy, regulacja — utrzymywanie (w przybliżeniu) nominalnej prędkości obrotowej, a więc i mocy silnika wiatrowego, mimo że prędkość wiatru przybiera wartości większe od wartości nominalnej i jest zmienna, zabezpieczenie całego układu podczas zbyt silnych wiatrów i niedopuszczenie do rozbiegania się silnika w razie jego odciążenia. Moc nominalna silnika wiatrowego odpowiada nominalnej (obliczeniowej) prędk. wiatru, dobranej w zależności od średniej rocznej prędk. Gdy prędk. wiatru jest mniejsza od nominalnej, wartości mocy i prędk. obrotowej silnika są mniejsze niż ich wartości nominalne i zmieniają się odpowiednio do zmian prędk. wiatru. W wiatrakach wiejskich (→ silownia wiatrowa) regul. polega na zmianie czynnych powierzchni skrzydeł przez usunięcie (zwykle ręczne) części poszycia (deszczulek,



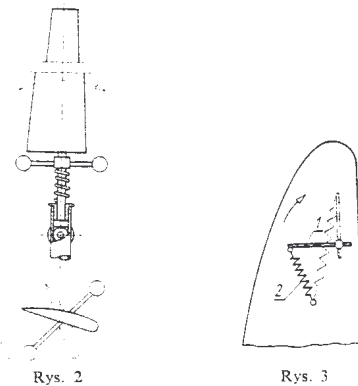
Rys. 1

płótna zagłowego) szkieletu łopat. Taka regul. jest raczej tylko przystosowaniem wiatraka do pracy podczas przewidywanego silniejszego

wiatru i na ogół może być dokonywana dopiero po zatrzymaniu silnika.

Urządzenia do samoczynnej regulacji można podzielić na dwie grupy: 1) wykorzystujące parcie wiatru; 2) działające na zasadzie sił bezwładności. Poza tym urządzenia obu grup mają różne rozwiązania konstr. do pierwszej grupy należy regul. przez zmianę położenia płaszczyzny wirnika względem kierunku wiatru. W rozwiązaniu przedstawionym na rys. 1 (widok z góry) wychylenie osadzonego przegubowo wirnika jest spowodowane siłą aerodynamiczną działającą na pow. steru bocznego, połączony sztywno z głowicą silnika i ustawionego prostopadle do osi wirnika. Gdy prędkość wiatru nie przekracza wartości nominalnej, płaszczyzna wirnika zajmuje położenie prostopadle do kierunku wiatru (rys. 1a) a parcie aerodynamiczne na ster boczny jest zrównoważone naciągami wstępnym sprężyny. Przy większej prędkości wiatru jego parcie na ster boczny przewyższa siłę sprężyny i wirnik wychyla się z położenia normalnego (rys. 1b), aż wreszcie przy wietrze huraganowym ($v > 30$ m/s) przyjmuje położenie równoległe do kier. wiatru (rys. 1c) i silnik przestaje pracować. Regulacja przez zmianę położenia wirnika ma zastosowanie głównie w silnikach wolnoobrotowych.

W silnikach szybkoobrotowych (śmigłowych) stos. się najczęściej urządzenia regulacyjne drugiej grupy. W rozwiązaniu przedstawionym na



rys. 2 regulacja polega na przekręcaniu łopat śmigła względem ich osi, co powoduje zmianę naporu aerodynamicznego, a więc i momentu obrotu. Gdy prędk. obrot. wirnika wzrasta, moment od sił bezwładności samej łopaty i mas (obciążników), umieszczonych u jej nasady na końcach ramion prawie prostopadłych do płata, pokonuje naciąg sprężyny i przekręca łopatę. Powrotny obrót łopaty odbywa się na skutek działania sprężyny.

Na działaniu sił bezwładności opiera się również regulacja przez hamowanie aerodynamiczne. W jednym z rozwiązań, przedstawionym na rys. 3, przy końcach łopat śmigła są osadzone

hamulce aerodynamiczne w postaci klap, które w normalnych warunkach pracy są utrzymywane przez sprężyny w położeniu równoległym do prędk. obwodowej osi klap. Gdy prędk. obrotowa wirnika wzrasta, siły odśrodkowe działające na hamulce pokonują opory sprężyn, odchyłają kłapy z normalnego położenia, tak że w skrajnym przypadku ustawiają się one wzdłuż łopaty. Odchylenie kłap powoduje wzrost oporów ruchu śmigła i zmniejszenie jego prędk. obrotowej.
Lit. 32, 102

silnik wiatrowy, sprawność — silnik wiatrowy, moc.

silnik wiatrowy, szybkobieżność — silnik wiatrowy, wyróżnik szybkobieżności.

silnik wiatrowy, współczynnik aerodynamiczny wykorzystania energii wiatru — silnik wiatrowy, moc.

silnik wiatrowy, współczynnik teoretycznego wykorzystania energii wiatru → silnik wiatrowy, moc.

silnik wiatrowy, wyróżnik szybkobieżności — szybkobieżność; stosunek prędkości obwodowej elementu obracającej się łopaty silnika wiatrowego do prędkości wiatru. Szybkobieżność różnych elementów łopaty jest różna — zmienia się proporcjonalnie do odległości elementu od osi obrotu oraz zależy od rozkładu prędk. napływu powietrza wzdłuż łopaty. Jako wskaźnik charakteryzujący silnik wiatrowy stos. się wyróżnik szybkobieżności odniesionej do okręgu opisywanego końcem łopaty, zwany wyróżnikiem szybkobieżności silnika wiatrowego

$$Z = \frac{u_z}{v} = \frac{r_z \omega}{v}$$

gdzie: u_z — prędkość obwodowa końca łopaty, r_z — odległość końca łopaty od osi obrotu wirnika, ω — prędkość kątowa wirnika, v — prędkość wiatru (w założeniu $v = \text{const}$).

Wyróżnik szybkobieżności charakteryzuje na ogół wielkość silnika wiatrowego potrzebnego do uzyskania określonej mocy; ze względu na wartość wyróżnika szybkobieżności silniki wiatrowe można podzielić na: wolnobieżne ($Z \leq 1,5$), średnobieżne ($1,5 < Z \leq 3,5$) i szybkobieżne ($Z > 3,5$). Wartości wyróżnika szybkobieżności silników śmigłowych (szybkobieżnych) o śmigle dwułopatowym dochodzą do 12, a o śmigle jednołopatowym — nawet do 20 (patrz też silnik wiatrowy).
Lit. 32, 102

silnik wielobiegowy — silnik (elektryczny) wielobiegowy.

silnik wielopaliwowy — silnik (spalinowy tłokowy) wielopaliwowy.

silnik wirnikowy — maszyna wirnikowa.

silnik wysokoprężny — silnik (spalinowy tłokowy) z zapłonem samoczynnym.

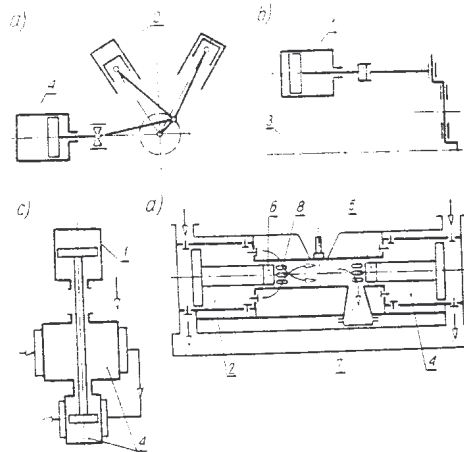
silnik z tłokiem wirującym — silnik spalinowy (tłokowy) obrotowy.

silnik z zapłonem iskrowym — silnik (spalinowy tłokowy) z zapłonem iskrowym.

silnik z zapłonem samoczynnym — silnik (spalinowy tłokowy) z zapłonem samoczynnym.

silnikosprężarka — zestaw sprężarki i silnika mających wspólne elementy, np. kadłub, skrzynię korbową, wał lub in., w wyniku czego maszyny te stanowią nierozłączną całość. S. są napędzane silnikami tłokowymi parowymi lub spalinowymi i dzielą się na s. korbowe (rys. a, b) i bezkorbowe (rys. c, d).

W s. korbowych wykorzystuje się czopy korbowe wału do wspólnego łożyskowania korbowodów silnika i sprężarki, osiągając w ten sposób zmniejszenie wypadkowych sił styecznych działających na wykorbienie i możliwość zasto-



Silnikosprężarka: a) z wałem o wspólnym czopie korbowym silnika i sprężarki; b) z wałem o oddzielnych czopach korbowych silnika i sprężarki; c) sprężarka bezkorbowa z napędem pasowym; d) sprężarka ze swobodnymi tłokami; 1 — silnik parowy, 2 — silnik spalinowy, 3 — oś cylindra sprężarki, 4 — sprężarka, 5 — tłok sterujący

sowania mniejszego koła zamachowego. Stos. się zazwyczaj układ dwóch cylindrów silnika i jednego sprężarki (rys. a), współpracujących na jednym wykorbieniu, układ taki sprzyja bowiem równomierności biegu silnikosprężarki.

W sprężarkach bezkorbowych z napędem parowym (rys. c), stos. najczęściej na parowozach do zasilania pneumatycznych urządzeń hamulcowych, tłok sprężarki jest połączony tłoczykiem z tłokiem silnika parowego obustronnego działania.

W przypadku napędu silnikiem spalinowym najczęściej spotyka się rozwiązanie, w którym centralnie umieszczona komora spalania jest ograniczona dwoma tłokami (rys. d). Praca silnika takich sprężarek jest oparta na zasadzie

dwustuwu. Po sprężeniu powietrza przez zbliżające się tłoki następuje wyrisk paliwa i jego zapłon. Rozprężające się spaliny wywołują ruch tłoków na zewnątrz i uchodzą z cylindra przez szczeliny wylotowe 7, odsłonięte krawędzią tłoka 5, przy czym dokładnemu usunięciu spalin sprzyja dopływ powietrza, wprowadzanego przez szczeliny 8 pod działaniem dmuchawy przepływającej. Przesuwając się na zewnątrz, tłoki sprężarki połączone z tłokami silnika spalinowego sprężają i wyłaczają na zewnątrz czynnik sprężany. Ruch tłoków silnika ku sobie jest wywołany energią rozprężającego się czynnika pozostałego w szkodliwych przestrzeniach cylindrów lub czynnika w cylindrach przewidzianych specjalnie do tego celu. Ruch tłoków jest zsynchronizowany układem wahaczy lub zębatek.

Do zalet s. należą: dobra sprawność mech., dobre wyrównowanie sił bezwładności, mały ciężar i zwartość budowy. Znalazły one zastosowanie jako sprężarki przewoźne, sprężarki wielostopniowe do celów specjalnych i, w przypadku sprężarek bezkorbowych z napędem spalinowym, jako generatory spalin do turbin gazowych.
Lit. 174, 263

silumin → stopy aluminium odlewnicze.

siła lepkości → Newtona prawo tarcia, → tarcie płynne.

siła skrawania → obróbka skrawaniem, siły.

siła spójności → kohezja.

siła zredukowana → redukcja sił.

siłownia — zakład przemysłowy (lub jego część), którego zadaniem jest wytwarzanie bądź energii mech. przetwarzanej bezpośrednio w pracę użytkową maszyn roboczych (np. w s. kopalnianych w pracę sprężarek), bądź energii elektr. W tym ostatnim przypadku s. nazywa się elektrownią, a jeżeli dostarcza przy tym i ciepło — elektrociepłownią.

W zależności od postaci i sposobu przetwarzania energii dostarczanej do s. rozróżnia się s. cieplne (→ elektrownia wodna) i jądrowe (wykorzystujące ciepło wydzielające się w reaktorze wskutek rozpadu jąder atomowych). Inne s., jak wiatrowe (wykorzystujące energię kinetyczną powietrza atmosferycznego), słoneczne (wykorzystujące energię promieni słonecznych), geotermiczne (przetwarzające energię ciepłą wnętrza ziemi) mają znaczenie lokalne lub są w stadium badań.
Lit. 149, 152, 177, 180

siłownia, moc rezerwowa — różnica pomiędzy mocą zainstalowaną, pomniejszoną o trwałe ubytki mocy, a maksymalnym możliwym obciążeniem siłowni. Moc zainstalowana pomniejszona o trwałe ubytki mocy nazywana jest mocą osiągalną. Rezerwa mocy w stosunku do mocy osiągalnej powinna wynosić 12 do 18%.

żeby było możliwe pokrycie: zmiennych ubytków mocy wynoszących 3—4% mocy osiągalnej, planowanych remontów (2—3%), ubytków awaryjnych (6—12%) oraz 2—3% rezerwy wirującej, potrzebnej do regulacji częstotliwości w układzie elektroenergetycznym.
Lit. 149, 152

siłownia, moc zainstalowana — sumaryczna moc znamionowa wszystkich zainstalowanych w siłowni silników i urządzeń, mierzona w jednostkach mocy oddawanej przez siłownię. W elektrowniach będzie to suma mocy wszystkich zainstalowanych turbozespołów. W siłowniach kopalnianych moc zainstalowaną charakteryzuje suma wydajności znamionowej turbodmucha. W elektrociepłowni zainstalowana moc cieplna określona jest sumaryczną największą mocą cieplną (w MW lub Gcal/h), którą mogą oddać wszystkie sieciowe podgrzewacze pracujące równocześnie, przy swej największej wydajności oraz największym natężeniu odbioru pary grzejnej. Np. moc zainstalowana elektrociepłowni dostarczającej ciepło zarówno w postaci wody gorącej, jak i pary, może być podana w postaci np.: 240 MW, 720 Gcal/h oraz 100 t/h.
Lit. 149, 152

siłownia, parametry pary — wielkości określające stan pary dołotowej (parametry dołotowe) oraz wylotowej (parametry końcowe). Stan pary dołotowej określa ciśn. mierzone w atmosferach absolutnych (ata) lub kg/cm² oraz temp. w °C. Stan pary wylotowej określa jej ciśn. i stopień wilgotności.

Parametry dołotowe mają decydujący wpływ na sprawność obiegu. Im wyższe są parametry pary dołotowej, tym większa jest sprawność, ale równocześnie większe są koszty budowy siłowni. Dlatego dobór parametrów dołotowych jest zagadnieniem techniczno-ekonomicznym. Typowe parametry dołotowe stosowane obecnie wynoszą 130 ata i 535°C. Szczególnie duże korzyści dają wysokie parametry dołotowe w przypadku turbin przeciwprężnych, instalowanych w elektrociepłowniach.

Parametry końcowe mają również znaczny wpływ na sprawność — im niższe jest przeciwciśnienie (próżnia w skraplaczu), tym większa jest sprawność. Dlatego chłodzenie przepływowe, które zapewnia lepszą próżnię — ok. 0,035 ata, jest korzystniejsze od obiegu, zapewniającego próżnię tylko ok. 0,065 ata.
Lit. 149, 151

siłownia, plan generalny — plan rozmieszczenia na terenie siłowni wszystkich budowli, torów kolejowych, dróg kołowych, pieszych ciągów komunikacyjnych, dróg dojazdowych, parkingów, doprowadzeń do linii wysokiego napięcia oraz terenów zielonych (rys. patrz str. 742).
Lit. 149

siłownia, schemat cieplny — graficzne przedstawienie, przy użyciu znormalizowanych symboli, wszelkich elementów układu cieplnego si-