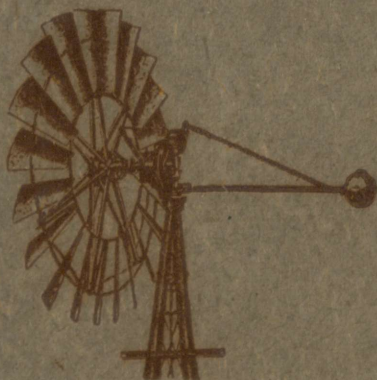


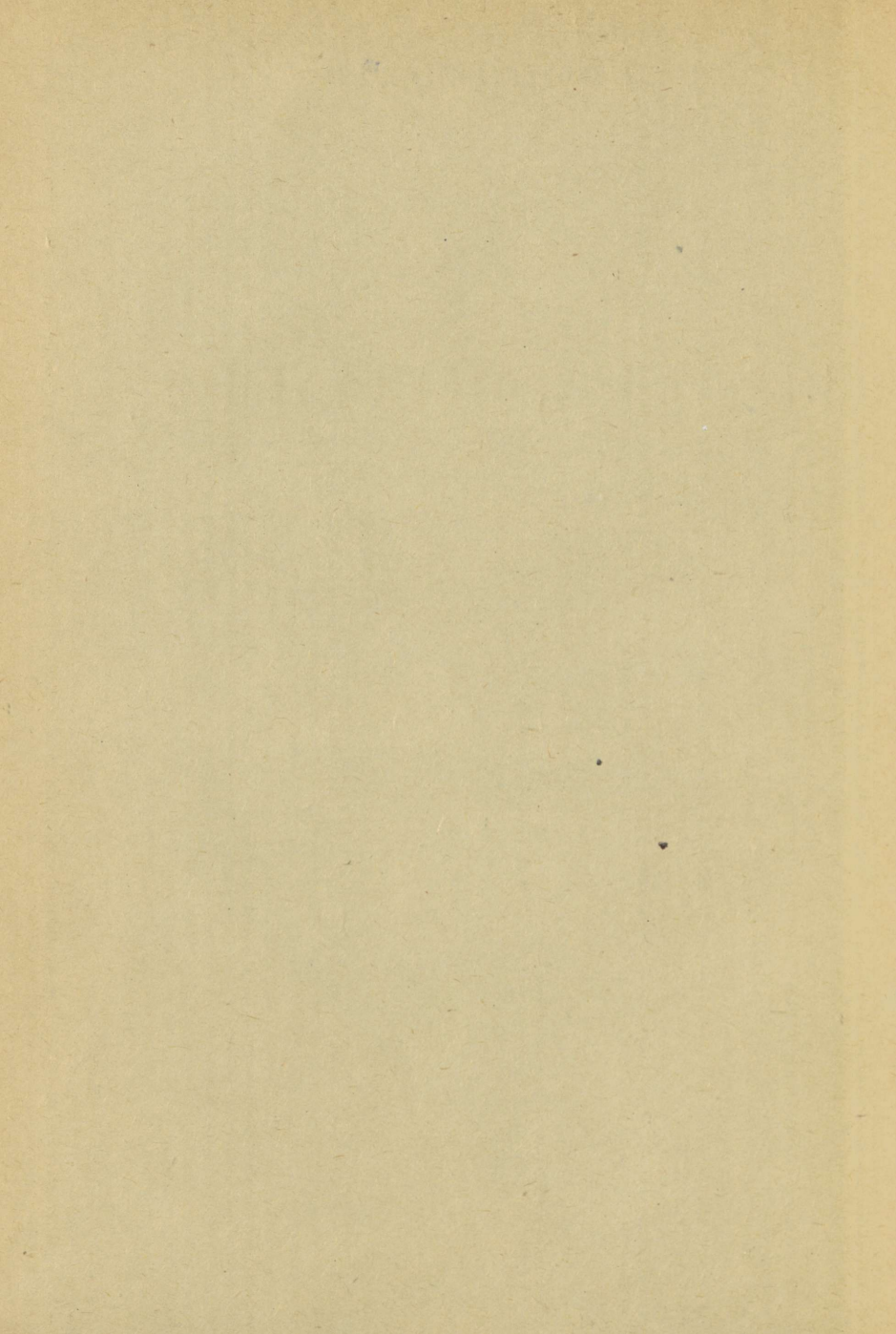
10073
D. 10073
GEORG VILLEMS

TUULE- MOOTORID



RK „PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“
TALLINN 1946

~~1~~
TUULEMOOTORID



GEORG VILLEMS

TUULEMOOTORID

ARHIIVKOGU

RK

„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“

TALLINN 1946



12135
A-16073

~~ARHIIVKOGU~~

S A A T E K S .

Tuule-energia kasutamisele majapidamises veevarustuseks, elektri tootmiseks ja tööstusmasinate käitamiseks osutatakse üha suuremat tähelepanu nii meil kui mujal.

Sellest alast huvitatuile olen tahtnud käesoleva teosega ülevaadet anda tuule-energiast ja selle rakendamise võimalustest, tuulemootorite konstruktsioonidest ja esile tuua neid aluseid, mis on vajalikud tuulemootori-tüübi valikul.

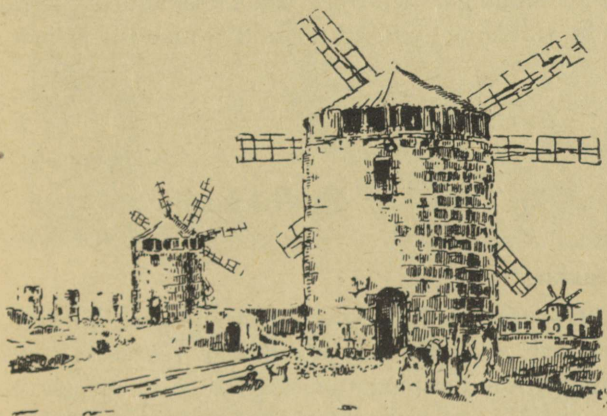
Süüa avaldan südamlitku tänu kõigile neile õhusõidu- ja meteoroloogia-ala eriteadlastele, kelle innukal kaasabil on koostatud käesoleva raamatu 2. ja 3. osa.

G. Villems.

1. Tuul energiaallikana.

Esimeseks õhu liikumise energia rakendamise viisiks oli kahtlemata veesõidukite liikumapanemine purjede abil. Hiljem kasutati purje vesiratta eeskujul, millest kujunesid tuulejõumasinad.

Õhu liikumise energia kasutamise probleemiga on inimesed tegelnud kõigi aegade jooksul ja ka praegune põlv on rakendunud selle lahendamisele, sest vee-energia hulk on piiratud ja tema kasutamine on seotud asukohaga.



Joon. 1. Vanad tuuleveskid Aleksandrias.

Maakera pindala on umbes 500 miljonit ruutkilomeetrit, millest umbes 150 miljonit km² on maismaad. Sellest pinnast 20 kuni 25 miljonit km² on tuulerikast ala. Viimasest võib ainult 10 kuni 15% hõlpsasti kasutamisele tulla; niisiis jääb tuulejõujaamade ehitamiseks 2 kuni 3 miljonit ruutkilomeetrit maa-ala.

Arvestades pindala $400 \times 600 = 240\,000\text{ m}^2$ 12 000-kW tuulejõujaama püstitamiseks langeks iga kW kohta 20 ruutmeetrit. 2000 miljardil ruutmeetril võiksime tuulest saada vähemalt

$$\frac{2\,000\,000\,000\,000}{20} = 100 \text{ miljardit kW elektrienergiat.}$$

Seega ei oleks veel kõik tuule-energia rakendatud, sest 100000 km merede kaldaid 20 km laiuselt võimaldaks veel saada 100 miljardit kW. Seega kogu maakera tuule-energia rakendamine annaks kokku 200 miljardit kW.

Tuule-energiat kasutati juba vanal ajal. Selle tõenduseks on vana Egiptuse linna Aleksandria läheduses tänini säilinud tuuleveskid, millede iga hinnatakse 3000 aastale (joon. 1).

Tehnika arenemisega on arenenud ka tuulemootorid, ning on kujunenud mitmed tuulemootori tüübid, milledest aga paljud on olemas alles kavanditena. Selle ala laiaulatuslikumaist kavatsusist võib nimetada H. Honnefi ideed (joon. 2 – mandril ja joon. 3 – merel).

2. Tuul kui õhuliikumine.

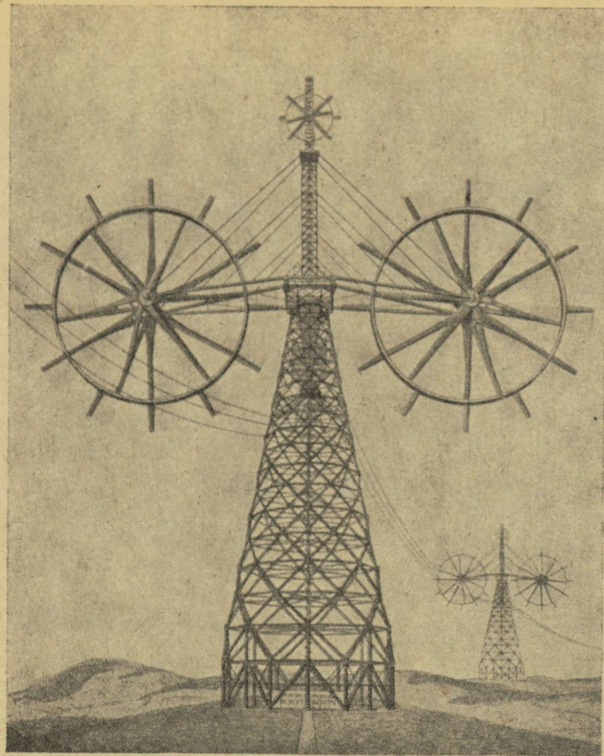
a. Õhu raskus.

Maakera ümbritseb õhukiht. Õhk on väryitu gaasiline aine, mille keskmine erikaal $\gamma = 1,226 \text{ kg/m}^3$ oleneb rõhkusest (veeaeruisaldusest), temperatuurist ning atmosfäärilisest rõhumisest. Näiteks suvel päikesepaisteliste palavate ilmadega on õhk kuivem ja soojem ning seega kergem kui hilissügisel vihmaste ja külmade ilmadega.

b. Õhu liikumise kiirus.

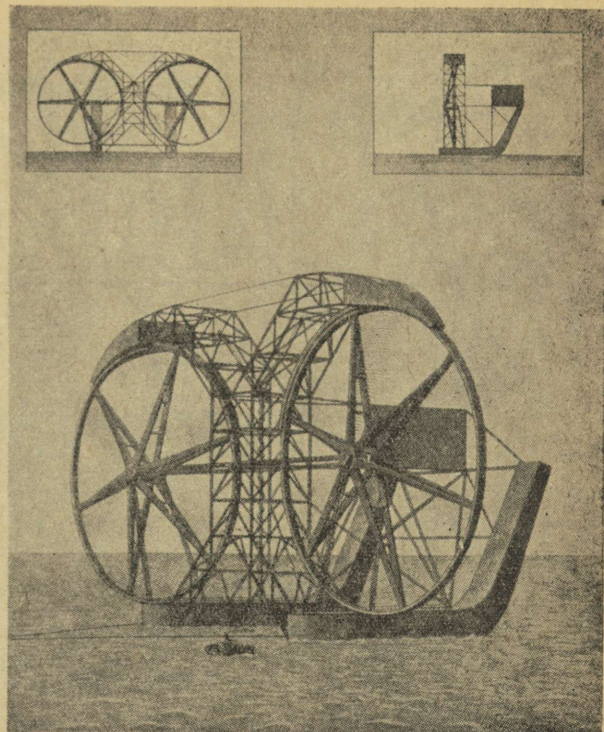
Õhk võib liikuda horisontaalses ja vertikaalses suunas. Õhu liikumist horisontaalses suunas nimetatakse tuuleks. Tuule tugevuse määrajaks on õhu tihedus ja liikumise kiirus (tuule kiirus).

Varematel aegadel määrati tuule kiirust tuulikute käivitamisel kui ka merel purjetamisel kogunud isikute vaatluste alusel. Tuule kiirust määrati 10- või 12-astmeliste skaalade alusel tuule tugevuse tähistajate loodusnähtuste järgi. Säärast 12-astmelist skaalat tarvitas 1805. aastal inglise admiral Beaufort.



Joon. 2. Mandril.

H. Honnefi tuulejõuamade kavandid.



Joon. 3. Merel.

Hiljem kujundati „Rahvusvaheline tuulte tugevuse skaala“ ehk nn. Beaufort'i skaala. Tabelis nr. 1 on märgitud tuulekiirused ja -surved selle skaala alusel.

Tabel 1. Beaufort'i skaala.

| Beaufort'i skaala | Tuule | | Tuule iseloom |
|-------------------|----------------------|--|----------------|
| | kiirus v m/sek | surve $\frac{\rho v^2}{2}$ kg/m ² | |
| 0 | 0—0,5 | 0—0,0156 | tuulevaikus |
| 1 | 0,6—1,7 | 0,0225—0,11805 | väga nõrk tuul |
| 2 | 1,8—3,3 | 0,202—0,686 | } nõrk tuul |
| 3 | 3,4—5,2 | 0,696—1,685 | |
| 4 | 5,3—7,4 | 1,76—3,4 | keskmine |
| 5 | 7,5—9,8 | 3,51—6,00 | värske |
| 6 | 9,9—12,4 | 6,12—9,60 | tugev |
| 7 | 12,5—15,2 | 9,75—14,40 | } väga tugev |
| 8 | 15,3—18,3 | 14,6—20,6 | |
| 9 | 18,3—21,5 | 20,9—28,8 | } torm |
| 10 | 21,6—25,1 | 29,2—39,4 | |
| 11 | 25,2—29 | 29,7—52,6 | } raju |
| 12 | üle 29 ¹⁾ | üle 52,6 | |

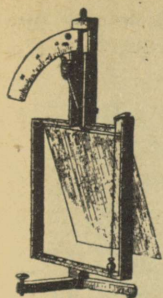
Tänapäeval mõõdetakse tuule kiirust nn. anemomeetritega. Anemomeetreid on mitmesuguse konstruktsiooniga. Üldjoonis võiksime nad jagada kahte liiki: liikuva ja liikumatu antenniga anemomeetrid. Seejuures nimetame antenniks tuule mõju vastuvõtvat osa anemomeetrist.

Levinud esimese liigi anemomeetreist võiks nimetada Wild'i pendelanemomeetrit (joon. 4) ja Robinson'i kausstuulikut (joon. 5). Esimene neist peab tuulelipust tuule suunda juhitud olema, kuna viimane on tuule suunast sõltumatu.

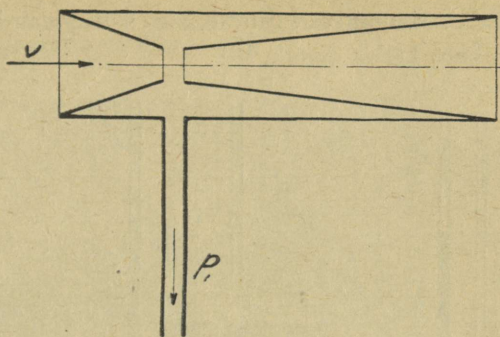
Liikumatu antenniga anemomeetreist on tuntumad Venturi (joon. 6) ja Pitot' (joon. 7) torud.

Tuule mõõtmiseks need torud ühendatakse mikromanomeetritega. Neist lihtsamat kujutab joon. 8, milles vedeliku pindade vahe määrab

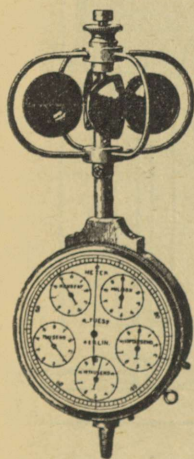
¹⁾ Suurimaks kiiruseks, mis maapinnal seni mõõdetud, on 54 m/sek. orkaani puhul Manilas Filipiinidel ja Mauritiuse saarel.



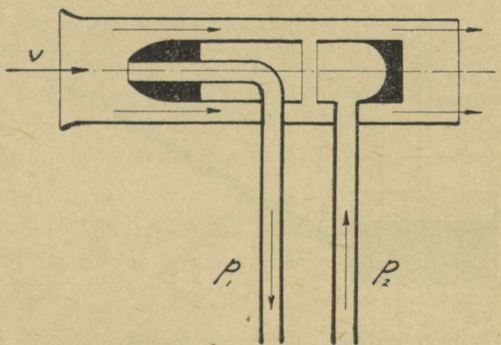
Joon. 4. Wild'i pendelanemomeeter.



Joon 6. Venturi toru läbilõikes.



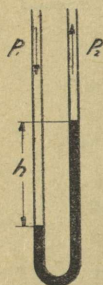
Joon. 5.
Robinsoni kausstuulik.



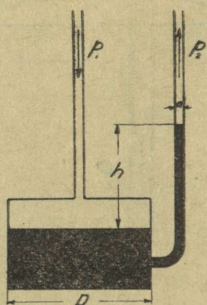
Joon. 7. Pitot' toru läbilõikes.

rõhumissamba kõrguse h . Rõhumissamba kõrguse h leidmine mõlema pinna kõrguse lugemisega ei ole praktiline, millest tingituna kasutatakse joon. 9 kujutatud mikromanomeetrit. Selle manomeetri üks vedelikupind on niivõrd suur $\left(\frac{d}{D} < \frac{1}{20}\right)$, et selle pinna kõrguse kõikumine anumas on väga väike, nii et samba kõrguse h määramiseks piisab ainult peenema samba pinna asendi lugemisest vastaval

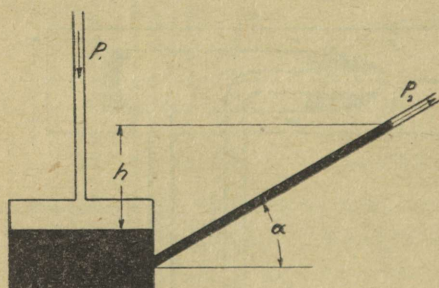
skaalal. Manomeetri tundlikkuse suurendamiseks antakse peenemale sambale kallak (joon. 10).



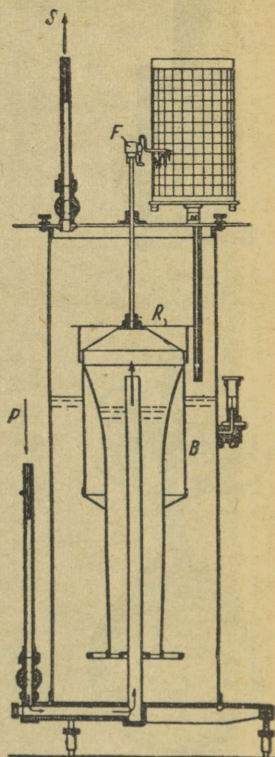
Joon. 8.



Joon. 9.
Prandtl'i mikromanomeeter.



Joon. 10. Füssi mikromanomeeter.

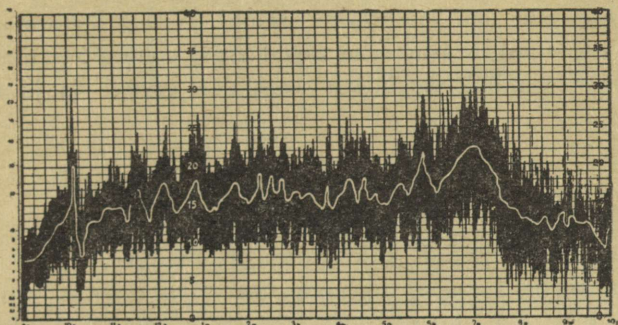


Joon. 11. Füssi
universaal-anemograaf.

Tuulekiiruste pidevaks registreerimiseks kasutatakse anemomeetrit ühendatult registreerimiseadisega. Seda aparaati nimetatakse anemograafiks. Joon. 11 kujutab Füssi universaal-anemograafi. See töötab Pitot' toruga, mõjutab vedelikus üles-alla hõljuvat Dines'i kellukest, millega ühenduses olev varras joonestab pöörlevale trumlile tuulekiiruste joone.

Anemograafi, mis peale kiiruse registreerib ka tuule suunda, nimetatakse anemorumbograafiks.

Õhu liikumise kiirus on väga muutlik, mis avaldub ka anemograafi joonestatud anemogrammil (joon. 12).



Joon. 12. Anemogramm.

Tabel 2. Meetriline tuule skaala.

| Kiirus m/sek. | Surve kg/m ² | Tuule tugevuse nr. | Kiirus m/sek. | Surve kg/m ² | Tuule tugevuse nr. | Kiirus m/sek. | Surve kg/m ² | Tuule tugevuse nr. |
|------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1 | 0,1 | 0,2 | 18 | 26 | 6,7 | 35 | 98 | 10,4 |
| 2 | 0,4 | 0,5 | 19 | 29 | 7,0 | 36 | 104 | 10,6 |
| 3 | 0,8 | 0,8 | 20 | 32 | 7,2 | 37 | 110 | 10,8 |
| 4 | 1,3 | 1,0 | 21 | 36 | 7,5 | 38 | 116 | 11,0 |
| 5 | 2 | 1,3 | 22 | 39 | 7,8 | 39 | 122 | 11,2 |
| 6 | 3 | 1,6 | 23 | 43 | 8,0 | 40 | 128 | 11,4 |
| 7 | 4 | 2,0 | 24 | 46 | 8,2 | 41 | 135 | 11,6 |
| 8 | 5 | 2,5 | 25 | 50 | 8,4 | 42 | 141 | 11,8 |
| 9 | 7 | 3,0 | 26 | 54 | 8,6 | 43 | 148 | 12,0 |
| 10 | 8 | 3,5 | 27 | 59 | 8,8 | 44 | 155 | 12,2 |
| 11 | 10 | 4,0 | 28 | 63 | 9,0 | 45 | 162 | 12,4 |
| 12 | 12 | 4,3 | 29 | 68 | 9,2 | 46 | 170 | 12,6 |
| 13 | 14 | 4,7 | 30 | 72 | 9,4 | 47 | 177 | 12,8 |
| 14 | 16 | 5,0 | 31 | 77 | 9,6 | 48 | 185 | 13,0 |
| 15 | 18 | 5,5 | 32 | 82 | 9,8 | 49 | 192 | 13,2 |
| 16 | 21 | 6,0 | 33 | 87 | 10,0 | 50 | 200 | 13,4 |
| 17 | 23 | 6,3 | 34 | 93 | 10,2 | | | |

Kuna tuule-energia kasvab kiiruse kolmanda astmega, s. o. tuule kiiruse 2-kordseks kasvamisel kasvab energia 8-kordseks, siis tuulejõuseadmete arvutamisel peame aluseks võtma säärase keskmise tuulekiiruse, mis on vaatlustest saadud kiiruse kolmanda astme korrutis selle kiiruse esinemise sagedusega, saadud korrutiste summeerimisest, summa jagamisest vaatluste arvuga ja juurimisest:

$$v_k = \sqrt[3]{\frac{n_1 v_1^3 + n_2 v_2^3 + \dots + n_n v_n^3}{n_v}} \quad (1)$$

v_k on otsitav keskmine tuulekiirus; $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ on üksikud mõõdetud kiirused ning n_v on vaatluste arv, kusjuures $n_v = n_1 + n_2 + \dots + n_n$; n_1, n_2, n_n on üksikute kiiruste esinemise sagedused.

Kui näiteks ühe päeva jooksul vaatleja poolt mõõdetud tuulekiirused olid kell

$$7.00 \quad v_1 = 12 \text{ m/sek.},$$

$$,, \quad 13.00 \quad v_2 = 10 \text{ m/sek.},$$

$$,, \quad 21.00 \quad v_3 = 6 \text{ m/sek.},$$

siis selle päeva keskmine tuulekiirus on

$$v_k = \sqrt[3]{\frac{12^3 + 10^3 + 6^3}{3}} \approx 10 \text{ m/sek.},$$

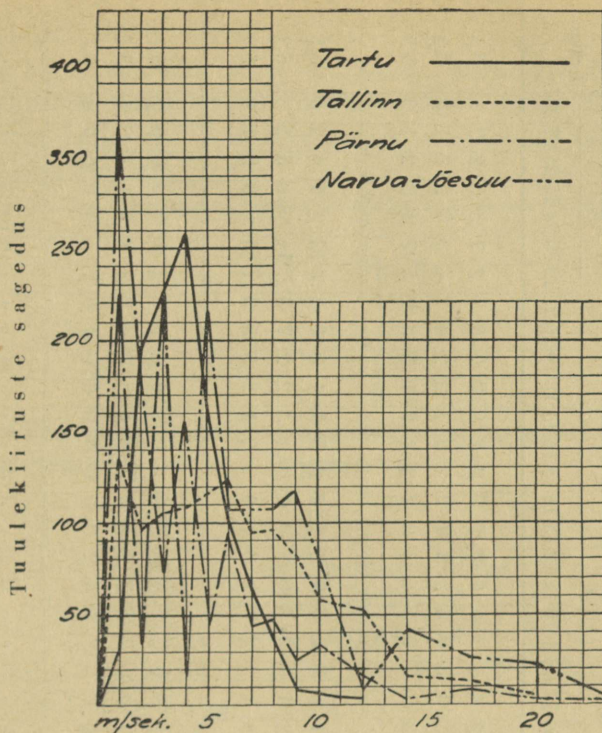
siinjuures $n_1 = 1$; $n_2 = 1$; $n_3 = 1$.

Sellekohased arvutused Eestis valitsevate tuulte kohta on teinud A. Kärnsna töös „Tuule-energia jaotusest Eestis“. Ilmunud Loodusvarade Instituudi kirjastusel.

Et tuulte kiirus aasta vältel väga vaheldub, siis ülevaate annab nende korduvus.

Vaadeldes tuulekiiruse andmeid Eestis 1933. aasta kohta, nähtub, et tuulte kiiruste sagedus teeb järsu languse 10–12 m/sek. juures. Sisemaal, Tartus, pole registreeritud 1933. a. vältel tuulekiirusi üle 12 m/sek. (joon. 13).

Joon. 13 toodud kõverjoontest selgub ka, et sisemaal tuulekiirus on ühtlasem, kuna mereäärsetes piirkondades tuulekiirus on suurem ja kõikumavam. Iseloomustavaks näiteks võiks veel tuua 1933. a. veebruarikuu andmed tuulekiiruste kohta (tabel 3).



Joon. 13.

c. Tuulekiiruse sõltuvus kõrgusest.

Suur-tuulejõuamade kasutamisel tuleb arvesse peamiselt kõrgemate õhukihtide energia.

Näiteks Jaapanis 10 km kõrgusel on talve kestel keskmine tuulekiirus peaaegu püsivalt 75 m/sek. Maapinna lähedal piirdub aga keskmine tuulekiirus ainult kuni 10 m/sek. See nähtus on seletatav seega, et kõrgel õhu liikumine on vaba nendest takistustest, mis esinevad maapinnal (metsad, mäed jne.). Mida lähemale maapinnale, seda enam maapinna kuju ja iseloom mõjutavad tuulekiirust, millest on ka tingitud tuulekiiruste vahed mäeharjadel ja voortel.

Tabel 3.

Tuulekiirused m/sek. 1933. a. veebruarikuu andmed.

| Vaatusjaamad | Kell | K u u p ä e v a d | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Keskm. | | |
|--------------|------|-------------------|----|----|----|----|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | | 27 | 28 |
| Tartu | 7 | 2 | 6 | 5 | 4 | 7 | 2 | 4 | 1 | 7 | 6 | 6 | 3 | 7 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 1 | 2 | 7 | 5 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3,5 |
| | 13 | 1 | 8 | 5 | 3 | 9 | 3 | 3 | 2 | 7 | 3 | 5 | 2 | 7 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 4 | 1 | 4 | 8 | 5 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3,5 |
| | 21 | 3 | 7 | 4 | 6 | 5 | 3 | 2 | 3 | 9 | 5 | 5 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 5 | 7 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3,5 |
| Tallinn | 7 | 4 | 14 | 9 | 1 | 14 | 1 | 6 | 3 | 12 | 3 | 9 | 5 | 2 | 2 | 0 | 5 | 2 | 1 | 3 | 8 | 2 | 5 | 12 | 8 | 1 | 4 | 2 | 5 | 5,1 |
| | 13 | 3 | 12 | 7 | 7 | 12 | 2 | 1 | 4 | 12 | 5 | 10 | 2 | 9 | 3 | 0 | 1 | 3 | 2 | 2 | 7 | 3 | 7 | 14 | 9 | 0 | 3 | 1 | 6 | 5,2 |
| | 21 | 8 | 8 | 9 | 12 | 4 | 4 | 1 | 8 | 20 | 8 | 12 | 8 | 1 | 0 | 7 | 3 | 1 | 2 | 5 | 5 | 3 | 7 | 10 | 5 | 3 | 2 | 1 | 8 | 5,9 |
| Pärnu | 7 | 0 | 12 | 6 | 0 | 8 | 2 | 3 | 0 | 7 | 7 | 4 | 5 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2,7 |
| | 13 | 0 | 12 | 10 | 3 | 10 | 2 | 0 | 2 | 7 | 4 | 10 | 2 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 4 | 0 | 7 | 8 | 3 | 1 | 1 | 0 | 4 | 3,4 |
| | 21 | 5 | 7 | 7 | 3 | 8 | 0 | 0 | 3 | 17 | 5 | 6 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 7 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 3,1 |
| Narva-Jõesuu | 7 | 6 | 8 | 1 | 10 | 6 | 0 | 5 | 0 | 5 | 12 | 8 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 3,6 | |
| | 13 | 5 | 8 | 5 | 8 | 12 | 3 | 6 | 1 | 10 | 3 | 10 | 1 | 12 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 0 | 1 | 17 | 10 | 1 | 1 | 0 | 5 | 4,5 |
| | 21 | 5 | 8 | 3 | 6 | 5 | 5 | 1 | 0 | 14 | 8 | 3 | 1 | 1 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 3 | 0 | 5 | 17 | 5 | 1 | 0 | 0 | 3 | 3,5 |

Uldiselt liigub õhk kõrgemates kihtides, kuhu ei küüni maapinna konarused, suurema ning ühtlasema kiirusega. Näiteks ühtedel mõõtmistel Eiffeli tornis oli tuulekiirus 305 m kõrgusel 8,7 m/sek., kuna samal ajal 21 m kõrgusel oli ta ainult 2,1 m/sek. – seega neli korda väiksem.

Tuulekiiruse muutumine kõrgusega oleks Hellmanni järgi:

$$h = 0 \text{ kuni } 2 \text{ m } \frac{v}{v_0} = \sqrt[4]{\frac{h}{h_0}}$$

$$h = 2 \text{ kuni } 16 \text{ m } \frac{v}{v_0} = \sqrt[5]{\frac{h}{h_0}}$$

Sama teadlase järgi on tuule keskmist kiirust kõrgustel 16 ja 500 m vahel võimalik arvutada järgmise valemiga:

$$v = 2,7 \sqrt[5]{h}$$

Bilgrimi andmete järgi on tuule keskmine kiirus

$$v = \frac{2,97 + 0,38 h + 0,00122 \cdot h^2}{1 + 0,061 \cdot h + 0,00008 \cdot h^2}$$

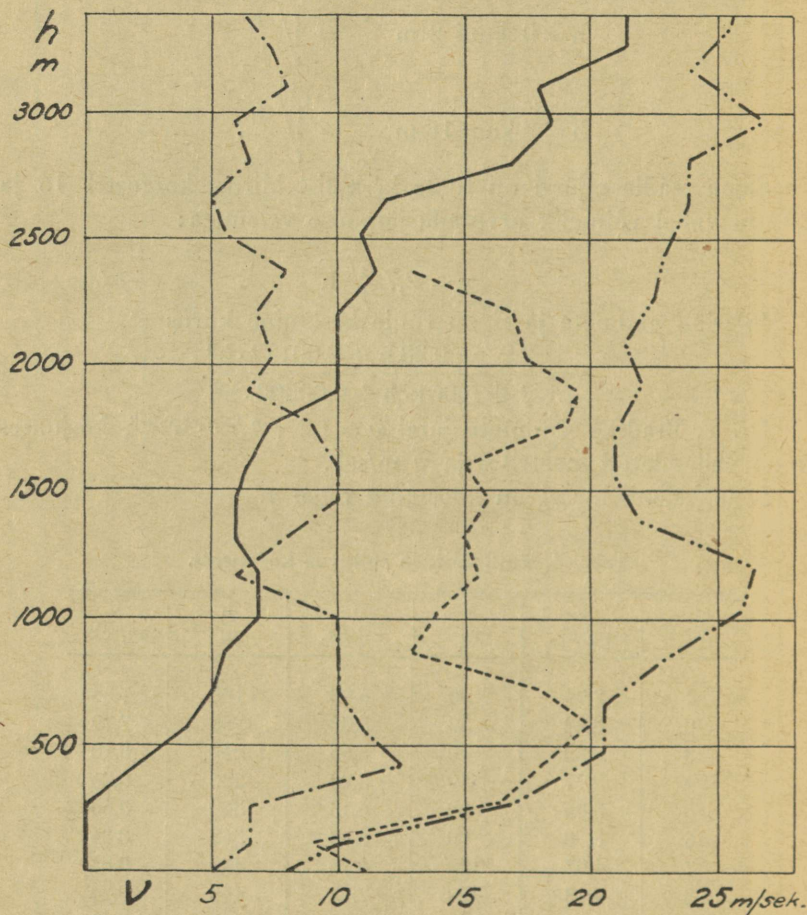
Dr. F. Brattke andmete järgi $v = 1,2 + 1,79 \cdot h^{0,246}$, kusjuures h on väljendatud meetrites ja v m/sek.

Selle valemi alusel on koostatud tabel 4.

Tabel 4. Tuulekiiruse sõltuvus kõrgusest.

| h m | v m/sek. | h m | v m/sek. | h m | v m/sek. |
|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|
| 1 | 2,99 | 20 | 4,95 | 180 | 7,64 |
| 2 | 3,22 | 30 | 5,32 | 200 | 7,79 |
| 3 | 3,53 | 40 | 5,63 | 240 | 8,10 |
| 4 | 3,77 | 50 | 5,88 | 280 | 8,26 |
| 5 | 3,86 | 60 | 6,15 | 320 | 8,60 |
| 6 | 3,98 | 80 | 6,48 | 360 | 8,84 |
| 7 | 4,07 | 100 | 6,75 | 400 | 9,04 |
| 8 | 4,18 | 120 | 7,08 | 440 | 9,24 |
| 9 | 4,27 | 140 | 7,25 | 480 | 9,41 |
| 10 | 4,36 | 160 | 7,45 | | |

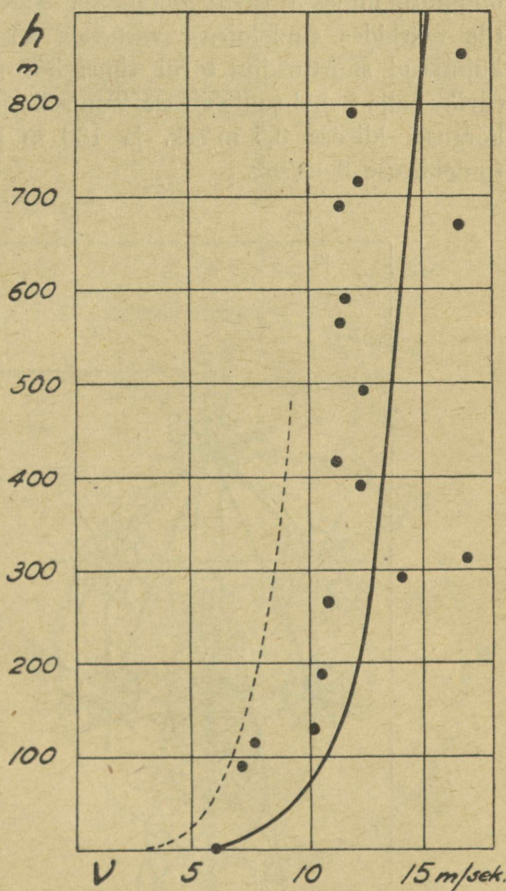
Tabelis 4 märgitud kiirused vastavalt kõrgustele ei ole mõõdu-
 andvad kõigile piirkondadele, sest tuulekiirus on muutlik, see
 tähendab kõikuv aastaaegadel ja päevade jooksul. Tallinna Ulemiste
 Lennujaama pilootpallide vaatluste andmeist nähtub, et 1933. a.
 14. apr. (joon. 14 märgitud — joonega) kuni 300 m kõrguseni õhu-
 kihtide liikumist ei olnud. Kuid sellest piirist ülespoole kuni 3500 m



Joon. 14. Uksikvaatlused.

kõrguseni tuulekiirus kihtides oli suurenev astmeliselt, võttes kõrgusega kiirust juurde 0 kuni 22 m/sek. Seevastu aga 9. veebruari mõõtmised (märgitud — — — joonega) näitasid maapinnal 5 m/sek. (maapind asetseb 40 m üle merepinna), 400 m kõrgusel 12,5 m/sek. 1000 – 1500 m vahel 6 – 10 m/sek. ja kõrge- mal 5 – 8 m/sek. Neist andmeist nähtub, et tuulekiirust ülemistes õhukihtides ei ole võimalik otsustada maapinna lähedase õhuliikumise alusel vaatluse momendil, mida veel tõendavad joon. 14 toodud kõverad mõõtmistest 15. nov., märgitud — · — · — joonega, ja 24. jaan., märgitud - - - - - joonega.

Ulevaatlikuma pildi tuulekiirustest annab aasta keskmine. Nii on joon. 15 täppidega märgitud vastavalt kõrgus- tele tuule keskmised kiirused Tallinna Ulemiste Lennujaamas teostatud pilootpallide vaatluste andmetel 1938. a. kohta. Maapinnal keskmist tuulekiirust 6 m/sek. aluseks võttes kujuneksid tuulekiirused sõltuvalt kõrgusest

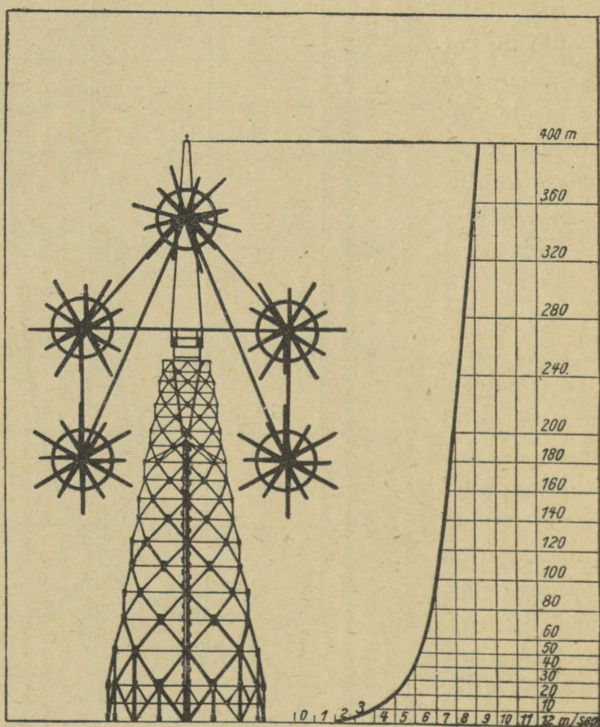


Joon. 15.

Tuulekiirus eri kõrgustes 1938. a. kohta.

joon. 15. pideva joonena. Võrdluseks toome tab. 4 andmed katkend-
joonega tõmmatuna.

Sellepärast peab tuulejõumootorite projekteerimisel arvestama õhukihti, millesse tiivik asetatakse. Näiteks tuulejõujaama projek-
tile märkides tuulekiiruse vastavalt kõrgustele saame joon. 16
kujutatud suurturbiini torni tipus 350 m kõrgusel asuva ülemise
tiiviku telje kohal tuulekiiruse 9 m/sek., järgmise kahe ratta 270 m
kõrgusel kiiruse 8,5 m/sek. ja 180 m kõrgusel asuval teljepaaril
tuulekiiruse 8 m/sek.



Joon. 16.

H. Honnefi tuuleturbiini kavand.

d. Tuule suund.

Tuule suund tähistatakse ilmakaarte alusel: S – W – N – E (lõuna, lääs, põhi, ida). Need ilmakaared poolitatuna annavad SW – NW –

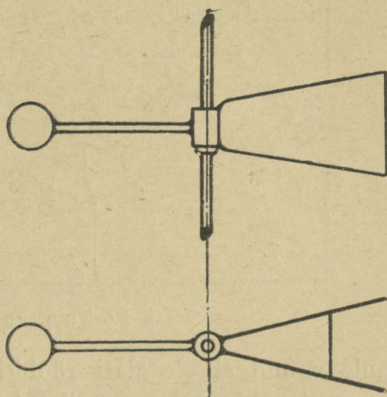
NE – SE (edel, loe, kirre, kagu) ja nende poolitamisel saaksime WSW – WNW – NNW – NNE – ENE – ESE – SSE – SSW.

Tuule suund määratakse suunanäitajaga, milledest levinum on joon. 17 kujutatud nn. Wild'i tuulelipp.

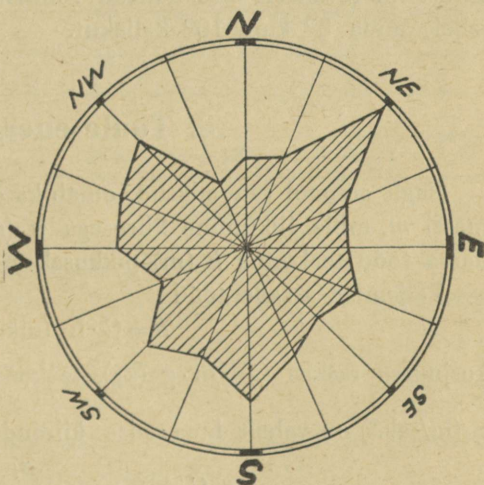
Üksikasjalisemaid andmeid Eestis valitsevate tuulte suundade kohta leiame K. Kirde töös „Andmed Eesti kliimast“, ilmunud 1939. a. Tartu Ülikooli Met.-obs. kirjastusel.

Ulevaate tuulesuundadest saaksime märkides tuule suundade sagedusi ilmakaartele, joonistades nn. tuuleroosi. Joon. 18 on näitena toodud Tallinnas 1933. a. mõõdetud tuulesuundade tuuleroos. Sellest nähtub, et 1933. a. oli kõige rohkem NE-, seejärel S-, siis NW-tuuli jne. Kõige vähem oli NNW- ja üldisemalt põhjatuuli.

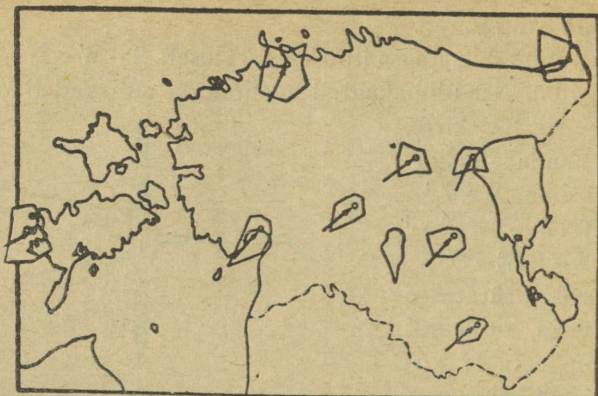
Tuulesuuna muutlikkusest tingituna peab tuulemootori tiibratas olema suuteline pöörduma igasse ilmakaarde, seepärast tiibratta mehhanism asetatakse vabalt pöörlevale alusele.



Joon. 17. Wild'i tuulelipp.



Joon. 18. Tuuleroos.



Joon. 19. Tuulesuunad Eestis.

Tuule suund ei ole alati rööbiti maapinnaga, sest maapinna ebatasasused põhjustavad mõnikord tuule suuna muutumist, sellepärast on tavaliselt ette nähtud võimalus tuulemotorite tiibratta teljele anda 3° kuni 10° kallakut.

3. Tuule-energia.

Nagu eespool tähendatud, omab ka õhk raskust G (kg), s. o. ka massi m , mille liikumine kiirusega v (m/sek.) on suuteline arendama tööd teekonna h (m) pikkusel.

Väljendades seda tööd

$$A = G \cdot h \quad (\text{mkg}) \quad (2)$$

kusjuures raskus $G = m \cdot g$ (kg), teekonna pikkus $h = \frac{v^2}{2g}$ (m) ja g (m/sek.²) on vabalt langemise kiirendus. Edasi võib väljendada

$$A = G \cdot h = g \cdot m \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (3)$$

Kui õhu raskust väljendada $G = Q \cdot \gamma$, kus Q = keha maht (m³)

ja massi tihedus $\rho = \frac{\gamma}{g} \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{sek}^2}{\text{m}^4} \right)$,

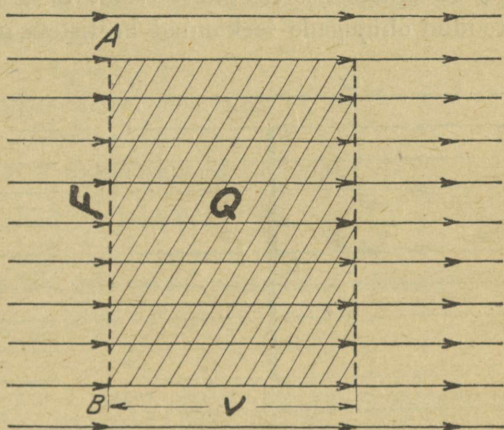
siis

$$A = G \cdot h = Q \frac{\gamma \cdot v^2}{2g} = Q \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (\text{mkg}) \quad (4).$$

Paneme näiteks joon. 20 toodud joonega AB kujutatud ava liikuvasse õhukihti, siis ühe sekundi vältel sellest avast läbivoolava õhu maht $Q = F \cdot v$, kus F = ava pind ja v = tuule kiirus. Sellest avast läbivoolava õhuhulga võimsus.

$$E = Q \frac{\rho \cdot v^2}{2} = F \cdot v \frac{\rho \cdot v^2}{2} = F \frac{\rho \cdot v^3}{2} \quad (\text{mkg/sek.}) \quad (5).$$

Et õhuhulga võimsus on arvusuuruselt võrdne sekundilise vooluhulga energiaga, siis nimetatakse edaspidises käsitluses suurust E ka tuuleenergiaks, õhuliikumiseenergiaks jne.



Joon. 20.

a. Tuule survepaigalseisvale pinnale.

Väljendades võimsust $E = P \cdot v$, s. o. jõud korrutatud kiirusega, siis valemi 5 alusel jõud

$$P = \frac{E}{v} = F \frac{\rho \cdot v^3}{v \cdot 2} = F \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (6).$$

Võttes aluseks õhu mahukaalu $\gamma = 1,226 \text{ kg/m}^3$ ja kiirendust $g = 9,81 \text{ m/sek.}^2$, mille suhe on õhutihedus

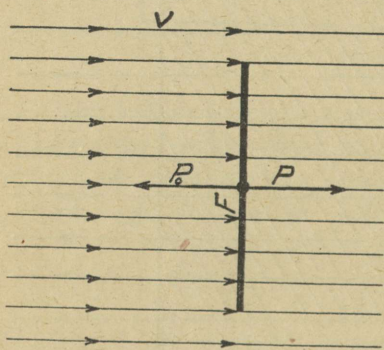
$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1,226}{9,81} = 0,125,$$

siis jõud
$$P = F \frac{0,125 \cdot v^2}{2} = 0,063 \cdot F \cdot v^2 \quad (\text{kg}) \quad (7)$$

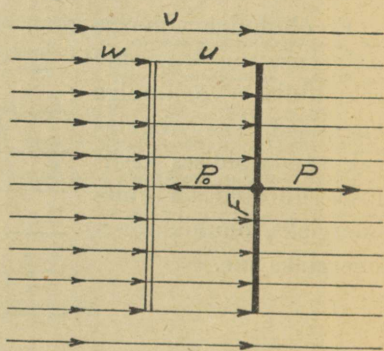
ja tuule surve pinnaühikule

$$\frac{P}{F} = 0,063 \cdot v^2 \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$$

Tegelikkuses on tuule surve suurus teistsugune, sest üksikud õhujoad põrkavad etteseatud takistuse vastu mitte tuule liikumise suunas, vaid eseme ette tekkiva „õhukuhjumise” tõttu muudavad oma suunda eseme ees. Peale selle eseme taga õhujoad ei liibu mitte eseme pinna külge, vaid inertsi mõjul valivad teistsuguse teekonna. Seetõttu eseme taga tekib õhutühjus, mis omakorda põhjustab õhukeerise tekkimist eseme taga pool. Joon. 21 ja 21a on toodud õhujugade teekonnad keeristeta, mis ei vasta tegelikkusele.



Joon. 21.



Joon. 21-a.

Eeltähendatud põhjustel tegelikult rakendatud jõud $P_0 \cong P$ ja suhe

$$\frac{P_0}{P} = c_x \quad (8)$$

See on katseliselt määratav ja nimetatakse takistusteguriks, mille kohta arvulised andmed on toodud tab. 5. See arv oleneb eseme kujust, tema pinna karedusest ja eseme asetusest õhuliikumise suuna suhtes.

Täiendades valemit (7) takistusteguriga, saaksime tuule rakendatud jõu

$$P_0 = c_x \cdot F \frac{0,125 \cdot v^2}{2} = 0,063 \cdot c_x \cdot F \cdot v^2 = \frac{1}{16} c_x \cdot F \cdot v^2 \quad (9)$$

Tabelis 2 on toodud andmed tuule surve kohta risti asetatud lamedale pinnale, mis on arvatud valemi järgi

$$P_o = \frac{1}{16} c_x F v^2 = \frac{1}{16} \cdot F v^2 = 0,08 \cdot F \cdot v^2,$$

kus P_o = rakendatud jõud kg, F = pindala, millele tuul avaldab survet, c_x = takistustegur (tab. 5 nr. 1).

b. Tuule surve liikuvale pinnale.

Kui pind liigub tuule mõjul tuule suunas kiirusega u , siis pinnale rakendatud võimsus on

$$E_o = P_o \cdot u \quad (10)$$

ja pinnale mõjuva õhumassi kiirus (joon. 22)

$$w = v - u \quad (11).$$

Sellest sõltuvalt valem 9 alusel rakendatud jõud

$$P_o = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot w^2}{2} = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot (v - u)^2}{2} \quad (12)$$

ja pinnale rakendatud õhu liikumisenergia (rakendatud võimsus) (v. 5)

$$E_o = P_o \cdot u = c_x \cdot F \frac{\rho (v - u)^2 u}{2} = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot w^2 \cdot u}{2} \quad (13),$$

millest nähtub, et valemi 5 järgi arvatud tuule-energia on ainult osaliselt kasutatud, mille suhet võime kirjutada

$$\eta = \frac{E_o}{E} = \frac{P_o \cdot u}{F \frac{\rho \cdot v^3}{2}} = \frac{c_x \cdot F \frac{\rho \cdot (v - u)^2 \cdot u}{2}}{F \frac{\rho \cdot v^3}{2}} = c_x \cdot (v - u)^2 \frac{u}{v^3} \quad (14)$$

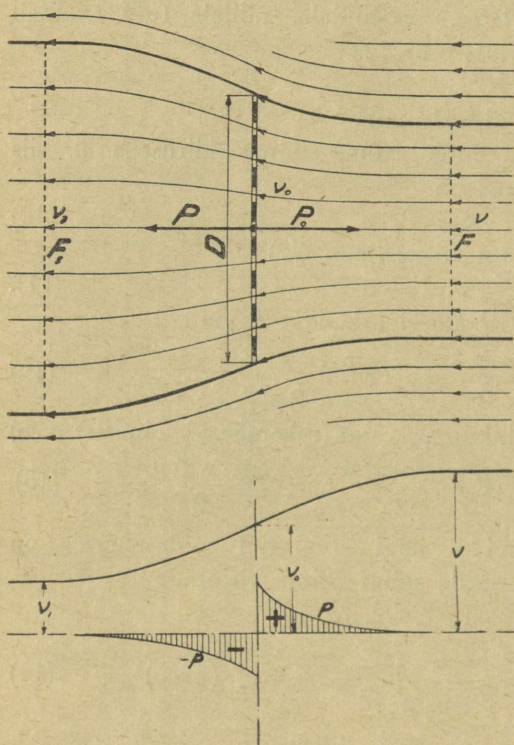
ja koondatult

$$\eta = c_x \left(1 - \frac{u}{v}\right)^2 \frac{u}{v} \quad (15).$$

Seda suhet nimetatakse tuule võimsuse ehk energia kasuteguriks. Kui $u = v$, see tähendab, et pind liigub tuulega ühises suunas ja võrdse kiirusega, siis $\eta = 0$, see tähendab, et tuul ei avalda pinnale mingit mõju. Samuti on loomulikult $\eta = 0$, kui $u = 0$ s. t. kui pind seisab paigal.

c. Pinnast läbivoolava õhu liikumisenergia.

Kui eespool käsitletavad pinnad olid täiesti kinnised, siis käesoleval juhul valime kettakujulise võre, millest juhime õhku läbi. Olenevalt pinna (võre) kujust õhk voolaks pinnast läbi kiirust aeg-



Joon. 22 ja 23.

lustavalt, mille tagajärjel algkiirusega voolava õhujoa põiklõige liikumise kiiruse vähenemisel paisub suuremaks. Seejuures alg- ja lõppkiiruste vahel on sõltuv pinnale ülean- tud õhumassi kineeti- line (liikumis-) energia.

Kujutades tuuletur- büüni tiivikut pöörleva kettakujulise võrena, millele voolab õhk alg- kiirusega v ja sealt lah- kub lõppkiirusega v_1 , siis pinnale voolava õhu kiirus v_0 on alg- ja lõppkiiruste vahepeal- ne, kusjuures sekundi vältel pinnale voolava õhu hulk

$$Q = F_0 \cdot v_0 \text{ (m}^3\text{/sek.)}$$

Selle õhuhulga läbi- voolamiseks on vajali- kud, vastavalt alg- ja lõppkiirustele, õhujoa põiklõikepinnad

$$F \cdot v = F_1 \cdot v_1 = Q,$$

nagu seda kujutab tiibratta pinnale voolava õhu spekter (joon. 22).

Ülaltoodud põhjustel voolab õhk tiivikusse ja tiivikust välja väheneva kiirusega, kusjuures esineb rõhumuutus, mis on näidatud üldjoontes joonisel 23.

Eeltoodust tuleb järeldada, et tiivikusse voolava õhu kiirus on vahepealne ja tõenäoliselt $v_0 = \frac{v + v_1}{2}$, kusjuures v_0 ei ole ühtlane

kogu pinnal, vaid arvutatav keskmine.

Kui ühe sekundi vältel läbivoolava õhu mass

$$m = \rho \cdot F_0 \cdot v_0 = \rho \cdot F_0 \cdot \frac{(v + v_1)}{2} \quad (17),$$

ning pinnale üleantud õhumassi kineetilise energia

$$E_0 = \frac{m \cdot v^2}{2} - \frac{m \cdot v_1^2}{2} = \frac{m}{2} (v^2 - v_1^2)$$

ja arvutades massi valemi 17 alusel saame

$$\begin{aligned} E_0 &= \rho \cdot F_0 \cdot \frac{(v + v_1)}{2} \cdot \frac{1}{2} (v^2 - v_1^2) = \\ &= \frac{1}{4} \rho \cdot F_0 \cdot (v + v_1) (v^2 - v_1^2) \end{aligned} \quad (18)$$

ja valemiga 5 arvutatud E suhe määrab tuule-energia kasutatavuse koefitsiendi ehk nn. kasuteguri

$$\eta = \frac{E_0}{E} = \frac{\frac{1}{4} \rho \cdot F_0 \cdot (v + v_1) (v^2 - v_1^2)}{\frac{1}{2} \rho \cdot F_0 \cdot v^3} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{v_1}{v} \right] \quad (19).$$

Sel kasuteguril või tuule-energia kasutamise võimalusel on piir, mille määrab prof. A. Betzi väitel kiiruste suhe $\frac{v_1}{v} = \frac{1}{3}$, mida aluseks võttes saaksime kasuteguri $\eta_{\text{maks.}} \cong 0,60$, kuid prof. G. Sabinini

väitel, arvutades valemiga $\eta = 4 \frac{v_1 \left(1 - \frac{v_1}{v} \right)}{v \left(1 + \frac{v_1}{v} \right)}$, see vahetegur on

$$\frac{1}{2,5} \text{ ja } \eta_{\text{maks.}} = 0,69.$$

Näide 1.

Tabelites toodud arvude selgitamiseks võtame pinna suurusega $F = a \cdot b = 1,26 \cdot 12,6 = 16,0 \text{ m}^2$ ja tuule-kiirusega 40 m/sek . Sel puhul tuule jõud valemite 6 ja 7 alusel oleks:

$$P = F \frac{\rho \cdot v^2}{2} = 0,063 \cdot F \cdot v^2 = 0,063 \cdot 16,0 \cdot 40^2 = 1600 \text{ kg}.$$

Kuna oluline on veel pinna kuju, mis iseloomustatakse teguriga c_x (v. 8), siis käesoleval juhul tab. 5 nr. 1 toodud pindadele,

suhte $\frac{a}{b} = \frac{12,6}{1,26} = 10$ juures tegur $c_x = 1,29$, siis pinnale üleantud

jõud valemi 9 põhjal on $P_o = 1,29 \cdot 1600 = 2050 \text{ kg}$, mis annab rõhu-

mise pinnauhikule $\frac{P_o}{F} = \frac{2050}{16} = 128 \text{ kg/m}^2$. See arv võrdub tab. 2

toodud arvuga, milles $\frac{\rho \cdot c_x}{2} = 0,08$ ja $\frac{P_o}{F} = 0,08 \cdot v^2 \text{ (kg/m}^2\text{)}$.

Näide 2.

Kui aga sama pind $F = 16 \text{ m}^2$ tuule mõjul liigub tuule suunas kiirusega $u = 15 \text{ m/sek}$. (joon. 22), siis õhu relatiivne liikumiskiirus valemi 11 alusel on $w = v - u = 40 - 15 = 25 \text{ m/sek}$., ja arvutades teguriga c_x , saame pinnale üleantud jõu (v. 12)

$P_o = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot w^2}{2} = 0,08 \cdot F \cdot w^2 = 0,08 \cdot 16 \cdot 25^2 = 800 \text{ kg}$, kus $\frac{c_x \cdot \rho}{2} = 0,08$ ehk võimsuse (v. 13)

$E_o = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot w^2 \cdot u}{2} = 0,08 \cdot F \cdot w^2 \cdot u = 0,08 \cdot 16 \cdot 25^2 \cdot 15 = 12000 \text{ mkg/sek}$., samuti $E_o = P_o \cdot u = 800 \cdot 15 = 12000 \text{ mkg/sek}$.

Kui liikuva õhumassi energia (v. 5)

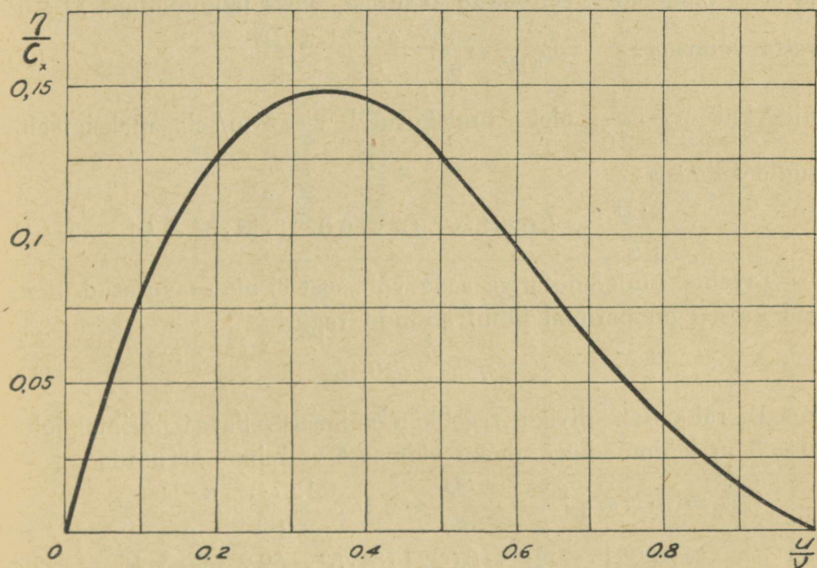
$$E = F \frac{\rho \cdot v^3}{2} = \frac{0,125 \cdot 16 \cdot 40^3}{2} = 64000 \text{ mkg/sek}.,$$

$$\text{siis kasutegur } \eta = \frac{E_o}{E} = \frac{12000}{64000} = 0,189.$$

Seda kasutegurit arvutades valemi 15 alusel, saaksime

$$\eta = \frac{E_o}{E} = c_x \left(1 - \frac{u}{v}\right)^2 \frac{u}{v} = 1,29 (1 - 0,375)^2 \cdot 0,375 = 0,189.$$

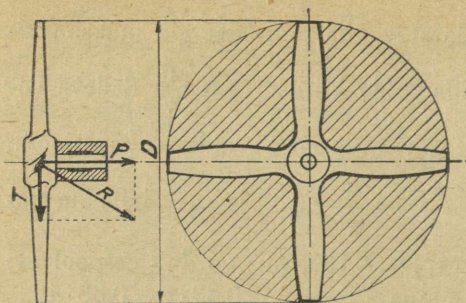
Kuna c_x on katseliselt määratav, siis tuule-energia maksimaalseks kasutamiseks tuleks valida sobiv kiiruste suhe $\frac{u}{v}$. Selleks võtame vaatlusele joon. 24 kasuteguri muutmist avaldavat kõverjoont, mille haritähpile vastav kiiruste suhe $\frac{u}{v} = 0,33$ ja maksimaalne kasutegur $\eta = 0,147 \cdot c_x = 0,147 \cdot 1,29 = 0,189$, mis võrdub eespool arvatatud arvuga põhjusel, et pinna kiirus $u = 0,33 \cdot v = 0,33 \cdot 40 = 13,2$ m/sek., mis näites toodud kiirusele ($u = 15$ m/sek.) on sedavõrd lähedane, et see kasutegurit ei mõjuta.



Joon. 24.

Näide 3.

Kolmanda näitena toome tiiviku läbimõõduga $D = 5$ m, mille neli tiiba on küllaldased tiirlemispinnast $F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ läbivoolava õhu liikumisenergia maksimaalseks haaramiseks (joon. 25).



Joon. 25.

Kui kiiruste suhte $\frac{v_1}{v} = \frac{1}{3}$

juures on tuule-energia kasutegur valemi 19 alusel

$$\eta_{\text{maks.}} = \frac{E_o}{E} = \frac{16}{27} \sim 0,6$$

kõige suurem, siis käsitles valemis 5 toodud tuule võimsuse väljendust

$$E = F \frac{\rho \cdot v^3}{2}$$

ja seda täiendades eeltoodud teguriga, oleks läbimõõduga D tiibratta võimsus

$$E_{\text{maks.}} = \frac{16}{27} \frac{\rho \cdot v^3}{2} \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (20)$$

ning, kui $\frac{\rho}{2} \sim \frac{1}{16}$, oleks tuulekiirusel $v = 5$ m/sek. maksimaalne tuule võimsus

$$E_{\text{maks.}} = \frac{v^3}{27} \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,0291 \cdot v^3 \cdot D^2 = 0,0291 \cdot 5^3 \cdot 5^2 = 91 \text{ mkg/sek.}$$

Tavalise tuulemootoriga seda võimsust ei ole saavutatud. Senised katsed on parimal juhul andnud teguri

$$\eta = \frac{E_n}{E} \cong 0,45 \quad (21),$$

kus E_n tähendab tiiviku tegelikku võimsust. Seega parimal juhul $D = 5$ m läbimõõduga tiiviku võimsust võiksime arvutada

$$\begin{aligned} E_n &= \eta \cdot E = \eta \frac{\rho \cdot v^3}{2} \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,45 \frac{0,125 \cdot v^3}{2} \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \\ &= 0,0221 \cdot v^3 \cdot D^2 = 0,0221 \cdot 5^3 \cdot 5^2 = 69,2 \text{ mkg/sek.} \end{aligned} \quad (22).$$

Väljendades seda võimsust hobujõududes, saaksime

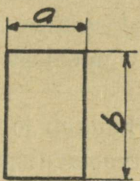

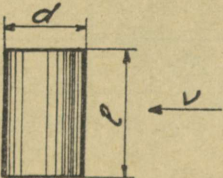
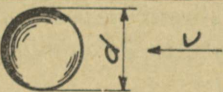

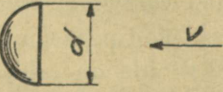
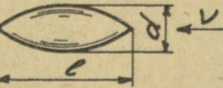

$$N_h = \frac{69,2}{75} = 0,92 \text{ hobujõudu}$$

(üks hobujõud = 75 mkg/sek.) või kilovattides

$$N_k = \frac{69,2}{102} = 0,68 \text{ kilovatti (üks kilovatt = 102 mkg/sek.).}$$

Tabel 5.

Takistustegurid c_x erinevatele kehadele.

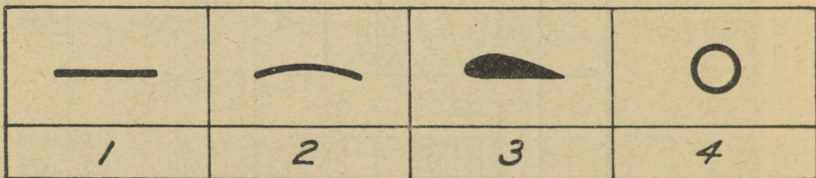
| Järje- nr. | Keha kuju | Pind | Kuju vabekorrad | c_x |
|---------------------------------|---|---------------------|--|------------------------------|
| Täisnurkne plaat |  | $a \cdot b$ | $\frac{b}{a} = 1$ $\frac{b}{a} = 4$ $\frac{b}{a} = 10$ ∞ | 1,10 1,19 1,29 2,01 |
| Ummargune plaat |  | $\frac{\pi d^2}{4}$ | — | 1,11 |
| Silinder |  | $d \cdot l$ | $\frac{l}{d} = 1$ $\frac{l}{d} = 5$ $\frac{l}{d} = 40$ ∞ | 0,63 0,74 0,98 1,20 |
| Kera |  | $\frac{\pi d^2}{4}$ | — | 0,47 |
| Poolkera |  | $\frac{\pi d^2}{4}$ | — | 0,34 |
| Poolkera |  | $\frac{\pi d^2}{4}$ | — | 1,33 |
| Kuul mõlemapoolse teravikuga |  | $\frac{\pi d^2}{4}$ | $\frac{l}{d} \sim 6$ | 0,05 |
| Kuul |  | $\frac{\pi d^2}{4}$ | — | 0,22 |

4. Tuulemootori tiivik.

a. Tiiva kuju.

Tuule-energia rakendamisel mehaanilisele tööle tuleks võimalikult suurel hulgal rakendada õhu liikumise energiat. Selleks peab valima võimalikult väikese takistusega tiiva, s. o. tiiva pind olgu sil e ja põiklõikepind (profiil) võimaldagu tiiva õhust läbitungimist vähesel takistusega.

Tarvitatavaid tiivaprofiile kujutab joon. 26. Lame profiil (1) on seepärast halvema õhu ümbervoolavusega kui kaarekujuline (2), et võimaldab rohkem õhukeeriste tekkimist.



Joon. 26. Tiivaprofiilid.

Parima õhu ümbervoolavusega on nn. aerodünaamiline profiil (3), mida kasutatakse kiiresti tiirlevate tiivikute puhul. Selgituseks on toodud (joon. 27) pööristega profiili ja (joon. 28) aerodünaamilise profiili spektrid.

Nagu joon. 27 nähtub, tekib lameda profiiliga (1) pindadel rohkem õhukeeriseid, mis püsivad enam-vähem igasuguse pinna kohtumisnurga α suuruse puhul; kuna aerodünaamilise profiiliga (3) pindadel keeriseid esineb väiksemal arvul ja väiksemate kohtumisnurkade puhul puuduvad nad peaaegu täiesti.

Et pinna asetamisel tuulde on rakendatud jõud (v. 9)

$$P_o = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot v^2}{2},$$

siis selle suurus sõltub pinna profiilist ja kohtumisnurgast α (joon. 29).

Seades joon. 26 kuju I pinna tuulde kohtumisnurgaga α , koosneb jõud P_o komponentidest P_x ja P_y , milledest

$$P_y = c_y \cdot F \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (23)$$

nimetatakse tõstejõuks

$$\text{ja } P_x = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (24)$$

takistusjõuks. Uhtlasi nimetatakse tegurit c_y tõstejõu- ja c_x takistus- teguriks, millede suhe

$$\epsilon = \frac{c_x}{c_y} \quad (25)$$

on tiiva profiili iseloomustajaks ja nimetatakse lauglemisteguriks.

Jõud P_o on tõste- ja takistusjõu resulteeriv jõud, mis on

$$P_o = \sqrt{P_y^2 + P_x^2},$$

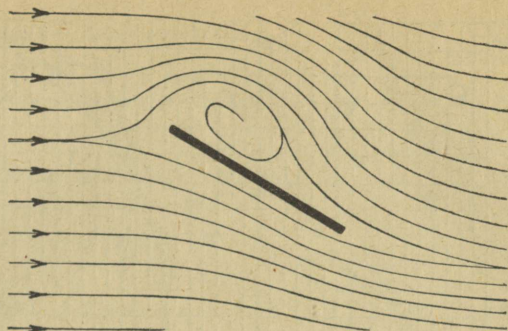
$$\text{või } P_o = c_o \cdot F \frac{\rho \cdot v^2}{2},$$

kui tegur

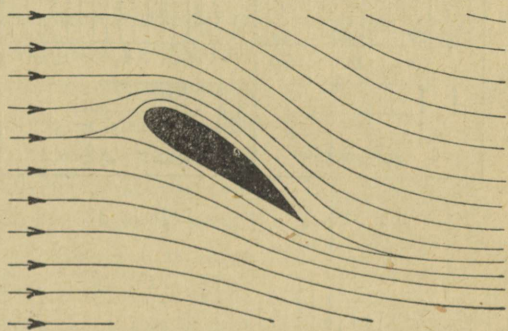
$$c_o = \sqrt{c_y^2 + c_x^2},$$

kuujuures mõlemad tegurid c_y ja c_x olenevad profiilist, kohtumisnurgast α ja pinna karedusest.

Joon. 30 – 32 on tuulemootorite ehitusel kasutatavate siledade profiilide katseliselt

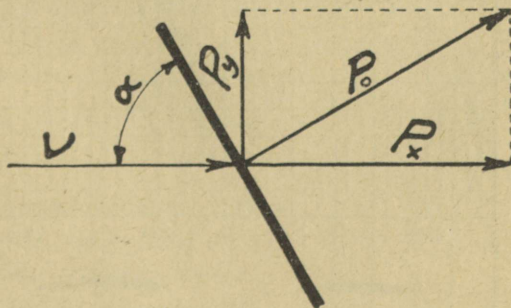


Joon. 27.

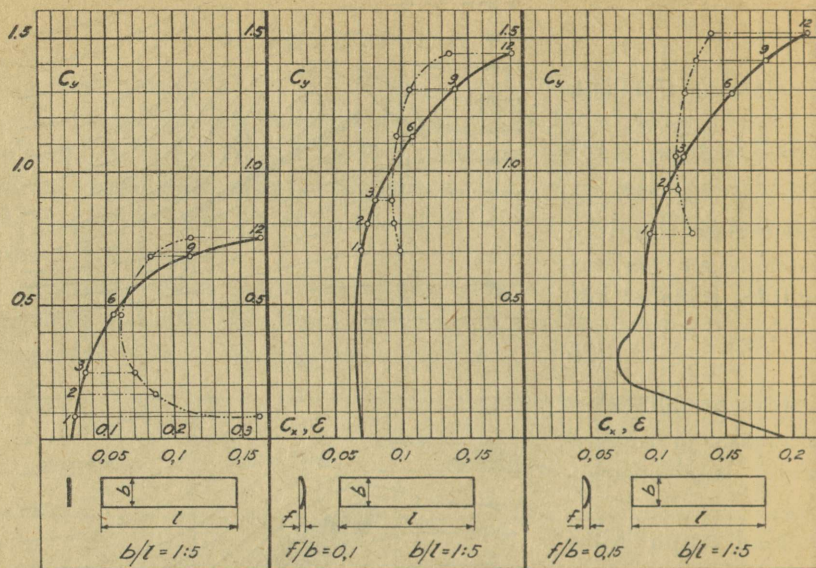


Joon. 28.

Õhuliikumise spektrid.



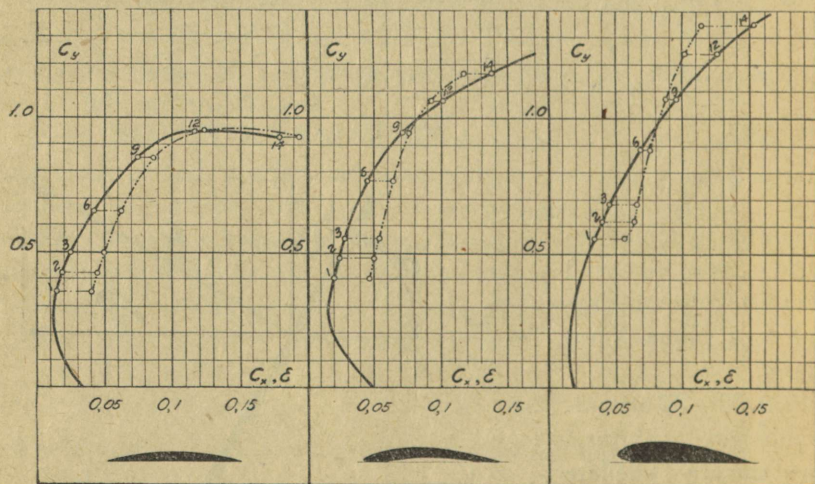
Joon. 29.



Joon. 30.

Joon. 31.

Joon. 32.



Joon. 33.

Joon. 34.

Joon. 35.

määratud tegurid, vastavalt kohtumisnurgale α . Pideva joonega on märgitud tegurid c_x ja c_y . Kohtumisnurga suurused on märgitud kõver-

joone juurde kraadides. Tegurite suhte $\frac{c_x}{c_y}$ suu-

rused või nn. lauglemistegurid \mathcal{E} (valem 25) on märgitud - - - - - joonega. Profiili aerodünaamilise paremuse otsustab \mathcal{E} suurus: mida väiksem on \mathcal{E} , seda suurem on tiiviku kasu-
tegur.

Et kohtumisnurgad tiiva rummu lähedal on suuremad kui tiiva otstes, valitakse ka vajaduse puhul tiivale mitu profiili pideva üleminekuga. Võrreldes kolme profiili (joon. 33 + 35), nähtub, et neist 1° kohtumisnurga puhul omab vähima \mathcal{E} joon. 33 profiil ja 14° nurga puhul omab vähima \mathcal{E} joon. 35 profiil. Seega joon. 33 profiil oleks, olenevalt tiiviku konstruktsioonist, sobiv tiiva otstepoolsel osale kuni 6° kohtumisnurgaga, kuna joon. 35 profiil sobiks rummupoolsele osale, kus suuremate kohtumisnurkade juures \mathcal{E} on väiksem.

Tegurid c_y ja c_x , nagu eespool tähendatud, määratakse katseliselt ja olenevad profiilist ning kohtumisnurgast.

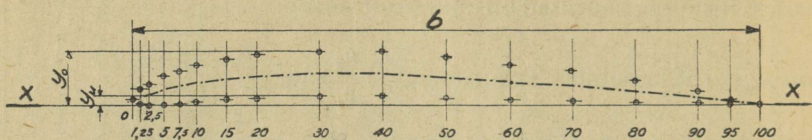
Näiteks joon. 34 ja 35 profiili mõõdud on antud tabel 6.

Tabel 6 toodud mõõtude käsitlemise näiteks võtame joon. 34 profiili, mille laius on b (joon. 36). Profiili pürjoone punktide abstsissid on tabelis 6 antud profiili laiuse b protsentides. Profiili ülemise pinna ordinaadid

Tabel nr. 6

| | | x | 0 | 1,25 | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 95 | 100 |
|----------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Joon. 34 | y^o | 0,75 | 2,45 | 3,20 | 4,45 | 5,45 | 6,20 | 7,30 | 8,05 | 8,60 | 8,55 | 7,85 | 6,90 | 5,55 | 3,85 | 2,05 | 1,10 | 0,00 | 0,00 |
| | y_u | 0,75 | 0,10 | 0,05 | 0,00 | 0,15 | 0,40 | 0,85 | 1,20 | 1,60 | 1,65 | 1,50 | 1,20 | 0,75 | 0,45 | 0,15 | 0,05 | 0,00 | 0,00 |
| Joon. 35 | y^o | 4,00 | 7,15 | 8,50 | 10,40 | 11,75 | 12,85 | 14,35 | 15,30 | 16,00 | 15,40 | 14,05 | 12,00 | 9,50 | 6,60 | 3,55 | 2,00 | 0,00 | 0,50 |
| | y_u | 4,00 | 2,25 | 1,65 | 0,95 | 0,60 | 0,40 | 0,15 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

on märgitud $y_0 = ga$ ja alumise pinna ordinaadid $y_u = ga$ (vt. joon. 36).

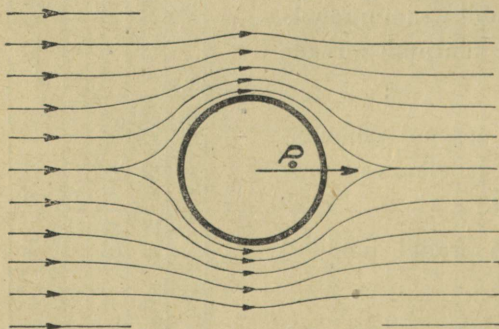


Joon. 36.

Ringikujulise profiiliga (joon. 26-4) tiib kujutab endast Fletneri rootorit, s. o. telje ümber pöörlevat silindrit. Fletneri rootor tuulemootori tiivana (joon. 96) on vähe kasutamist leidnud ja katsetamisel andnud jõudude suhte $\frac{P_y}{P_x} = 7$, kuna aerodünaamiliselt parimad profiilid annavad 3 korda suurema, s. o. $\frac{P_y}{P_x} = 22$.

Rootori tööiseloom on lühidalt järgmine.

Kui voolavasse õhku asetatud silinder ei tiirle, siis õhk voolab



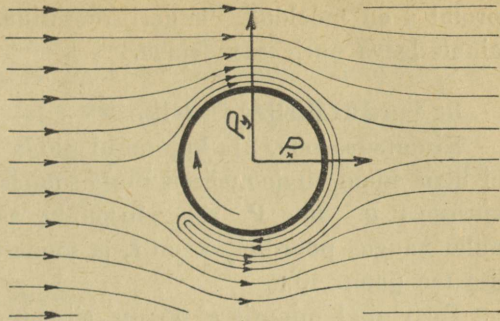
Joon. 37.

võrdse kiirusega mõlemal pool silindrit. Ka jõud on sealjuures mõlemal küljel võrdsed ja jõu P_0 suund on samane õhu liikumise suunaga (joonis 37).

Kui aga sama silinder oma telje ümber tiirleb, siis õhukihid silindri pinna ümber tiirlevad kaasa. Sellel

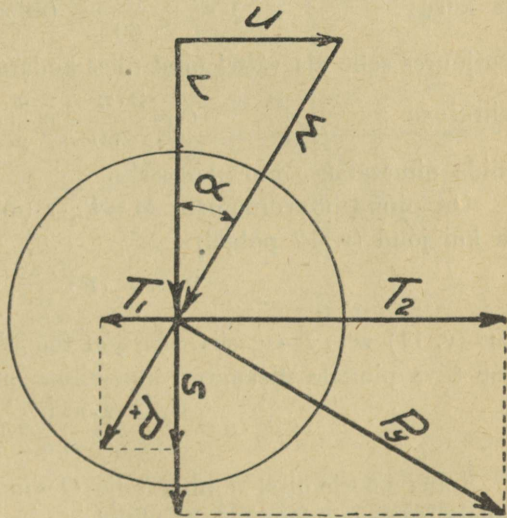
silindri küljel, kus voolava õhu suund ühtub tiirlemise suunaga, need liikumised ühinevad, mille tagajärjel sellel silindri poolel õhu-

rõhk väheneb. Teisel silindri küljel tiirlevad õhukihiid vastassuunas õhuvoolule, mis tingib seal rõhumise suurenemise. Neilt mõlemalt silindri poolelt avalduvad surved annavad jõu P_y , mille mõjul silinder liigub õhu voolamise sihile põiki (joonis 38).



Joon. 38.

Liigub aga pöörlev silinder põiki tuult kiirusega u , siis tungjooned P_x ja P_y jagunevad joonisel 39 kujutatud komponentideks, kusjuures silindri liikumisjõud T on komponentide T_1 ja T_2 summa (vt. ka v. 52).



Joon. 39.

Kohtumisnurk α on sõltuv õhu voolamise kiiruse v ja silindri liikumise kiiruse u suuruste suhtest. Seega silindri kiiruse u suurenemisega, kui õhu voolamise kiirus v püsib, suureneb kohtumisnurk α , kuid silindri liikumise jõud T väheneb. Sellest järeldub, et maksimaalse kasuteguri annab väiksem kohtumisnurk, mispärast silindri liikumise kiirus peab olema väike.

Eeltoodu põhjal joon. 26 toodud profiile 1 ja 2 tarvitatakse aeglaselt ja profiili 3 kürestti jooksvate tiivikute ehitamistel, ning

profiil 4 on mõeldud Fletneri rootorina, mida seni on kasutatud ainult laeva purje asendajana.

b. Verti kaalteljega tiivik.

Kinnitades joon. 21a kujutatud pinda kodaraga teljele, siis pind ei liigu enam sirgjooneliselt tuule suunas, vaid pöörleb ümber telje kiirusega u . Jõu P_0 rakenduspunkt asub pinna raskuspunktis, mille kaugus pöördteljest on r , ja joonestab pöörlemisel ringikujulise tee (joon. 40).

Teeb pind minutis n pööret, siis pinna raskuspunkti teekonna pikkus on

$$s = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n \quad (\text{m}) \quad (26)$$

ja kiirus

$$u = \frac{2 \cdot r \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (\text{m/sek.}) \quad (27),$$

ksjuures selle aja vältel pind ühes kodaraga muudab oma asendit

kiirusega

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{u}{r}, \quad (28),$$

mida nimetatakse nurk-kiiruseks.

On pinna pöördmoment $M = P_0 \cdot r$ (mkg) (29)

ja kui jõud (v. 12 põhjal)

$$P_0 = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot w^2}{2},$$

kus (v. 11) $w = v - u$, siis selle jõu töö ühe sekundi vältel (v. 10) või tiiva pinnale ülekantud kineetiline energia

$$E_0 = P_0 \cdot u = \frac{P_0 \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n}{60} = M \cdot \omega = M \frac{u}{r} \quad (30).$$

Pinna pöörlemisel ümber telje O muutub kohtumisnurk α ja sellele vastavalt ka jõud T . Asudes põigiti ($y - y$) tuule suunale on jõud $T = P_0$ (maksimaalne) ja rööbiti ($x - x$) asendis $T = 0$.

Märkides keskmise suurusega jõu T_k , siis

$$T_k \cdot r \cdot \pi = P_0 \cdot 2 \cdot r,$$

ja

$$T_k = \frac{2}{\pi} P_0 = 0,64 \cdot P_0 \quad (31)$$

ning kasutegurit $\eta = 0,189$ (lk. 29), saame

$$E_0 = \eta \cdot T_k \cdot u = 0,189 \cdot 0,64 \cdot P_0 \cdot u = 0,121 \cdot P_0 \cdot u \quad (32).$$

Sääraselt liigub pind positiivsel (+) poolel. Negatiivsel (-) poolel sunnib tuul pinda tagasi pöörduma ja pind jääks seisma. Selle vältimiseks moodustada kate A (joon. 40). Kuna kattega varjatud pindu ei, haara tuul, kujuneb v. 32 täiendavalt

$$E_o = \eta \frac{z}{2} P_o \cdot u = 0,061 \cdot z \cdot P_o \cdot u \quad (33)$$

kus z on pindade arv.

c. Horisontaalteljega tiivik.

Horisontaalteljega tiiviku telg on rööbiti tuule suunaga. Tiiviku ülesanne on tiiviku tiirlemispinnast läbivoolava õhu liikumisenergiat võimalikult suuremal hulgal muuta mehaaniliseks tööks.

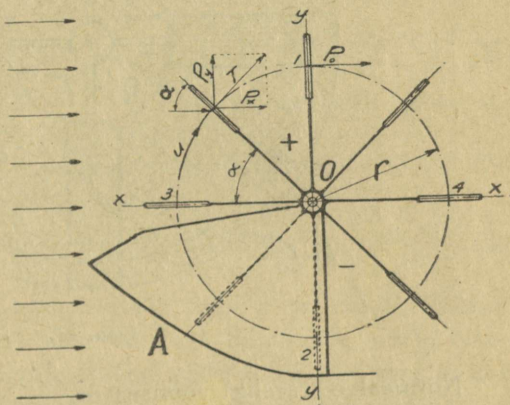
Tiiviku tiirlemispinnaks nimetame ringikujulist pindala F , mille läbimõõtu D mõõdetakse tiiva otstest. Tiibade pinnaks

nimetame üksikut tiibade pindade summat Σf . Pindala F_1 , piiratud läbimõõduga D_1 , kujutab ebatäielikult rakendatavat seesmist osa. Teguvõimelist pindala F_o piirab läbimõõt D_o . Tiibade otstest ebatäielikult rakendatav pind on F_2 (joon. 41).

Tiirlemispind F (mille läbimõõt D), olenevalt kasutegurist η , määrab rakendatava energia hulga.

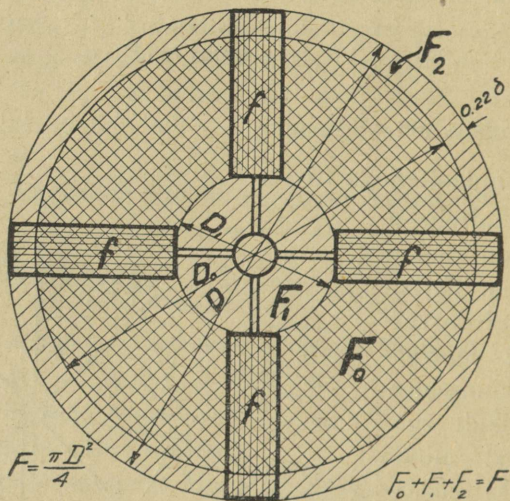
Joon. 22 ja 23 alusel on tiiviku tiirlemispinnast läbivoolava õhumassi maksimaalne võimsus (v. 20)

$$E_{\text{maks.}} = \frac{16}{27} \frac{\rho \cdot v^3 \pi \cdot D^2}{2 \cdot 4} = 0,0291 \cdot v^3 \cdot D^2 \quad (\text{mkg/sek.})$$



Joon. 40.

Sõltuvalt tiibade profiilist ja arvust, kadudest tiibratta kesk-
kohas ja tiivaotstes, mehaanilistest takistustest, on saavutatav võim-
sus väiksem.



Joon. 41.

Normaalne (tegelik) võimsus on

$$E_n = \eta_o \cdot E_{\text{maks.}} = \eta_o \cdot 0,0291 \cdot v^3 \cdot D^2 \quad (34).$$

Tiiviku võimsuse üldine kasutegur (v. 21) on avaldatav

$$\eta = \frac{E_n}{E} = \eta_o \cdot \eta_{\text{maks.}} \quad (35),$$

kus $\eta_{\text{maks.}} \sim \frac{16}{27} \sim 0,60$ (lk. 27) on kõigil horisontaaltiivikuil ühine.

Kasutegur η_o iseloomustab tiivikut ja on parimatel 0,6 kuni 0,8,

seega $\eta = \eta_o \cdot \eta_{\text{maks.}} = 0,35$ kuni 0,46.

Tiiviku kasutegur

$$\eta_o = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \quad (36),$$

kusjuures:

| | |
|--|---------------|
| η_1 oleneb tiiviku keskkoha kasutamatuses | (0,90 – 0,97) |
| η_2 tiibade kasutegur | (0,87 – 0,93) |
| η_3 oleneb kadudest tiivaotstes | (0,83 – 0,93) |
| η_4 = mehaaniline kasutegur | (0,90 – 0,95) |

Tiiviku pinna teljepiirkonnas kasutamata osa F_1 suurus oleneb tiibade konstruktsioonist. Kuna see osa tiibadest ei ole suuteline tuule-energiat rahuldaval määral rakendama, siis ei ole tasuv selles piirkonnas tiibu viimistella. Harilikult lühendame tiibade rummu-poolset osa aeglaselt pöörlevatel tiivikutel $1/3$ ja kiiresti pöörle-vatel $1/6$ tiivapikkuse võrra. Seega vastavate pindade suurused kujunevad:

$$F_o = R_o^2 \cdot \pi - R_1^2 \cdot \pi = R_o^2 \cdot \pi - i^2 \cdot R_o^2 \cdot \pi. \quad (37),$$

kus $i = \frac{R_1}{R_o} = \frac{D_1}{D_o}$ ja $R_o - R_1 = \frac{D_o - D_1}{2}$. Seega aeglaselt jooksvatel

$$F_o = R_o^2 \cdot \pi - \frac{1}{9} R_o^2 \cdot \pi = 0,888 \cdot R_o^2 \cdot \pi \quad (38)$$

ehk $\eta_1 \cong 0,89$, ja kiiresti jooksvatel

$$F_o = R_o^2 \cdot \pi - \frac{1}{36} R_o^2 \cdot \pi = 0,973 \cdot R_o^2 \cdot \pi \quad (39)$$

ehk $\eta_1 \cong 0,97$.

Järgnevalt vaatleme tiivaprofilide valikut ja nende kallakut tuule suunas, ning millest olenevad kaod tiibadel ja nende otstel.

Tiivad liiguvad tuule rõhu mõjul põiki tuult kiirusega u , kus-juures tuule kiirus pidurdub tiibade pindadel ja ühtlasi aeglustub, kaotades algkiirusest $1/3$. Seega E_{maks} . puhul tiivikust läbivoolava õhu kiirus on

$$v_o = \frac{2}{3} v = 0,666 \cdot v \quad (40)$$

ja tuule kiirus liikuvate tiibade suhtes on relatiivne

$$w = \sqrt{v_o^2 + u^2} \quad (41).$$

Sellest nähtub, et kiirus w oleneb tuule ja tiibade kiirusest. Kogu tiiva kiirus ei ole ühtlane, vaid oleneb kaugusest pöördtel-jest. Sellest tingituna riba a pinnad (joon. 42) $f = a \cdot b$ liiguvad

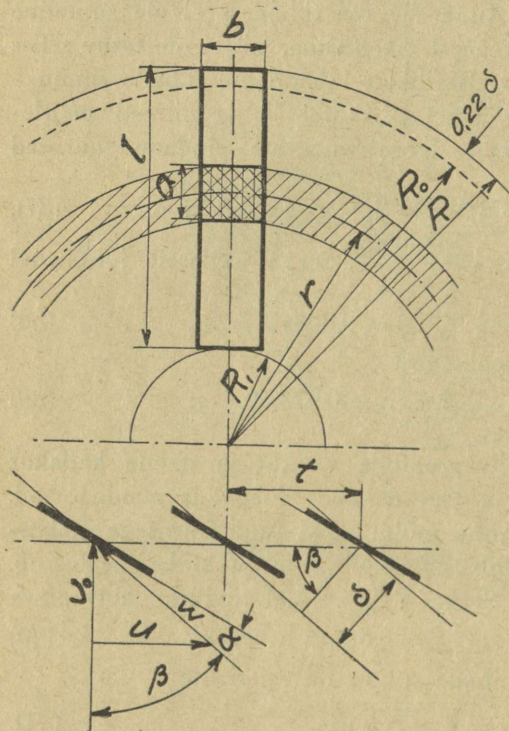
kiirusega $u_r = \frac{r}{R} u = \frac{r}{R} k \cdot v = i \cdot k \cdot v \quad (42),$

kus $i = \frac{r}{R}$ ja k kiirusemoodul. Tiiva pikkus l on jagatud a -laius-teks ribadeks, millede arv ühel tiiva pinnal

$$e = \frac{R - R_1}{a} = \frac{l}{a} \quad (43)$$

Kiirusemooduliks nimetatakse tiivaotsa ja tuule kiiruse suhet

$$k = \frac{u}{v} \quad (44)$$



Joon. 42.

Relatiivne tuulekiirus w moodustab telje, millest ühel pool asub seadnurk β ja teisel pool kohtumisnurk α . Siinjuures

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= \frac{u_r}{v_0} = \frac{u_r}{\frac{2}{\sqrt{3}} v} = 1,5 \frac{u_r}{v} \\ &= 1,5 \cdot i \cdot k \end{aligned} \quad (45)$$

Nagu eespool kirjeldatud, liiguvad tiiva ribad erineva kiirusega, olenevalt kaugusest pöördteljest, millest tingituna tiib tuleb kujundada sääraseks, et iga riba saaks sobiva kohtumisnurga α . See kohtumisnurk on sõltuv profiilist (joon. 30-35), millest on olemas tiiviku kastegur.

Kui tiiva pinna a laiuse riba tõstejõud (v. 23)

$$P_y = \frac{\rho}{2} w^2 \cdot a \cdot b \cdot c_y = \frac{\rho}{2} w^2 \cdot f \cdot c_y \quad (46)$$

siis lahutades komponentideks, saaksime tiiviku tiirlemise sihis jõu (joon. 43)

$$T_1 = P_y \cdot \cos \beta \quad (47)$$

ja tiiviku telje sihis

$$S_1 = P_y \cdot \sin \beta \quad (48)$$

Takistusjõu (v. 24)

$$P_x = \frac{\rho}{2} w^2 \cdot a \cdot b \cdot c_x = \frac{\rho}{2} w^2 \cdot f \cdot c_x \quad (49)$$

lahutamisel saaksime $T_2 = P_x \cdot \sin \beta$ (50)

ja $S_2 = P_x \cdot \cos \beta$ (51)

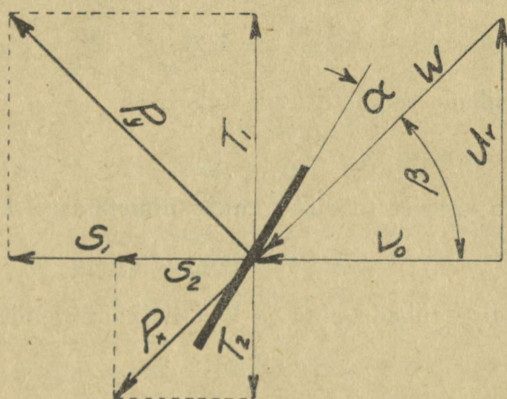
Vastastikku suunatud jõudude T_1 ja T_2 vahe on tangentsiaaljõud

$$T = T_1 - T_2 = P_y \cdot \cos \beta - P_x \sin \beta \quad (52)$$

tiiva riba käivitamiseks. Tiiviku telje suunas jõud

$$S = S_1 + S_2 = P_y \cdot \sin \beta + P_x \cdot \cos \beta \quad (53)$$

mõjub tuule kiirust aeglustavalt (joon. 43).



Joon. 43.

Nagu tähendatud, saab ainult osa voolava õhu liikumise energiast rakendada. Tiirlemispinnast, mille moodustab tiivariba tiirlemine, voolab läbi õhk mahuga

$$Q = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot a \cdot v_o$$

Jõu S saavutamiseks, mis aeglustaks tuulekiirust v kuni v_1 , peab

$$S = \rho \cdot Q (v - v_1) = 2 \rho r \pi a v_o (v - v_1) \quad (54)$$

ja olenevalt tiibade arvust z (v. 48. ja 49)

$$S = z \cdot P_y \cdot \sin \beta = z \frac{\rho}{2} u \cdot w \cdot a \cdot b \cdot c_y \quad (55)$$

Võrrandeist 54 ja 55: $z \frac{\rho}{2} u \cdot w \cdot a \cdot b \cdot c_y = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot a \cdot v_o \cdot 2 (v - v_o) \rho$

saame tiiva laiuse $b = \frac{2 \cdot r \cdot \pi}{z} \cdot \frac{4}{c_y} \cdot \frac{v_o}{u} \cdot \frac{v - v_o}{w}$,

kus $v - v_1 = 2 (v - v_o)$ ja $\sin \beta = \frac{u}{w}$. Asendades $v_o = \frac{2}{3} v$ (v. 40),

on tiiva laius

$$b = \frac{2 \cdot r \cdot \pi}{z} \cdot \frac{8}{9 \cdot c_y \cdot u \cdot w} \cdot v^2 = 5,59 \frac{r \cdot v^2}{z \cdot c_y \cdot u \cdot w} \quad (56).$$

Selle valemi esimese osaga

$$\frac{2 \cdot r \cdot \pi}{z} = 6,28 \frac{r}{z} \quad (57)$$

määratakse tiibade samm t , kuna teine osa

$$\frac{8}{9 \cdot c_y \cdot w} \cdot v \quad (58)$$

määrab pinna katvust tiibadest, mida nimetatakse katvusastmeks

$$\varphi = \frac{\Sigma f}{F}, \quad (59)$$

kus Σf = üldine tiibade pind ja F = tiiviku tiirlemispind.

Ja

$$\frac{v}{u} \quad (60)$$

on kiiruse moodul (v. 44) ümberpööratud kujul $k_o = \frac{v}{u}$.

Kui tuule relatiivset kiirust (v. 41) väljendada

$$w = \frac{v_o}{\cos \beta} = \frac{2}{3} \frac{v}{\cos \beta} = 0,667 \frac{v}{\cos \beta} \quad (61),$$

saame tiiva laiuse (v. 56) ümberkujundamisel

$$b = \frac{5,59}{z \cdot c_y \cdot k \cdot v \cdot 0,667} \cdot v^2 = 8,38 \frac{r \cdot \cos \beta}{z \cdot c_y \cdot k} = \frac{1}{c_y} \cdot 8,38 \frac{r}{z} \cdot \tau \quad (62)$$

kus $\tau = \frac{\cos \beta}{k}$.

Tiibade laiuse b määramisel väljutakse kiiruse moodulist k ja arvutatakse ühtlasi $\cos \beta$. Kuid tiibade arv z olgu kooskõlas tiiva

laiusega b , kus sobiva profiili valikul võib, olenevalt tiiviku konstruktsioonist, tiibade laius proportsionaalselt tiibade arvule laiem või kitsam olla. Profiilide sobivuse eelduseks on tegurite c_x ja c_y suhe, nn. lauglemisarv \mathcal{E} (v. 25), vastavalt kohtumisnurgale α .

Tagasi tulles komponentidele T ja S leiame, et tangentsiaaljõud (v. 52)

$$T = P_y \cdot \cos \beta (1 - \mathcal{E} \cdot \operatorname{tg} \beta) \quad (63)$$

ja aktsiaaljõud (p. 53) $S = P_y \cdot \sin \beta (1 + \mathcal{E} \cdot \operatorname{ctg} \beta)$ (64)

ja kui seejuures rakendatud tuule liikumisenergia $S \cdot v_o$, millest tiiva pind omab liikumisenergia $T \cdot u$, siis nende suhe on tiiva

kasutegur

$$\eta_2 = \frac{T \cdot u}{S \cdot v_o} = \frac{1 - \mathcal{E} \cdot \operatorname{tg} \beta \cos \beta}{1 + \mathcal{E} \cdot \operatorname{ctg} \beta \sin \beta} \frac{u}{v_o}$$

Kuna $\frac{u}{v} = \operatorname{tg} \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta}$, siis tiibade kasutegur kujuneb

$$\eta_2 = \frac{1 - \mathcal{E} \cdot \operatorname{tg} \beta}{1 + \mathcal{E} \cdot \operatorname{ctg} \beta} \quad (65)$$

Profiilitegurid c_x ja c_y ning lauglemisarv \mathcal{E} vastavalt kohtumisnurgale α on toodud joon. 30 kuni 35.

Lauglemisarv \mathcal{E} on kõige olulisem kiiresti jooksvate tiivikute tiiva-profiilide valikul. \mathcal{E} valitakse võimalikult väike, sest (sõltuvalt kiirusemoodulist k , s. o. $\operatorname{tg} \beta = 1,5 k$) suurema lauglemisarvu valikul vähendame tunduvalt kasutegurit η_2 (v. 65). Et aeglaselt jooksvatel tiivikutel on lauglemisarvu \mathcal{E} mõju kasutegurile η_2 väike, siis võib kasutada ka viimistlemata tiivaprofiile. Järelikult lauglemisarvu \mathcal{E} ja tiivalaiuse b määramisel on aluseks kiirusemoodul k .

Tiivaribade kiirused ei ole ühtlased, vaid kasvavad proportsionaalselt kaugusega teljest, s. o. ribade ringjooksu kiirus $u = \omega \cdot r$.

Kui kiirusemoodul $k = \frac{u}{v}$, siis ribade ringjooksu kiiruse muutumisega muutuvad ka üksikute ribade moodulid k , s. o. tiivaotstest alates kuni teljeni moodul k ja ühtlasi suhtelise kiiruse ω seadnurk β väheneb.

Vaadeldes õhuvoolu tiivikule, nähtub, et õhk voolab tiibadele relatiivse kiirusega ω ja lõigatakse tiibadest δ -laiusteks ribadeks.

Aluseks võttes tiiva laiust (v. 62) selgub, et tiibade arvu suurendamisega vähendame proportsionaalselt tiibade laiust ja tiibade

sammu. Kuid joon. 43 nähtub, et õhuribade laius ei ole sõltuv tiiva laiusest, vaid tiibade arvust olenevast tiiva sammust $t = 6,28 \frac{r}{z}$

ja tegurist $\tau = \frac{\cos \beta}{k}$.

Kui tiiva põiklõike kaugusega teljest muutuvad moodulid k ühes relatiivse kiiruse ω nurgaga β , siis sellest sõltuvalt igas tiiva lõikes peab profiili määramisel arvutama tiiva laiuse ja samm, ning tiibadevahelise õhuriba laiuse

$$\delta = t \cdot \cos \beta \quad (66)$$

Õhuribade laiuste üleminekud olgu enam-vähem ühtlased, see tagab ühtlast õhu läbivoolu tiivikust ja ühtlast tuule-energia rakendamist.

Jälgides joon. 44 toodud tuulekiiruste vahet $v - v_1$ tiibade pinnal, nähtub, et tuulekiiruste vahed kasvavad alates $v - v_1 = 0$ kuni $v - v_1 = \frac{2}{3} v = v_0$. Olenevalt tiibadevahelise õhuriba δ laiusest kiiruste vahe kasvamine 0 kuni v_0 võib optimaalse (pideva joonega märgitud) või väiksema tõusuga (katkendjoonega) oma maksimaalset energiat andva suuruseni tõusta, kusjuures mõlema kiirusjoone vahe avaldab rakendamata osa tuule kiirusest kogu tiibade pinnal. See rakendamata osa tuule-energiast on sõltuv arvutuse ja profiili viimistlemisest, kuid lihtsustatud arvutamisel määrame tiivaotste piirkonna kasutamata osa F_2 (joon. 41) valemiga

$$D - D_0 = 0,44 \cdot \delta \quad (67)$$

nagu see toimus teljepiirkonna kasutamata osa F_1 määramisel lk. 41, kasutegur η_3 oleneb kadudest tiivaotstes.

Mehaaniline kasutegur η_4 oleneb takistustest tiiviku laagrites, juurde arvamata takistusi hammasrataste ülekandes ja mujal.

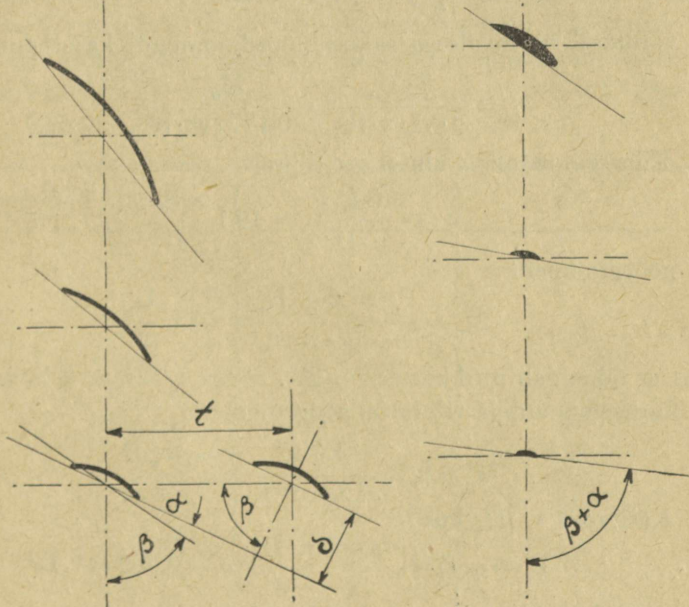
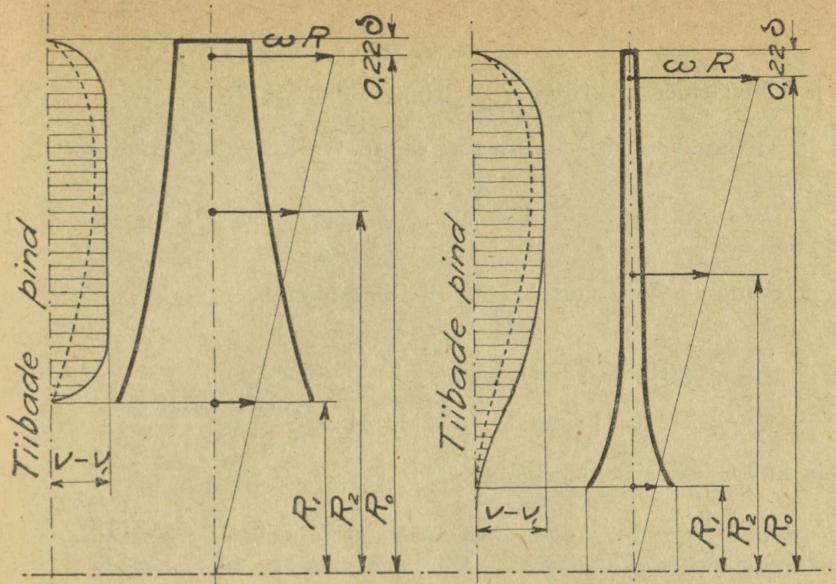
Kõiki loeteldud kadusid kokku võttes saame normaalse võimsuse kasuteguri $v. 36$ alusel $\eta_0 = 0,6$ kuni $0,8$.

Võttes aluseks keskmise kasuteguri $\eta_0 = 0,7$, siis läbimõõduga D tiiviku normaalne võimsus on ($v. 20$)

$$E_n = 0,7 \cdot 0,0291 \cdot v^3 \cdot D^2 = 0,0203 \cdot v^3 \cdot D^2 \quad (\text{mkg/sek.}) \quad (68)$$

ehk hobujõududes (lk. 30)

$$N_n = \frac{E_n}{75} = 0,000271 \cdot v^3 \cdot D^2 \quad (\text{PS}) \quad (69)$$



Joon. 44.

ja kilovattides
$$N_k = \frac{E_n}{102} = 0,0002 \cdot v^3 D^2 \text{ (kW)} \quad (70).$$

Tiiviku võimsuse kasuteguri saime v. 21 toodud avaldusest

$$\eta = \frac{E_n}{E} = \frac{E_n}{\frac{\rho \cdot v^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}.$$

Samaselt võib võrrelda ka pöördmomente

$$\eta_m = \frac{M_n}{M} \quad (71).$$

Kui v. 30 alusel

$$E = M \frac{u}{R} = M \frac{2 \cdot u}{D} \text{ ehk } M = \frac{E \cdot D}{2 \cdot u} = \frac{E \cdot R}{u}$$

ja kui $u = v$, siis pöördmoment

$$M = \frac{\rho \cdot v^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{D}{2 \cdot v} = \frac{1}{16} \rho \cdot v^2 \cdot \pi \cdot D^3 = 0,02455 \cdot v^2 \cdot D^3,$$

$$\text{ehk} \quad = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot \pi \cdot R^3 = 0,197 \cdot v^2 \cdot R^3 \quad (72)$$

ja võrdlusel normaalsega saame pöördmomendi kasuteguri

$$\eta_m = \frac{2 \cdot M_n}{\rho \cdot v^2 \cdot \pi \cdot R^3} = \frac{M_n}{0,197 \cdot v^2 \cdot R^3} \quad (73).$$

Kiirusemooduli k alusel on tiibratta tiirude arv

$$n = \frac{60 \cdot k \cdot v}{\pi \cdot D} = 19,1 \frac{v \cdot k}{D} \quad (74)$$

ja pöördmoment

$$M_n = \frac{E_n}{\omega} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \frac{E_n}{n} = 9,55 \frac{E_n}{n} \quad (75),$$

kus ω tähendab nurkkiirust (v. 28). Seega määratava läbimõõduga ja kiirusemooduliga tiibratta pöördmoment

$$M_n = 9,55 \frac{E_n \cdot D}{19,1 \cdot v \cdot k} = 0,5 \frac{E_n D}{v \cdot k} \quad (76).$$

Käsitades v. 22₁ kus

$$E_n = \eta \cdot E = \eta \frac{\rho \cdot v^3}{2} \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \eta \cdot 0,049 \cdot v^3 \cdot D^2 \quad (77),$$

siis pöördmoment

$$M_n = 9,55 \frac{E_n \cdot D}{19,1 \cdot v \cdot k} = \eta \cdot 0,5 \cdot 0,049 \frac{v^3 \cdot D^2 \cdot D}{v \cdot k} = \\ = \eta \cdot 0,0245 \frac{v^2 \cdot D^3}{k} \quad (78).$$

Seega kasutegurite vahekord $\eta_m = \frac{\eta}{k}$ (79)

ja pöördmoment avalduvad

$$M_n = \eta \cdot 0,0245 \cdot v^2 \cdot D^3 \quad (80).$$

Seejärgi tuule jõud suunatuna tiiviku teljele või aksiaaljõud

$$T_o = \frac{E_n}{v} = \eta \cdot 0,049 \frac{v^3 \cdot D^2}{v} = \eta \cdot 0,049 \cdot v^2 \cdot D^2 \quad (81)$$

Näide 4.

Selgitamiseks, kuidas kiirusemoodul mõjutab tiiviku mõõte kasutamata osa tiivaotstes, tiibade arvu, kuju ja võimsuse kasutegurit jne., teeme arvutuse kahe võrdse võimsusega tiibrattale: üks neist aeglaselt (moodul 1,2) ja teine kiiresti (moodul 5,8) jooksev.

Tabelis lk. 49, 50 ja 51 on arvatud tiibrattad, millede normaalne võimsus tuulekiirusel $v = 5$ m/sek. on $E_n = 69,2$ mkg/sek. = 0,92 PS = 0,70 kW. Tiibade arv on valitud $z = 18$ ja 3 (joon. 44).

| Kiirusemoodul | k = | 1,2 | 5,8 |
|--|------------|---------------|---------------|
| | v = | 5 | 5 |
| | $\eta_2 =$ | 0,87 | 0,93 |
| $D_o = 2 R_o = \sqrt{\frac{E_n}{\eta_2 \cdot 0,0291 \cdot v^3}}$ | = | 4,67 | 4,52 |
| $\frac{D_1}{D_o} = \frac{R_1}{R_o} =$ | = | $\frac{1}{3}$ | $\frac{1}{6}$ |
| $R_o =$ | = | 2,34 | 2,26 |
| $R_1 =$ | = | 0,78 | 0,376 |
| $u = v \cdot k =$ | = | 6,0 | 29 |
| $\omega = \frac{u}{R_o} =$ | = | 2,56 | 12,8 |
| $n = \omega \frac{60}{2 \cdot \pi} =$ | = | 24,4 | 122,0 |

| | R° | R ₂ | R ₁ | R ₀ | R ₂ | R ₁ |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 2,34 | 1,54 | 0,78 | 2,26 | 1,32 | 0,376 |
| $u = \omega \cdot R =$ | 6,0 | 3,94 | 2,0 | 29 | 16,9 | 4,80 |
| $k = \frac{u}{v} =$ | 1,2 | 0,79 | 0,40 | 5,8 | 3,38 | 0,96 |
| $\text{tg} \cdot \beta = \frac{u}{v_0} = 1,5 \cdot k =$ | 1,80 | 1,18 | 0,60 | 8,70 | 5,06 | 1,44 |
| $\beta =$ | 60° 57' | 49° 44' | 31° 00' | 83° 27' | 79° 52' | 55° 14' |
| $\cos \beta =$ | 0,485 | 0,646 | 0,866 | 0,114 | 0,176 | 0,570 |
| $\text{ctg} \beta =$ | 0,555 | 0,847 | 1,732 | 0,115 | 0,179 | 0,694 |
| $\tau = \frac{\cos \beta}{k} =$ | 0,404 | 0,815 | 2,160 | 0,0197 | 0,052 | 0,594 |
| Profil joon. | 26 | 26 | 26 | 28 | 28 | 30 |
| $\varepsilon =$ | 0,094 | 0,091 | 0,098 | 0,043 | 0,042 | 0,058 |
| $c_y =$ | 0,80 | 0,88 | 1,12 | 0,35 | 0,35 | 0,56 |
| $c_x =$ | 0,075 | 0,08 | 0,110 | 0,015 | 0,015 | 0,032 |
| $\alpha =$ | 2° | 3° | 6° | 1° | 1° | 1° |
| $z =$ | 18 | 18 | 18 | 3 | 3 | 3 |
| $\frac{R}{z} =$ | 0,130 | 0,086 | 0,0433 | 0,755 | 0,440 | 0,125 |
| $b = c_y \cdot 8,38 \cdot \frac{R}{z} \tau =$ | 0,35 | 0,516 | 0,875 | 0,044 | 0,067 | 0,347 |
| $t = 6,28 \cdot \frac{R}{z} =$ | 0,815 | 0,54 | 0,272 | 4,75 | 2,76 | 0,785 |
| $\delta = t \cdot \cos \beta =$ | 0,395 | 0,350 | 0,236 | 0,542 | 0,486 | 0,446 |
| $\beta + \alpha =$ | 62° 67' | 52° 44' | 36° 00' | 84° 27' | 80° 52' | 56° 14' |
| $R - R_0 = 0,22 \delta =$ | 0,087 | | | 0,119 | | |
| $D = 2R =$ | 4,844 ~ 4,85 m | | | 4,758 ~ 4,80 m | | |
| $\eta_2 = \frac{1 - \varepsilon \cdot \text{tg} \beta}{1 + \varepsilon \cdot \text{ctg} \beta} =$ | 0,831 | 0,893 | 0,9412 | 0,626 | 0,788 | 0,916 |
| $\eta_2 =$ | 1,052 | 1,077 | 1,169 | 1,005 | 1,0075 | 1,040 |
| $\eta_2 =$ | 0,790 | 0,825 | 0,805 | 0,620 | 0,78 | 0,90 |
| $\eta =$ | | 0,35 | | | 0,35 | |

| | | |
|---|----------|----------|
| $M_n = \eta \cdot 0,0245 \frac{v^2 \cdot D^2}{k} =$ | 20,3 mkg | 4,06 mkg |
| $T_o = \eta \cdot 0,049 \cdot v^2 \cdot D^2 =$ | 10,0 kg | 9,85 kg |

Lõplikuks tiibade kuju ja mõõtude kindlaksmääramiseks on vaja arvutust viimistella.

Exhib. univ. Tart.

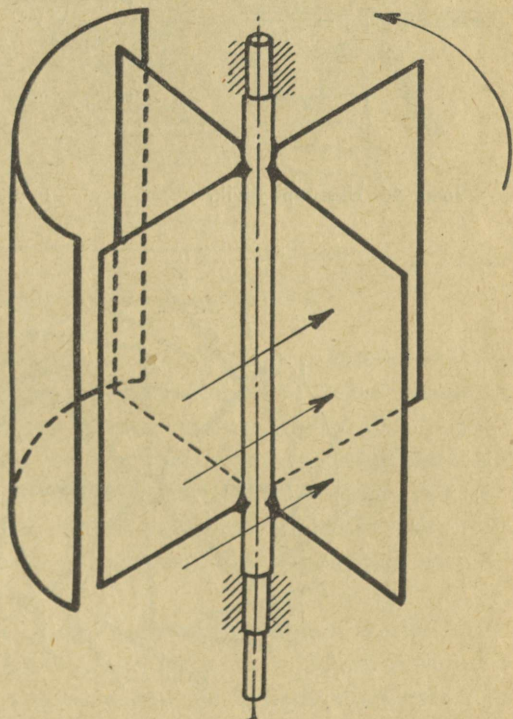
5. Tuulemootorite tüübid ja tornid.

a. Vertikaalsed tuulemootorid.

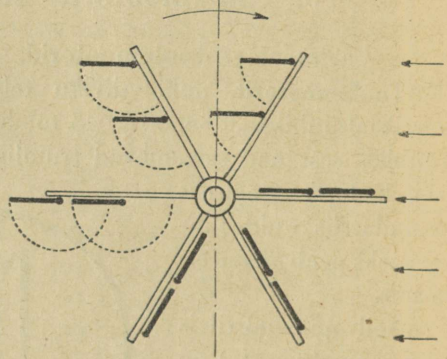
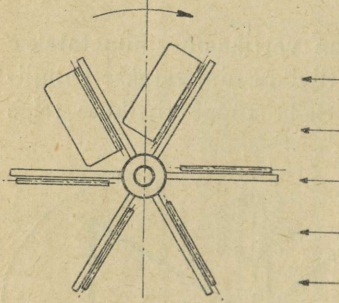
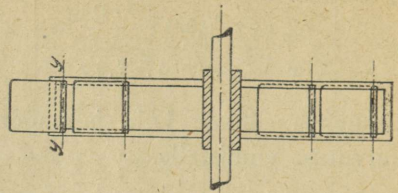
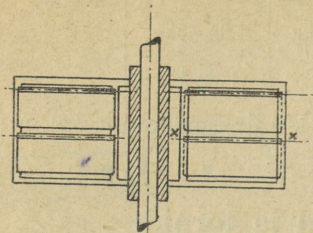
Tuulemootorit, mille tiiviku telg on vertikaalne, nimetatakse vertikaaltüübiks. Joon. 40 ja 45 toodud tiivikut nimetatakse trumlitüübiks, sest nad sarnanevad trumliga. Seda tüüpi tiivikute telge võib ka horisontaalseks asetada; siis tuulde juhtimiseks peab olema eri seadis.

Neil mõlemal tiivikul (joon. 40 ja 45) on vastu tuult pöörlevate osade varjamiseks kate. Selle katte kõrvaldamisel tuleks pinnad valmistada nii, et vastu tuult liikumisel tiiva pinnad pöörduvad tuule suunale serviti. Selleks peavad tiivad olema kerged, õhukesed ja hingedel vabalt liiguvad, mis võimaldab neil väiksema takistusega vastu tuult liikuda (joon. 46 ja 47).

Tiivad kinnitatakse tiivikraami külge radi-

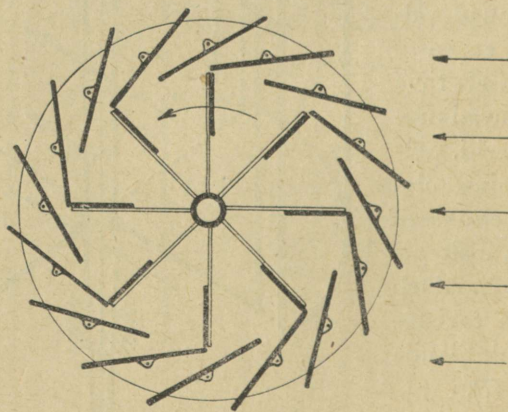


Joon. 45. Trumlitüüpi tiivik.



Joon. 46. Ukstüüpi tiivik.

Joon. 47. Ukstüüpi tiivik.

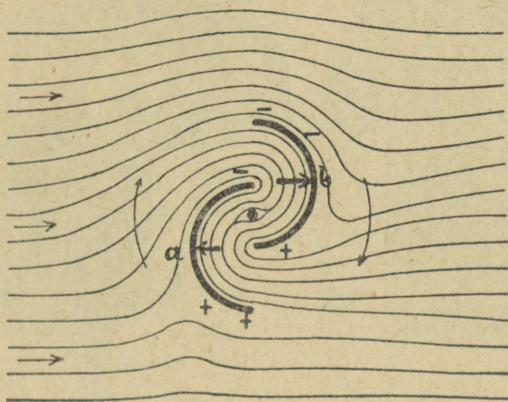


Joon. 48. Vesirattatüüpi tiivik.

aalselt (joon. 46) või tiiviku teljele rööbiti (joon. 47). Sääraseid tüüpe nimetatakse ukstüüpideks.

Ka vesiratta eeskujul on ehitatud tiivikuid (joon. 48)

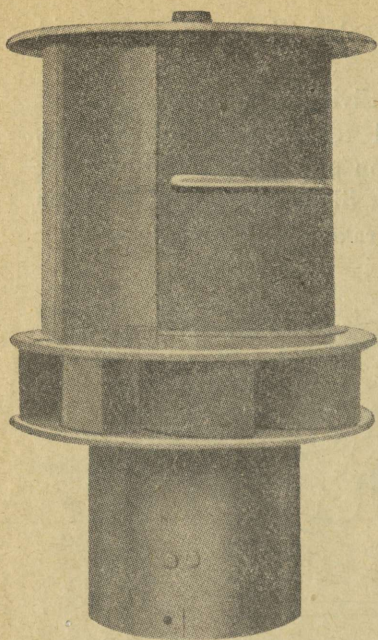
Kuigi peale esiletoodute on veel teisigi ukstüüpi tiivikuid, piirdume näidatutega, sest ülejäänud on praktiliselt piiratud väärtusega põhjusel, et tiiviku vastu tuult liikuv osa on tuuleenergia kasutamiseks rakendamatu ja ühtlasi rakendatud tiivikuosa tiirlemise takistajaks.



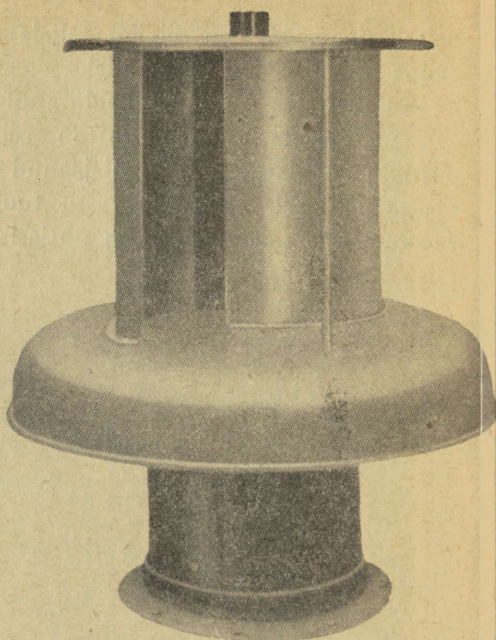
Joon. 49. Õhuvoolu spekter rootortiivikus.

Vertikaalteljega tiiviku mõlema poole (osa) rakendamist võimaldab see tiiviku konstruktsioon, mida üldiselt tuntakse Savoniuse rootorina. See koosneb kahest tiivast, mis on saadud silindri poolitamisest oma telje sihis ja mis on vastastikku asetatud sääraselt, et tiiva „b“ õõnsale poolele voolav õhk võib edasi voolata tiiva „a“ õõnsale poolele, sellega seal vältida vaakuumi tekkimist (joon. 49) ja (kui tiivad, võrreldes tuulega, aeglaselt liiguvad) koguni soodsat survet tiivale „a“ avaldada.

Savoniuse rootorid on edukat kasutamist leidnud ventilaatorite käivitajatena, s. o. õhuvahetuse otstarbeks. Joon. 50 on Savoniuse rootor-ventilaator, mille pealmine osa on kahetiivaline rootor ja alumine 8- kuni 12-tiivaline ventilaator.

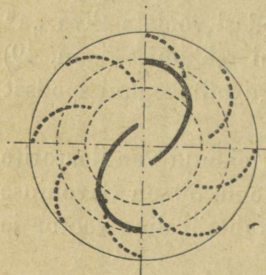


Joon. 50.
Savoniuse rootor – ventilaator.



Joon. 51.
Savoniuse rootor – ventilaator kattega.

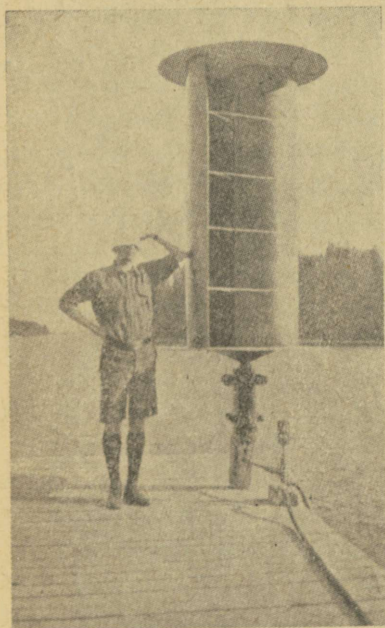
Rootor-ventilaator on määratud korstnaile tõmbe suurendamiseks ja elu-, tööstus-, kooli- jne. ruumide õhuvahetuseks. Joon. 51 kujutab kaetud tiibadega ventilaatorit, mis on määratud mere-sõidukeile ja nimetatakse meritüübiks. Mõlema tüübi kohta on andmed tab. 7.



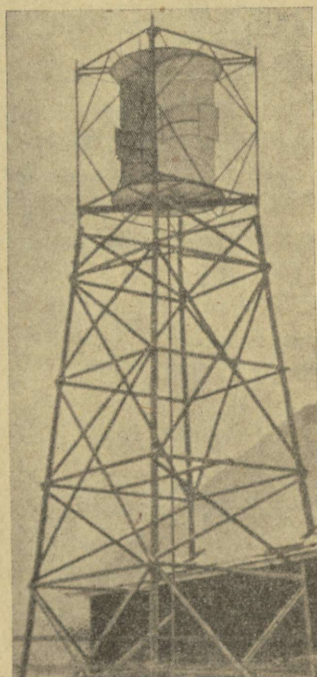
Tabel nr. 7.

| Tüüp | Imemis-ava mm | Lähikaudne imemisvõime m ³ -tunnis tuulekiirusel m/sek. | | | |
|-------|---------------|--|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4,5 |
| SRV16 | 160 | 50 | 100 | 150 | 225 |
| SRV20 | 200 | 85 | 170 | 250 | 380 |
| SRV25 | 250 | 120 | 240 | 360 | 550 |
| SRV30 | 300 | 180 | 360 | 540 | 810 |
| SRV40 | 400 | 320 | 640 | 960 | 1440 |
| SRV50 | 500 | 500 | 1000 | 1500 | 2250 |

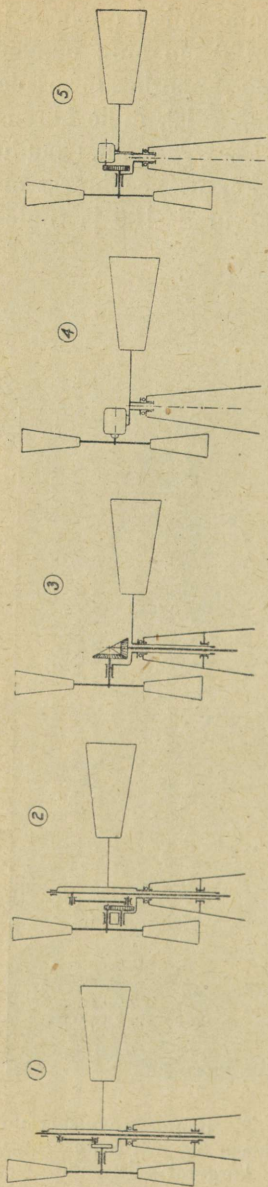
Savoniuse rootorit kasutatakse ka vee pumpamisel (joon. 52). Selle rootori mõlema otsplaadi läbimõõt on 120 cm ning nende vaheline kõrgus 196 cm, tiibade pind 1,88 m², pöörlevate osade kogukaal 50 kg. Rotor ühes pumbaga asub sillal, mille kõrgus veepinnast on 2,5 m, ja pumbatav vesi juhatakse $\frac{3}{4}$ " vooliku kaudu 110 m kauguses olevasse veenõusse, mille kõrgus veepinnast on 15 m, kusjuures tuulekiirusel 3 m/sek. saavutati 100 ja tuulekiirusel 7 m/sek. 600 liitrit tunnis.



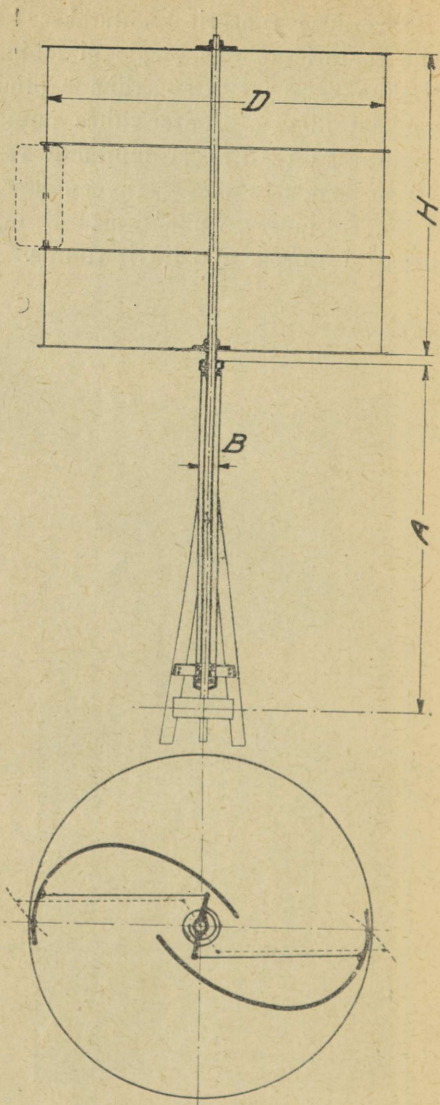
Joon. 52.
Savoniuse rootor pumbaga.



Joon. 53. Rotor reguleerivate klappidega 5,4 m²; rotor 15 m kõrgusel puittornil.



Joon. 54.



Joon. tabel 8 juurde.

Peale ülalkirjeldatud seadise valmistatakse rootor-membraan-pumpi, millede üldmõõdud on toodud tab. 8.

Tabel nr. 8.

| Tüüp | D | H | A | B | Vee maht liitrites 8 tun- niga. Tõstekõrgus 10 m. Tuulekiirusel $v = 4$ m/s. |
|---------------------|------|------|------|-----|---|
| 1,0 m ² | 1100 | 950 | 1125 | 52 | 1500 |
| 2,0 m ² | 1100 | 1900 | 1485 | 80 | 3000 |
| 3,5 m ² | 1850 | 1900 | 1485 | 80 | 5250 |
| 5,25 m ² | 1850 | 2860 | 2245 | 100 | 8000 |
| 8,0 m ² | 2800 | 2860 | 2245 | 100 | 12000 |

Peale tüüpide 1 ja 2 m² on neil rootoreil tiiva välisel äärel tiirude arvu reguleerimiseks sellekohased ukсед. Rootori keskel asuv spiraalvedruga vinnak hoiab mõlemaid ukssi suletuna ja normaalse tiirude arvu ületamisel avanevad need tsentrifugaaljõu mõjul. Suis osa õhku voolab läbi ukse avade ja vastu tuult liikuv avatud uks mõjub tiirlemist pidurdavalt, mille tulemusena tuul enam ei suuda rootori tiirlemist kiirendada (joon. 53).

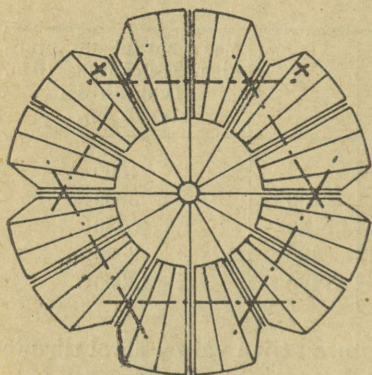
b. Horisontaalteljega tuulemootorid.

Horisontaalteljega tuulemootorite konstruktsioonide erinevus üldjoontes on alljärgnev (joon. 54):

1. Tiivik on otseeseses pumba vardaga, seega võrdub pumbakolvi käikude arv tiiviku tiirudega.
2. Tiivik on pumbavardaga ühendatud hammasratas-ülekande kaudu.
3. Tiivik on ühendatud püstvõlliga hammasratas-ülekande kaudu.
4. Tiivik asub torni tippu asetatud dünamo võllil.
5. Tiivik on torni tipus asetseva dünamoga ühendatud hammasratas-ülekandega.

Tuulemootorite reguleeritavus, s. o. tiiviku tuulde juhtimise ja tuules hoidmise seadmed jagunevad üldiselt kolme liiki: 1) tiibadest, 2) tiibrattast ja 3) sabast ehk nn. tuulelipust reguleeritavad.

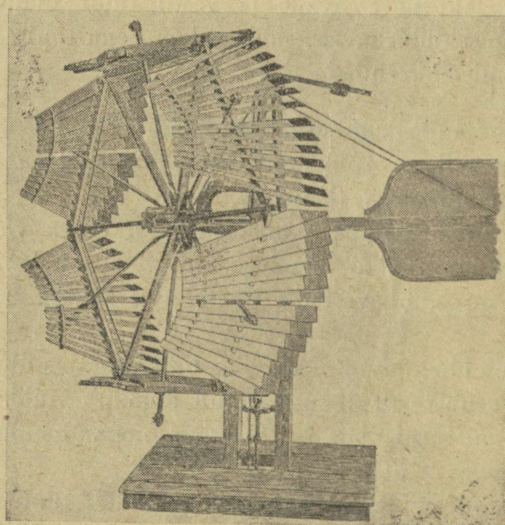
Tiibadest reguleeritavat tiivikut tuntakse Halladay tiivikuna ja on kujutatud joon. 55 töötavas ja joon. 56 väljalülitatud seisundis. Sellel tiivikul on tiivad gruppidega X – X telgedele monteeritud,



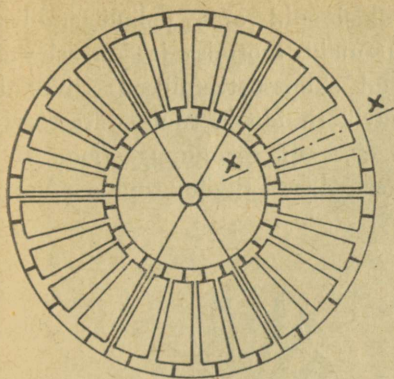
Joon. 55. Halladay-süsteemiline tiivik.

kus need hoitakse tuules vastava vedruga või vastukaaluseadisega. Liigse tuule surve puhul pöörduvad tiivagruppid X – X teljel tuulest ära. Halladay süsteemi tiivik on vanemaid tüüpe.

Joon. 57 kujutab ultrasüsteemilist tiivikut. Selle tiiviku tiivad on üksikult monteeritud radiaalsetele pöördtelgedele. Tuulde ja tuulest ära pööramine toimub ühise seadisega eeltoodud tüübi eeskujul (joon. 58).



Joon. 56. Halladay-süsteemiline tiivik.

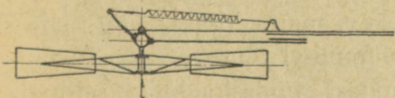
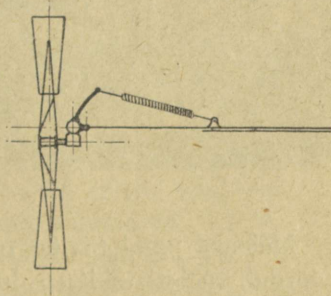
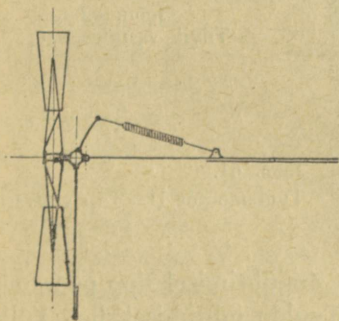


Joon. 57.

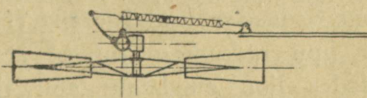
Ultrasüsteemiline tiivik radiaalsete pöördtelgedega tiibadega.



Joon. 58.

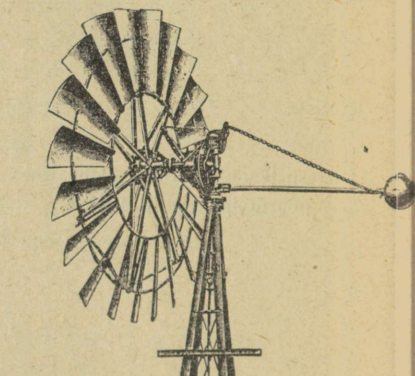


Joon. 59. Tormilipuga tiivik.



Joon. 60. Ekstsentrilise teljega tiivik.

Need mõlemad tiivikukonstruktsioonid oma paljuliigendilise reguleerimisseadisega vajavad suuremaid tootmis- ja korrashoiukulusid kui järgnevana kirjeldatud eklipssüsteemilised tiivikud. Eklipssüsteemi puhul pööratakse tiivik tuulde ja tuulest ära tervikuna. On kaks varianti: 1) külje- ehk nn. tormilipuga (joon. 59) ja 2) tiiviku telje asetamisega ekstsentriliselt tiiviku tuulde pööramise telje suhtes (joon. 60).

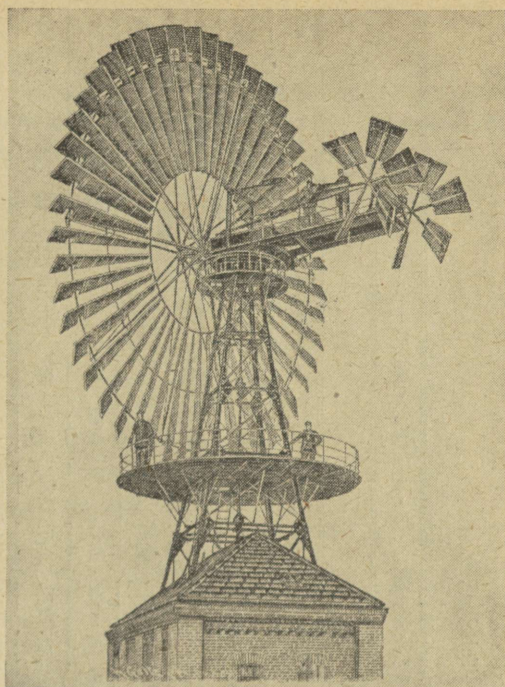


Joon. 62.
Tiivik vastukaaluga.

Joon. 61.
Tuulemootor $D=3$ m vesivarustuseks.

Mõlemal juhul tiiviku tuulest ärajuhtimisel lipp pööratakse või pöördub rööbiti tiiviku suhtes. Tuulde juhtimisel lipu küljel olev vedru tõmbab lipu perpendikulaarseisundisse tiiviku suhtes. Et aga vedrud võivad kaotada elastsuse, monteeritakse lipp sääraselt, et lipu raskuse tuulest ärapööramise tõuseb, sellega võimaldades lipu omakaalu abil tiibratast tuuleshoidmise seisundisse viia (joon. 61).

Nagu eespool (55, 56, 57, 58) nähtus, olid tiivikud reguleeritavad tiibadest ja lipu ülesandeks oli ainult tiivikut tuules hoida. Eklipssüsteem (joonised 59, 60 ja 61) aga võimaldab selle lihtsuse, et reguleerimine ning tuules hoidmine ja tuulest ärajuhtimine toimub ainult tiiviku ja lipu koostöoga. Kui aga lipp on määratud ainult tiiviku tuules hoidmiseks, s. o. kui tiiviku tiivad on reguleeritavad üksikult või gruppides, siis võib lipust loobuda, asetades tiiviku tornile allatuult ja mehhanismi tasakaalustamiseks moodustades varda vastukaalukuuliga (joon. 62).



Joon. 63. Tiivik kaksikseadroosidega
D = 14 m veski käitamiseks.

Suuremate läbimõõtudega tiivikute tuules hoidmiseks asendavad lippu külgtiivikud ehk nn. kaksikseadroosid (joon. 63). Siis on tiivik reguleeritav joon. 57 ja 58 näidatud põhimõttel.

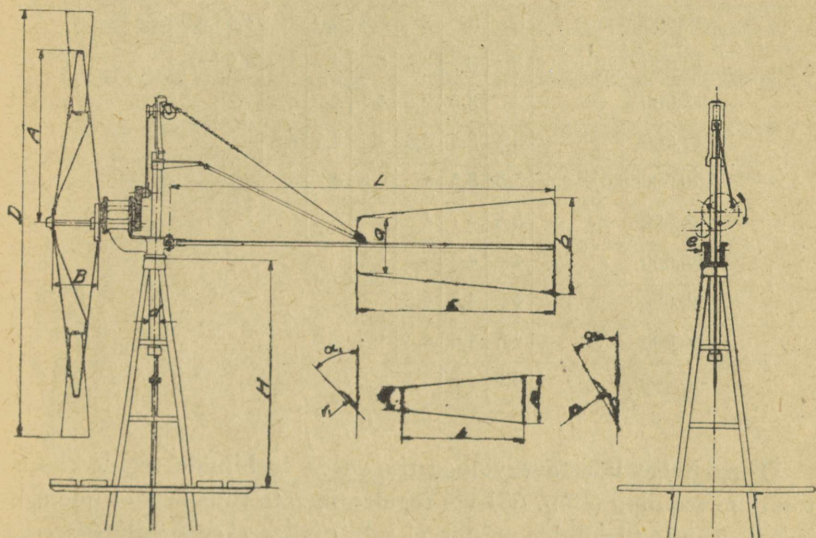
Joon. 55 kuni 63 tiivikuid nimetatakse tuuleroosideks. Neid valmistati puust ja hiljem galvaniseeritud terasest (Ameerikas), peamiselt väiksemajoolisi, vesivarustusseadmeile. Need on levinud ka Euroopas ja valmistatakse tiiviku läbimõõduga 2 kuni 12 m. Enamasti kasutatakse vesivarustustes 3- kuni 4,5- ja masinate käivitamiseks üle 5-m läbimõõduga tiivikuid. Tabelis nr. 9 on toodud tiiviku läbimõõdule (meetrites) vastav tiibade pind (ruutmeetrites),

Tabel nr. 9.

| Tüviku läbimõõt m | Tüübade pind m ² | Võimsus ja tüürude arv, kui tuule kiirus on | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|---|------|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|---------|----|
| | | 3 | | 3,5 | | 4 | | 4,5 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 m/sek | |
| | | N | n | N | n | N | n | N | n | N | n | N | n | N | n | N | n |
| 3 | 4,5 | 0,07 | 37,5 | 0,12 | 42 | 0,18 | 47 | 0,25 | 53 | 0,35 | 58 | 0,6 | 70 | 0,9 | 80 | 1,3 | 87 |
| 3,5 | 6 | 0,09 | 32 | 0,15 | 36 | 0,20 | 41 | 0,30 | 45 | 0,45 | 50 | 0,75 | 60 | 1,2 | 68 | 1,7 | 74 |
| 4 | 8 | 0,13 | 28 | 0,20 | 32 | 0,30 | 36 | 0,45 | 39 | 0,60 | 44 | 1,0 | 52 | 1,65 | 60 | 2,4 | 65 |
| 4,5 | 10 | 0,16 | 25 | 0,26 | 29 | 0,40 | 33 | 0,55 | 35 | 0,75 | 39 | 1,3 | 47 | 2,0 | 53 | 3,1 | 58 |
| 5 | 12 | 0,23 | 23 | 0,36 | 26 | 0,50 | 29 | 0,75 | 32 | 1,0 | 35 | 1,8 | 42 | 2,8 | 48 | 4,25 | 52 |
| 6 | 18 | 0,33 | 19 | 0,55 | 21 | 0,80 | 24 | 1,1 | 27 | 1,5 | 29 | 2,65 | 35 | 4,2 | 40 | 6,3 | 44 |
| 7 | 24 | 0,45 | 16 | 0,70 | 18 | 1,1 | 21 | 1,5 | 23 | 2,0 | 25 | 3,6 | 30 | 5,7 | 34 | 8,5 | 37 |
| 8 | 31 | 0,60 | 14 | 0,90 | 16 | 1,4 | 18 | 1,9 | 20 | 2,7 | 22 | 4,6 | 26 | 7,3 | 30 | 11,0 | 33 |
| 9 | 40 | 0,70 | 13 | 1,15 | 14 | 1,7 | 16 | 2,5 | 18 | 3,4 | 20 | 5,8 | 23 | 9,25 | 27 | 13,8 | 29 |
| 10 | 49 | 0,90 | 12 | 1,4 | 13 | 2,1 | 14 | 3,0 | 16 | 4,15 | 18 | 7,1 | 21 | 11,3 | 24 | 16,7 | 26 |
| 11 | 59 | 1,1 | 10 | 1,7 | 12 | 2,5 | 13 | 3,6 | 15 | 4,9 | 16 | 8,5 | 19 | 13,5 | 23 | 20,0 | 24 |
| 12 | 70 | 1,3 | 9 | 2,0 | 11 | 3,0 | 12 | 4,25 | 13 | 5,8 | 15 | 10,0 | 18 | 16,0 | 20 | 23,8 | 22 |

võimsus N (hobujõududes) ja tiirude arv n (minutis), kui tuule kiirus on 3 kuni 8 m/sek.

Vesivarustuseks valmistatakse tuulemootoreid kahes variandis: tiivik otseseoses pumbavardaga (joon. 54-1) ja hammasratas-ülekandega (joon. 54-2). Esimene neist on vähem tarvitatav põhjusel,



Joon. 64. Tuulemootori üldmõõdud.

et ühekordse tegevusega pumba varras mõjub tiivikule vahelduva koormana ja selle tagajärjel, surnud punktide läbistamisel, varda tõuked kanduvad tiivikule ja põhjustavad tiiviku ebaühtlase tiirlemise. Siinjuures hammasratas-ülekanne võimaldab ka tiiviku hoogmomenti paremini kasutada. Hammasratas-ülekanne valitakse 1:2 kuni 1:3,5 ja kolvikäik 140-200 mm. Hammasratas-ülekandega tuuleturbiini kujutab joon. 64 ja tööd 8 tunni kohta tab. nr. 10.

Vesivarustusturbiinide reguleeritavust on võimalik teostada joonistel 56, 58, 59, 60, 61 ja 64 näidatud põhimõttel, milledest kõige sobivamaks osutub ekstsentriline tiiviku asetus (joon. 60 ja 64).

Tabel nr. 10

| Vee maht päevas liitrites | T õ s t e k õ r g u s | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 m |
| 6.000 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3,5 | 3,5 | 4 | 4 | 4,5 | 4,5 |
| 8.000 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 4 | 4 | 4,5 | |
| 10.000 | 3 | 3 | 3 | 3,5 | 3,5 | 4 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | | |
| 12.000 | 3 | 3 | 3,5 | 3,5 | 4 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | | | |
| 15.000 | 3 | 3,5 | 3,5 | 4 | 4 | 4,5 | 4,5 | | | | |
| 17.000 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 4 | 4,5 | 4,5 | | | | | |
| 20.000 | 3,5 | 3,5 | 4 | 4,5 | 4,5 | | | | | | |
| 24.000 | 3,5 | 4 | 4 | 4,5 | 4,5 | | | | | | |
| 28.000 | 4 | 4 | 4,5 | 4,5 | | | | | | | |
| 32.000 | 4 | 4,5 | 4,5 | | | | | | | | |
| 36.000 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | | | | | | | | |
| 40.000 | 4,5 | 4,5 | | | | | | | | | |

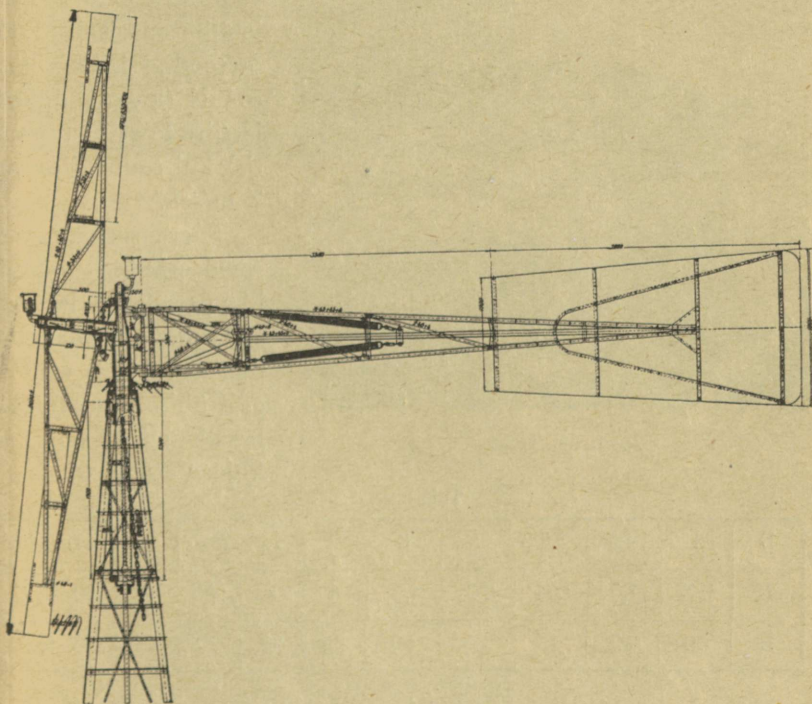
Torni telge läbistava võlliga ringveoga turbiinide reguleerimine toimub tormilipu (joon. 65) või reguleeritavate tiibade abil (joon. 62 ja 63). Nende turbiinide suhtes ei sobi tiiviku ekstsentriline asetus, sest koonilised hammasrattad, mis võimaldavad ekstsentrilist asetust, on selleks liiga kallid. Seevastu kooniliste hammasrattaste ülekanne võimaldab 3^o kuni 10^o kallutatud tiivikut (joon. 65). Enamik ringveoturbiine ehitatakse kallutatud tiivikuga, kuid vesivarustuseks (s. o. üles-alla õõtsuva pumbavardaga turbiinidel) kallutamine ei osutu konstruktiivselt praktiliseks. Joon. 64 ja 65 turbiinide mõõdud on toodud tab. nr. 11.

Joon. 65 kujutab tuuleturbiini ringveoks, s. o. masinate käitamiseks (joon. 54–3 tüüp). Energia ülekanne tiivikult torni läbistavale püstvõllile toimub hammasrattas-ülekandega, mille suhe valitakse 1:3 kuni 1:5.

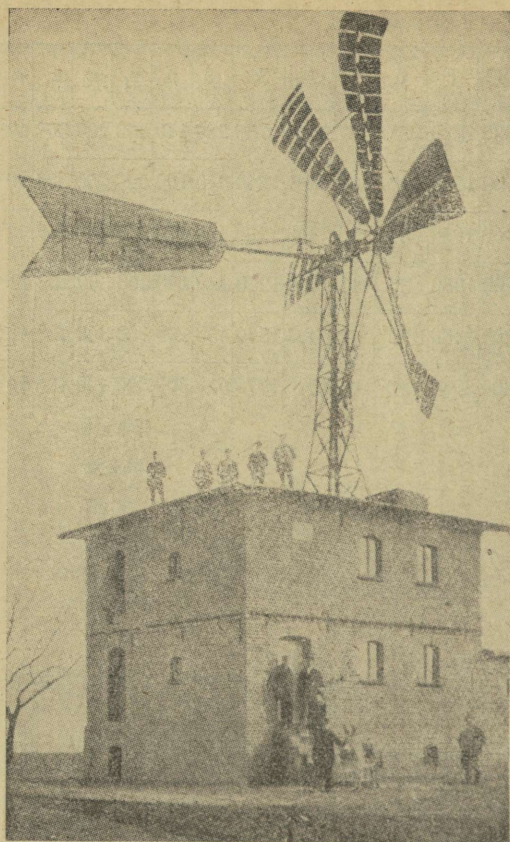
Eeltoodud tuuleroositüübile aerodünaamiliselt parema kuju saamisest arenes Soerenseni turbiin. See tüüp kujunes 10-tiivalisest

Tabel nr. 11.

| D m | A | B | L | a | b | c | d | e | H | k | m | n | r ₁ | r ₂ | α ₁ | α ₂ |
|--------|------|-----|------|------|------|------|---------|-----|------|------|-----|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 3 | 1230 | 300 | 2700 | 410 | 680 | 1380 | 2'' | 87 | 1600 | 720 | 260 | 140 | 400 | 200 | 30° | 40° |
| 3,5 | 1480 | 300 | 3200 | 410 | 680 | 1380 | 2'' | 87 | 2000 | 850 | 340 | 160 | 500 | 250 | 30° | 40° |
| 4 | 1600 | 400 | 3800 | 760 | 1160 | 1960 | 3'' | 115 | 2250 | 1200 | 400 | 170 | 550 | 280 | 26° | 42° |
| 4,5 | 1850 | 400 | 4200 | 760 | 1160 | 1960 | 3'' | 115 | 2500 | 1250 | 430 | 190 | 600 | 300 | 26° | 42° |
| 5 | 2050 | 450 | 5200 | 780 | 1200 | 2450 | 3 1/2'' | — | 3000 | 1530 | 450 | 200 | 700 | 350 | 22° | 42° |
| 6 | 2500 | 500 | 6310 | 1100 | 1500 | 2950 | 4'' | — | 3500 | 1975 | 630 | 300 | 800 | 400 | 15° | 44° |



Joon. 65. Tuulemotor, D = 6 m.



Joon. 66. Töös.

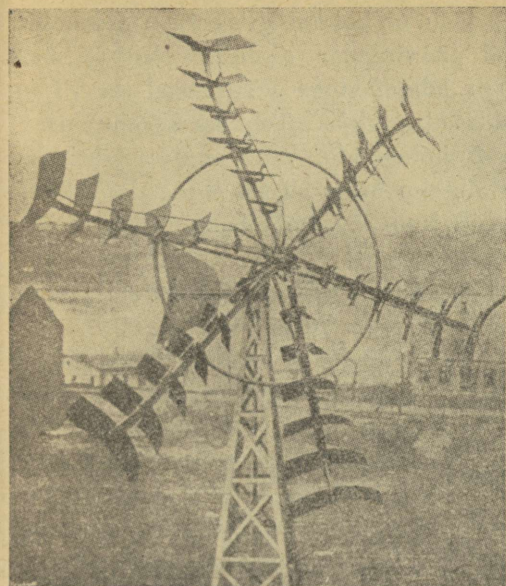
Tabel nr. 12

| | | | | | | | | | | | |
|---|------|-----|------|-----|-----|----|----|-----|----|----|----|
| D | 4 | 4,5 | 5,5 | 7 | 8 | 9 | 11 | 12 | 15 | 17 | 20 |
| N | 0,75 | 1,0 | 1,75 | 3,0 | 4,5 | 6 | 8 | 9,5 | 15 | 20 | 27 |
| n | 70 | 60 | 45 | 35 | 30 | 25 | 22 | 20 | 16 | 13 | 10 |

Suuremajooliste tuuleturbünide ehitamisel on püütud ka vana-
nenud tuulikute tüüpe moderniseerida. Vaatleme üldtuntud nn.

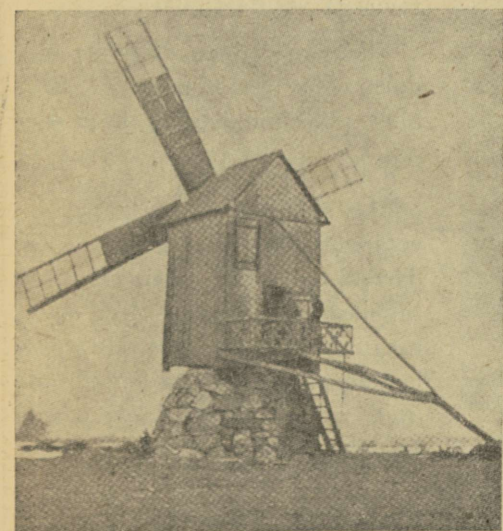
tiivikust, millest neli
tiiba tormist murti.
Umberehitamisel ku-
jundati kuuetiivaline,
ettepoole pööratud tii-
vaotstega koonusetao-
line tiivik. Soerenseni
tiiviku pinna katvus-
aste on tuuleroosiga
võrreldes väiksem. Joo-
nis 66 kujutab Soeren-
seni tuulemootorit töö-
valmina ja joon. 67 väl-
jalülitatuna. Tab. nr. 12
on toodud tiiviku võim-
sus N (hobujõududes)
ja tiirude arv n (minu-
tis), kui tuule kiirus on
7 m/sek.

Soerenseni mootori
reguleerimine toimub
klapposadeks lahuta-
tud tiibades, mida juhi-
takse tuulde ja tuulest
ära ühisest vastukaa-
luga kangist, nagu seda
kujutab joon. 67.



Joon. 69. Veski käitamiseks.

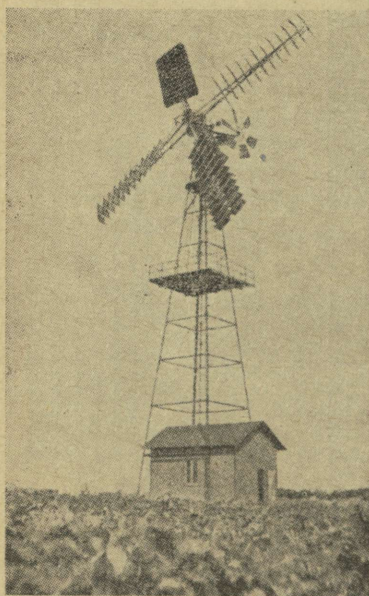
Joon. 67. Välja lülitatud.



Joon. 68. $D = 13$ m, veski käitamiseks Saaremaal.

hollandi tuulikuid, milledest joon. 68 kujutab pukktüüpi (Saaremaa) ja joon. 69 massiivsel alusel pöördtanuga tuulikut. Neist esimest ehitati peamiselt kuni 10-m läbimõõduga (Saaremaal ca 13 m, Uksikasjaline joonis on avaldatud ajakirjas „Tehnika Kõigile” nr. 7, 1938), ja arendasid kuni 5 hobujõudu, ning tuulde juhtimine toimus kogu tuulikut tema alusel pöörates. Teist ehitati kuni 28-m läbimõõduga ja nad arendasid kuni 50 hobujõudu, ning tuulde juhtimine toimus tanu pööramisega.

Tehnilisel viimistlemisel on neist tuulikuist kujunenud pöördpindadega neljatiivalised tiivikud (joon. 70 ja 71).



Joon. 70.
Pöördpindadega neljapinnaline tiivik.

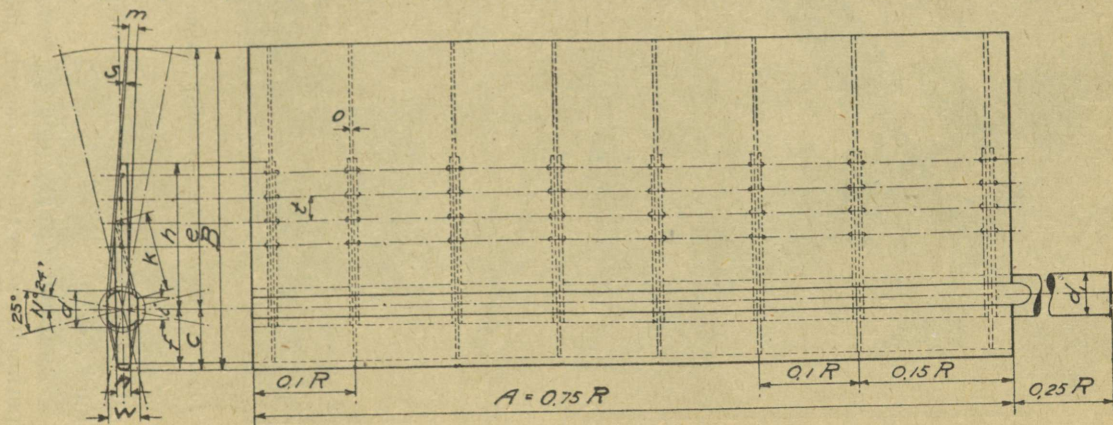
Need $D = 20$ m läbimõõduga ca 20-kW võimsusega tuulikud (joon. 70 ja 71) on määratud elektri tootmiseks ja on püstitatud prof. P. la Couri kavandi kohaselt. Niimetatute viimistlemisega ei ole kasutegurit nimetamisväärselt parandatud, on ainult muudetud automaatseks tiiviku tuulde juhitavus ja reguleeritavus.

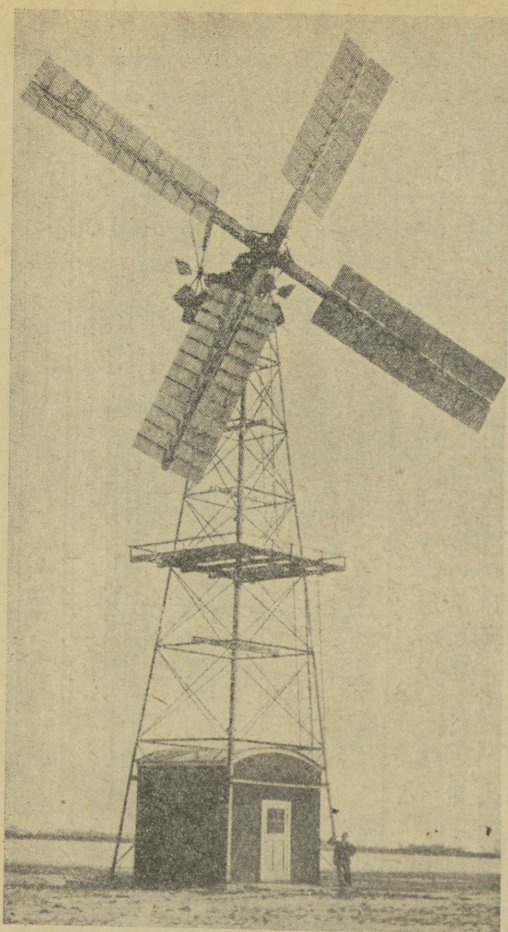
Tuulikute (joon. 68–71) madalat võimsuse kasutegurit $\eta > 0,2$ ning pöördmomentide kasutegureid $\eta_{mo} = 0,06$ ja $\eta_{m \text{ maks.}} = 0,10$

põhjastavad tiibade tagaküljel õhu voolamist takistavad kodarad. Kodartakistuse kõrvaldamiseks ja tiibadele aerodünaamiliselt parema profiili loomiseks valmistatakse laudadega täielikult kaetud pinnad (tab. nr. 13 ühes sinna juurde kuuluva joonisega).

Tabel nr. 13.

| D meetrites | A | B | C | e | f | h | m | n | o | t | i | k | s | w | w, | d | d, |
|-------------|------|------|-----|------|-----|------|----|----|------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| 10 | 3750 | 1500 | 250 | 1250 | 235 | 615 | 25 | 40 | 17,5 | 112 | 100 | 335 | 7 | 100 | 125 | 148 | 190 |
| 12 | 4500 | 1800 | 300 | 1500 | 282 | 738 | 30 | 50 | 21 | 135 | 120 | 400 | 7 | 120 | 150 | 177 | 228 |
| 14 | 5250 | 2100 | 350 | 1750 | 329 | 860 | 35 | 60 | 24,5 | 158 | 140 | 465 | 7 | 143 | 175 | 206 | 266 |
| 16 | 6000 | 2400 | 400 | 2000 | 376 | 934 | 40 | 70 | 28 | 180 | 160 | 532 | 10 | 160 | 200 | 236 | 304 |
| 18 | 6750 | 2700 | 450 | 2250 | 422 | 1102 | 45 | 80 | 31,5 | 202 | 180 | 600 | 10 | 180 | 225 | 265 | 342 |
| 20 | 7500 | 3000 | 500 | 2500 | 470 | 1230 | 50 | 90 | 35 | 225 | 200 | 665 | 10 | 200 | 250 | 295 | 380 |





Joon. 71. Pöördpindadega neljapinnaline tiivik.

sele. Nii näeme joon. 72 Adleri tiivikut, mille kiirusemoodul $k = 2,5$ kuni 3,5.

Suurimat kiirust suudavad arendada propellertiivikud, milledest parimaks saavutuseks osutub joon. 73 kujutatud neljatiiviline tiivik.

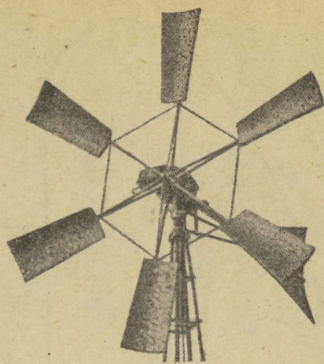
Katsed nende tiibade mudeliga on andnud võimsuse kasutegur $\eta = 0,31$ ja paigalt nihkumise või nn. algpöördmomendi kasutegur $\eta_{mo} = 0,115$ ja maksimaalse pöördmomendi kasutegur $\eta_{m\text{ maks.}} = 0,18$ kiirusemooduli $k = 2$ juures. Elektri tootmisel dünamot torni tippu asetades tuulemootori konstruktsioon ühes torniga lihtsustub, sest siis jäävad ära transmisiioonid. Sealjuures dünamo käitamiseks vajalik suurem tiirude arv sunnib valima kiiresti jooksvate tiibadega tiiviku, mis soodustab tiiviku katvusastme vähendamist, mille tulemusena tiibade arv ja üldpind kujuneb väikeseks. Sealjuures tiibade profiilid olgu valitud vastavalt tiibade kiiruse-

Ka võimsuse kasutegur ($\eta = 0,46$) ületab seniseid saavutusi. Selle tiiviku reguleerimisseadis erineb eelkirjeldatuist seega, et tiibade tagaküljele on kinnitatud Bilau-süsteemilised takistuspinna, mis normaalse tiirlemiskiiruse puhul asuvad tangentsiaal-asendis, vedrust tõmmatuna, toetudes vastu tuge (joon. 74). Ületades määratud tiirlemiskiiruse, takistuspinna pöörduvad tsentrifugaaljõu mõjul radiaalasendisse, põhjustades seega küllaldast takistust, et isegi suurte tormide puhul tiirlemiskiirus ei ületaks lubatavat piiri.

Kahetiivalised lihtsad propellertiivikud osutuvad kohasteks väiksemate akumulaatorite laadimisel. Uhte neist, tiibadest käitavat mootor-generaatorit, kujutab joonis 75.

Reguleerumine toimub tiibade pöörlemisel radiaaltelje ümber, kusjuures tiiviku kapslis asuv vedruga seadis hoiab tiivad töövalmis põiki tuult, ja tuul, mille tugevus ületab optimaalse piiri, surub tiivad serviti. Uksiktiiba kujutab joon. 76.

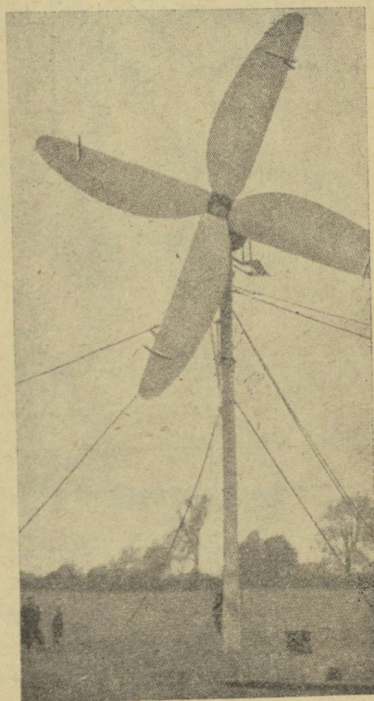
Samaks otstarbeks määratud tuulemootorit, mille reguleerumine toimub aga kogu tiiviku ja dünamo



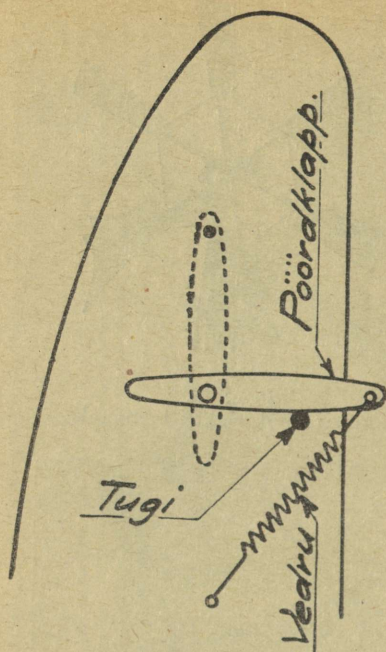
$$k = 2,5-3,5$$

Joon. 72.

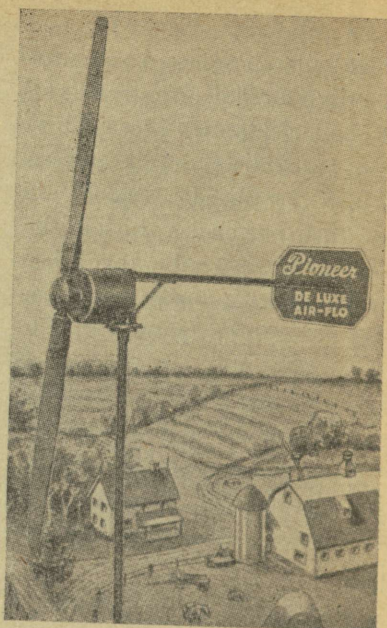
Adleri tiivik elektri tootmiseks.



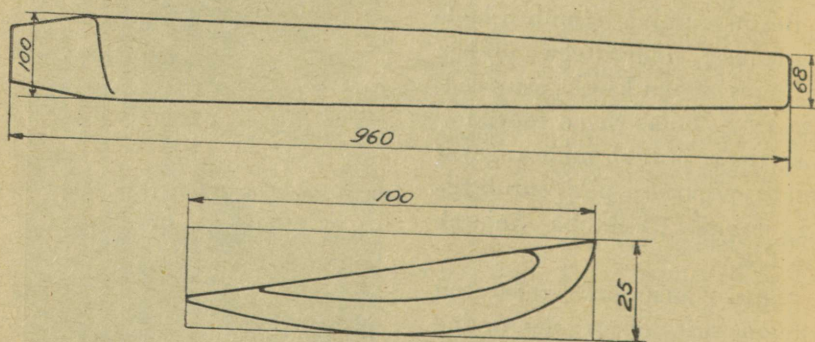
Joon. 73. Elektri tootmiseks.



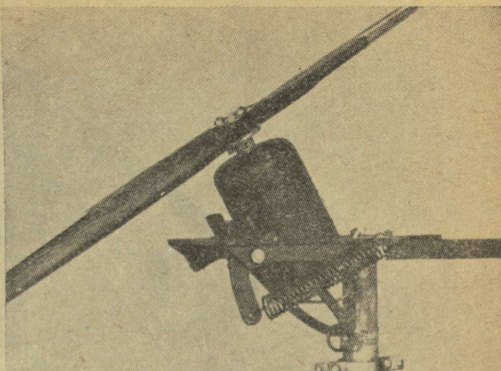
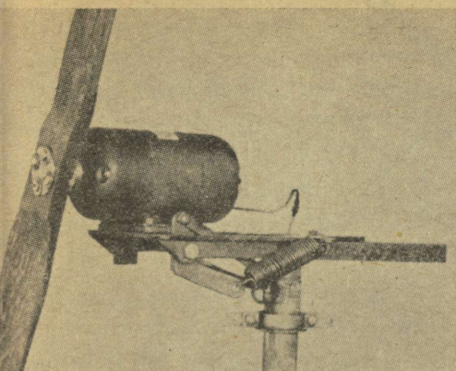
Joon. 74. Bilau-süsteemiline pöördklapp-regulaator.



Joon. 75. Tuulemootor. $D = 2,13$ m. 150 vatti. Akumulaatori laadimiseks.



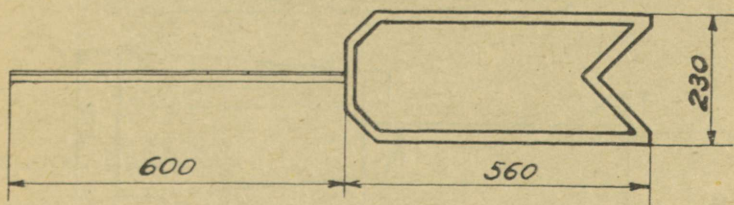
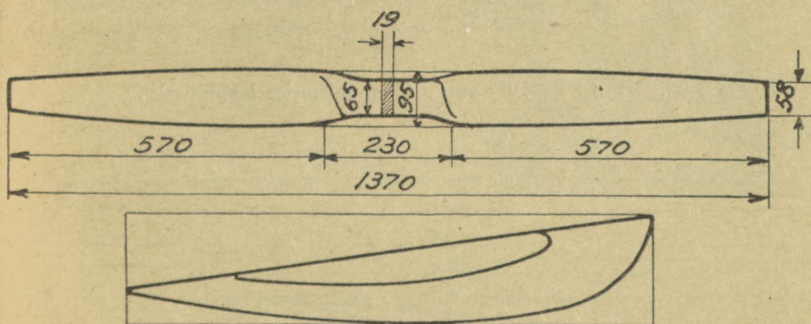
Joon. 76. Tuulemootori tiib.



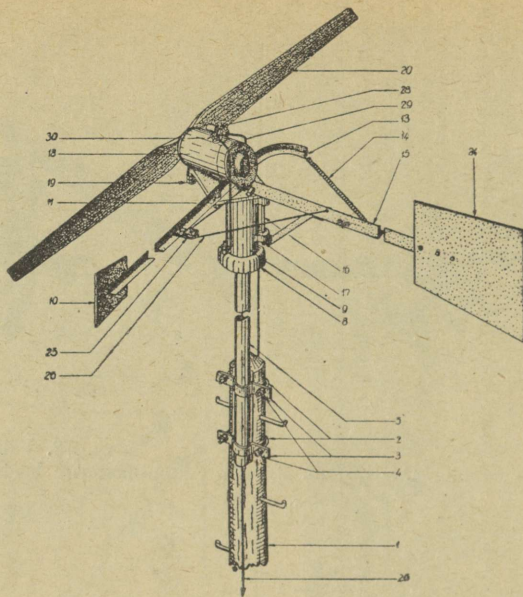
Joon. 77. Töös.

Joon. 78. Välja lülitatud.

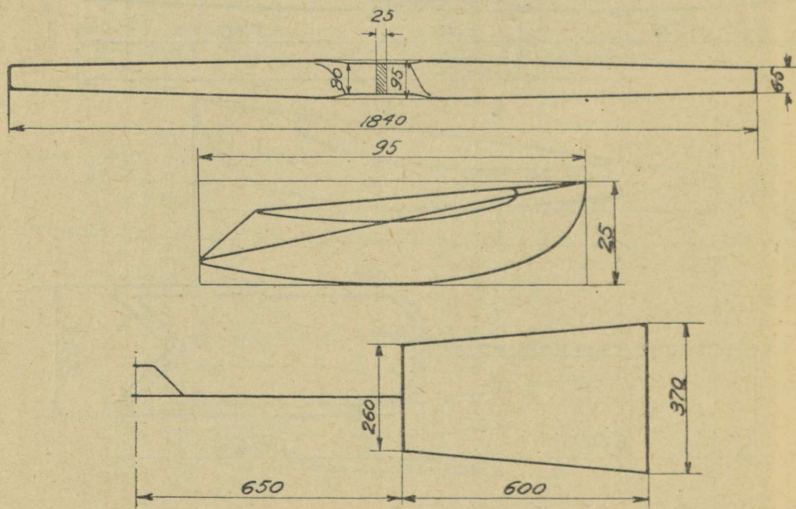
Tuulemootor $D = 1,37$ m. 30 vatti. Akumulaatorite laadimiseks.



Joon. 79. Tüvik ja lipp.



Joon. 80. $D_1=1,84$ m. 90 vatti. Akumulaatorite laadimiseks.



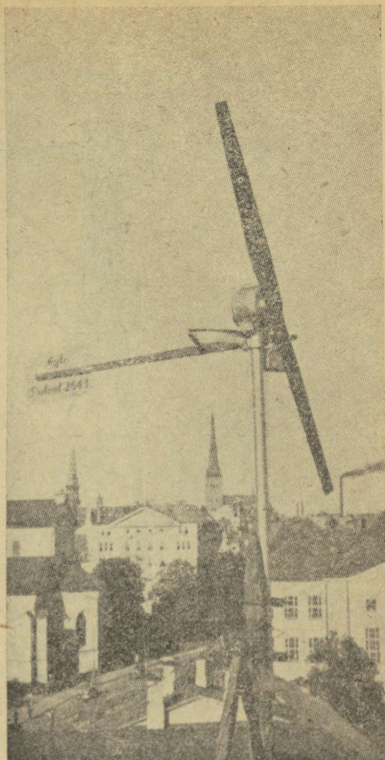
Joon. 81. Tiivik ja lipp

kaldumisega liigse tuule survel tagaküljele, kujutavad joon. 77 (töövalmina) ja joon. 78 (väljalülitatuna). Tiiva ja lipu mõõdud on antud joon. 79.

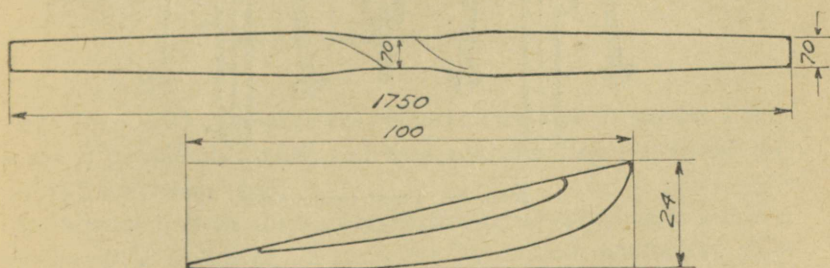
Joon. 80 kujutab „VEF“ tuulegeneraatorit ja üksikosi joon. 81. Reguleerumine eklipssüsteemiline.

Joon. 82 kujutab „Aglo“ tuulemootorit ja üksikosi joon. 83.

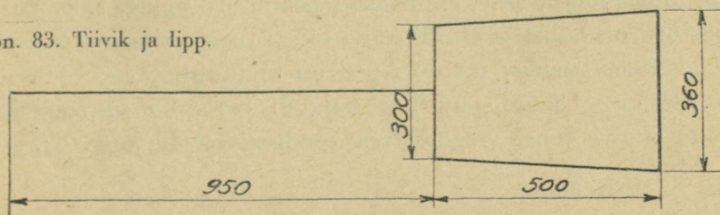
Eeltoodud kahetiivalised propellerid on valmistatud puust ja neid on võimalik valmistada primitiivsete abinõudega. Kasutades puud tuulemootorite ehitusmaterjalina on ehitatud mootoreid, milledest üht, tiibratta läbimõõduga 5 m (pumpamiseks), kujutab joon. 84.

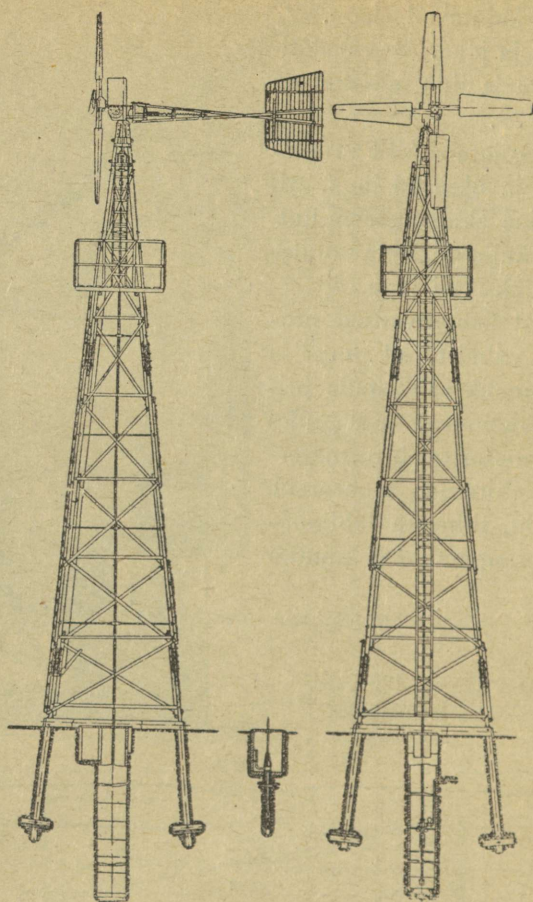


Joon. 82. $D = 1,75$ m. 120 vatti.
Akumulaatorite laadimiseks.



Joon. 83. Tiivik ja lipp.

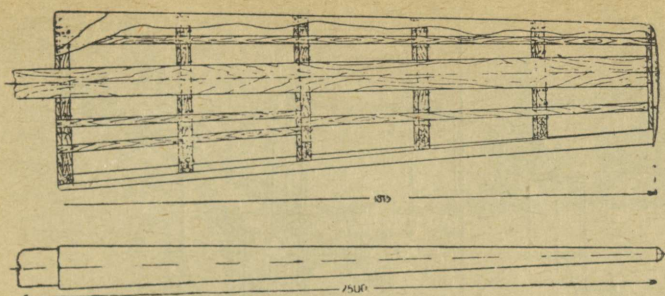




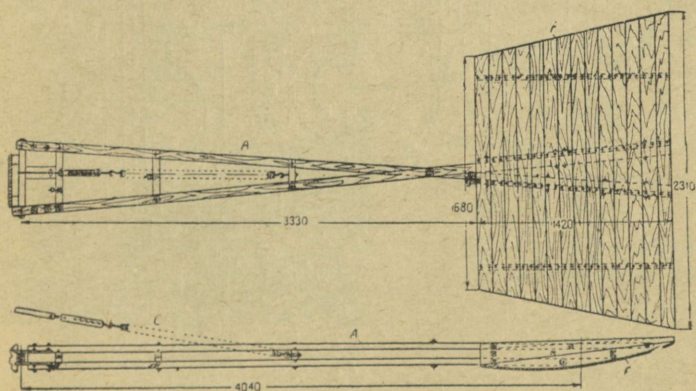
Joon. 84. Puust tuulemootor.

See mootor on valmistatud peamiselt puust, s. o. tiivik, saba ja torn on puust ja ainult kolvi tõusu reguleerimise seadist ja tigu-ülekanne sisaldav mootori pea on metallist.

Plekiga kaetud puutiiba kujutab joon. 85 ja saba joon. 86, ning kolvi tõusu reguleeriva seadisega pead joon. 87.



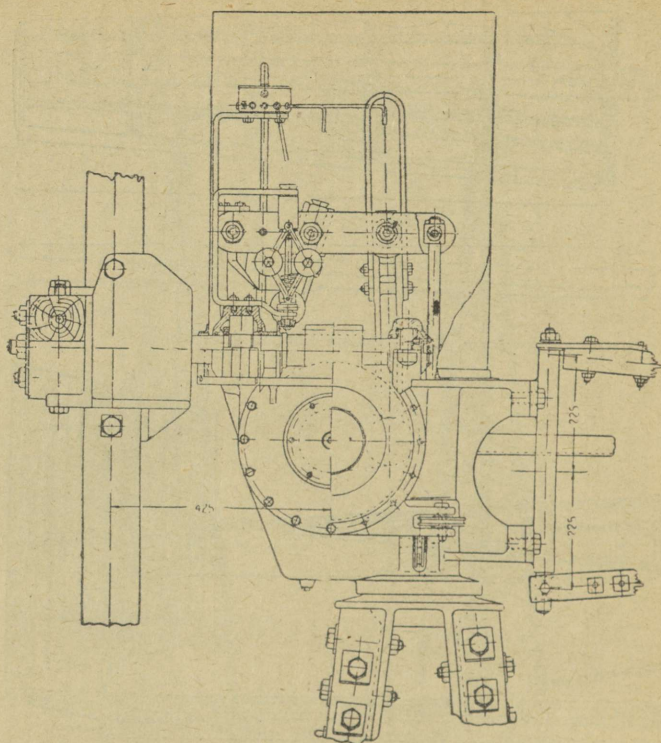
Joon. 85. Plekiga kaetud puutiib.



Joon. 86. Plekiga kaetud puulupp.

See 5-m tiivikuläbimõõduga mootor arendab 8 m/sek. tuulekiirusel 3 hobujõudu, tehes 180 tiiru minutis. Reguleerumine toimub eklipssüsteemi järgi.

Et kiiresti tüürleva tiiviku algpöördmoment on väike ja seetõttu nõrgema tuule puhul ei ole suuteline koormatult pöörlemist alustama, siis varustatakse eriti pumpamiseks määratavad mootorid säärase seadisega, mis mootori tüürlemise kiiruse kahanemisel kahan-dab koormat. Neid nõudeid rahuldab joon. 87 toodud seadis, mis koosneb tiguülekandest tübrattalt väntvõllile (1:6) ja pumbavarda käigu reguleerijast tsentrifugaalregulaatorist.

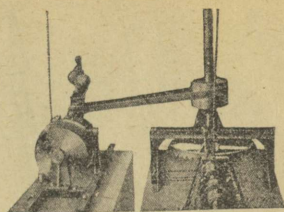


Joon. 87. Ulekandeseadis.

Joon. 75 tuulegeneraatorile reguleerivuselt sarnanevat tuulemootorit kujutab joon. 88. Tuulemootor $D = 20$ m, kasutatakse elektri tootmiseks (26/34 kW) ja veski käitamiseks. Tormi puhul selle mootori tiiviku radiaalsetel telgedel pöörduvad tiivad juhitakse tuulest ära vastukaalu abil, ja tuultest olenevaid tiirude arvu muutusi tasandab tsentrifugaalregulaator, mis on tiivikuga ühenduses vastava trossi kaudu ja vintsiga (joon. 89). Uhtlasi see regulaator hoiab ära juhtumid, kus veorihmade äralangemisel või tiivikust käitatava dünamo voolu katkestamisel koormast järsku vabanev tiivik ohtlikult kiiresti tiirlema võib hakata. Tiibratta tulde juhtimine toimub seadroosidega. Tiiviku kiirusemoodul $k = 3$.



Joon. 88.



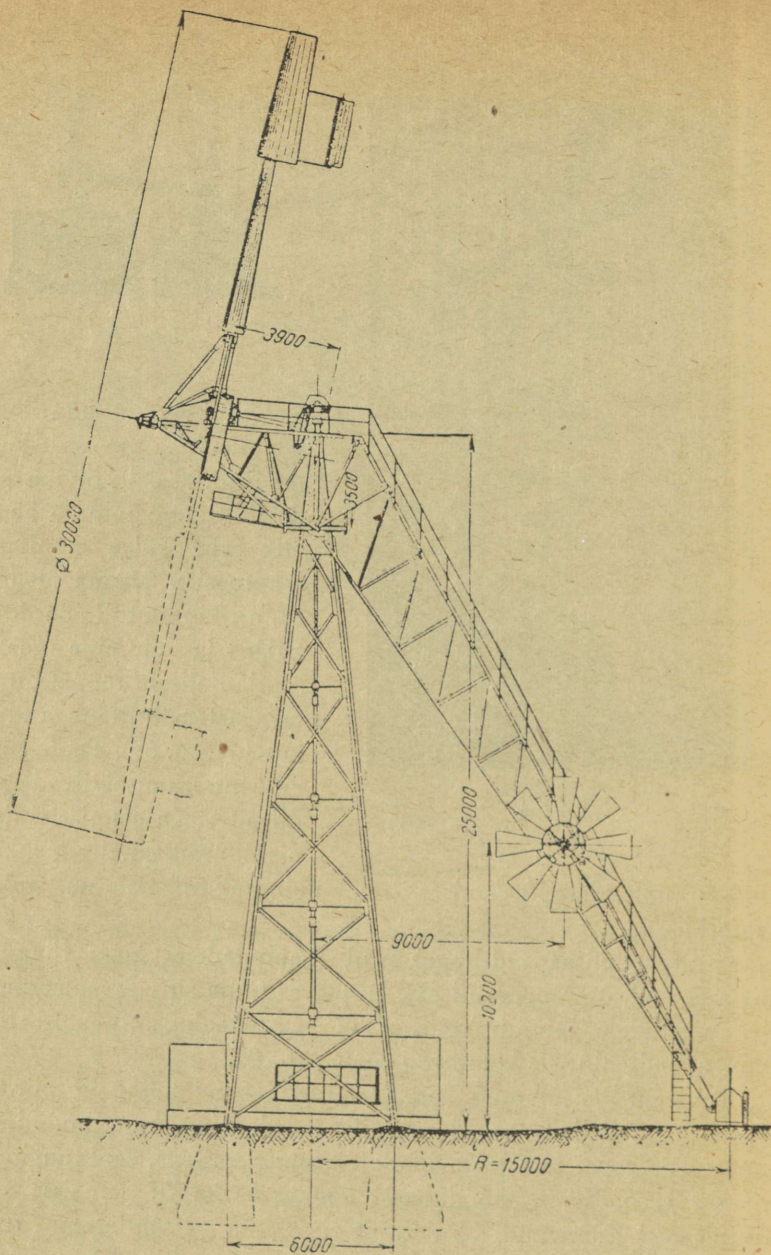
Joon. 89.

Eelmisest suurema tiibade läbimõõduga mootorit kujutab joon. 90. Selle tiiviku tuulde juhtimine toimub hanna ehk saba külge kinnitatud seadroosist. Hanna ülemine ots on kinnitatud pöördtanu külge ja alumine toetub sõõrikujulisele rööpale, nagu tavaliselt pöördtanuga tuulikutel (Joon. 69). Tuule tugevuse muutumisel tiivad pöörduvad nagu eelmiselgi (Joonis 88) radiaalsel teljel, kuid

tiibade tuulest ärapööramiseks on kinnitatud tiibadele nn. stabilisaatorid.

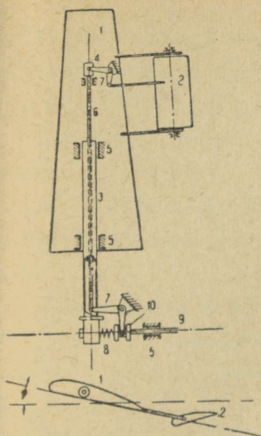
Need stabilisaatorid tegutsevad lisapindadena kogu tiiva või tiivaosa tuulest ärapööramiseks, kusjuures tuule surve reguleerimine tiiva pindadele toimub vedruga või vastukaaluga. Mootori tiiba ühes stabilisaatoriga kujutavad joon. 90–92.

Tuulejõu kasutamise probleemide lahendamisel ei piirduta tiibadele ja tiivikule aerodünaamiliselt sobivama kuju andmisega, mootori ja torni konstruktsioonide viimistlemisega, vaid tungitakse mootorile soodsama energiabaasi leidmiseks ka kõrgemaise õhukihtidesse. Kõrgemate õhukihtide tugevama ja ühtlasema tuule rakendamine on seoses torni ehitusega, mille ehitamise tasuvuse



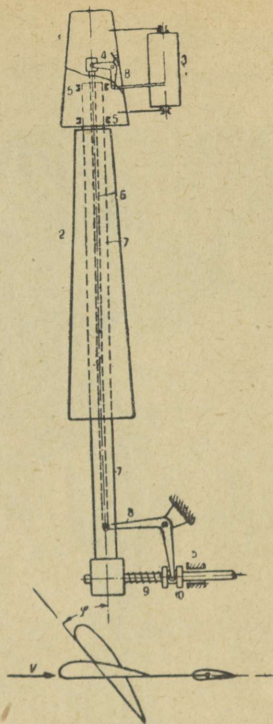
Joon. 90.

Tuulemootor elektri tootmiseks. $D = 30$ m. 100 kW.

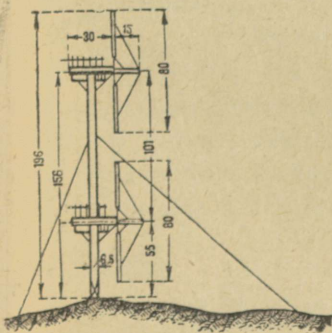


Joon. 91-a.

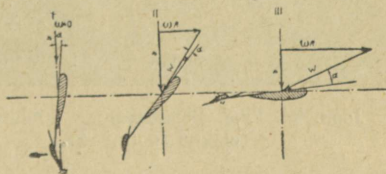
Joonised 91-a ja 91-b tiiba ja tiivaotsa pööravad stabilisaatorid.



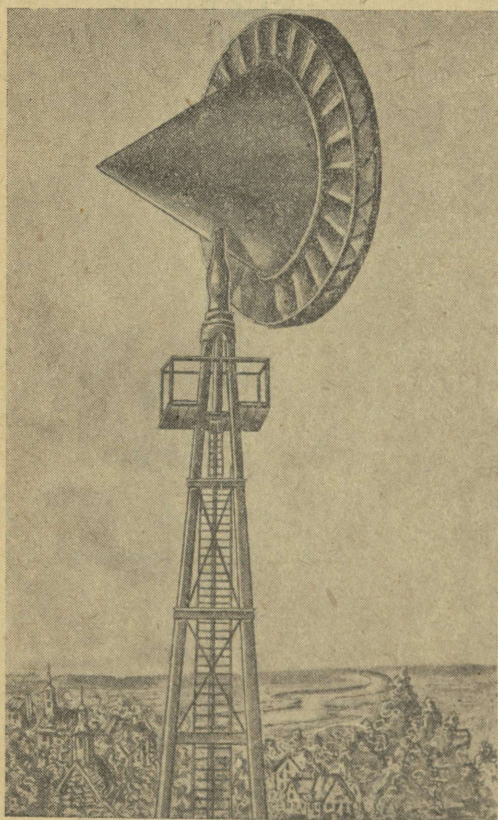
Joon. 91-b.



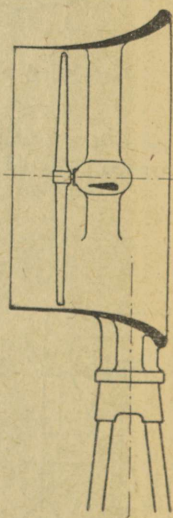
Joon. 93. Tuulemootori projekt elektrienergia tootmiseks $2 \times (D=80m)$; 100000 kW.



Joon. 92. Tiivapinna kolm asendit.



Joon. 94. Prof. Ellenhammeri tuuleturbiin
elektri tootmiseks.



Joon. 95.

eelduseks on suure võimsusega tuulemootor. Joon. 93 kujutab tuule-
elektrijõujaama projekti, mille 80-m läbimõõduga tiivikuid kannab
156 m kõrgune torn. Uldvõimsus on 10 000 kW.

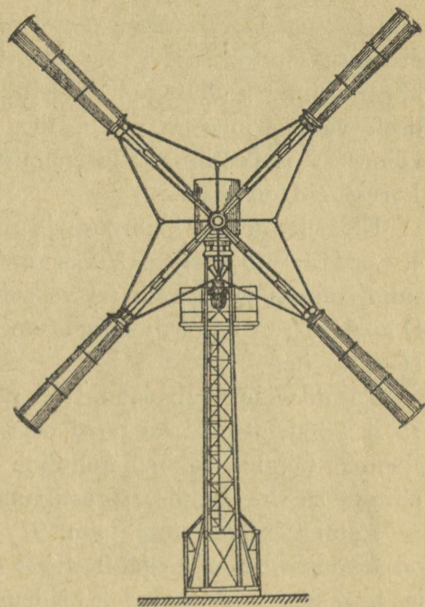
Eelmises projektis (joon. 93)
näidatud tiivikute läbimõõte
ületab Honnefi projekt, mille
kohta andmed on toodud I osas,
joon. 2. ja 3.

Mootori reguleerumine toi-
mub tiivikute kandekonstrukt-
siooni ettepoole kaldumisega
(võrdle joon. 78).

Eeltooduist erineva konst-
ruktiooniga prof. Ellenhammeri
tuuleturbiini kujutab joon. 94,
mille tiiviku sisemise pinna
kooniline kate juhib tuule kes-
kelt tiibadele.

Vastupidi eelmisele juhi-
takse joon. 95 tuul tiibadele
Korti düüsi abil. Sellega on või-
malik tõsta tiiviku kasutegurit.

Fletneri rootori kui pinna
kasutamist tuulemootori tiivana
vaatlesime eespool. Seal kirjeldatud rootoreist võime kujundada
joon. 96 näidatud tiiviku. Et aga säärane tiivik osutub ebaratsio-
naalseks, siis me selle juures pikemalt ei peatu.



Joon. 96.

c. Tornid.

Nagu eespool (2-c) tähendatud, sõltub tuule kiirus maapinna
reljeefist ja kõrgusest, mida iseloomustavad tab. 4 toodud andmed
ja joon. 15 ja 16. Kõverjoonest (joon. 16) nähtub, et 10 m kõrguseni
tuule kiiruse juurdekasv on suurem kui järgnevatel kõrgustel, ja
kui arvestada asjaolu, et kõrgemate õhukihtide liikumine on üht-
lasem, tuleks mootori tiivik maapinnast vähemalt 10 m kõrgusele

paigutada. Seejuures arvestada ümbritsevaid esemeid, nagu hooned, puud jms., millede kõrgus 200 – 300 m kauguses ei ületaks mootori kõrgust, vaid jääksid vähemalt paar meetrit allapoole tiiviku alumist serva. Uhtlasi tähele panna ka seda, et neist piiridest lähemal ja madalamal asetsevate esemete kontuurid (näiteks katused) ei osutuks tuule suuna segajaiks. On soovitatav mootoreid asetada kõrgele, kuid hoidutagu liialdusist, ja seda kahel põhjusel: 1) suhteliselt väikese mootori puhul liiga kõrge torn põhjustab mootori võimsuse üksushinna suurenemist ja 2) mootori järelevalve ja korrashoid on raske.

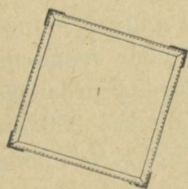
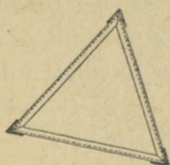
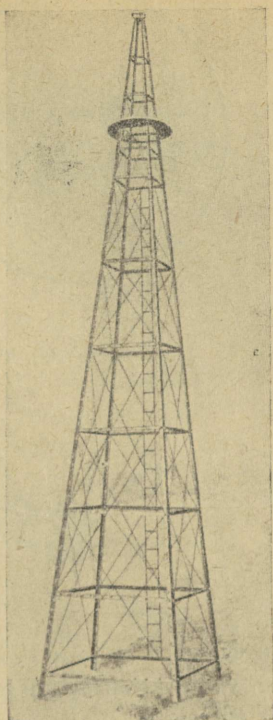
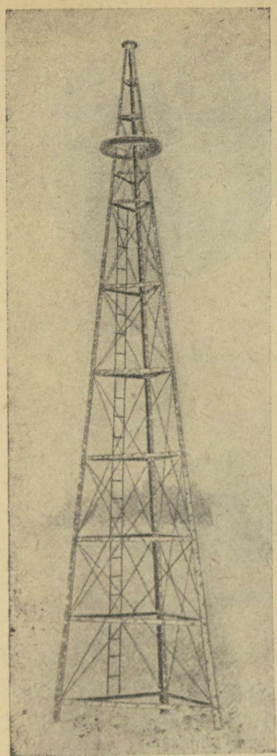
Üldiselt on torni kõrguse ja tiiviku läbimõõdu suhe 1,5 kuni 4, s.o. $H = 1,5$ kuni $4D$, kusjuures väiksematel mootoritel on see suhe suurem ja suurematel väiksem. Näiteks tiivikule läbimõõduga $D = 3$ m sobiva torni kõrgus on $H = 12$ m ja $D = 20$ m puhul $H = 30$ m.

Tornide konstruktsioonid on väga erinevad. Nii näeme joon. 73, 75 ja 93 mootoreid ka posti otsas. Üldiselt on tornide konstruktsiooniks kolme- või neljatahuline püramiidsõrestik. Suured tornid ehitatakse ringikujulise sõrestikuna (joon. 2 ja 88).

Kolmetahuline torn (joon. 97) sisaldab küll vähem üksikosi ja on kaalult kergem neljatahulisest (joon. 98), kuid selle 60° nurkade ja nurkades põikraudadele sidemete valmistamine on tülikam. Neljatahulised tornid võimaldavad ka paremini veereservuaari torni mahutada (joon. 58 ja 61).

Torni sõrestiku valmistamisel tarvitatakse võimalikult õhemaseinalist ja laiemaküljelist nurkrauda põhjusel, et kruviaugud vähem nõrgestaksid põiklõikepinda ja nurkraua inertsmomenti. Sellepärast ameeriklased tarvitavad tornide valmistamiseks plekist nurkraudu.

Sõrestiku projekteerimisel langeb pearõhk torni montaažile. Torne monteeritakse horisontaalasendis ja seejärel püsti tõstes, või püstasendis üksikosi järjekorras monteerides. Püstasendis monteerimine osutub paratamatuks torni hoone laele püstitamisel. Torni põikraudade vahed torni telje suunas valida kahe meetri piirides nii, et torni külgraudade otstes jätkuosa ulatuks üle põikraua. Külg- ja põikraudade sõlmpunktides on võimalik ka diago-

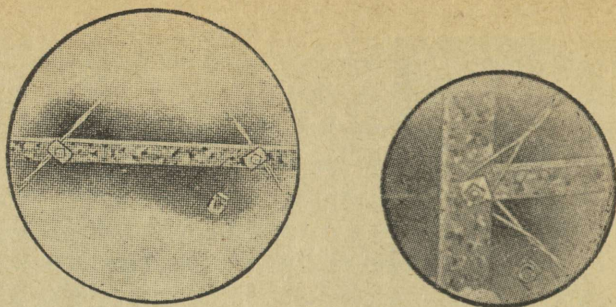


Joon. 97. Kolmeküljeline torn.

Joon. 98. Neljaküljeline torn.

naale kinnitada. Diagonaalid valmistatakse kahekordselt keerutatud traadist (joon. 99 ja 100) või ümarrauast silmustega otstes.

Plekist painutatud nurkraudadest ja traadist diagonaalidega torni konstruktsiooni kujutab joon. 102, kus sõõriga on piiratud sideme kohad.



Joon. 99. ja 100. Traadist diagonaalide sidemed.

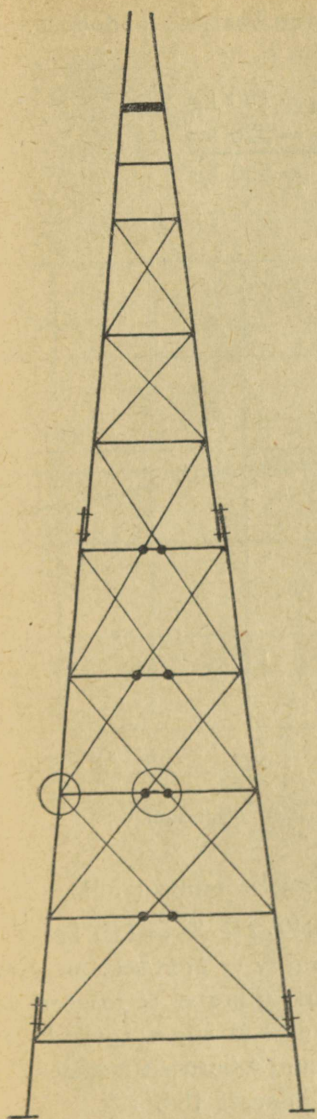


Joon. 101. Ankurtallad.

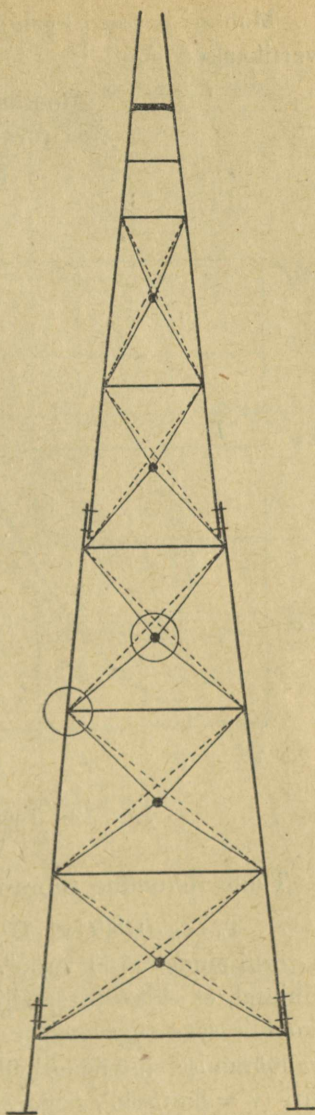
Nurkraudadest torni konstruktsiooni kujutab joon. 103. Diagonaalid valmistatakse ümarrauast ja pingutatakse pingutusrosettidega. Pingutamata diagonaalidega (märgitud joon. 103 katkendjoonega) torn on nn. „vedel“ ja peale rosettidest pingutamist (märgitud pideva joonega) muutub stabiilseks, ja tornile mõjuvaile jõududele vastupanemisest võtavad kõik torni osad ühtlaselt osa. Mootorile juurdepääsuks varustatakse torn redeliga, mille astme kõrgus valitakse 250 mm ja laius 300 mm. Redeli küljed valmistatakse $1\frac{1}{4}'' \times \frac{1}{4}''$ lame- ja astmed $\frac{1}{2}''$ ümarrauast.

Torni jalgade külge kinnitatud ankurtallad on vajalikud maasse müürimisel või hoonde lae talade külge kinnitamiseks (joon. 101). Jalgade vahe ja torni kõrguse vahekord valitakse 1:4–4,6.

Torni tugevuse ja stabiilsuse arvutamise näiteks toome $D = 3$ m tiibrattä läbimõõduga mootori, tuginedes $H = 12$ m tornile, mille jalgade vahe $B = 2,8$ m. Torn peab olema suuteline mootorit ja torni kandma ja tuule rõhumisele vastu pidama.



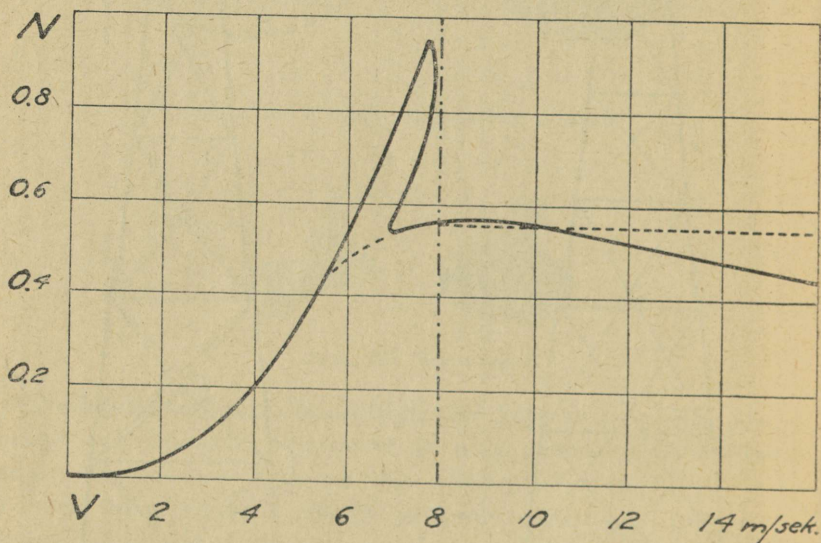
Joon. 102.
Plekist torni konstruktsioon.



Joon. 103.
Nurkraudadest torni konstruktsioon.

Mootori ja torni kaalud mõjuvad vertikaalsete jõududena. Seega vertikaalsed jõud:

| | |
|---------------|------------------------|
| Mootori kaal | $G_1 = 180 \text{ kg}$ |
| ja torni kaal | $G_2 = 320 \text{ kg}$ |
| Kokku: | $G = 500 \text{ kg}$ |

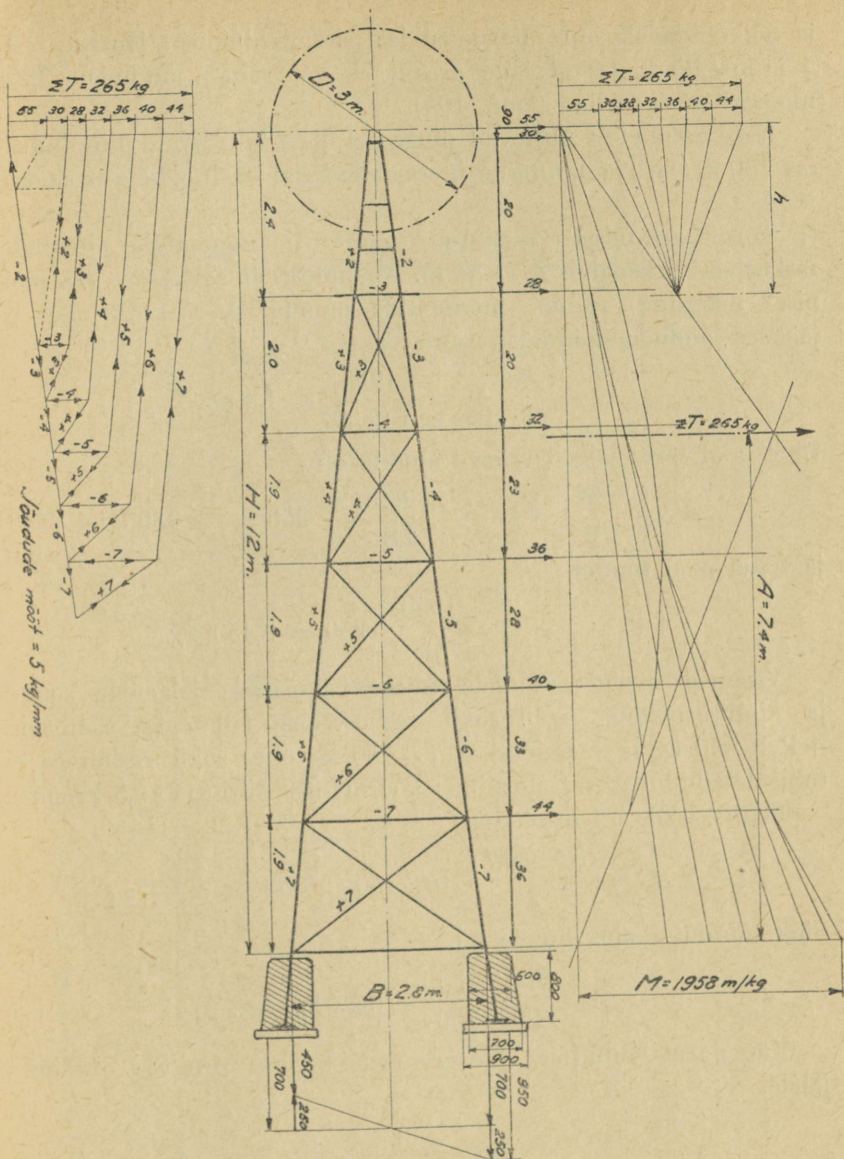


Joon. 104. Tuulemootori võimsuse diagramm.

Tuule rõhumine tiibrattale horisontaalse jõuna (v. 81)

$T_o = \eta \cdot 0,049 \cdot v^2 \cdot D^2 = 0,35 \cdot 0,049 \cdot 27^2 \cdot 3^2 = 110 \text{ kg}$
 ja torni pinnale 150 kg/m^2 . Tuule kiirus $v = 27 \text{ m/sek.}$ on võetud põhjusel, et eklipssüsteemiline reguleeriv tiibratas ei reageeri vajaliku kiirusega tugevatele tuulepuhangutele ja surve tiivikule võib ärapööramise momendil ületada 3- kuni 4-kordselt reguleerivuse piiri ($v = 8 \text{ m/sek.}$), nagu see nähtub joonisel 104.

Ulaltoodud arvud on kantud tab. 14, lahter 1 ja 2, ning on arvutatud ühele torni poolele. Selle järgi määrame graafiliselt püst-



Joon. 105. Sõrestikus esinevate jõudude määramine graafiliselt.

ja põikraudadele ning diagonaalidele sisemised jõud (lahtrid 3, 4, 5 ja 6). Püstrauas olevaile graafiliselt määratud jõududele liita mootori torni kaalud (joon. 105).

Neist jõududest olenevad pinged ei ületa lubatavaid piire (lubatav 750 kg/cm^2) ja arvutatud inertsmomendid on lubatavaist suuremad.

Torni graafilisel arvutusel saame horisontaalsete jõudude raskuspunkti kauguse $A = 7,4 \text{ m}$. Analüütiliselt arvutades (ka joonisel märgitud) saame momentide summa $M = 1958 \text{ mkg}$ ja jagades jõudude summale, saame

$$A = \frac{M}{\Sigma T} = \frac{1958}{265} = 7,4 \text{ m}.$$

Uhel pool torni jalgade surve alusele on

$$-P_1 = \frac{M}{B} + G = \frac{1958}{2,8} + 250 = -950 \text{ kg}$$

ja teisel pool tõmme

$$+P_2 = \frac{M}{B} - G = \frac{1958}{2,8} - 250 = +450 \text{ kg}.$$

Vastavalt neile jõududele tuleks valmistada jalgadele soklid ja kinnituspoldid, s. o. sokli raskus peab ületama tõmbejõu $+P_2 = 450 \text{ kg}$ ja survejõud $-P_1 = 950 \text{ kg}$ ühes sokli raskusega ei tohi ületada lubatavat aluspinna koormatuse piiri ($p = 2,5 \text{ kg/cm}^2$).

Sokli raskus on tegelikult

$$G = \left(\frac{0,6 + 0,7}{2} \right) \cdot 0,8 \cdot 1600 = 830 \text{ kg}$$

ning rõhumine aluspinnale on

$$p = \frac{950 + 830}{900 \cdot 900} = 0,22 \text{ kg/cm}^2.$$

Käesoleval juhul jõud olid arvutatud poolele tornile, s. o. kahele jalale.

Tabel 14.

| Nr. | Jõud | | Graafiliselt määr. jõud | | | | P ü s t r a u a d | | | | | | | | Põikraud | | Diagon. | | | | | |
|-----|-------|------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|----------------|----------------|---------------------------------|-------|-----------|----------------|---------------------------------|---------|----|-------|------|-------|
| | vert. | hor. | Püstraud | | Põik. | Diag. | G | Surve | Tõmbe | Nurkr. | F | | Pinged | | Inerts o. | | Surve- | Inerts. | ∅ | Tõmbe | | |
| | G | T | surve | tõmbe | -T ₃ | +T ₄ | | -P ₁ | +P ₂ | | maks. | min. | surve | tõmbe | nõutav | ole- | pinge | J | | F | F | pinge |
| | 2 | 2 | -T ₁ | +T ₂ | | | | T ₁ +G | T ₂ -G | | P ₁ | P ₂ | J = $\frac{P_2 \cdot l^2}{400}$ | mas | J × | T ₃ | J = $\frac{T_3 \cdot l^2}{400}$ | F | | F | F | F |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | | | |
| 1 | 90 | 55 | — | — | — | — | — | — | — | | | | | | | | — | — | | — | | |
| 2 | 20 | 30 | 305 | 305 | 70 | — | 110 | 415 | 195 | 35 × 5 | 2 × 3,28 | | 95 | 45 | 4,98 | 7,12 | 16,0 | 1,01 | | — | | |
| 3 | 20 | 28 | 385 | 305 | 46 | 90 | 130 | 515 | 175 | 35 × 5 | 2 × 3,28 | 4,36 | 118 | 40 | 5,15 | | 10,5 | 0,46 | | 237 | | |
| 4 | 23 | 32 | 465 | 385 | 60 | 95 | 153 | 618 | 243 | | | | | | | 142 | 56 | 5,56 | | 13,8 | 0,54 | |
| 5 | 28 | 36 | 540 | 465 | 80 | 105 | 181 | 721 | 284 | 40 × 5 | | | 134 | 53 | 6,50 | | 14,8 | 0,72 | | 277 | | |
| 6 | 33 | 40 | 625 | 540 | 100 | 125 | 214 | 839 | 331 | 2 × 3,79 | | | 156 | 62 | 7,45 | 10,86 | 18,6 | 0,90 | | 330 | | |
| 7 | 36 | 44 | 710 | 625 | 130 | 145 | 250 | 960 | 475 | 5,38 | | | 178 | 89 | 9,63 | | 24,2 | 1,17 | | 382 | | |
| Σ | 250 | 265 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

6. Tuule-energia rakendamisest.

a. Otstarbeka tuulemootori tüübi valimine.

Tuulemootori konstruktsiooni valikul tuleb kõigepealt silmas pidada ökonoomsuse põhimõtteid, s. t. tuulemootor peab võimalikult väikeste tootmiskuludega ära kasutama võimalikult suure hulga tuule-energiat. See õleneb peamiselt sellest, kuivõrd tootmistehnilisel teostamisel on arvestatud aerodünaamilisi kaalutlusi.

Põhilisi tiivikukonstruktsioone (joon. 106) vaadeldes nähtub, et Savoniuse rootoriga (1) on lahendatud vertikaalse teljega trummel-tüübilise tuulemootori idee sel teel, et ka vastu tuult liikuvat tiiba on kasutatud tuule-energia rakendamiseks, mille tõttu see tiivik rahuldab tootmistehnilisi nõudeid ja on üks paremaid väiksemajooliste vertikaalse teljega tuulemootorite rühmas (näiteks rootor-ventilaatorid).

Hollandi tuulikust arenesid aeglaselt tüürlevad tuuleroosid ja kiiresti jooksvad propeller-tuulemootorid (2). Tuuleroostüübiga avasid ameeriklased võimaluse tuule jõudu kasutada üksikmajapidamistes igapäevastel töödel, vesivarustuses jne. ja ka suuremate masinate käitamiseks. Tuuleroostüüp on kohandatud nõrkadele tuultele, millest olenevalt mootor kujunes suure katvusastmega aeglaselt jooksvaks tuulemootoriks.

Hilisemad katsed tuuleroostüübiga avaldavad rahuldavat kasutegurit ja suurt algpöördmomenti; viimane on vajalik nõrgas tuules töötavate tiivikute puhul.

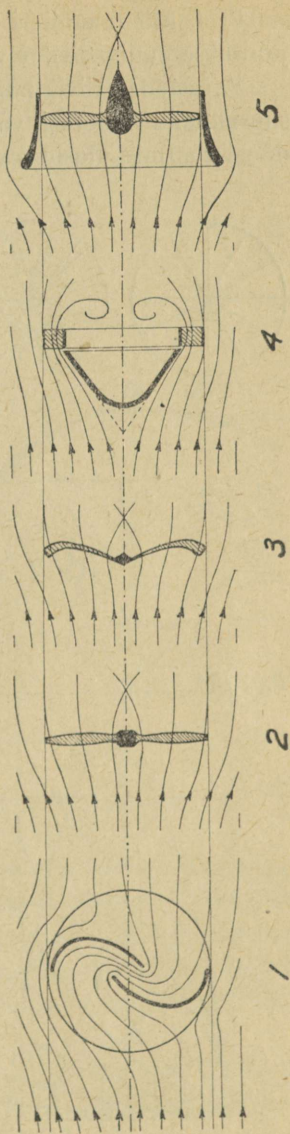
Tuulemootori aerodünaamilistel ja tootmistehnilistel kaalutlustel ja vajadusest kiiresti jooksvate mootorite järele kujunes väikese katvusastmega (v. 59) propellertüüp. Olenevalt kiirusemoodulist k propellertüübi võimsuse kasutegur võib ületada tuuleroosi kasuteguri, kuid sealjuures tema algpöördmoment on väga väike, mis on tingitud väikesest seadnurgast ja väikesest tiiva pinnast. Tuulerikastes piirkondades aitab väikese algmomendi puudumist leevendada tuule tugevus. Kiiresti jooksvaid propellertüüpi mootoreid kasutatakse peamiselt elektri tootmiseks ja nad osutuvad odavaimaks tuulemootori tüübiks.

Soerenseni (3) labidakujuliste tiivaots-
tega koonusekujulise tiivikuga mootori
konstrueerimisel oli sihiks tiibade arvu
vähendada, ühtlasi andes tiibadele säärase
kuju, mis juhhib tuule tiivaotstesse, et saada
suuremat pöördmomenti. Selle tüübi alu-
seks on nähtus, et tuule erisurve kitsale
pinnale on suurem kui laiale pinnale. Näi-
teks paiskab torm vahedega (lattidest) aia
hõlpsamini ümber kui tiheda laudadest
aia. Sel põhimõttel on purjesse aukude
tegemisega püütud suurendada survet
purjele.

Eeltooduga põhjendades tegi taani prof.
P. la Cour katseid nelja tiiviku mudeliga
(joon. 107), millest selgus, et koonusekuju-
line tiivik on (võrdse läbimõõduga) vento-
kraadist 700%, 2,8 korda suuremast tuule-
roosist 33,3% ja 71% väiksemast vanast
Soerenseni tiivikust 29% suurema võim-
susega.

| | Tiiva pind cm | | | |
|------|------------------|------|------|--|
| 7440 | 2976 | 1116 | 1188 | |
| | Võimsus mkg/sek. | | | |
| 1,59 | 1,77 | 1,81 | 2,34 | |

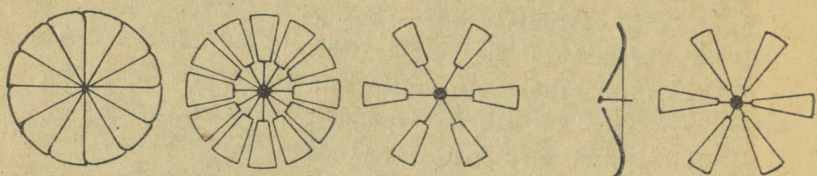
Võrreldes üksteisega Soerenseni tuule-
mootori (joon. 66 ja 67), tuuleroos- (joon. 61
ja 63) ja propellertüüpi (joon. 82 ja 88)
näeme, et neist kõige lihtsam ja seega
väiksemate tootmis- ja korrashoiukuludega
on propellertüüp. Klappidest reguleerita-
vate tiibadega Soerenseni mootori kasuta-
miskulud on kõige suuremad ja katvus-
astme vähendamisest loodetud tulu ei kata
eelnimetatud kulu.



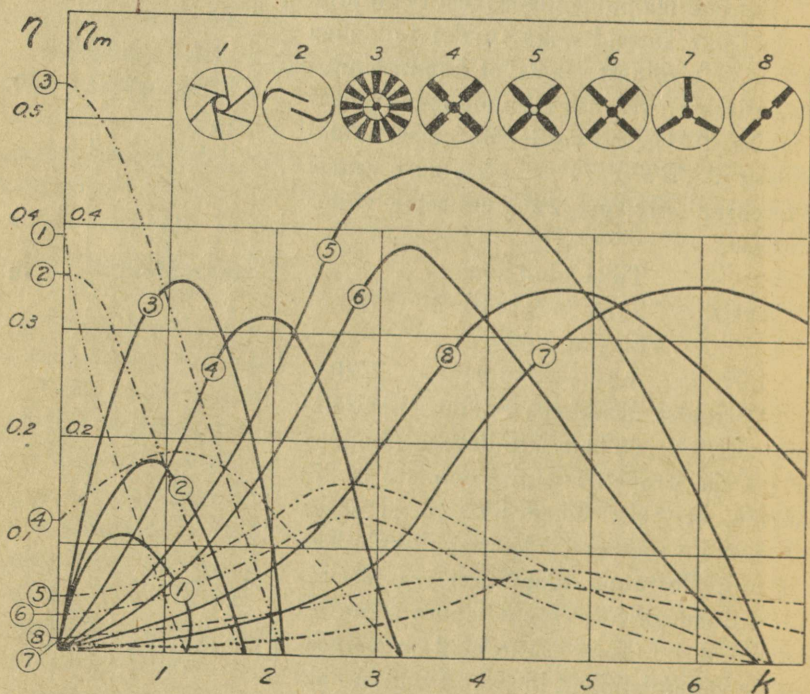
Joon. 106.

Prof. Ellenhammeri (4) koonilise keskpinnaga turbiinil (joon. 94) juhatakse tuult tiiviku välisringil asuvaile tiibadele.

Varustades tiiviku Korti (5) düüsiga (joon. 95-5) on võimalik suurendada mootori võimsust 5% võrra. Kuid kas see 5% ka düüsi tootmiskulusid katab, on küsitav.

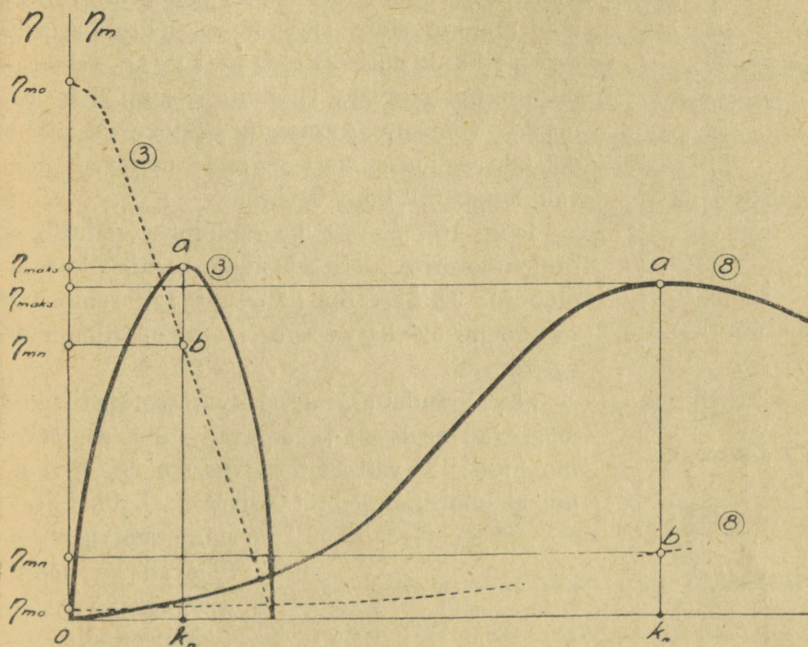


Joon. 107.



Joon. 108. — võimsuse kasutegur, - - - - - pöördmomendi kasutegur.

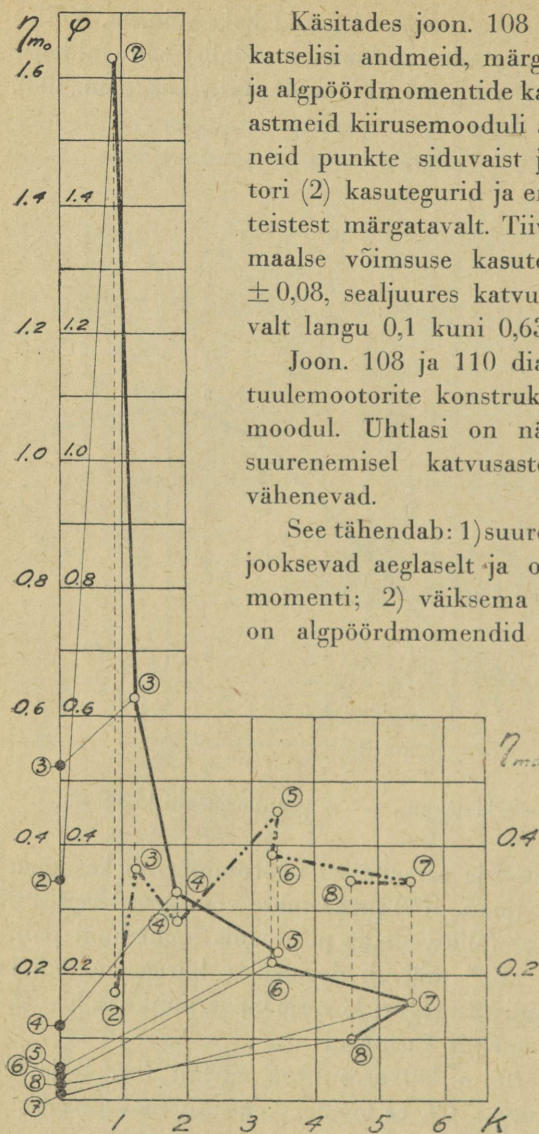
Neist viiest liigist (joon. 106) on levinud kaks esimest. Võttes vaatlusele mõlema katvusastmest ja kiirusemoodulist sõltuvaid erinevusi, kõrvutame kaheksa võrdse läbimõõduga tiivikut (joon. 108).



Joon. 109. — võimsuse kasutegur, ----- pöördmomendi kasutegur.

Maksimaalset võimsust ja samaaegset pöördmomendi kasuteguri üksteisest sõltuvust (joon. 109) määratakse võimsuse kasuteguri kõverjoone haritäpist „a” (alla vedades püstloodis joont kuni põhijooneni), millel punkt „ k_n ” määrab normaalse kiirusemooduli ja lõikumisel pöördmomendi kasuteguri kõverjoonega punktis „b” saame normaalse pöördmomendi kasuteguri η_{mn} .

Võrreldes kahe äärmise katvusastmega tiiviku (nr. 3 ja 8) kasutegureid, nähtub joon. 109, et nende võimsuse maksimaalsete kasutegurite ($\eta_{maks.}$) vahe ei ole nii suur, kuid normaalseil (η_{mn}) ja eriti algpöördmomentidel (η_{mo}) on väga suur.



Joon. 110. — katvusaste, - - - - - võimsuse kasutegur,

Käsitades joon. 108 diagrammidena toodud katselisi andmeid, märgime tiivikute võimsuse ja algpöördmomentide kasutegureid ning katvusastmeid kiirusemoduli alusel joonisele 110, siis neid punkte siduvaist joontest nähtub, et rootori (2) kasutegurid ja eriti katvusaste erinevad teistest märgatavalt. Tiivikute 3 kuni 8 maksimaalse võimsuse kasutegurid kõiguvad ainult $\pm 0,08$, sealjuures katvusastmed näitavad pidevalt langu 0,1 kuni 0,63.

Joon. 108 ja 110 diagrammidest nähtub, et tuulemootorite konstruktsiooni määrab kiirusemodul. Ühtlasi on näha, et kiirusemoduli suurenemisel katvusaste ja algpöördmoment vähenevad.

See tähendab: 1) suure katvusastmega tiivikud jooksevad aeglaselt ja omavad suurt algpöördmomenti; 2) väiksema katvusastmega tiivikuil on algpöördmomentid väikesed, kuid kiiruse

suurenemisega suurenevad ka pöördmoment ja võimsus.

Meelde tuleb, et pöörlemist alustavat või paigalt nihkumise momenti nimetatakse algpöördmomentiks ja normaalseks pöördmomentiks nimetame momenti, mis tiivik annab maksimaalse võimsusega türelde, siis pälvib seejuures erilist tä-

helepanu algpöördmoment. Väikese kiirusemooduliga mootor võib alustada tegevust täiskoormaga. Seda võimaldab tiibade suur seadnurk ja suur tiibade pind (suur katvusaste), mis annavad suure algpöördmomenti. Sellel on eriline tähtsus neis piirkondades, kus on ülekaalus nõrgad tuuled. Seevastu suure kiirusemooduliga tiivik, mille tiibade väike seadnurk või väike tiibade pind annavad väikese algpöördmomenti, ei võimalda alustada tegevust täiskoormaga, vaid koormatakse vastavalt tiirlemiskiirusega arenenud pöördmomentile. Need sobivad elektridünamote, koormatusregulaatoritega pumpade jne. käitamiseks ja üldiselt tuulerohkesse piirkondadesse või kasutades tugevamaid ja ühtlasemaid tuuli kõrgemate tornide abil.

Tabel 15

| Tiiviku nr. | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------------------|-----------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Kiirusemoodul | k | 0,9 | 1,2 | 1,9 | 3,5 | 3,3 | 5,8 | 4,5 |
| Katvusaste | φ | 1,63 | 0,63 | 0,33 | 0,23 | 0,21 | 0,16 | 0,10 |
| Kasutegurid | võimsuse | η | 0,18 | 0,36 | 0,31 | 0,46 | 0,39 | 0,35 |
| | norm. pöördm. | γ_{mn} | 0,2 | 0,3 | 0,163 | 0,131 | 0,115 | 0,061 |
| | algpöördmom. | γ_{mo} | 0,350 | 0,530 | 0,120 | 0,050 | 0,025 | 0,008 |
| Tiibade kiirus u m/sek. | Tuule kiirus v m/sek. | 2 | 1,8 | 2,4 | 3,8 | | | |
| | | 3 | 2,7 | 3,6 | 5,7 | 10,5 | 9,9 | |
| | | 4 | 3,6 | 4,8 | 7,6 | 14,0 | 13,2 | 23,2 |
| | | 6 | 5,4 | 7,2 | 11,4 | 21,0 | 19,8 | 34,8 |
| | | 8 | 7,2 | 9,6 | 15,2 | 28,0 | 26,4 | 46,4 |
| | | 10 | | | | 35,0 | 33,0 | 58,0 |
| | | 12 | | | | 42,0 | 39,6 | 69,6 |
| | | 14 | | | | | | 81,2 |

Diagrammide (joon. 108 ja 110) andmeil on koostatud tab. 15, kus on märgitud tiivikute välisringi kiirused u vastavalt kiirusemoodulile k , kui tuulekiirus $v = 2$ kuni 14 m/sek. Tabel on lahutatud nelja gruppi, milledest nr. 2 (rootorit) on kohaseim rakedada keskmistel tuulekiirustel 2 kuni 8 m/sek., nr. 3 ja 4 — 4 kuni 8 m/sek., nr. 5 ja 6 kuni 12 m/sek. ja nr. 7 ja 8 kuni 14 m/sek.

Tab. 16 näidatud tuulemootorid on võrdse läbimõõduga $D = 5$ m (tiirlemispind F on kohandatud $D = 5$ m). Võrdleme nende tiibade tegelikke pindu Σf (m^2), võimeid E_n (mkg/sek.) ja tiirude arvusi n min. (tab. 16).

Tabel 16.

| Tiiviku nr. | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Mootori võimsus $E_n = m$ kg/sek. $D = 5,0$ m $F = 19,6$ m ² | | | |
|---|-------------------------|----|------|------|------|------|------|------|---|-------------------|-------|------|
| Tiibade Σf pind m ² | | 32 | 12,3 | 6,46 | 4,51 | 4,12 | 3,14 | 1,96 | nr. 2 | 3. 4. 6. 7. 8. | nr. 5 | |
| Tiiviku tiirude arv n /min. | Tuule kiirus v m/sek. | 2 | 8,6 | 9,2 | 14,5 | | | | | 1,76 | 3,43 | |
| | | 3 | 13,0 | 13,7 | 21,4 | 40,0 | 37,8 | | | 6,0 | 11,6 | 14,9 |
| | | 4 | 17 | 18,3 | 29,0 | 53,5 | 50,5 | 88,6 | 69,0 | 14,1 | 27,4 | 36,0 |
| | | 6 | 26 | 27,4 | 43,6 | 76,5 | 75,6 | 133 | 103 | 47,5 | 92,6 | 119 |
| | | 8 | 34 | 36,7 | 58,0 | 107 | 101 | 177 | 138 | 113 | 220 | 283 |
| | | 10 | | | | 134 | 126 | 222 | 172 | | 428 | 550 |
| | | 12 | | | | 160 | 151 | 266 | 206 | | | 950 |
| | | 14 | | | | | | 310 | 241 | | | |

Tab. 16 nähtub, et kiirusemoodulist sõltuv erinevus määrab igähele oma kindla aluse kasutamiseks, mille teljeks on keskmine tuulekiirus, märgitud ————— joonega. Algpöördmomentide erinevusest sõltuvalt osutub seega otstarbekaks kasutada mootorit nr. 2 (rootorit) piirkondades, kus aasta keskmine tuulekiirus $v_k = > 2$ m/sek., nr. 3 ja 4 — $v_k = \sim 4$ m/sek., nr. 5 ja 6 — $v_k = \sim 6$ m/sek. ja nr. 7 ja 8 — $v_k = 7-8$ m/sek.

b. Tuule-energia otstarbekohane kasutamine.

Tuule-energia otstarbekohaseks kasutamiseks on vaja kindlaks määrata piirkonna tuulele sobiv tuulemootor, millest tuleb järeldada, et iga katvusastet sümboliseeriva pinnaga mootori tüüp (joon. 108) ja tiibratta läbimõõt on sõltuv piirkonna tuulest.

Kujukaks näiteks kasutame 1933. a. andmeid ja arvutame neljale piirkonnale, neis piirkondades aasta keskmiste tuulekiiruste alusel 1-hobujõulise tuulemootori tiiviku läbimõõdud, kusjuures valime mootorid ühise võimsuse kasuteguriga $\eta = 0,35$ (tab. nr. 17)

Tabel 17.

| Linn | v_k (m/sek) | D (m) |
|--------------|---------------|-------|
| Tartu | 3,57 | 9,7 |
| Tallinn | 5,7 | 4,8 |
| Pärnu | 3,6 | 9,7 |
| Narva-Jõesuu | 5,3 | 5,4 |
| Keskmine | 4,9 | 6,0 |

Tabel 18

| Tiibratta nr. | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------|--------|----|-----|----|------|----|
| | U maks | 16 | | 42 | | 82 |
| V_k | 4 | | 6 | | 7÷8 | |
| V_{min} | 2 | | 3 | | 4 | |
| V_{maks} | 8 | | 12 | | 14 | |
| E_x | 35% | | 64% | | 82% | |
| η_x | 86,5% | | 73% | | 60,5 | |

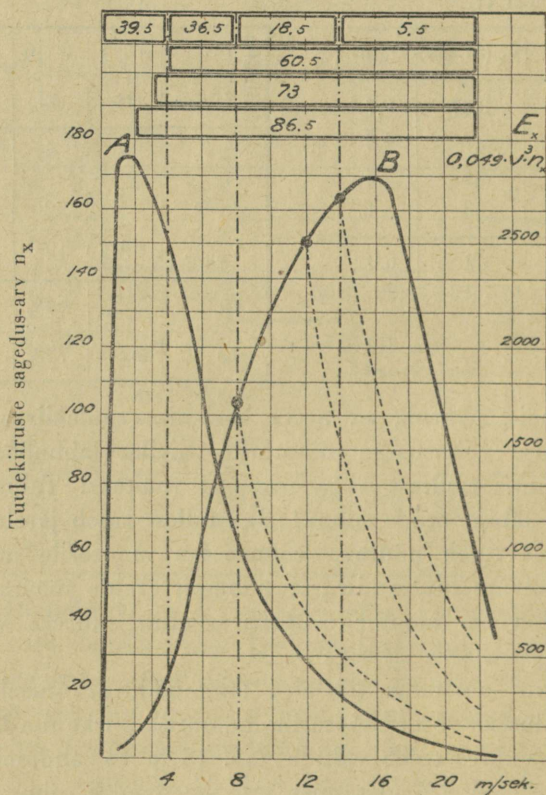
Neist andmeist nähtub, et aasta keskmise tuulekiiruse alusel määratud võrdse võimsusega mootorite tiiviku läbimõõdud on sõltuvalt piirkonna tuulest väga erinevad (näiteks: Tallinnale ja Tartule tiiviku läbimõõtude suhe 1:2), millest tuleb järeldada, et tiiviku läbimõõt tuleb nõutava võimsusega mootorile määratud piirkonnas puhuvate tuulte kiiruste kohaselt eraldi määrata, sest vastasel korral võiks mootor osutada asjatult suureks või liiga nõrgaks.

Igal juhul on soovitatav tiibratta läbimõõdu arvutusel kui ka tüübi valikul aluseks võtta mootorile määratud piirkonna keskmise tuulekiirust, kusjuures tuleb vältida tab. 15 ja 16 andmeil määratud v_k piiride (tab. 18) ületamist, sest sagedamini esinevad nõrgemad tuuled võiksid sel juhul suuremal määral kasutamist leida,

mida soodustab aeglasemalt jooksva tiiviku suurem algpöörmoment.

Tiiviku tüübi (joon. 108) valiku näiteks seame kolme gruppi jaotatud tiivikud (tab. 18), milledest nr. 3 ja 4 jooksevad aeglaselt, nr. 5 ja 6 keskmise kiirusega ja nr. 7 ja 8 kiiresti, võrdsesse olukorda, s. o. piirkonda, kus kõigile keskmine tuulekiirus $v_k = 4,9$ m/sek. (tab. 17) ja kasutades joon. 13 diagramme, koostame neljale piirkonnale ühise tuulekiiruste sageduse diagrammi A (joon. 111).

Tuulekiiruste sagedus-arv 0/0 0/0.



Joon. 111.

Seejärgi kiiruste sagedusi rühmitades tab. 18 andmete aluse v_{\min} saaksime mootorit tööle rakendavaid tuulte sagedusi aeglaselt jooksvaile tiivikuile 86,5%, keskmise kiirusega tiivikuile 73% ja kiiresti jooksvatele 60,5% aasta kestel.

Uhtlasi võtame vaatlusele aasta kestel kasutada oleva tuule-energia, arvutame kiirused energiaks valemiga

$$E_x = 0,049 \cdot v_k^3 \cdot n_x \quad (\text{v. } 77)$$

ja koostame energiahulgale diagrammi B, märgitud joon. 111 joonega — — — —. Siis selle pindala kohaselt aeglaselt jooksvad mootorid rakendavad 35%, keskmise kiirusega 64% ja kiiresti jooksvad 82% aastastest tuule-energiast. Neid arve paigutades tab. 18 alummisse lahtrisse, tähistades %/0 aasta kestel kasutada olevaid tuulte sagedusi n_x ja tuule-energiat E_x , ja võrreldes neid arve, tuleb järeldada, et võrdses olukorras aeglaselt jooksvad tiivikud kasutavad aasta jooksul küüremini tiirlevaist mootoreist väiksema hulga tuule-energiast, kuid seevastu nende tegevuses olemise aeg on pikem, s. o. nad on sagedamini tegevuses, mis on oluline neis piirkondades, kus sagedamini esinevad nõrgemad tuuled ja tuulevaiksed päevad (näiteks tab. 3).

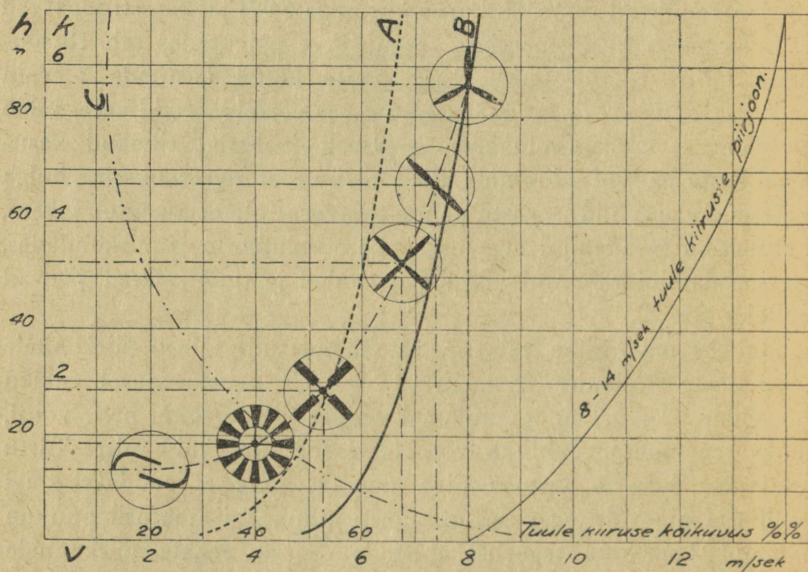
Näiteks määrasime tab. nr. 17 tähendatud neljale piirkonnale ühise aasta keskmise tuulekiiruse $v_k = 4,9$ m/sek. alusel tiiviku läbimõõdu $D = 6,0$ m ja siinkohal valides tiiviku tüübi nr. 7 või 8, sobiks see mootor Tallinna või Narva-Jõesuhtu, kuid mitte Tartu ega Pärnu, kus ta osutuks liiga nõrgaks ning ei suudaks kuigi sageli ega pidevalt tegevuses olla, eriti juhul, kui mootoril puudub võimalus koormata tegevust alustada. Seega neljale piirkonnale ühistel alustel määratud tuulemootor ei ole suuteline üksikus kitsamas piirkonnas nõudeid rahuldama.

Toodud näitest tuleb ka järeldada, et väga oluline on tiiviku läbimõõdu määramisel ja tüübi valikul piirkonna keskmine tuulekiirus, mis tuleb, eriti juhul, kui tootmistehnilistel kaalutlustel soovitakse kasutada suurema kiirusemooduliga tiivikutüüpi, määrata võimalikult väikese piirkonna andmeil.

Seega tuule-energia otstarbekaks rakendamiseks võivad tulla kasutamisele kõik joon. 108 esinevad tiivikutüübid tingimusel, kui

neid kasutatakse neile sobivas õhukihis, kus keskmine tuulekiirus vastab tiivikutüübi tegevuse nõuetele. Need õhukihid võivad leiduda piirkondades (olenevalt maapinna reljeefist või teistest 2. osas lõige b ja c kirjeldatud põhjusist) maapinna läheduses või kõrgemais õhukihtides.

Näiteks valime piirkonna, kus maapinna läheduses õhukihi aasta keskmine tuulekiirus $v_k = 5$ m/sek. ja käsitades tab. 4 ja joon. 15 andmeid tuulekiiruste kohta kõrgemais õhukihtides koostame diagrammi B (joon. 112).



Joon. 112.

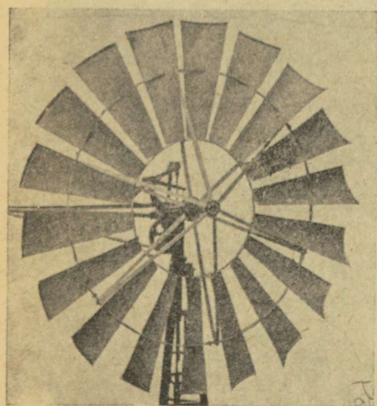
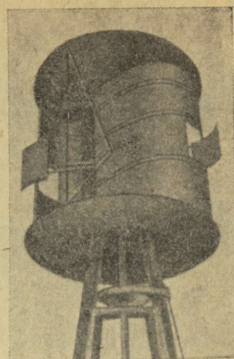
Valime tiivikutüübile nr. 7 (moodul $k = 5,8$) sobiva kõrguse $h = 86$ m, kus sellele tüübile nõutav keskmine tuulekiirus $v_k = 7-8$ m/sek. (vt. tab. 18) ja tuulekiiruste kõikumuse sagedus $\% \%$ (diagramm C) on minimaalne.

Paigutades teised tüübid tab. 18 andmeil alumistesse kihtidesse, on võimalik iga tiivikutüüpi tuule-energia rakendamiseks otstarbekalt kasutada.

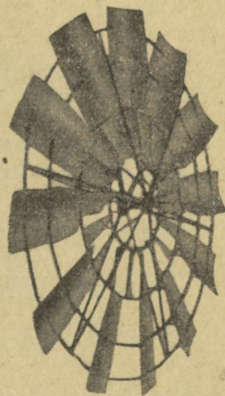
Tabel 19.

| Nr. | 2 | 3 | 4 | 5-6 | 8 | 7 |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| h | 13 | 19 | 29 | 52 | 61 | 86 |
| k | 0,9 | 1,2 | 1,9 | 3,5 | 4,5 | 5,8 |
| v_k | 2 | 4 | 5,3 | 6,8 | 7,4 | 8 |
| Kõikuvus $0/0^0/0$ | 68 | 55 | 46 | 22 | 14 | 12 |

Joon. 112 andmeil koostame tab. 19, mis võiks käsitlemist leida tiivikutüübi määramisel keskmise tuulekiiruse alusel, kusjuures ei ole oluline kõrgus h (m), vaid tiivikule määratava pürkonna keskmine tuulekiirus v_k .

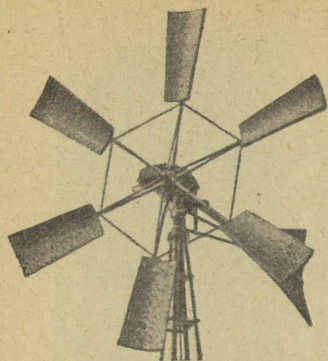
Joon. 114. $k = 1,2 - 1,9$ Joon. 113. $k = 0,9$

Põgusaks ülevaateks tuntumate tuulemootorite tiivikuist, alates rootorist kuni kiiresti jooksva propellertüübini, toome ülesvõtted, järjestatud joonistel 113 kuni 117 kiirusemooduli kohaselt.

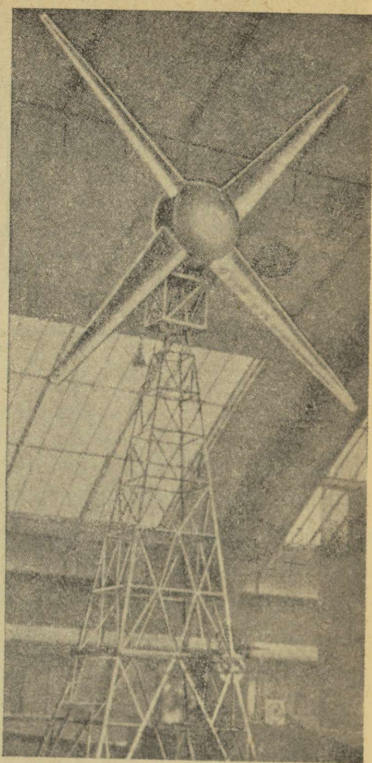


Joon. 115.

 $k = 1,2 - 1,9$



Joon. 116.
 $k = 2,5 - 3,5$



Joon. 117. $k = 4 - 6$

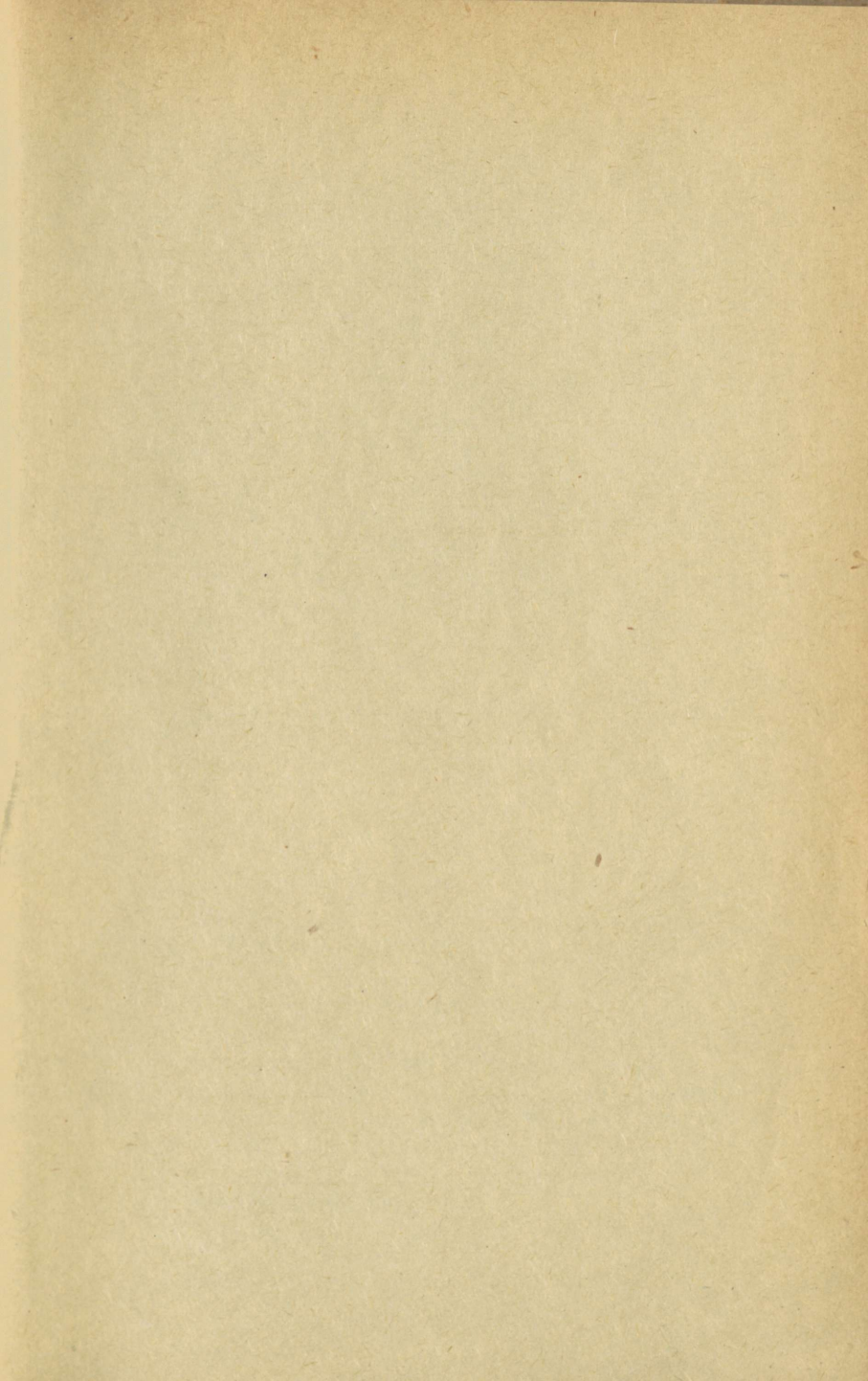
Kirjandust.

- Kurrik, W. „Meteoroloogia ehk ilmateaduse õpetus“.
- Kägi, E. „Meteoroloogia ja okeanograafia“.
- Kirde, K. „Meteorological Elements Characterized by Frequency-Curves“. 1936.
- Kirde, K. „Andmed Eesti kliimast“.
- Kärsna, A. „Tuuleenergia jaotus Eestis“.
- Ivand, J. „Aeromehaanika“ I.
- Villems, G. „Tarvitamata tööjõud meie põllumajanduses“. E. T. S. — Ajakiri 1920. a. nr. 6.
- Tamm, P. „Tuulerootor – käepäraseim jõumasin“. T. K. 1938. a. nr. 1 „Tuuleturbiinid“. O/U. „Waba Maa“ kirjast. 1936. a.
- Prümmel, J. „Tuulejõu abil majja . . .“ „Waba Maa“ kirjast. 1938. a. Молчанов, „Аэрология“.
- Фатеев, А. М. „Ветродвиатели“.
- Красовский, Н. В. „Как использовать энергию ветра“.
- Гоннеф-Келлер „Ветро-Электрические станции.“
- Сабинин, Г. X. „Проблема использования энергии ветра“.
- Betz, A. „Wind-Energie“.
- Betz, A. „Die Vorgänge beim Schraubenpropeller“. Die Naturwissenschaften“. 1921. Heft 18.
- Betz, A. „Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust“. Nachrichten von der K. G. der W. zu Göttingen 1919 Heft 2.
- Stertz, O. „Moderne Windturbinen“.
- Stertz, O. „Windkraft oder Kleinmotoren“.
- Hammel, L. „Die Ausnutzung der Windkräfte“.
- Honnef, H. „Windkraftwerke“.
- Bilau, K. „Windmühlenbau einst und jetzt“.
- „Die Windkraft in Theorie und Praxis“.
- Borck, H. „Die Luftschraube“.
- Savonius, S. J. „The wing-rotor in Theory and practice“.
- Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen Lieferung III u. IV.
- Riefstahl, L. „Wirtelektrische Anlagen und die Gesichtspunkte für ihren Entwurf“. AEC Mitteilungen. 1925 S. 334.
- Hullen, H. „Die wirtschaftliche Ausnutzung der Windenergie“ VDI 1925 S. 132.
- Ackert, J. „Neue Versuche an Windmühlenmodellen“ VDI 1925 S. 1172.
- Pfleiderer, C. „Anwendung der elementaren Turbinentheorie auf die Berechnung der Windräder“ VDI 1921 S. 1003.

- Kauffel, A. „Das Rotor-Motorschiff „Barbara“. VDI 1927 S. 119.
 „Neues über Windkraftanlagen“ Arch. f. Wärm. u. Dampfkr. 1934
 S. 159.
 Conrad, W. „Zur Berechnung von Windmühlenflügeln“ VDI 1937
 S. 521.
 Caille, C. „Untersuchungen am Modell eines Windkraftwerkes“
 Arch. f. Wärm. und Dampfkr. 1940 S. 9.
 Witte, H. „Windkraftanlagen in der Sowjetunion“ ETZ 1942 S. 220

Sisukord.

| | |
|--|-------|
| 1. Tuul energiaallikana | lk. 7 |
| 2. Tuul kui õhuliikumine. | |
| a. Õhu raskus | 8 |
| b. Õhu liikumise kiirus | 8 |
| c. Tuulekiiruse sõltuvus kõrgusest | 15 |
| d. Tuule suund | 21 |
| 3. Tuule-energia. | |
| a. Tuule surve paigalseisvale pinnale | 23 |
| b. Tuule surve liikuvale pinnale | 25 |
| c. Pinnast läbivoolava õhu liikumisenergia | 26 |
| 4. Tuulemootori tiivik. | |
| a. Tiiva kuju | 32 |
| b. Vertikaalteljega tiivik | 38 |
| c. Horisontaalteljega tiivik | 39 |
| 5. Tuulemootorite tüübid ja tornid. | |
| a. Vertikaalteljega tuulemootorid | 51 |
| b. Horisontaalteljega tuulemootorid | 57 |
| c. Tornid | 83 |
| 6. Tuule energia rakendamisest. | |
| a. Otstarbeka tuulemootori tüübi valimine | 92 |
| b. Tuule-energia otstarbekohane kasutamine | 99 |
| 7. Kirjandust | 105 |



Vastutav toimetaja A. Põdrus

Keeleline toimetaja M. Küla

Ladumisele antud 26. VII 1946. Trükkimisele antud 16. VIII 1946. Trükiarv 5200 eks. Paber 56×79, 1/16. Trükipoognaid 6.75. Trükitähti trükipoognaid 37 888. Arvutuspoognaid 6. MB-05411. Tellimise nr. 867. Trükikoda „Punane Täht“, Tallinn, Pikk tn. 54/58.

Г. Виллемс. Ветряные моторы.

На эстонском языке.

Rbl. 5.—

A

16073

12 135

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00505223 0

Rbl. 5.—

A

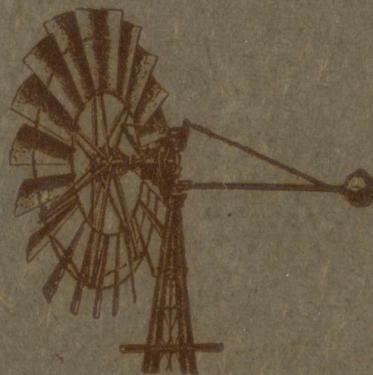
16073

12135

G. VILLEMS • TUULEMOTORID

GEORG VILLEMS

TUULE-
MOTORID



RK „PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“
TALLINN 1946

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00505223 0