Ainārs Galiņš
Liene Kanceviča
Aigars Laizāns

ALTERNATĪVĀS ENERĢĒTIKAS IEKĀRTAS

- **Saules kolektori, saules baterijas**
- **Vēja dzinēji, vēja ģeneratori**
- **Ūdens enerģija, hidroelektrostacijas**

LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
TEHNISKĀ FAKULTĀTE
Lauksaimniecības enerģētikas institūts

Ainārs Galiņš, Aigars Laizāns, Liene Kanceviča

Alternatīvās enerģētikas iekārtas

Mācību grāmata

Jelgava 2008

Mācību līdzeklis sagatavots un izdots ESF projekta „Inženierzinātņu studiju satura modernizācija Latvijas Lauksaimniecības universitātē" ietvaros, projektu līdzfinansē Eiropas Savienība.

Galiņš A., Laizāns A., Kanceviča L. **Alternatīvās enerģētikas iekārtas.** Jelgava: LLU, 2008. – 316 lpp.

Mācību grāmata veltīta atjaunojamo energoresursu izmantošanai. Grāmatā ir plaši apskatīti saules, vēja un ūdens, izmantošanas iespējas un tehniskie risinājumi. Katras tēmas izklāstā ir pievērsta uzmanība arī ekoloģiskajiem jautājumiem. Grāmatā ir plaši apskatīti alternatīvās enerģētikas iekārtu tehniskie risinājumi. Grāmatā apskatīti jautājumi, kas saistīti arī ar atjaunojamajiem resursiem un ekoloģiju.

Mācību grāmata paredzēta LLU inženieru specialitāšu bakalauru un maģistra studiju studentiem, kuri apgūst enerģētikas priekšmetu bloku un lauksaimniecības enerģērtikas specialitātes studentiem „Alternatīvā enerģētika un energoekonomika", „Alternatīvā enerģētika" priekšmetu apguvei.

ISBN 978-9984-784-79-3

© Ainārs Galiņš, Aigars Laizāns, Liene Kanceviča
© LLU Tehniskā fakultāte

Profesora Anša Grunduļa piemiņai

2009. gada 21. martā LLU profesoram, habilitētajam inženierzinātņu doktoram Ansim Grundulim paliktu 75 gadi, bet jau 5 gadus viņš noraugās uz mums caur Vēju, Sauli, Ūdeni un citām matērijām. Mēs visi esam pateicīgi mūsu skolotājam, neatlaidīgam atjaunojamās enerģētikas popularizētājam, atbalstītājam un entuziastam, izcilam lauksaimniekam.

Profesors bija tas, kurš pirms daudziem gadiem (1993. g.) Lauksaimniecības mehanizācijas fakultātes Elektrotehnikas katedru reorganizēja par Lauksaimniecības enerģētikas institūtu – pirmo šāda tipa institūtu Latvijas augstskolās, bija šā institūta dibinātājs un pirmais direktors (no 1993. līdz 1999. g.). Profesora Anša Grunduļa vadībā Latvijas Lauksaimniecības universitātē tika izveidota lauksaimniecības enerģētikas studiju programma. Viņš sagatavoja jaunu studiju kursu *Alternatīvā enerģētika* un vadīja studijas lauksaimniecības enerģētikas programmas studentiem, gan bakalaura, gan maģistra līmenī. Profesors Ansis Grundulis ierosināja un vēlējās, lai viņa darba turpinātāji uzrakstītu grāmatu par alternatīvās enerģētikas iekārtām.

Lai šī grāmata ir dziļas cieņas un pateicības apliecinājums mūsu bijušajam kolēģim un skolotājam profesoram Ansim Grundulim, veltījums viņa atcerei un piemiņai.

LLU Lauksaimniecības enerģētikas institūta direktors,
asociētais profesors, Dr.sc.ing. Ainārs Galiņš
Docents, Mg.sc.ing., MBA Aigars Laizāns
Lektore, Mg.sc.ing. Liene Kanceviča

SATURS

IEVADS 8

1. SAULES ENERĢIJA 12
1.1. Saules starojums 14
1.2. Starojuma komponentes 16
1.3. Zemes un Saules ģeometrija 20
1.3.1. Platuma grāds, gadalaiks un diennakts apstarojums 22
1.3.2. Uztvērējvirsmas izvietojums pret Sauli 25
1.4. Saules enerģijas pārveidošana siltumā, darbā un elektrībā 27
1.5. Saules enerģijas pielietojums aukstuma ieguvei 33
1.5.1. Tvaika kompresijas saldēšanas iekārtas 34
1.5.2. Absorbcijas saldēšanas iekārtas 35
1.5.3. Siltumsūknis 37
1.6. Fotoelektriskā ģenerācija 39
1.6.1. Fotoelementu darbības princips 40
1.6.2. Fotonu absorbcija 44
1.6.3. Ķēdes un slodzes fotoelektriskās īpašības 46
1.6.4. Foto elementu efektivitāte 49
1.6.5. Foto elementu konstrukcija 55
1.7. Ūdens sildīšana ar saules starojumu 61
1.7.1. Atklātie sildītāji 63
1.7.2. Noslēgtie sildītāji 64
1.7.3. Saules enerģijas kolektori, un to veidi 65
1.7.4. Plakanie kolektori 66
1.7.5. Vakuuma kolektori 69
1.7.6. Kolektori ar caurspīdīgu termisko izolāciju 72
1.7.7. Absorbētāji 73
1.7.8. Fokusējošie kolektori 75
1.8. Ūdens sildīšanas sistēmas 77
1.8.1. Sistēmas ar piespiedu cirkulāciju 79
1.8.2. Sistēmas ar dabisko cirkulāciju 80
1.8.3. Uz grunts novietojama kolektoru sistēma 80
1.8.4. Akumulācijas tvertnes kolektoru sistēmas 81
1.9. Saules kolektoru un ūdens sildīšanas sistēmu efektivitāte 81
1.9.1. Saules kolektoru sistēmas ražība 82
1.9.2. Saules kolektora jauda 83
1.9.3. Kolektoru tehniskie parametri 84
1.10. Saules enerģijas pielietojums gaisa sildīšanai 88
1.10.1. Gaisa kolektori 88
1.10.2. Graudu kaltes 91

2. VĒJA ENERĢĒTIKA 96
2.1. Ievads 96

2.2. Vēja iekārtu klasifikācija ... 99
2.2.1. Vēja rotori ar horizontālu asi ... 101
2.2.2. Vēja rotori ar vertikālu asi ... 102
2.2.3. Vēja koncentratori ... 104
2.3. Vēja rotoru teorijas pamatjēdzieni ... 105
2.3.1. Vēja plūsmas enerģija ... 105
2.3.2. Idealizēts vēja rotors, Betca kritērijs un vēja izmantošanas koeficients 107
2.3.3. Vēja rotora ātrgaitas koeficients ... 112
2.3.4. Gaisa spiediens uz vēja rotoru ... 113
2.3.5. Griezes moments ... 115
2.3.6. Vēja spiedspēks un cēlējspēks ... 117
2.3.7. Vēja rotora darba režīms ... 119
2.4. Vējdzirnavas ... 122
2.4.1. Holandiešu vējdzirnavas ... 122
2.4.2. Vējdzirnavas Latvijā ... 124
2.5. Vēja ūdens sūkņi ... 130
2.6. Vēja ģeneratori ... 133
2.6.1. Ģeneratori un piedziņas veidi ... 133
2.6.2. Netiešās piedziņas vēja ģeneratora uzbūve ... 141
2.6.3. Tiešās piedziņas vēja ģeneratora uzbūve ... 148
2.6.4. Moderno vēja ģeneratoru spārnu izgatavošana ... 155
2.6.5. Vēja ģeneratoru uzstādīšana ... 165
2.7. Vēja ģeneratori Latvijā ... 169
2.7.1. VEF vēja ģenerators ... 170
2.7.2. Glūdas vēja ģenerators ... 170
2.7.3. LEI vēja ģenerators ... 171
2.7.4. Ainažu VES ... 174
2.7.5. Užavas VES ... 175
2.7.6. Liepājas Kara ostas vēja ģenerators ... 175
2.7.7. Grobiņas vēja parks ... 176
2.8. Vēja parki ... 176
2.9. Jauni tehniskie risinājumi ... 178
2.10. Vēja enerģētisko iekārtu izvēle ... 180
2.11. Jautājumi, kas varētu interesēt... ... 181
3. ŪDENS IZMANTOŠANA ENERĢĒTIKĀ ... 191
3.1. Ievads ... 191
3.2. Hidroenerģētika enerģijas bilancē ... 193
3.3. Ūdens īpašības ... 196
3.3.1. Ūdens fizikālās īpašības ... 197
3.3.2. Ūdens ķīmiskās īpašības ... 201
3.3. Ūdens aprite dabā ... 203
3.4. Ūdens enerģijas izmantošanas vēsture ... 205
3.5. Ūdens enerģētikas teorētiskie pamati ... 220
3.5.1. Ūdens enerģija ... 220
3.5.2. Zudumi ūdens enerģētikas iekārtās ... 223
3.6. Hidroenerģētikas iekārtas ... 225

3.6.1. Vispārējā spēkstacijas uzbūve ... 225
3.6.2. Ūdenskrātuvju tipi ... 229
3.6.3. Ūdens energoiekārtu piedziņas iekārtas ... 230
3.6.4. Turbīnu izvēle ... 270
3.6.4. Multiplikatori ... 274
3.6.5. Ģeneratori ... 275
3.6.6. Spēkstacijas vadības sistēmas ... 276
3.7. Spēkstacijas projekta struktūra ... 277
3.8. Ūdens energoiekārtu ietekme uz vidi ... 278
3.9. Hidoenerģētikas normatīvā regulēšana ... 282
3.10. Hidroenerģētika Latvijā ... 285
3.10.1. Daugavas kaskāde ... 287
3.10.2. Mazās hidrospēkstacijas ... 289
3.10.3. Mazo hidrospēkstaciju regulēšana Latvijā ... 291
3.11. Netradicionāli ūdens enerģijas izmantošanas piemēri ... 299
3.11.1. Viļņu enerģija ... 299
3.11.2. Paisuma – bēguma enerģija ... 302
3.11.2. Jūras straumju enerģija ... 304
3.11.4. Ūdens termālo īpašību izmantošana ... 306
3.12. Noslēgums ... 313
IZMANTOTĀ LITERATŪRA ... 314

IEVADS

Modernā industriāli informatīvā sabiedrība nav iedomājama bez nepārtrauktas energoapgādes, bez augstas kvalitātes elektroenerģijas un siltumenerģijas piegādes katram sabiedrības loceklim. Valstis un ražotāji, kam pieder fosilā kurināmā ieguves vietas, visu pasauli tur atkarībā no saviem resursiem un diktē nosacījumus, pēc kādiem dzīvot. Visu laiku tiekam biedēti ar naftas, dabasgāzes un akmeņogļu sarūkošajiem krājumiem. Par monopolizētajiem energoresursiem pārmaksājam milzīgu naudu gan piegādātājiem, gan starpniekiem, gan par kredītiem, ar kuriem mums nav nekāda sakara. Tajā pašā laikā, jau sen ir izgudrotas dažādas netradicionālas, videi draudzīgas enerģētiskās iekārtas, kuru patenti tiek nopirkti un noslēpti. Pēdējā laikā ir vērojama tendence, ka arī lielie enerģētikas uzņēmumi, tādi kā NESTE un citi, kuriem nav savas naftas, sāk tērēt ievērojamus līdzekļus atjaunojamo energoresursu un alternatīvo enerģētikas iekārtu pētījumiem. Piemēram, lai palielinātu savu neatkarību no naftas piegādātājiem un nepazaudētu savu vietu degvielas tirgū, Vācijā un Somijā notiek intensīvi otrās paaudzes motoru biodegvielu pētījumi.

Arvien pieaugošais pieprasījums pēc enerģijas resursiem, fosilo enerģijas resursu krājumu samazināšanās un nepieciešamība rūpēties par vides kvalitāti, par vienu no galvenajiem nākotnes attīstības virzieniem ir izvirzījusi ilgtspējīgas attīstības principu ievērošanu. Šādu attīstības principu ievērošana un īstenošana nodrošina ekonomisko attīstību, konkurētspējas paaugstināšanu un nodarbinātības veicināšanu, vienlaikus saglabājot un nepazeminot vides kvalitāti.

Pieaugošā atjaunojamo enerģijas resursu loma pasaules kurināmā un enerģijas bilancē dod ieguldījumu enerģijas resursu labākā izmantošanā un to saglabāšanai ilgākam laika periodam. Vienlaicīgi tam ir arī pozitīvs efekts vides kvalitātes uzlabošanā, jo samazinās izmešu daudzums atmosfērā un ūdenī. Tādēļ atbalsts atjaunojamo resursu attīstībai kļūst arvien svarīgāks un būtiskāks uzdevums visām pasaules valstīm, tajā skaitā arī Latvijai.

Sen jau ir pazīstamas videi draudzīgas alternatīvās enerģētikas iekārtas – ūdeņraža dzinēji, saules kolektori, saules baterijas, vēja ģeneratori un citas iekārtas, kas atjaunojamo avotu enerģiju pārveido mums izmantojamā formā.

Mūsu planētas enerģētisko potenciālu veido visdažādākie enerģijas avoti. Visus enerģijas avotus var iedalīt divās klasēs.

1. Atjaunojamie enerģijas avoti – avoti ar pastāvīgu enerģijas plūsmu, kas eksistē vai periodiski rodas apkārtējā vidē. Tie ir enerģijas avoti, kuru krājumi praktiski nav izsmeļami, piemēram, Saules, vēja, ūdens, ģeotermālā enerģija. Atjaunojamā enerģija ir apkārtējās vides enerģija, kas rodas neatkarīgi no cilvēka darbības.

2. Neatjaunojamie enerģijas avoti – tie ir vielu un materiālu dabas krājumi, kurus var izmantot cilvēks, lai ražotu enerģiju, piemēram, kodoldegviela, fosilie avoti - ogles, nafta, gāze. Neatjaunojamo avotu enerģija, atšķirībā no atjaunojamās enerģijas avotiem, atrodas dabā saistītā stāvoklī un tiek iegūta tiešas cilvēka darbības rezultātā.

Mums ir pieejami pieci galvenie enerģijas avoti:

1) Saules starojums;
2) Saules, Mēness un Zemes kustības un pievilkšanas spēks;
3) Zemes kodola siltuma enerģija, kā arī ķīmisku reakciju un radioaktīva sabrukuma zemes dzīlēs;
4) kodolreakcijas;
5) dažādu vielu ķīmiskas reakcijas.

Pirmie trīs ir atjaunojamās enerģijas avoti. Neatjaunojamie enerģijas avoti ir karstie ieži (3), kodolreakcijas (4) un dažādu vielu ķīmiskās reakcijas (5), tajā skaitā, dedzinot fosilo kurināmo.

Izplatījums, kas ir mums apkārt, nepārtraukti ir caurstrāvots ar enerģijas plūsmām no atšķirīgiem avotiem. Piemēram, Saules starojuma pilnā plūsma, kas krīt uz Zemi, ir vienāda ar $1{,}2 \cdot 10^{17}$ W, t.i., uz vienu cilvēku aptuveni 30 MW, kas ir pielīdzināms 10 lielu dīzeļelektroģeneratoru jaudai.

Atjaunojamo avotu enerģētikā izmanto plūsmu enerģijas, kas jau eksistē apkārtējā izplatījumā, enerģija no jauna netiek atbrīvota. Apkārtējas vides siltuma piesārņojums, kas ir atkarīgs no pārveidotās atjaunojamās enerģijas, ir nenozīmīgs. Nenozīmīgi ir arī gaisa un ūdens piesārņojuma veidi, kā arī enerģijas noplūdes apjomi. No ekoloģiskā viedokļa, salīdzinot ar fosilo kurināmo vai atomenerģiju, atjaunojamo avotu enerģija ir vismazāk kaitīga. Izņēmums ir koksnes nepilnīgas sadedzināšanas tehnoloģija, kas piesārņo gaisu.

Atjaunojamie energoresursi atjaunojas, to krājumi praktiski nav izsmeļami. Lielāko daļu atjaunojamo energoresursu rada saules radiācija, un to intensitāte paliks nemainīga tādā pašā mērā, cik nemainīga paliks saņemtā enerģija no Saules. Atjaunojamie energoresursi ir vējš, ūdens, saules starojums, biomasa, ģeotermālā enerģija jeb zemes siltums, viļņi, kā arī paisuma – bēguma procesi. Atjaunojamie energoresursi var tikt izmantoti tieši vai arī pastarpināti, piemēram, no biomasas iegūstot motoru degvielas un cita veida šķidro kurināmo.

Atjaunojamie enerģijas avoti piesaista interesi:

- ar savu relatīvo ekoloģisko tīrību;
- ar principiālu iespēju radīt uz planētas sabiedrību, kas dzīvo līdzsvarā ar vidi;
- ar iespēju izmantot dažāda izmēra enerģijas pārveidotājus un tos izvietot dažādās vietās pa visu planētu tur, kur ir nepieciešama enerģija.

Perspektīvā atjaunojamās enerģijas izmantošana ļaus ietekmēt klimata izmaiņas, kas nav mazsvarīgas, ja ņem vērā pieaugošo energopatēriņu, kas var izraisīt stihisku postu. Lai atjaunojamās enerģijas izmantošana sasniegtu vajadzīgo līmeni, nepieciešams veikt revolūciju mūsu priekšstatos par enerģijas avotiem un radīt sabiedrībā priekšnoteikumus alternatīvo enerģētisko iekārtu plašai ieviešanai, sagatavot speciālistus, kuri varētu ne tikai izstrādāt tādas iekārtas, bet arī pareizi tās ekspluatēt.

Viens no alternatīvo enerģētikas iekārtu izmantošanas trūkumiem ir dabas ainavas izjaukšana. Tas ir neizbēgami iekārtām, kuru darbs pamatojas uz apkārtējā izplatījumā cirkulējošo enerģijas plūsmu izmantošanu, kad apkārtējā vide ir enerģijas pārveides procesa nepieciešams elements. Visspēcīgāk šis trūkums izpaužas lielām iekārtām. Piemēram, jaudīgas hidroelektrostacijas tiek uzstādītas vietās, kur ir viegli izveidot ūdenskrātuvi – gleznainā kalnu vai paugurainā apvidū, rezultātā šis unikālais skaistums tiek izjaukts. Vēl smagākas sekas var būt būvējot upju ūdenskrātuves līdzenā apvidū ar dambju palīdzību. Tas var novest pie augsnes erozijas, tās kvalitātes pasliktinājuma un rezultātā pie lauksaimniecības zemes sabojāšanas. No šāda veida sekām, protams, visādi jāizvairās, tādēļ droši vien nevajadzētu tiekties uz pārāk jaudīgu atjaunojamo enerģijas avotu iekārtu būvi.

Nozīmīga enerģijas daļa, kuru patērē sabiedrība, tiek izlietota dzīvojamās un sabiedriskajās ēkās. Atjaunojamās enerģijas plašā izmantošana noved pie būtiskām izmaiņām ēku arhitektūras veidolā. Rajonos ar aukstu un mērenu klimatu ir racionāli radīt iestiklotās oranžērijas gar ēku sienām, kas ir vērstas pret sauli, lai izmantotu saules siltuma starojumu. Nozīmīgu vietu ieņem arī siltumsūkņu izmantošana, lai palielinātu sistēmas efektivitāti, ir izdevīgi izmantot siltās grīdas. Dabīgi, ka tas iespaido gan ēku veidolu, gan dzīves stilu.

Šī ir mācību grāmata, kas paredzēta enerģētikas specialitātes studentiem alternatīvās enerģētikas studiju kursa apguvei. Grāmatā ir apkopota informācija par svarīgākajiem atjaunojamās enerģētikas avotiem un aprakstītas alternatīvās enerģētikas iekārtas, to uzbūve, darbības princips, enerģētiskais un ekonomiskais novērtējums.

Grāmata sastāv no trim nodaļām, kas ietver sevī Saules enerģiju, vēja enerģiju un hidroenerģiju. Grāmata satur teorētisku un praktisku materiālu, kas ļauj saprast fizikālo parādību būtību un konkrētos piemēros pārliecināties par tehnisko lēmumu realizācijas iespēju, un apstiprināt saņemtās zināšanas ar piemēriem.

Grāmata ir izmantojama arī interesentiem, kas vēlas iepazīties ar alternatīvās enerģētikas iekārtu darbību un pielietojumu. Tā ļauj iegūt kopējo priekšstatu par teoriju, uz kuras pamatojas alternatīvās enerģētikas iekārtu konstruēšana. Autori cer, ka lasītājs gūs priekšstatu par alternatīvās enerģētikas iekārtām un varēs izmantot iegūtās zināšanas šo iekārtu izvēlē, izveidē un pielietošanā savās mājās vai darbā.

1. SAULES ENERĢIJA

Saule ir gigantisks enerģijas avots ar diametru ap $1\ 392 \cdot 10^3$ km un masu – $2 \cdot 10^{30}$ kg. Pēc ķīmiskā sastāva Saules vielu veido gāzveida stāvoklī esošs ūdeņradis – 81,76 %, hēlijs – 18,14 % un slāpeklis – 0,1 %. Vielas blīvums Saules centrā sasniedz $76 \cdot 10^3$ kg/m^3, tāpēc tās iekšienē notiek nepārtrauktas kodoltermiskas reakcijas, kuru rezultātā ap $4 \cdot 10^{10}$ kg saules vielas ik sekundi ($1{,}27 \cdot 10^{17}$ kg/gadā) pārvēršas enerģijā. Temperatūra saules masas virspusē sasniedz 5 900–6 000 °C, bet starojuma jauda ir $4 \cdot 10^{23}$ kW. Neliela šā starojuma daļa (ap $1{,}56 \cdot 10^{18}$ kWh/gadā) sasniedz Zemes atmosfēru, no kuras virsējiem slāņiem 30–35 % enerģijas atstarojas atpakaļ kosmiskajā telpā. Rezultātā zemeslodes virsma saņem ap $1{,}05 \cdot 10^{18}$ kWh enerģijas gadā, no kuras apmēram 1/5 daļa nonāk uz sauszemes.

1.1. att. **Saules starojuma sadalījums Latvijā**

Saules sistēmas galvenais enerģijas ražotājs ir Saule. Neliela daļa saules enerģijas, sasniedz Zemi un padara dzīvi uz mūsu planētas par iespējamu. Visi fosilie enerģijas avoti, nafta, gāze, akmeņogles ir akumulēta saules enerģija.

Saules starojuma klātbūtne ir ļāvusi attīstīties dzīvībai uz Zemes. Tās starojums sasilda atmosfēru, zemes virsmu un izraisa procesus, kas nepieciešami, lai rastos un

pastāvētu dzīvība uz Zemes. Saules starojuma enerģija ir visu uz Zemes notiekošo procesu pamats. Fotosintēzes, kā bioloģiska enerģijas uzkrāšanas procesa, rezultātā gada laikā augi akumulē ap $2 \cdot 10^{14}$ kg oglekļa ar enerģētisko vērtību – $3 \cdot 10^{21}$ J, kas 10 reizes pārsniedz zemeslodes iedzīvotājiem nepieciešamo gada enerģijas daudzumu. Pateicoties fotosintēzei uz zemeslodes pastāv un turpinās dzīvība. Lielākie biomasas piegādātāji ir lauksaimniecībā izmantojamās platības – meži un zāle. Gada laikā meži saražo $75 \cdot 10^9$ t biomasas, kuras enerģētiskā vērtība 3 reizes pārsniedz cilvēkiem nepieciešamo. Pasaules lauksaimniecības blakusproduktu – salmu, kūtsmēslu, mežizstrādes atlikumu masa gada laikā ir ap $4{,}2 \cdot 10^9$ t. No tiem iegūtais metāns varētu nodrošināt vismaz 1/10 no zemeslodes enerģijas patēriņa.

Daba atrodas optimālā līdzsvarā. Lai uz zemeslodes saglabātos dzīvība, enerģijas un materiālu izmantošana pieļaujama tikai tādā apjomā, kādā tie spēj atjaunoties. Atjaunojamās enerģijas avoti saglabā līdzsvaru pateicoties saules enerģijai. Cilvēku rīcībā ir saules starojums, kas rada tiem izmantojamo vēja un ūdens enerģiju, kā arī nepārtraukti augošo biomasu un dzīvās būtnes ar savu augšanas un dzīves ritmu. Visi fosilie enerģijas nesēji – akmeņogles, nafta, dabasgāze, ir pirms miljoniem gadu akumulēta saules enerģija. Fosilo energoresursu izmantošana nākamajām paaudzēm vairs nebūs pieejama, jo tie būs jau izlietoti, tādēļ tām nāksies pievērsties tikai atjaunojamiem, dabiskiem enerģijas avotiem, no kuriem arī var iegūt visas cilvēku sadzīvē, ražošanā un transportā nepieciešamās enerģijas formas: siltumu, degvielu, elektrību.

Saules enerģijai ir liels potenciāls un tās enerģētiskais apjoms jau sen ir apzināts. Paralēli dažādā mērogā tiek meklēti veidi, kā to iegūt, izmantot un pielietot. Tomēr joprojām šo nozīmīgo bezmaksas enerģijas avotu izmanto salīdzinoši nedaudz. Ir vērojamas pozitīvas tendences saules enerģijas izmantošanā tautsaimniecībā un personīgajām vajadzībām. Protams, šeit ir radīti būtiski un nozīmīgi veicinošie faktori, kā arī apstākļi, kas tiek realizēti un aktualizēti gan lokālā, gan globālā līmenī, lai veicinātu un attīstītu saules enerģijas izmantojošās tehnoloģijas un sistēmas, to ražošanu un izpēti, kas ir vērsta uz efektivitātes un konkurētspējas paaugstināšanu.

Lielākais saules starojuma plūsmas blīvums, kas nonāk uz Zemes, ir aptuveni 1 kW/m^2 ar viļņa garumu diapazonā no 0,3–2,5 μm. Šis starojums tiek saukts par īsviļņu

un tas ietver redzamo spektru. Apdzīvotiem rajoniem, ņemot vērā to atrašanās vietu, diennakts laiku un laika apstākļus, Saules enerģijas plūsmas, kas sasniedz Zemi, mainās no 3 līdz 30 MJ/m^2 dienā. Saules starojums tiek raksturots ar fotona enerģiju, tā sadalījuma maksimumā ap 2 eV (elektronvolts – enerģijas mērvienība, ko plaši izmanto atomfizikā un kvantu fizikā, 1 eV = 1,60217646 × 10^{-19} J), kas tiek noteikts pēc Saules virsmas temperatūras ap 6 000 K. Tā ir enerģētiskā plūsma no pieejamā avota pie daudz augstākas temperatūras, nekā tā ir tradicionālajiem tehniskajiem avotiem. Starojuma siltumenerģija var tikt pārveidota ar standarta tehnisko ierīču palīdzību, piemēram, ar tvaika turbīnu, kā arī, ar ierīcēm, kuru darbība pamatojas uz fotoķīmisku un fotofizikālu mijiedarbību pamata.

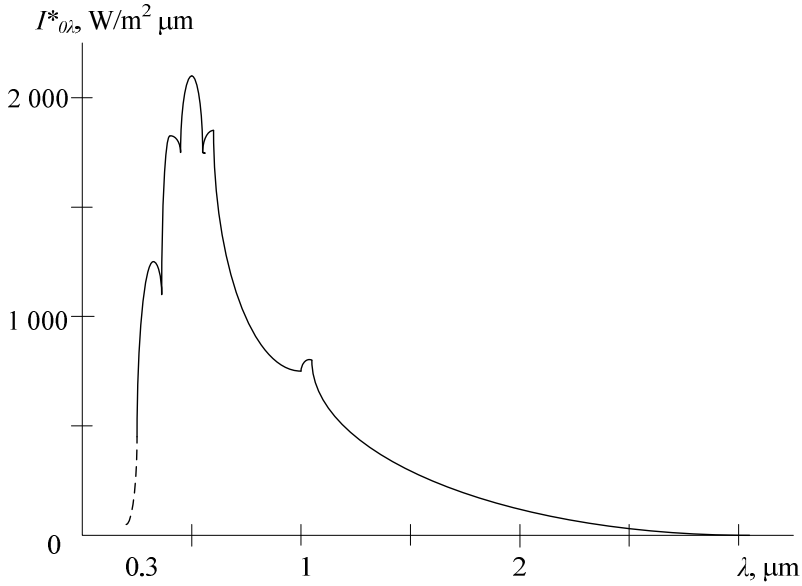
Saules enerģijas plūsma, kas caur atmosfēru nonāk uz zemes virsmas, arī ir ap 1 kW/m^2, bet tas ir starojums ar citu spektrālo diapazonu – no 5 līdz 25 μm, ko sauc par garo viļņu diapazonu, ar maksimumu pie 10 μm. Pēc spektra īsviļņu un garo viļņu starojumi atrodas viens no otra pietiekoši tālu, un tos var viegli atšķirt.

Šīs nodaļas pamat mērķis ir parādīt, kā ir iespējams izmantot saules starojuma enerģiju, kas tiek pievadīta saules iekārtai, orientētai noteiktā veidā, noteiktā vietā un noteiktā laikā.

1.1. Saules starojums

Kodolsintēzes reakcijas rezultātā, aktīvajā Saules kodolā tiek sasniegtas temperatūras līdz pat 10^7 K, starojuma plūsmas spektrālais sadalījums no kodola ir nevienmērīgs. Šis starojums absorbējas ārējos neaktīvajos slāņos, kas tiek uzsildīti līdz T = 5800 K, kā rezultātā saules starojuma spektrālais sadalījums kļūst samērā nepārtraukts.

1.2. attēlā parādīts staru enerģijas spektrālais sadalījums vidējā attālumā no Saules līdz Zemei neizkropļots atmosfēras iespaidā. Redzams, ka sadalījums pēc savas formas viļņa garuma maksimumā un pilnās starojuma enerģijas ir līdzīgs absolūti melna ķermeņa intensitātes starojuma sadalījumam pie temperatūras 5800 K.



1.2. att. **Saules starojuma spektrālais sadalījums ārpus atmosfēras**

Ūdeņradim pārvēršoties hēlijā, atbrīvojas starojuma enerģija, kas uz saules virsmas sasniedz intensitāti 70 000–80 000 kW/m^2. Starojumam noejot attālumu no Saules līdz Zemei, kas ir aptuveni $150 \cdot 10^6$ km, tā intensitāte samazinās un Zemes atmosfēras virspusē vidēji ir vairs tikai $s_0^* = 1{,}37$ kW/m^2, ko sauc par saules konstanti. Ejot cauri Zemes atmosfērai saules starojuma intensitāte turpina samazināties un skaidrā saulainā dienā uz zemeslodes horizontālas virsmas saules starojuma intensitāte mūsu platuma grādos ir 800–1 000 W/m^2, ko sauc par globālo starojumu.

Saules enerģijas sadalījums pa zemes virsmu nav vienmērīgs. Enerģijas daudzums, ko saņem 1 m^2 zemeslodes virsmas gada laikā svārstās no 3 GJ/m^2 ziemeļu rajonos līdz 8 GJ/m^2 tuksnešu apvidos. Vidējais enerģijas daudzums, ko saņem 1 m^2 zemeslodes virsmas, gadā ir 7,2 MJ/m^2 ziemeļos un 21,4 MJ/m^2 tuksnešu rajonos. Gada vidējā saules starojuma intensitāte ir 210–250 W/m^2 subtropiskos un tuksnešu rajonos, 130–210 W/m^2 vidējos platuma grādos un 80–130 W/m^2 ziemeļu rajonos. Latvijā, kas atrodas ap 57 ziemeļu platuma grādu, zemes virsma dienā vidēji saņem ap 3,1 kWh/m^2 enerģijas. Tas nozīmē, ka starojuma gada vidējā intensitāte ir ap 130 W/m^2.

Patiesībā starojuma plūsmas blīvums, kas nonāk līdz augšējai atmosfēras robežai, atšķiras no saules konstantes saules enerģijas plūsmas fluktuācijas (svārstību) rezultātā mazāk kā par ± 1,5 %, un paredzamo attālumu Zeme – Saule izmaiņu rezultātā radušos vājas eliptiskas zemes orbītas dēļ par ± 4 % gadā.

Saules starojuma frekvenču spektrs apmēram atbilst absolūti melna ķermeņa starojuma spektram pie temperatūras 5 900 °C. Saules spektru var sadalīt trijās pamatrobežās:

1. ultravioletais starojums ar viļņu garumu 0,2–0,4 μm ir 9 % no kopējā starojuma;
2. redzamais starojums gaisma ar viļņu garumu 0,4–0,7 μm veido 45 % no kopējā starojuma;
3. infrasarkanais starojums ar viļņu garumu lielāku par 0,7 μm (0,7–3,2 μm) – 46 % no kopējā starojuma.

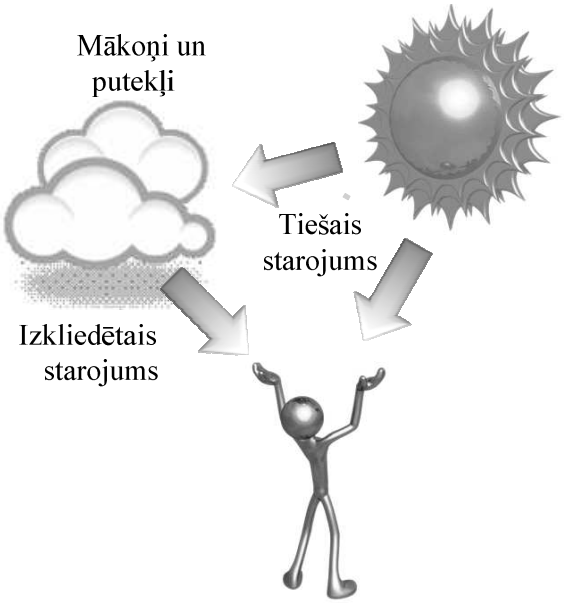
Ieguldījums saules radiācijas starojuma plūsmā ar viļņu garumu virs 2,5 μm ir neliels, tāpēc visas trīs robežas pieskaitāmas īsviļņu starojumam. Starojuma intensitātes maksimums ir ar viļņa garumu 0,5 μm. Zemes virsmu, ūdeņu un atmosfēras sasildīšanai tiek izmantoti ap 47 % starojuma. Ūdens iztvaikošanai no upēm, jūrām, okeāniem un citām mitrām virsmām tiek tērēts ap 23 % no saules starojuma, kas kopā ar 2 % vēja un straumju radīšanai patērēto enerģiju uztur globālo ūdens apriti. Tikai 0,25 % saules starojuma enerģijas augi fotosintēzes ceļā pārveido biomasā, kas ir visas dzīvības uz zemes pamats. No saules starojuma var iegūt siltumu, mehānisko enerģiju, elektrību un biomasu.

1.2. Starojuma komponentes

Saules starojums var būt izkliedēts un tiešs. Saules gaisma, kura tiek izkliedēta tai ejot cauri mākoņiem, dūmakai un miglai, sasniedz zemes virsmu kā izkliedētais starojums. Tiešais saules starojums sasniedz zemes virsmu bez iepriekšējas izkliedēšanās. Abi veidi kopā veido tā saukto globālo starojumu.

Gada laikā uztveramais saules starojums ir aptuveni 200 000 000 miljardi kilovatstundu; tas ir vairāk nekā 10 000 reižu pārsniedz globālo nepieciešamību.

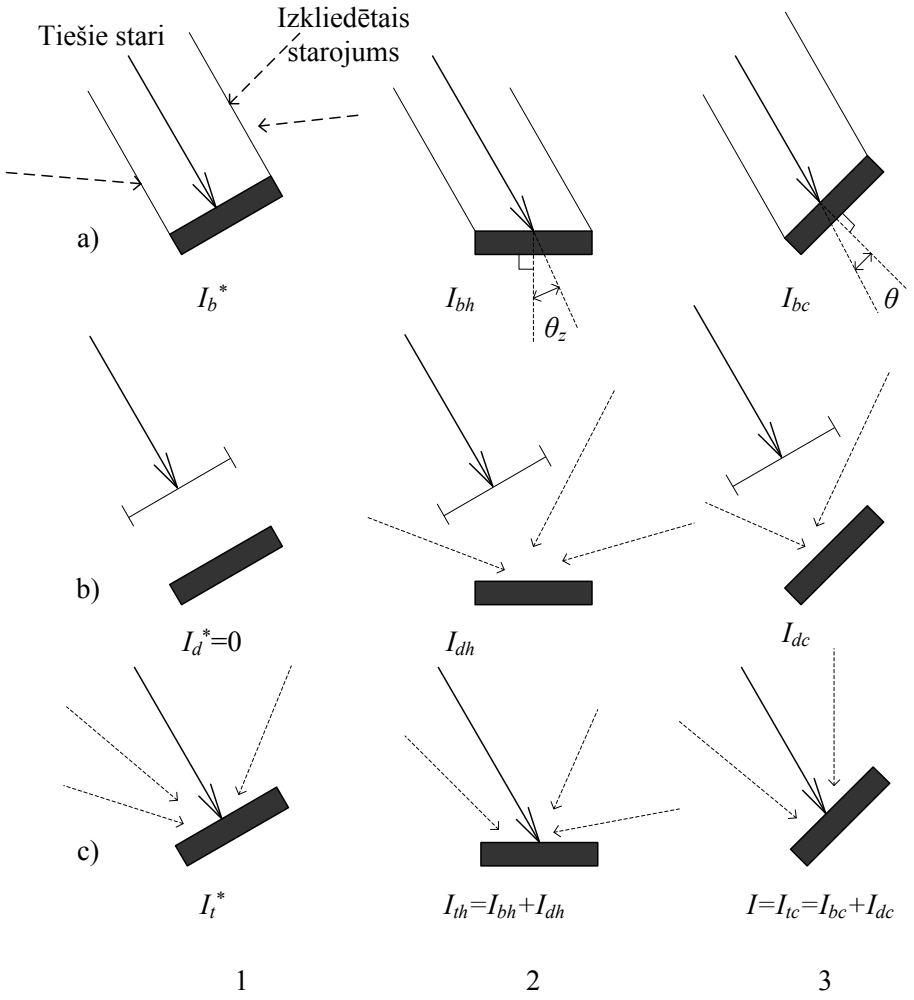
Saules starojuma intensitāte ārpus atmosfēras caurmērā ir 1370 W/m^2 (saules konstante). Saules starojums, ejot cauri atmosfērai, daļēji zūd. Skaidrā saulainā dienā uz grunts var iegūt 800–1000 W/m^2 (globālais starojums).



1.3. att. **Tiešais un izkliedētais saules starojums**

Tiešā un izkliedētā starojuma proporcijas, atkarībā no atrašanās vietas, ir ļoti dažādas. Saulainās pasaules vietās, tādās kā Sahāras tuksnesis vai Kalifornijas štats (ASV), pārsvarā ir tiešais starojums. Šeit var izmantot tādas tehnoloģijas, kuras spēj koncentrēt saules starojumu. Izmantojot šīs tehnoloģijas, ir iespējams darbināt pat tvaika turbīnas, lai ražotu elektrību.

Pateicoties Eiropas laika apstākļiem, apmēram 40 % no ikgada globālā starojuma ir izkliedētais starojums. Šo starojumu nav iespējams fokusēt, izmantojot lēcas vai spoguļus. Šī iemesla dēļ Eiropā lietot koncentrējošās sistēmas no ekonomiskā viedokļa ir neizdevīgi. Eiropā izmantojamās saules iekārtas ir konstruētas tādējādi, lai tās pēc iespējas efektīvāk spētu uztvert izkliedēto starojumu.



1.4. att. **Dažādu saules starojuma komponenšu mērīšanas veidi**

Pieņemts, ka uztvērējam ir jābūt tumšai virsmai ar laukuma vienības filtru: tiek reģistrēti tikai tiešie stari (a); tikai difūzā komponente (b); summārais starojums (c): 1 – uztvērējs perpendikulārs starojuma plūsmai; 2 – horizontāli novietots uztvērējs; 3 – brīvi izvēlēts uztvērēja novietošanas leņķis.

Saules starojuma intensitāte ir ļoti atkarīga no gadalaika. Eiropas platuma grādos saules kolektora iekārta vasarā spēj nodrošināt lielāko daļu no karstā ūdens patēriņa.

Taču saules starojums decembrī, ir tikai desmitā daļa no vasaras saules starojuma, tas var maz līdzēt siltuma patēriņa nodrošinājumā.

Katram Eiropas reģionam saules starojums ir atšķirīgs. Grieķijā tas ir vidēji 1680 kWh gadā uz katru horizontālās virsmas kvadrātmetru, bet Anglijā tikai 950 kWh.

Globālā starojuma izmaiņas dienas laikā izraisa zemes rotēšana ap savu asi. Izmaiņas sezonas laikā rodas Zemei rotējot ap Sauli, kā arī mainoties zemes ass stāvoklim. Pateicoties 23,5º leņķim starp zemes asi un iedomāto vertikālo līniju, saules starojums uz zemes virsmu ir tuvāks perpendikulam vasarā nekā ziemā. Papildus tam, saules starojuma intensitāte ir atšķirīga dažādos platuma grādos. Ja uz ekvatora īpašu saules starojuma izmaiņu gada laikā nav, tad tās ir ievērojamas uz Ziemeļpola un Dienvidpola.

Praksē tiešie stari no difūzās komponentes atšķiras ar to, ka virzītā plūsma var tikt fokusēta. Pat skaidrās dienas laikā pastāv neliels daudzums izkliedētā starojuma. Virzītās plūsmas intensitāte attiecība pret pilnā starojuma intensitāti mainās no 0,9 skaidras dienas laikā līdz pat nullei ļoti apmākušās dienas laikā.

Svarīgi atšķirt saules starojuma komponentes un izdalīt laukumu, kurā mērāms apstarojums. 1.4. attēlā ir izmantoti sekojoši indeksi apzīmējumiem: *b* – tiešie stari, *d* – izkliedētais starojums, *t* – pilnais starojums, *h* – horizontālais laukums, *c* – uztverošais laukums. Ar zvaigznīti apzīmēta plūsma uz laukumu, kas perpendikulāra tiešajiem stariem. Indekss *0* apzīmē lielumus ārpus atmosfēras. Ja indeksu nav vispār, tad tas ir analoģiski uzreiz diviem indeksiem *c* un *t*, tāpēc $I = I_{tc}$. No 1.4. attēla izriet, ka:

$$I_{bc} = I_b^* \cos\theta \qquad (1.1)$$

kur θ – leņķis starp starojuma plūsmas virzienu un normāli pret uztvērēja virsmu jeb staru krišanas leņķis, tāpat:

$$I_{bh} = I_b^* \cos\theta_z \qquad (1.2)$$

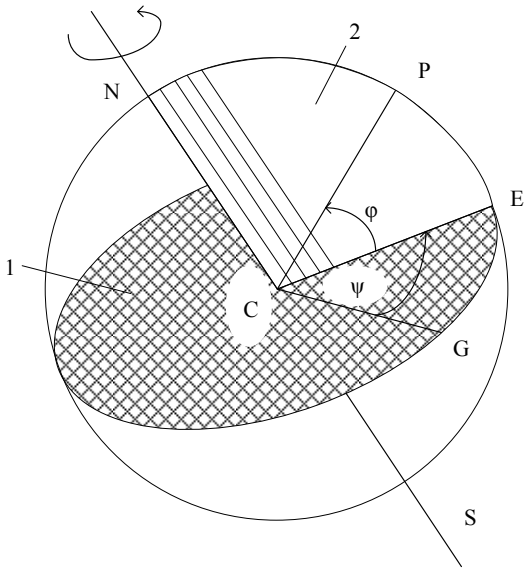
kur θ_z – leņķis starp starojuma plūsmas virzienu un vertikāli.

Pilnu patvaļīgās virsmas apstarojumu sastāda tiešā un izkliedētā starojuma intensitāšu summa:

$$I_t = I_b + I_d \qquad (1.3)$$

1.3. Zemes un Saules ģeometrija

Zeme 24 stundu laikā apriņķo ap savu asi, kas apzīmēta ar ziemeļu un dienvidu polu punktiem *N* un *S* (skat. 1.5. att.). Ass ir perpendikulāra Zemes ekvatoriālai plaknei. Punkts *C* – Zemes centrs, punkts *P* uz Zemes virsmas tiek raksturots ar platumu φ un garumu ψ. Lielums φ pozitīvs punktiem, kas atrodas vairāk uz ziemeļiem no ekvatora. Garums ψ pozitīvs uz austrumiem no Grīnvičas (Lielbritānija). Vertikālā plakne, kas izvietojas no ziemeļiem uz dienvidiem caur punktu *P*, – lokāla meridionālā plakne. Punkti *E* un *G*, 1.5. attēlā – punkti uz ekvatora, kam ir tādi paši ģeogrāfiskie garumi, kā punktam *P*, un attiecīgi – Grīnvičai.



1.5. att. **Platuma φ un garuma ψ noteikšanas shēma**:
1 – ekvatoriālā plakne; 2 – meridiāna plakne.

Reizi 24 stundās Saule nokļūst meridiāna plaknē. Pēc saules laika tas ir pusdienlaiks punktiem pie dotā garuma. Pusdienlaiks pēc saules laika ne vienmēr sakrīt ar pulksteni divpadsmit, jo pulkstenis rāda tā saucamo dekrēta laiku, kas ir vienoti uzstādīts lieliem izplatījuma apvidiem 15° garuma robežās, ko sauc par stundu

joslām. Pulksteņu pagriešana uz vasaras laiku nozīmē, ka saules un dekrēta laiki var atšķirties vairāk kā par 1 h.

Zemes orbītas elipses forma ir cēlonis tam, ka periods starp saules pusdienlaikiem nav tieši 24 stundas, kaut arī vidēji šī starpība ir 24,0000 stundas. Praktiski, starpība nepārsniedz 15 minūtes. Stundu leņķis ω punktā P, ir leņķis, par kuru Zeme pagriežas no saules pusdienlaika momenta, tātad leņķis ω = 0 saules pusdienlaikā. Tā kā zeme pagriežas par 360°/24 h = 15° stundā, tad saules stundu leņķi var izteikt no izteiksmes:

$$\omega = (15°h^{-1}) \cdot (t_{solar} - 12h) = (15°h^{-1}) \cdot (t_{zone} - 12h) + \omega_{eq} + (\psi - \psi_{zone}) \quad (1.4)$$

kur: t_{solar} un t_{zone} – attiecīgi lokālais saules un dekrēta laiks, h;

ψ_{zone} – garums, kurā atrodas Saule, kad t_{zone} sakrīt ar pusdienlaiku (kad saules un dekrēta laiks sakrīt);

ω_{eq} – labojuma koeficients, ko parasti neņem vērā aprēķinos.

Saskaņā ar (1.4) leņķis ω pozitīvs vakara stundās un negatīvs rīta stundās. Saullēkta (vai attiecīgi – saulrieta) stundu leņķi, horizontāli novietotai virsmai, nosaka sekojoši:

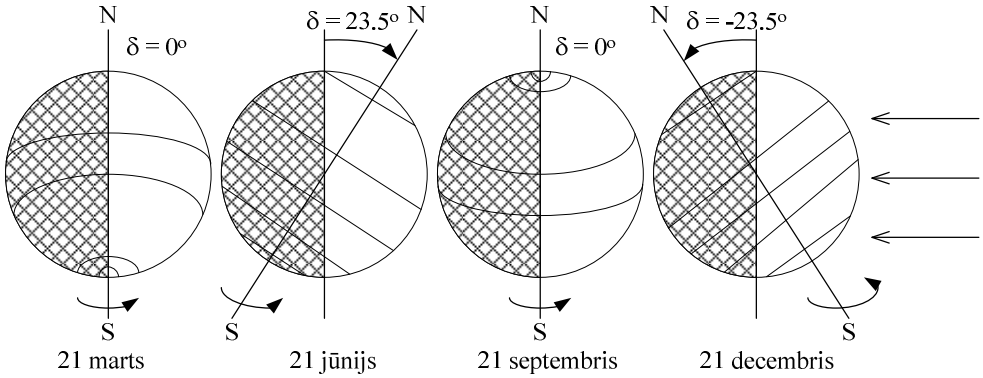
$$\omega = \arccos(-tg\,\varphi \cdot tg\,\delta) \quad (1.5)$$

Zeme apgriežas ap Sauli gada laikā. Zemes ass virziens paliek fiksēts izplatījumā zem leņķa δ_0 = 23,5° pie normāles pret griešanas plakni. Leņķis starp virzienu pret Sauli un ekvatoriālo plakni tiek dēvēts par deklināciju δ un ir sezonālu izmaiņu mērs. Domās novilksim līniju no Zemes centra līdz Saulei, kas krusto Zemes virsmu punktā P (skat. 1.5. att.). Šajā gadījumā δ pārstāv leņķi φ 1.5. attēlā. Tādējādi, deklinācija ir punkta platums, kuram Saule atrodas zenītā dienas vidū saules laikā. Ziemeļpuslodē δ mainās no δ = + 23,5° vasaras saulgriežu periodā līdz δ = – 23,5° ziemas saulgriežu periodā (1.6.att.). Tādējādi δ var izteikt ar sekojošu izteiksmi:

$$\delta = 23.5 \sin\left[360\,\frac{284 + n}{365}\right] \quad (1.6)$$

kur: n – gada dienas numurs skaitot no 1. janvāra.

1.6. attēlā ir atzīmēti platumi 0º; ± 23,5º; ± 66,5º. Var redzēt, kā mainās deklinācija δ. Ar bultām apzīmēta saules starojuma plūsma.



1.6. att. **Zemes virsmas apgaismošana ar saules starojumu dažādos gada laikos**

Mēnešu vidējo dienu numuru n atbilstošās δ vērtības apkopotas 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Mēnešu vidējo dienu numuru n atbilstošās Saules deklinācijas leņķa vērtības

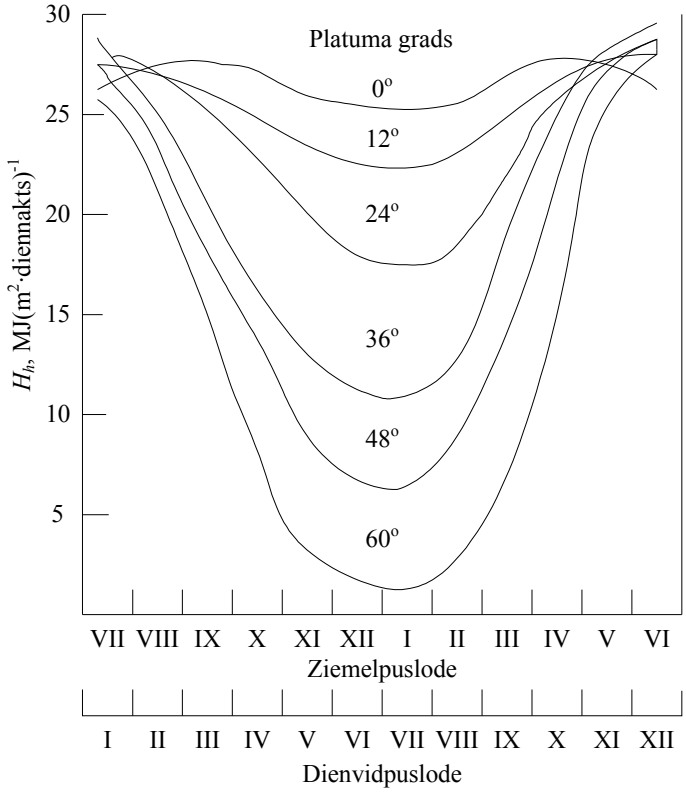
n	17	47	75	105	135	162	198	228	258	318	344	17
δ	–21°	–13°	–2,4°	9,4°	18,8°	23,1°	21,2°	13,5°	2,2°	–9,6°	–18,9°	–23°

1.3.1. Platuma grāds, gadalaiks un diennakts apstarojums

Diennakts apstarojums H ir vienāds ar saules starojuma pilno enerģiju, kas nonāk uz virsmas laukuma vienību dienas laikā:

$$H = \int I dt \qquad (1.7)$$

1.7. attēlā ir parādīta diennakts apstarojuma izmaiņa atkarībā no vietas platuma grādiem un gadalaika. Attēlā parādītie lielumi atbilst mērījumiem horizontālā plaknē, skaidru debesu gadījumā. Vasarā $H_h \approx 25$ MJ/m^2 dienā, visiem platuma grādiem, ziemā H_h augstos platumos daudz mazāks, jo diena ir daudz īsāka, stari krīt slīpāk un atmosfēra stipri vājina.



1.7. att. **Horizontālas virsmas apstarojuma H_h sezonālās izmaiņas tiešā saules starojumā, dažādiem platuma grādiem** (ar romiešu cipariem apzīmēti mēneši)

Sezonālās izmaiņas nosakāmas ar sekojošu trīs pamat faktoru palīdzību:

1. **Dienas garuma izmaiņa.** No vienādojumā (1.6) izriet, ka dienas ilgumu starp saullēktu un saulrietu, var izteikt sekojoši:

$$N = \frac{2}{15} \cdot \omega = \frac{2}{15} \cdot \arccos(\ -tg\,\varphi tg\,\delta) \qquad (1.8)$$

kur: N – dienas ilgums, h;

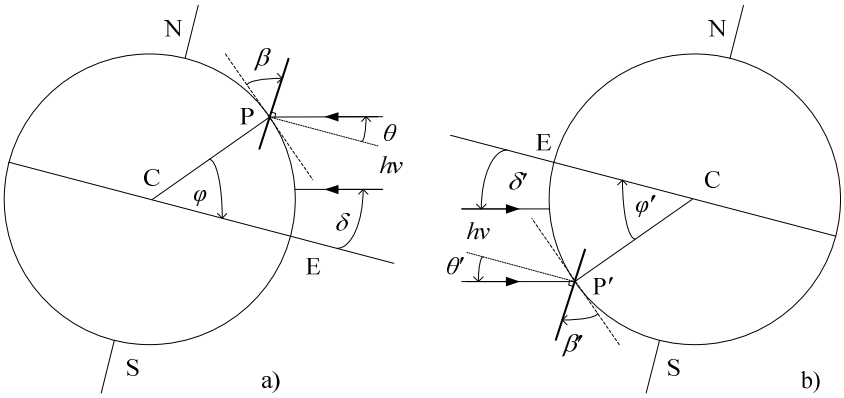
φ – vietas platuma grāds;

δ – Saules deklinācijas leņķis.

57 platuma grādos (Rīgas platuma grāds), piemēram, N mainās no 13,3 h vasaras saulgriežos, līdz 6,4 h ziemas saulgriežos. Polārajos platuma grādos ($|\varphi| > 66{,}5^{\circ}$),

lielums $|tg\varphi tg\delta|$ tuvs nullei. Šādos gadījumos N = 24 h (vasarā) vai N = 0 (ziemā).

2. **Uztvērēja laukuma orientācija.** No 1.8. attēla izriet, ka horizontālā plakne punktā P vasarā vairāk pagriezta pret Sauli, nekā ziemā. Tāpēc, pat ja I_b^*, vienādojumā (1.2) paliek nemainīgs, reizinātājs $\cos\theta_z$ samazina I_{bh} ziemā, un, proporcionāli samazina H_h. Tāpēc līknes 1.7. attēlā aptuveni proporcionālas $\cos\theta_z = \cos(\varphi - \delta)$ (skat. 1.8. att.).



1.8. att. **Uztvērēja apgaismošanas shēma pusdienlaikā pēc saules laika**

Attēlā parādīts platums φ, Saules deklinācija δ, un uztvērēja pagrieziena leņķis β punktā P. Leņķis θ ir vienāds ar staru krišanas leņķi uz uztvērēju, kas ir pagriezts pret ziemeļiem dienvidpuslodē, un attiecīgi – pret dienvidiem ziemeļpuslodē. Ziemeļpuslodei vasarā (a) $\varphi, \delta, \beta > 0$, dienvidpuslodei (b) $\varphi' = -\varphi$, $\delta' = -\delta$, $\beta' = \beta$, $\theta' = \theta$.

3. **Absorbcijas izmaiņa atmosfērā.** Saules starojuma enerģija, kas sasniedz Zemi, kad ir skaidras debesis (skat. 1.7.att.), ir mazāka par kosmisko starojuma plūsmu. Plūsmas pavājināšanās notiek atmosfēras iedarbības rezultātā. Šī pavājināšanās pieaug, palielinoties θ_z, tādēļ I_b^* ziemā ir zemāks. Zemes virsmas apstarojums saules tiešajam starojumam ir nosacīts lielums, 1.7. attēlā parādīta noderīga informācija par vidējo apstarojumu atkarībā no vietas platuma

grādiem un gadalaika, bet patiesie laika apstākļi atšķiras no tiem, ko pieņem aprēķinot apstarojumu.

1.3.2. Uztvērējvirsmas izvietojums pret Sauli

Saules radiācijas aprēķinos, izņemot trīs jau pieminētos pamatleņķus φ, δ, ω, izmanto zenīta leņķi θ_z, Saules augstuma leņķi α, kā arī Saules azimutu a.

Saules zenīta leņķis θ_z. Tas ir leņķis starp saules staru un normāli pret horizontālo plakni punktā P.

Saules augstuma leņķis α. Leņķis vertikālā plaknē starp saules staru un tā projekciju horizontālā plaknē. Summa $\alpha + z$ vienāda 90°.

Saules azimuts a. Leņķis horizontālā plaknē starp saules stara projekciju un dienvidvirzienu.

Plaknes slīpuma leņķis β. Tas ir leņķis starp apskatāmo plakni un horizontu ($0 < \beta < 90°$ virsmām, kas vērstas pret ekvatoru; $90° < \beta < 180°$ virsmām pagrieztām no ekvatora).

Plaknes azimuts a_p. Novirze no meridiāna projekcijas uz horizontālo normāles projekciju pret uztvērēja virsmu ($a_p = 0$ virsmai, kas orientēta tieši uz dienvidiem; $a_p > 0$ – vērsta uz rietumiem no virziena tieši uz dienvidiem; $a_p < 0$ – uz austrumiem. Horizontālai virsmai pieņem $a_p = 0$).

Staru krišanas leņķis θ. Leņķis starp starojuma plūsmas virzienu pret uztvērējvirsmu un tās normāli.

Saules staru krišanas leņķis uz brīvi orientētu virsmu, ar azimutu a_p, un plaknes slīpumu β, nosakāms pēc sekojošas formulas:

$$\cos\theta = \sin\beta \cdot \left[\cos\delta\left(\sin\varphi \cdot \cos a_p \cdot \cos\varpi + \sin a_p \cdot \sin\omega\right) - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos a_p\right] + \\ + \cos\beta\left[\cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega + \sin\delta \cdot \sin\varphi\right] \quad (1.9)$$

kur: β – plaknes slīpuma leņķis pret horizontu;

δ – Saules deklinācijas leņķis;

φ – vietas platuma grāds;

a_p – plaknes azimuts – leņķis starp normāles vertikālo plakni un dienvidu virzienu;

ω – saules stundu leņķis – leņķis horizontālajā plaknē starp dienvidu virzienu un saullēktu (saulrietu).

Dažos gadījumos kopīgā formula (1.9) ievērojami vienkāršojās. Piemēram, no 1.8. att. izriet, ka uztvērējs, orientēts ekvatora virzienā, tiks pagriezts tieši saules plūsmas virzienā pusdienlaikā, ja tā leņķis β, vienāds ar vietas platuma grādu. Šajā gadījumā (a = 0, $\beta = \varphi$), formula (1.9) pārveidojas sekojoši:

$$\cos\,\theta = \cos\,\omega \cdot \cos\,\delta \tag{1.10}$$

Horizontālai plaknei $\beta = 0$ un (1.9) tiek pārveidota sekojoši:

$$\cos\theta_z = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \tag{1.11}$$

Saules starojuma leņķis pret vertikālu virsmu ($\beta = 90°$):

$$\cos\theta = \cos\delta(\sin\varphi \cdot \cos a_p \cdot \cos\omega + \sin a_p \cdot \sin\omega) - \sin\varphi \cdot \sin\delta \cdot \cos a_p \tag{1.12}$$

Vertikālās uztvērējvirsmas azimuts a_p, gadījumā, ja tā orientēta dienvidu virzienā, vienāds ar 0º, rietumu virzienā 90°, austrumos – 90°, uz ziemeļiem 180°. Ievietojot šīs a_p vērtības pēdējā formulā, iegūstam staru krišanas leņķi pret vertikāli novietotu virsmu, ar doto orientāciju.

Slīpai virsmai, orientētai uz dienvidiem ($a_p = 0º$) atrod:

$$\cos\theta = \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin\delta + \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \tag{1.13}$$

Zenīta leņķi nosaka:

$$\cos\,z = \cos\,\omega \cdot \cos\,\delta \cdot \cos\,\varphi + \sin\,\delta \cdot \sin\,\varphi \tag{1.14}$$

Saules augstuma leņķi virs horizonta var aprēķināt pēc sekojošas formulas:

$$\alpha = 90° - (\cos\omega \cdot \cos\delta \cdot \cos\varphi + \sin\delta \cdot \sin\varphi) \tag{1.15}$$

Maksimālais saules augstuma leņķis tiek sasniegts saulainā pusdienlaikā, kad $\omega = 0$, t.i.:

$$\alpha_{\max} = \frac{\pi}{2} - (\varphi - \delta) \tag{1.16}$$

Un attiecīgi Saules azimuts ir vienāds:

$$\sin\,a = \sec\,\alpha \cdot \cos\,\delta \cdot \sin\,\omega \tag{1.17}$$

Kā saullēkta stundu leņķi, slīpai virsmai orientētai dienvidu virzienā, mazāko lielumu ω_s, kas ir aprēķināma:

$$\omega_s = \arccos(-tg(\varphi - \beta) \cdot tg\delta)) \qquad (1.18)$$

Saules starojuma intensitātes izmaiņas skaidram dienas laikam uz horizontālas virsmas pietiekoši precīzi var noteikt kā sinusa funkciju:

$$I_n = I_{n\max} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t'}{N}\right) \qquad (1.19)$$

kur: t' – stundu skaits no saullēkta, h;

N – dienas ilgums, h.

I_{nmax} – starojuma maksimālā vērtība, W/m^2.

Integrējot izteiksmi (1.19) visam dienas ilgumam, iegūstam formulu dienas laikā saņemtā siltumenerģijas aprēķinam:

$$Q_s = \frac{2N}{\pi} \cdot I_{n\max} \qquad (1.20)$$

kur: Q_s – dienas laikā iegūtais enerģijas daudzums, Wh/m^2.

1.4. Saules enerģijas pārveidošana siltumā, darbā un elektrībā

Uz šo brīdi saules enerģiju izmanto gan siltuma enerģijas – karstā ūdens sagatavošanai un apkures vajadzībām, gan arī elektroenerģijas ieguvei. Tiek domāts par saules enerģijas izmantošanu dzesēšanas vajadzībām.

Klimats un konkrētā reģiona ģeogrāfiskās īpatnības ir galvenais bremzējošais apstāklis iepriekš minēto saules enerģijas izmantošanas tehnoloģiju ieviešanai. Pastāv uzskats, ka saules starojuma enerģiju var izmantot tikai tur, kur visu gadu spīd saule, vai arī vietās, kas atrodas pēc iespējas tuvāk ekvatoram, jeb t.s. planētas saules jostā. Šādās vietās saules starojuma intensitāte ir augsta, tur parasti mazāk nepieciešama siltumenerģija, bet vairāk elektroenerģijas izstrāde. Saules enerģijas izmantošana elektrības ražošanai joprojām ir salīdzinoši dārga, šīs tehnoloģijas sabiedrībā izraisa zināmu atturību un neuzticību, neskatoties uz to, ka ar katru gadu iekārtu ražošanas

izmaksas būtiski samazinās. Pēdējā laikā tiek pievērsta lielāka uzmanība tieši saules enerģiju izmantojošo sistēmu attīstīšanā un izpētē, kā arī ir jau sastopami pozitīvi šādu tehnoloģiju pielietošanas piemēri praksē.

Ar veiksmīgiem demonstrācijas projektiem un aktivitātēm, šobrīd jau ir pierādīts, ka ir iespējams efektīvi izmantot saules enerģiju arī reģionos un valstīs, kur klimatiskie apstākļi nav salīdzināmi ar dienvidu reģionu klimatu, piemēram, Dānijā, Vācijā un Zviedrijā, kur klimatiskie apstākļi ir līdzīgi Latvijā esošajiem. Saules enerģijas izmantošana privātmāju vai dzīvojamo māju apkurē un karstā ūdens sagatavošanā ir plaši pielietota. Tomēr Latvijā šādas kombinētās saules siltumenerģētiskās sistēmas pagaidām nav aktuālas un tiek pat nepamatoti ignorētas. Šo situāciju var izskaidrot ar to, ka trūkst detalizētas informācijas un veiksmīgu demonstrācijas pilotprojektu, zināšanu un zinātniskās izpētes. Neapšaubāmi, lai veidotu šādas sistēmas ir nepieciešams detalizēts ekonomiskais pamatojums, kas apstiprina konkrētās iekārtu izmantošanas enerģētisko un ekonomisko efektivitāti ilgtermiņā. Situāciju pasliktina arī tas, ka nav saules enerģijas izmantošanas veicināšanas politikas un stratēģija valstiskā līmenī, kas varētu ietekmēt šādu tehnoloģiju attīstību.

Būtiska problēma, kas saistītas ar saules enerģijas izmantošanas iekārtu ieviešanu, ir to salīdzinoši lielās izmaksas, izmēri, sarežģītā uzstādīšana un ar ekspluatāciju saistītās īpatnības un prasības. Tas padara šīs iekārtas nepievilcīgas potenciālo lietotāju acīs.

Tāpēc tiek meklēti varianti, lai šādas saules kombinētās siltumenerģētiskās sistēmas veidotu kompaktākas, samazinātu to izmaksas un ar uzstādīšanu saistītās problēmas. Rezultātā iegūtu konkurētspējīgu, viegli un vienkārši ekspluatējamu sistēmu, kuru ir iespējams ērti vadīt un kontrolēt. Mūsu pētnieku mērķis ir izveidot saules kombinēto siltumenerģētisko sistēmu modeli vai prototipu, ko būtu iespējams ražot rūpnieciski, kā arī sērijveidā, tādā veidā sasniedzot visus ekonomiskā un tehnoloģiska rakstura ieguvumus, kā arī priekšrocības un stimulāciju tālākām aktivitātēm. Lai šādus inovatīvus izpētes variantus varētu attīstīt, ir nepieciešama gan likumdošanas, gan administratīvā, gan finansiālā un tehniskā bāze. Skatoties ilgtermiņā un saistībā ar ilgtspējīgas attīstības vadlīnijām un pasaules pieredzi, ir nepieciešams orientēt darbību tajos virzienos, kur tiešām ir iespējams iegūt

pielietojamu gala rezultātu. Lai attīstītu, pārbaudītu un ieviestu inovatīvas tehnoloģijas, izmanto dažādas metodes un pieejas. Viena no tām ir izmantot dažādus imitācijas modeļus, kas galvenokārt domāti, lai saīsinātu pētīšanas procesu no idejas līdz reālam rezultātam, kā arī ļautu laicīgi identificēt galvenās problēmas un to iespējamos iemeslus pirms ar tām saskartos praksē. Tāpēc tiek izstrādātas kompleksas programmas, kas ļauj veikt diezgan precīzas un detalizētas sistēmu imitācijas, ko izmanto par pamatu turpmākajām darbībām – sistēmas darbības optimizēšanai, sastāvdaļu un komponenšu mijiedarbības un kopējā izpildījuma uzlabošanai, kā arī meklēt jaunus konceptuālos risinājumus.

Saules enerģija var būt pārveidota siltuma, mehāniskā un elektriskā enerģijā, izmantota ķīmiskos un bioloģiskos procesos. Saules iekārtām tiek rasti pielietojumi dzīvojamās un sabiedriskās ēkās, tehnoloģiskos procesos, kas norisinās zemās, vidējās un augstās temperatūrās. Saules enerģiju izmanto karstā ūdens ieguvei, jūras ūdens atsāļošanai, materiālu un lauksaimniecības produktu žāvēšanai un tamlīdzīgi. Pateicoties saules enerģijai, notiek fotosintēzes process un augu augšana, notiek dažādi fotoķīmiski procesi.

Elektriskās enerģijas ieguvei var lietot termodinamiskās saules enerģijas pārveidošanas metodes, kas balstās uz siltumdzinēju ciklu izmantošanu. Elektrības ieguvē var lietot arī saules enerģijas pārveidotājus, kas izmanto termoelektriskos un termoemisijas procesus, kā arī tiešās pārveidošanas metodes, fotoelektrisko, fotogalvanisko un foto emisiju. Vislielāko praktisko pielietojumu saņēma fotoelektriskie pārveidotāji un termodinamisko pārveidojumu sistēmas ar siltumdzinēju izmantošanu.

Izskatīsim fizikālo būtību saules enerģijas pārveidošanai siltumā un darbā, kā arī darbu stāvokli elektroenerģijas ieguvei, jo tas pilnīgāk raksturo moderno saules iekārtu attīstības līmeni.

Saules enerģijas pārveidošana mehāniskajā enerģijā notiek divās stadijās.

- Pirmā stadija ir foto termiskā transformācija, tās rezultātā saules enerģija, kas absorbējas kolektorā, uzsilda siltumnesēju un darba ķermeni. Šī silšana notiek tieši saules kolektorā – saules starojuma uztvērējā. Tāda veida darba ķermeņiem

kā ūdens tvaiks un organisko vielu (freonu) tvaiki, notiek arī tvaiku veidošanās un sakarsēšanas process.

- Otrā stadija notiek siltumdzinējā, kurā darba ķermeņa siltuma enerģija transformējas darbā. Darba ķermenis (ūdens tvaiks, freonu tvaiki, gaiss un tml.) siltuma dzinēja ciklā saņem siltumu Q_1 no siltuma avota, kā rezultātā tas izplešas un veic darbu, atdod siltumu Q_2 apkārtējai videi, tai pašā laikā saspiežoties patērē darbu. Lietderīgais cikla darbs vienāds ar saņemtā un atdotā siltuma daudzumu starpību:

$$L = Q_1 - Q_2 \tag{1.21}$$

Bet siltuma transformācijas darbā lietderība tiek raksturota ar cikla termisko lietderības koeficientu:

$$\eta_t = \frac{L}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \tag{1.22}$$

Daudz efektīvāk siltuma transformācija darbā notiek Karno ciklā, kas sastāv no ideāliem procesiem ar siltuma pievadīšanu pie patstāvīgās temperatūras T_1, un siltuma atdeves pie patstāvīgās temperatūras T_2 un lietderības koeficienta:

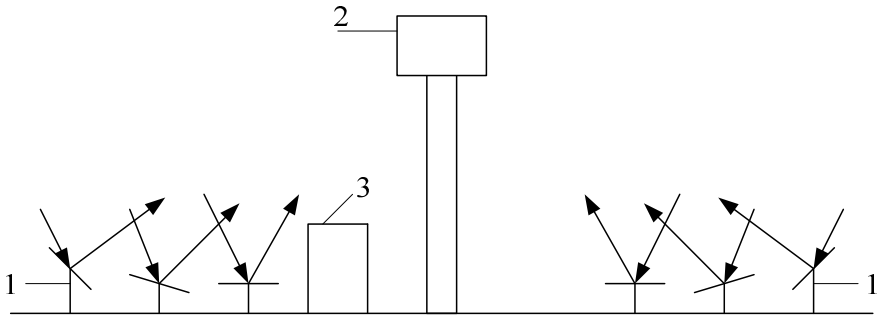
$$\eta_{tk} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \tag{1.23}$$

Lai paaugstinātu šo lietderības koeficientu, nepieciešams palielināt T_1 un samazināt T_2. Pie doto temperatūru diapazona (maksimuma T_1 un minimuma T_2), reālo siltuma dzinēju – tvaika un gāzu turbīnu, tvaika mašīnu, iekšdedzes dzinēju u.c. – cikla efektivitāte ievērojami mazāka par Karno cikla termisko lietderības koeficientu, bet tā tāpat pieaug paaugstinoties pievadītā siltuma vidējām temperatūrām un samazinoties aizvadītā siltuma vidējām temperatūrām. Maksimālās lietderības koeficienta vērtības pie tipiskām darba ķermeņa parametru vērtībām ir 0,48 tvaiku spēka iekārtām un 0,36 iekšdedzes dzinējiem un gāzturbīnu iekārtām, kas ir 1,5–2,5 reizes zemāk, nekā Karno ciklā.

Viena no kompleksām saules enerģijas pārveidošanas sistēmām ir *Saules elektrostacijas* (SES), tur izmanto iekārtas, kas paredzētas saules enerģijas uztveršanai,

un tās attiecīgai pārveidošanai siltumā un elektroenerģijā. Saules elektrostaciju efektīvam darbam ir nepieciešams siltuma akumulators, un automātiskas vadības sistēma.

Saules enerģijas uztveršana un pārveidošana siltumā izmanto atstarotāju optiskās sistēmas ar koncentrētas saules uztvērēja palīdzību, kas tiek izmantota, lai iegūtu ūdens tvaiku, vai uzsildītu gāzveida jeb šķidrmetāla siltumnesēju (darba ķermeni).



1.9. att. **Torņu tipa saules elektrostacijas shēma**:
1 – atstarotāji; 2 – centrālais starojuma uztvērējs; 3 – stacijas iekārtas.

Saules elektrostaciju izvietojumam visvairāk piemērotas sausas un tuksnešainas zonas. Rajoni, kur nokrišņu daudzums gadā nepārsniedz 250 mm, aizņem vienu astoto daļu visas sauszemes. Uz pasaules lielāko tuksnešu, ar platību 20 miljoni m^2 (Sahāras platība 7 miljoni m^2), gada laikā nonāk ap $5 \cdot 10^{16}$ kWh saules enerģijas. Pārveidojot saules enerģiju elektriskajā, ar efektivitāti 10 %, pietiktu izmantot tikai 1 % tuksnešaino zonu teritorijas saules elektrostaciju izvietošanai, lai nodrošinātu mūsdienīgu pasaules energopatēriņa līmeni.

Pašreiz tiek būvētas pamatā divu veidu elektrostacijas: torņu tipa SES, un moduļtipa SES. Ideja torņu tipa SES darbībai (skat. 1.9. att.) tika izteikta jau vairāk kā 350 gadus atpakaļ, taču šāda veida saules elektrostacijas būvniecība sākās tikai 1965. gadā, bet 80–tajos gados tika uzbūvēta virkne jaudīgu saules elektrostaciju ASV, Rietumeiropā, Krievijā, kā arī citās valstīs.

1.10. att. **Torņu tipa saules elektrostacija**

Moduļtipa saules elektrostacijās izmanto lielu moduļu daudzumu, katrs no tiem ietver sevī paraboliski cilindrisku saules starojuma koncentratoru un uztvērēju, kas atrodas koncentratora fokusā un tiek izmantots darba šķidruma uzsildīšanai, kas padots siltuma dzinējā, kas savukārt darbina elektroģeneratoru. Šāda tipa lielākā saules elektrostacija – 12,5 MW uzbūvēta ASV.

Pie nelielas jaudas ekonomiskākas ir moduļtipa saules elektrostacijas. Tai pat laikā, torņa tipa saules elektrostacijas ar jaudu līdz 10 MW ir nerentablas, to optimālā jauda vienāda ar 100 MW, bet torņa augstums 250 m. Moduļtipa saules elektrostacijās parasti izmanto līnijveida saules enerģijas koncentratorus ar maksimālo koncentrācijas pakāpi ap 100, bet torņa tipa saules elektrostacijās izmanto centrālo uztvērēju ar heliostatu lauku, kas nodrošina koncentrācijas pakāpi dažu tūkstošu apmērā. Otrajā gadījumā Saules sekošanas sistēma ir daudz sarežģītāka, jo ir nepieciešama griešanās ap divām asīm.

1.11. att. **Moduļtipa saules elektrostacija**

Siltuma dzinējā kā darba ķermeni parasti izmanto ūdens tvaiku ar temperatūru līdz 550 ºC, gaisu un citas gāzes – līdz 1000 ºC, organiskos šķidrumus ar zemu vārīšanās temperatūru - līdz 100 ºC (tai skaitā freonus) – šķidrmetāla siltumnesējus – līdz 800 ºC. Saules elektrostacijas uz saules baseinu pamata daudz lētākas nekā citu tipu saules elektrostacijas, tām nav nepieciešami spoguļu atstarotāji ar sarežģītu orientēšanās sistēmu, taču tās var uzstādīt tikai rajonos ar karsto klimatu.

Galvenais trūkums torņa tipa saules elektrostacijām ir to lielās izmaksas un lielā platība, kas nepieciešama to izvietošanai. Piemēram, lai izvietotu SES ar jaudu 100 MW, nepieciešamā platība 200 ha, bet atomelektrostacijai ar 1000 MW – tikai 50 ha.

Saules radiācijas enerģija var tikt pārveidota elektriskajā līdzstrāvā ar saules bateriju palīdzību. Tā ir iekārta, kas sastāv no plānām silīcija plāksnēm vai cita veida pusvadītāju materiāliem, kas fotoelektriskā efekta rezultāta ģenerē elektrodzinējspēku.

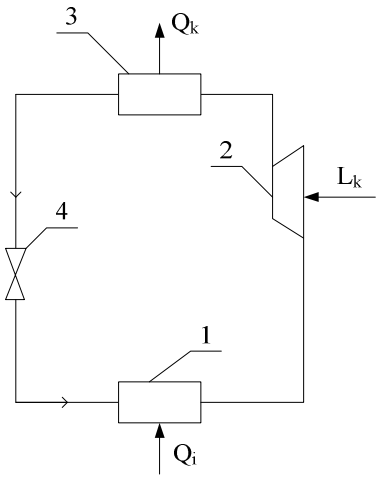
1.5. Saules enerģijas pielietojums aukstuma ieguvei

Saules enerģiju var izmantot arī aukstuma ieguvei. Šī mērķa sasniegšanai izmanto tvaika kompresijas un absorbcijas saldēšanas iekārtas. Īsumā izskatīsim to

darbības principu, kā arī siltumsūkņa darbības principu, ko var izmantot ēku apsildei un atvēsināšanai.

1.5.1. Tvaika kompresijas saldēšanas iekārtas

Tvaika kompresijas saldēšanas iekārta, kuras shēma parādīta 1.12. attēlā, sastāv no iztvaikotāja, kompresora, kondensatora, droseļu ventiļa un savienojošiem cauruļvadiem. Kā darba ķermeni – aukstuma aģentu – pamatā izmanto freonus, propānu un citas vielas ar zemu iztvaikošanas temperatūru.



1.12. att. **Tvaika kompresijas saldēšanas iekārta:**
1 – iztvaikotājs; 2 – kompresors; 3 – kondensators; 4 – droseļu ventilis.

Saldēšanas iekārtu darbības cikls notiek sekojoši. Pie atbilstoša zema spiediena un zemas temperatūras, pievadot siltumu Q_i , šķidrais aukstuma aģents iztvaikotājā iztvaiko – pārvēršas par gāzi. Aukstuma aģenta tvaikus saspiež ar kompresoru, rezultātā tiek patērēts darbs L_k. Aukstuma aģenta tvaiku spiediens un temperatūra palielinās. Kondensatorā no tvaikiem paņem siltumu Q_k tie atdziest un kondensējas. Kondensācija notiek pie augstākas temperatūras un spiediena, nekā tas ir iztvaicētājā. Šķidro aukstuma aģentu caur droseļ ventili padod uz iztvaikotāju, kur tā spiediens un temperatūra pazeminās līdz temperatūras un spiediena līmenim iztvaikotājā pie kura aukstuma aģenta daļa iztvaiko bez siltuma pievadīšanas. Papildus pievadot siltumu iztvaiko pārējais aukstuma aģents.

Saldēšanas iekārtu uzstādīšanas cikla efektivitāte tiek noteikta ar aukstumražošanas Q_k attiecību pret darbu L_k, patērētu aukstuma aģenta tvaiku saspiešanai kompresorā:

$$\varepsilon = \frac{Q_k}{L_k} \qquad (1.24)$$

Cikls notiek iztvaicētāja T_i un kondensatora T_k temperatūru diapazonā, bet maksimāli iespējamais aukstuma koeficents, kas ir pielīdzināms ideālam Karno ciklam, ir vienāds:

$$\varepsilon = \frac{T_i}{\frac{T_k}{T_i}} \qquad (1.25)$$

Aukstuma koeficents ε = 2÷4 un palielinās samazinot temperatūru diferenci kondensatorā un iztvaicētājā.

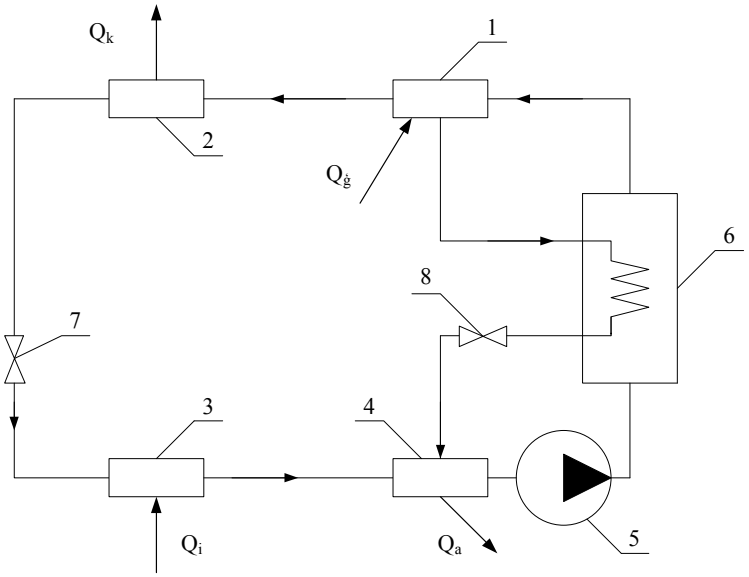
1.5.2. Absorbcijas saldēšanas iekārtas

Aukstuma ražošanai absorbcijas iekārtā tiek izmantota siltuma enerģija, bet par darba ķermeni kalpo aukstuma aģenta un absorbenta binārs maisījums. Absorbents – tāds šķidrums, kas ķīmiski sasaistās ar aukstuma aģentu pie zemām temperatūrām un atdalās no tā pie augstām temperatūrām. Parasti tiek izmantoti tādi maisījumi kā: ūdens (aukstuma aģents) – broma litijs (absorbents) un amonjaks (aukstuma aģents) – ūdens (absorbents).

Broma – litija absorbcijas saldēšanas iekārtas uzstādīšanas darba princips tiek skaidrots ar 1.13. attēla palīdzību. Iekārta sastāv no ģeneratora, kondensatora, iztvaicētāja, absorbera, sūkņa, siltummaiņa, droseļu ventiļa. Kā redzam, kompresora nav, bet spiediens ceļas sākumā aukstuma aģentam šķīstot vājā šķīdumā absorberā, bet pēc tam ar sūkņa palīdzību.

Cikls iesākas ar ūdens iztvaicēšanu no koncentrēta šķīduma un izveidotā ūdens tvaika pārkarsēšanas ģeneratorā, kur pienāk siltums no saules kolektora. Temperatūra ģeneratorā ir vienāda 77–99 °C. Tvaiki no ģeneratora pienāk kondensatorā, kur tie ar ūdens dzesētāju atdzesējas aptuveni līdz 37–40 °C un pārvēršas šķidrumā, kurš pēc tam atkal daļēji iztvaiko pie paplašinājuma droseļu ventilī 7. Pilna ūdens iztvaikošana notiek iztvaicētājā pie zema spiediena un temperatūras 4 °C, pie tam no telpas gaisa vai ūdens tiek paņemts siltums, kas ir nepieciešams aukstuma aģenta iztvaikošanai. Zemspiediena tvaiki pienāk absorberim, kur tie tiek absorbēti ar koncentrētu šķīdumu, kurš ar sūkni tiek padots caur siltummaini ģeneratorā. Ciklā siltums no darba ķermeņa

tiek novadīts kondensatorā Q_k un absorberī Q_a, bet pievadīts ģeneratorā $Q_{ģ}$ un iztvaicētājā Q_i.



1.13. att. **Absorbcijas saldēšanas iekārtas shēma**
1 – ģenerators, 2 – kondensators; 3 – iztvaikotājs; 4 – absorberis;
5 – cirkulācijas sūknis; 6 – siltummainis; 7, 8 – droseļu ventiļi.

Absorbcijas aukstumiekārtas efektivitāti raksturo ar iekārtas enerģijas pārveidošanas koeficentu, kas ir vienāds ar iegūtā aukstuma Q_i attiecību pret patērēto siltuma daudzumu ģeneratorā $Q_{ģ}$:

$$\varphi = \frac{Q_i}{Q_{ģ}} \qquad (1.26)$$

Šī koeficienta tipiskas vērtības broma – litija iekārtai ir 0,6 – 0,8, bet ūdens - amonjaka – 0,4–0,6. Šie skaitļi 5–7 reizes zemāki, nekā tvaika kompresijas iekārtai ar elektropiedziņu, bet ja ņem vērā lietderības koeficientu siltuma enerģijas pārveidošanai par elektrisko 0,33, kā arī enerģijas zudumus tīklā, tad starpība kļūst ievērojami mazāka.

1.5.3. Siltumsūknis

Siltumsūknis ir kā ledusskapis, kuru izmantojam telpas sildīšanai, tikai saldēšanas kamera ir izvietota ārpus sildāmās telpas. Siltumsūknis ir aukstum iekārta, kas tiek izmantota zemākas temperatūras siltuma enerģijas pārveidošanai augstākas temperatūras siltuma enerģijā. Tas sastāv no tiem pašiem elementiem, kā saldēšanas iekārtas, tikai strādā citā temperatūru režīmā un paredzēts ēku apkurei izmantojot apkārtējo vidi - gaisu, ūdeni, grunti, saules enerģiju un siltuma atkritumus. Siltumsūknis var tikt izmantots ēku apkurei ziemā un to atvēsināšanai vasarā. Eksistē tvaika kompresijas un absorbciju siltuma sūkņi. Tāpat kā saldēšanas iekārtai, tvaika kompresijas siltuma sūknim ir iztvaicētājs, kompresors, kondensators un droseļu ventilis. Siltumsūkņa darba cikls notiek darba ķermeņa temperatūru diapazonā iztvaicētājā un kondensatorā.

Tvaika kompresijas siltumsūkņa enerģijas balansu apraksta vienādojums:

$$q_k = q_i + l_k \tag{1.27}$$

kur: q_k – siltuma daudzums, kas novadīts kondensatorā, kJ/kg;

q_i – siltuma daudzums, kas ir pievadīts iztvaicētājā, kJ/kg;

l_k – aukstuma aģenta saspiešanas darbs kompresorā, kJ/kg.

Iekārtas efektivitāte gadījumā, kad siltumsūknis tiek izmantots ēkas apkurei, raksturojama ar siltuma (apkures) koeficentu vai enerģijas pārveidošanas koeficentu:

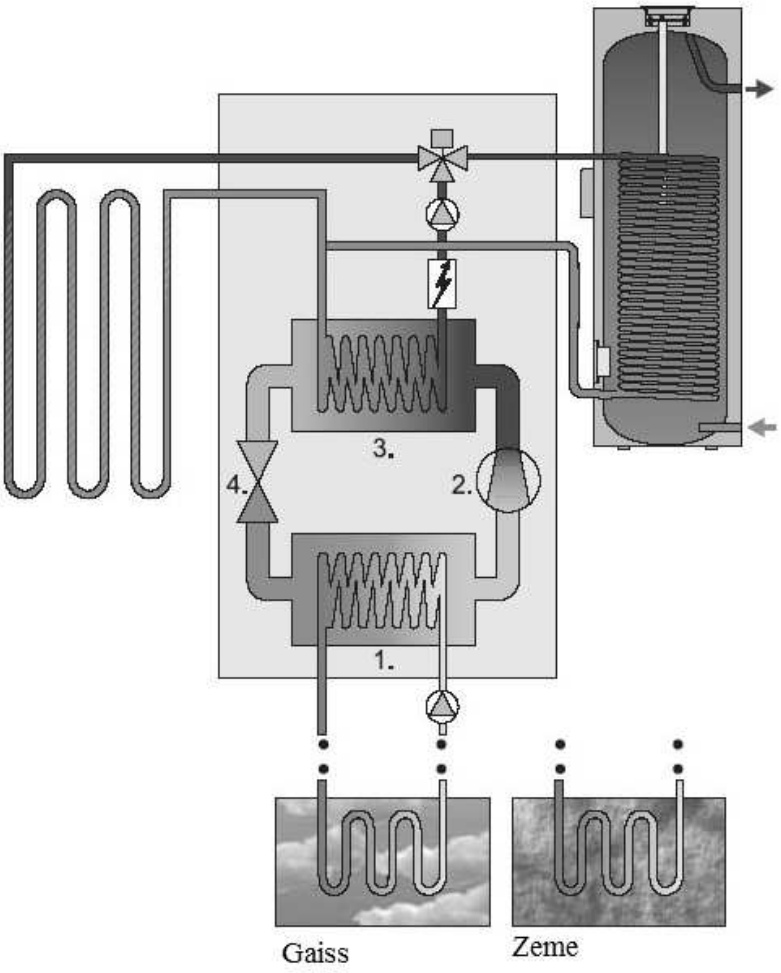
$$\varphi = \frac{q_k}{l_k} \tag{1.28}$$

Maksimālā efektivitāte ir siltumsūkņa un saldēšanas iekārtām, kas strādā apgrieztā Karno ciklā temperatūru diapazonā iztvaicētājā T_i un kondensatorā T_k. Pie tam:

$$\varphi_k = \frac{T_k}{(T_k - T_i)} \tag{1.29}$$

un:

$$\varepsilon_k = \frac{T_i}{(T_k - T_i)} \tag{1.30}$$



1.14. att. **Siltumsūkņa darbības principiālā shēma:**
1 – iztvaikotājs; 2 – kompresors; 3 – kondensators; 4 – droseļu ventilis.

Tvaika kompresijas siltumsūknī kā siltuma avotu, kas tiek pievadīts iztvaicētāja darba ķermenim, var tikt izmantots gruntsūdens vai ūdens no upes, jūras, ezera, kā arī mitra augsne, ārējais gaiss, saules radiācija. Siltuma pievadīšana un novadīšana notiek ar cirkulējošā siltumnesēja (ūdens vai gaiss) palīdzību.

Atkarībā no siltuma avota un siltuma novadīšanas vides izšķir šādus siltumsūkņu veidus: ūdens – ūdens, grunts – ūdens, gaiss – ūdens, ūdens – gaiss, grunts – gaiss un

gaiss – gaiss. Apkures sistēmām piemērotākie pirmie trīs veidi, bet, dzesēšanai – pārējie.

Lai siltumsūknis darbotos apkures un atvēsināšanas režīmos nepieciešams, lai tam būtu speciāls droseļu ventilis un četrgaitu vārsts, kas nodrošina aukstuma aģenta kustības virziena izmaiņu un pārslēdz iekārtas darbību uz pretējo virzienu. Siltummainis, kas apkures režīmā bija iztvaicētājs, kļūst par kondensatoru atvēsināšanas režīmā un pretēji.

1.6. Fotoelektriskā ģenerācija

Tuvāko gadu laikā pieprasījums pēc elektroenerģijas visā pasaulē, neapšaubāmi tikai pieaugs. Var paredzēt arī to, ka enerģijas ražotāji saskarsies ar fosilā kurināmā nepietiekamību, kā arī ar tādām problēmām, kā apkārtējās vides piesārņojums, sadedzinot šo kurināmo, bet kodolenerģētikas attīstību kavē lielās izmaksas un potenciālā bīstamība. Tāpēc var sagaidīt, ka noteiktu lomu ieņems „tīrā", atjaunojamā enerģētika, kas izmanto praktiski neizsīkstošus resursus. Viens šāds elektroenerģijas avots ir saules baterijas, kas tiešā veidā pārveido saules starojuma enerģiju elektrībā. Šī tehnoloģija nav nekas jauns. No kosmosa apgūšanas ēras pirmajām dienām, saules baterijas nodrošināja ar elektroenerģiju kosmosa kuģus, bet šobrīd tās izmanto, tādās izplatītās ierīcēs, kā mikrokalkulatori, pulksteņi, plaukstdatori, rotaļlietas, apgaismes ierīces utt. Šodienas situācijā jaunākjums ir tas, ka šī tehnoloģija sasniegusi tādu tehnisko līmeni, ka iespējams būvēt saules elektrostacijas ar jaudu miljonos vatu. Tas ir noticis pateicoties foto elementu enerģijas pārveidošanas efektivitātes paaugstināšanai un ražošanas izmaksu samazināšanai. Ņemot vērā progresu šajā sfērā, jau pagājušā gadsimta astoņdesmitajos gados paredzēja, ka līdz gadsimta beigām tiks ieviestas lielas elektrostacijas, kas darbosies uz saules baterijām. Pareģojums piepildījās – tika uzbūvētas pirmās fotoelektriskās saules elektrostacijas Japānā, Amerikā un Eiropā.

Fotoelektriskā enerģijas ģenerācija notiek elektromagnētiskā starojuma absorbcijas rezultātā telpiski sadalot pozitīvos un negatīvos lādiņnesējus pusvadītājā. Elektriskā lauka klātbūtnē, šie lādiņi veido elektrisko strāvu ārējā ķēdē. Pāreju vai

neviendabīgu materiālu vietās, pastāv iekšējie elektrostatiskie lauki. Fotoelementu iekšējie lauki, uz struktūras pārejām – pusvadītājs – pusvadītājs, metāls – pusvadītājs, veido potenciālu starpību ap 0,5 V un pie saules starojuma plūsmas blīvuma ap 1 kW/m^2 strāvas blīvums var sasniegt 200 A/m^2. Industriāli ražotajiem fotoelementiem lietderības koeficients pie vidējā apstarojuma ir no 10 līdz 20 %.

Uz pusvadītāju pāreju pamata veidotie fotoelektriskie EDS avoti parasti tiek saukti par fotoelementiem vai saules baterijām. Svarīgi atzīmēt, ka fotoelektriskās iekārtas ir elektroenerģijas avoti, kas darbojas no starojuma plūsmas. Saules baterijas ģenerē elektrisko strāvu tiešā atkarībā no diennakts, sezonas un nejaušas apstarojuma izmaiņas. Saules enerģijas izmantošanas efektivitāte atkarīga ne tikai no fotoelementa lietderības koeficienta, bet arī no dinamiskās slodzes saskaņotības ārējā ķēdē. Šajā ziņā fotoelektriskās iekārtas ir līdzīgas citiem enerģijas pārveidotājiem, kaut arī detaļās var atšķirties.

Fotoelementu lielākā daļa ir silīcija pusvadītāju fotodiodes. Pirmās fotodiodes izgatavotas 1954. gadā. To izgatavošanas tehnoloģija ļoti ātri pilnveidojas. Praktiski visi fotoelementi tiek izgatavoti no kristāliska silīcija, taču var izmantot arī citus materiālus. Tie ir pusvadītāji, veidoti no tādiem sakausējumiem kā vara – indija diselīts, kadmija tellurīds un gallija arsenīds.

1.6.1. Fotoelementu darbības princips

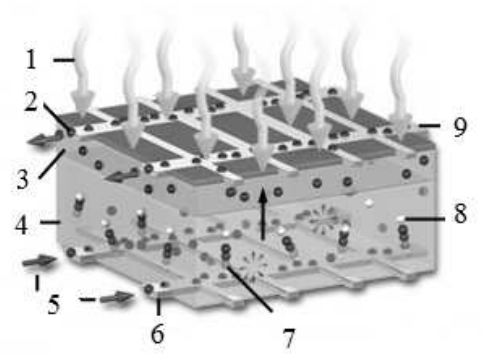
Neatkarīgi no fotoelementā izmantotā materiāla, saules starojuma pārveidošana elektriskajā enerģijā notiek pēc līdzīga principa. Elektriskā strāva ir lādiņnesnēju plūsma noslēgtā ķēdē, iepazīstoties ar fotoelementa darbību, mums galvenā interese ir par lādiņnesēju kustību pusvadītājā. Kā piemēru apskatīsim enerģijas pārveides procesu foto elementā, kas izgatavots no kristāliskā silīcija.

Normālā stāvoklī silīcija atomam ir 14 elektroni. Četri no tiem – valentie elektroni, tas ir tādi, kas var mijiedarboties ar citiem silīcija atomiem vai ar citu elementu atomiem. Tīrā silīcija kristālā, katrs atoms saistīts ar četriem citiem atomiem, katram ir pāris kopīgu elektronu: viens no tiem pieder pašam, bet otrs – kaimiņam.

Šī ir pietiekoši spēcīga elektrostatiskā saite starp elektronu un diviem atomiem, kam tas palīdz turēties kopā. Šī saite var tikt pārrauta, ja sistēmā pienāk enerģija no

ārpuses. Pie noteikta lieluma patērētās enerģijas elektrons pāriet uz augstāk stāvošo enerģētisko līmeni un nokļūst tā saucamajā vadīšanas zonā, kur var brīvi pārvietoties un piedalīties elektriskajā vadīšanā. Veicot tādu "lēcienu", elektrons atstāj savā vecajā vietā "caurumu". Atbrīvoto vietu var aizņemt kaimiņ elektrons, šajā gadījumā tas un caurums mainās vietām. No tā izriet, ka kristālā var pārvietoties kā elektroni, tā arī caurumi.

Foto elements pēc būtības ir diode ar lielu pusvadītāja kristāla virsmas laukumu. Diodē strāva, brīvo nesēju formā, nevar plūst vienā virzienā, toties brīvi plūst pretējā. Tas izskaidrojams ar pastāvīgā elektriskā lauka esamību diodē, pie nosacījuma, ka diode tiek veidota no diviem dažādiem pusvadītāju materiāliem. Tāds elektriskais lauks paātrina noteikta lādiņa nesēju kustību caur to, atgrūžot pretējā lādiņa nesēju.



1.15. att. **Fotoelementa darbības princips**: 1 – fotoni; 2 – elektroni; 3 – n-pusvadītājs; 4 – p–pusvadītājs; 5 – strāvas plūsma; 6 – pozitīvais kontakts „+"spaile; 7 – elektronu plūsma; 8 – caurumi; 9 – negatīvais kontakts „–" spaile.

Tieši šī parādība tiek izmantota foto elementā. Elements sastāv no dažādu pusvadītāju slāņiem, kas nodrošina pastāvīgā lauka uzturēšanu elementa iekšpusē, līdzīgu diodes laukam. Šo iebūvēto lauku "ievieto" cik vien var tuvāk tam laukam, kur notiek saules gaismas absorbēšana. Saules starojumam piemīt ievērojama enerģija, ap 1000 W uz apstarotās virsmas kvadrātmetru. Krītot uz pusvadītāja virsmu, fotoni var atstaroties, iziet tam cauri vai absorbēties.

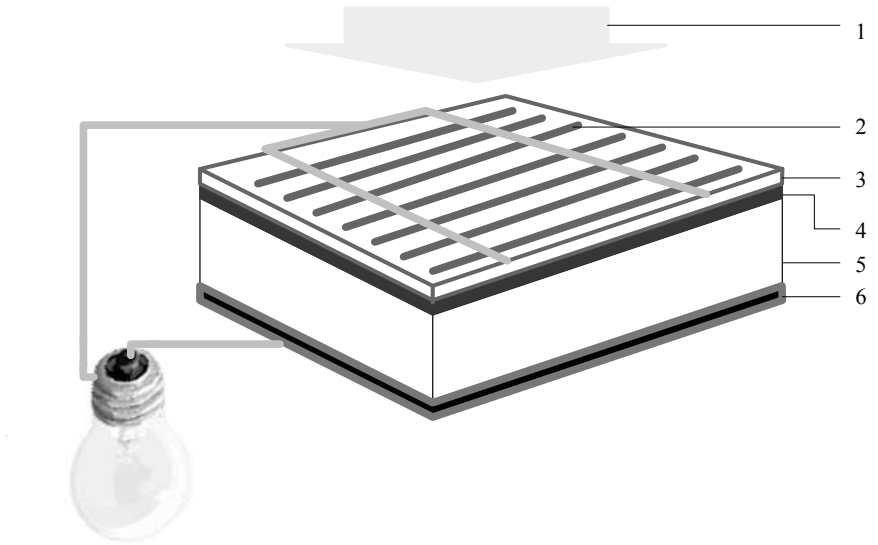
Fotons, kas absorbējas pusvadītājā, spēj radīt nelielu pusvadītāja temperatūras pieaugumu, bet, ja tam piemīt pietiekoša enerģija, tas spēj izsist elektronu no atoma, tā, ka tas nokļūst vadāmības zonā, un, līdz ar to pāriet brīvā stāvoklī. Piemēram, fotonam ar viļņa garumu mazāk kā 1,2 μm piemīt pietiekoši daudz enerģijas, lai veicinātu brīvā elektrona rašanos.

Elektrona pāreja vadāmības zonā sekmē caurumu rašanos, kas faktiski ir brīvais pozitīvais lādiņš, pēc savām īpašībām pretējs negatīvajam brīvajam lādiņam.

Pusvadītāja silīcijā caurums var brīvi pārvietoties tā, ka tuvākais sasaistītais elektrons spēj brīvi pārlēkt tā vietā, tādā veidā ļaujot caurumam būtībā pāriet iepriekšējā vietā.

Kad gaisma pusvadītājā absorbējas, rodas divi brīvi lādiņa nesēji: brīvais elektrons vadāmības zonā un brīvais caurums valentajā zonā (p–n pāreja). Galvenais fotoelementā notiekošajā procesā, pārveidojot gaismas enerģiju elektrībā ir tas, ka saules starojuma absorbcijas rezultātā radušies brīvie lādiņu nesēji, iebūvētā elektriskā lauka ietekmē, kustas pretējos virzienos. Kā piemēru var apskatīt kustību caurumiem un elektroniem, kas atrodas lauka tuvumā. Pieņemsim, ka lauks attiecībā pret šiem gaismas ģenerētajiem vadītājiem orientēts tā, ka sekmē elektronu kustību, bet atgrūž caurumus. Elektroni laukā paātrināsies, bet caurumi – paliks tās vietas tuvumā, kur tie ir radušies. Izejot cauri sprostslānim, brīvie elektroni vairs neatgriežas, jo lauks, līdzīgi diodes laukam, aizkavē to kustību atpakaļ.

Respektīvi, pie ilgstoša fotoelementa apgaismošanas, vienas zīmes lādiņi sakrāsies elementa virsdaļā, citas zīmes lādiņi – tā apakšējā daļā. Ja savieno augšējo un apakšējo elementa virsmu ar vadītāju, brīvie lādiņi sāks pārvietoties tajā, radot elektrisko strāvu. Šī pastāvīgā strāva pastāvēs tik ilgi, kamēr elements būs apgaismots.



1.16. att. **Fotoelementa shēma:**
1 – saules gaisma; 2 – virsējais kontaktslānis „–”; 3 – negatīvais slānis, n-tipa pusvadītājs; 4 – sprostslānis; 5 – pozitīvais slānis, p-tipa pusvadītājs; 6 – apakšējais kontaktslānis „+”.

Tipveida fotoelementam par balstu kalpo pamatne, kas veidota no stikla jeb plastmasas. Uz pamatnes uzklāj plānu kārtu metāla, kas darbojas kā apakšējais kontakts. Nākošā kārta ir no gaismas absorbējošā pusvadītāja. Virs tā – cits pusvadītājs, vai tas pats, bet modificēts. Divu pusvadītāju atdalošās virsmas tuvumā arī lokalizējas elementa darbībai, tik svarīgais, iebūvētais elektriskais lauks. Augšējais pusvadītājs bieži vien tiek veidots caurspīdīgs, lai saules gaisma varētu iziet tam cauri un absorbēties pēc iespējas tuvāk lauka lokalizācijas vietai. Pie šādas konstrukcijas palielinās iespēja, ka elektroni un caurumi, kas ģenerējās gaismas ietekmē, sasniegs lauku un sadalīsies.

Vēl viena fotoelementa komponente ir augšējais kontakts, kas izveidots ķemmes izskatā (skat. 1.16. att.). Ja augšējos un apakšējos kontaktus pievieno pie ārējās elektriskās ķēdes un apgaismo fotoelementu, tad ķēdē plūdīs elektriskā strāva, ko var izmantot praktiskiem mērķiem.

Lai izprastu, kā darbojas foto elements, nepieciešams iepazīt vēl virkni parādību. Eksistē divi procesi – dreifs un difūzija, no kurām atkarīgs, cik efektīvs ir gaismas ģenerēto brīvo lādiņnesēju ieguldījums elektriskās strāvas veidošanā. Brīvie lādiņnesēji var rasties gaismas absorbējošā elementa iedarbībā šaurajā lauka slānī, vai arī ārpus tā. Lādiņnesēji, kas ģenerē lauka iekšienē, kur slāņa biezums parasti ir ap 0,5 μm, samērā efektīvi sadalās spēcīga lauka ietekmē, kā rezultātā, tie lielā ātrumā virzās attiecīgi augšējā un apakšējā elementa daļā, tas ir dreifs.

Difūzais process attiecas uz brīvajiem lādiņnesējiem, kas ģenerējas ārpus lauka. Šis termins uzsver, ka noteiktā laika brīdī norādītie lādiņnesēji virzās nejauši. Pastāv varbūtība, ka jebkurš brīvais elektrons var satikties ar iebūvēto elektrisko lauku. Ja tas notiks, tad elektrons tiks novirzīts uz elementa augšdaļu un nesīs ieguldījumu elektriskās strāvas veidošanā. Augstas efektivitātes foto elementi tiek konstruēti tādējādi, lai šī varbūtība būtu vislielākā.

Fotoelementa biezumu lielā mērā nosaka materiālu cena un patēriņš tā pagatavošanai, un elementa spēja absorbēt tam virsū krītošo saules starojumu. Absorbēšanas spēju ietekmē divi faktori: aizliegtās zonas platums un absorbcijas koeficients. Šādas pusvadītāja zonas platums nosaka saules starojuma enerģijas lielumu, kuras ietekmē sākas gaismas absorbcija. Tādi materiāli kā silīcijs, gallija

arsenīds un citi, tiek izvēlēti saules bateriju pagatavošanai tieši tāpēc, ka tie sāk absorbēt gaismu ar pietiekoši lielu viļņa garumu. Respektīvi, tie var pārveidot elektrībā ievērojamo daļu pienākošā saules starojuma.

Bez tam, gaismas absorbēšana ar dažādu pusvadītāju materiālu palīdzību, sasniedz vislielāko kvantumu pie dažādu plākšņu biezumiem – no 100 līdz 1 μm un mazāk. Tā saucamie plānplākšņu saules elementi tiek izgatavoti no materiāliem, kas absorbē gaismu pie slāņa biezuma zem mikrometra, kas dod iespēju ievērojami samazināt materiālu patēriņu un elementu izgatavošanas izmaksas. Salīdzinājumam – kristāliskā silīcija plāksnei ir jābūt 50 μm biezai, lai absorbētu tik pat daudz saules gaismas, cik absorbē amorfā silīcija plāksne ar biezumu 1 μm vai vara–indija plāksne ar biezumu 0,1 μm.

Absorbēšanas spēju atšķirības ir izskaidrojamas ar atšķirībām pusvadītāju materiālu atomu uzbūvē. Daži materiāli, ko sauc par pusvadītājiem ar tiešajām optiskām pārejām, ir stipri absorbējoši, citi – pusvadītāji ar netiešām optiskām pārejām – absorbē vāji. Kristāliskais silīcijs atbilst pirmā tipa materiāliem. Plānplākšņu materiāli, tādi kā amorfais silīcijs vai vara–indija diselenīds – atbilst otrā tipa materiāliem. Pēdējiem valentā elektrona pāreja vadīšanas zonā prasa divu procesu vienlaicīgu norisi – gaismas absorbciju, un režģa vibrāciju pie noteiktas frekvences. Pirmā tipa materiāla gadījumā, pilnīgi pietiekošs nosacījums ir pati gaismas absorbēšana. Viena notikuma un divu vienlaicīgu notikumu varbūtības starpība izskaidro, kāpēc divu tipu materiāliem saules starojuma absorbcijas spējas atšķiras vairāk kā desmit reizes.

1.6.2. Fotonu absorbcija

Elektronu – caurumu pāru ģenerācija ir pamatprocess, kas notiek pusvadītājos elektromagnētiskā starojuma absorbcijas rezultātā. Fotonu absorbcijas rezultātā pie enerģijām, kas attiecināmas vienādojumā (1.31) dotajam nosacījumam, iespējama tiešā elektronu pāreja caur aizliegto zonu:

$$h\nu \geq E_g \qquad (1.31)$$

kur: h – Planka pastāvīgā konstante, $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J·s;

ν – starojuma frekvence;

E_g – aizliegtās zonas platums, fotoelementu pusvadītāju materiāliem $E_g \approx 1$ eV.

Tiešo pāreju gadījumā caur aizliegto zonu, pusvadītājiem (piemēram, GaAs) ir strauja absorbcijas joslas robeža un samērā lieli starojuma samazināšanas koeficienti, netiešo pāreju gadījumā (piemēram, Si) – mazāk strauja absorbcijas joslas robeža un mazāki starojuma samazināšanas koeficienti. Silīcijam absorbcijas joslas robeža atbilst:

$$\nu > \frac{E_g}{h} \approx \frac{(1{,}1eV)(1{,}6 \cdot 10^{-19} J \cdot eV^{-1})}{6{,}63 \cdot 10^{-34} J \cdot s} = 0{,}27 \cdot 10^{15} Hz \qquad (1.32)$$

$$\lambda \approx \frac{3{,}0 \cdot 10^{8} m \cdot s^{-1}}{0{,}27 \cdot 10^{15} s^{-1}} = 1{,}1 \mu m \qquad (1.33)$$

Saules starojums raksturojams ar augstu fotonu blīvumu ($\approx 3 \cdot 10^{21}$ fotons/m^{2}s), tāpēc tā absorbēšana ar pusvadītāju materiāliem var strauji palielināt elektronu – caurumu pāru veidošanās ātrumu (papildus termiskai ģenerācijai). Ja lādiņnesēju ģenerācija notiek p–n tipa pārejas tuvumā, tad kontakta lauka iedarbībā, notiek telpiska lādiņu sadalīšanās, un rodas foto elektrodzinējspēks un noslēgtajā ārējā ķēdē sāk plūst strāva. Tādā veidā fotonu nesēju ģenerācija, pie pusvadītāja apstarošanas ar saules starojumu, summējas ar vienmēr klātesošo termisko ģenerāciju. Tumsā, protams, pastāv tikai termiskā ģenerācija.

Fotonus absorbējošā p–n pāreja, ir līdzstrāvas enerģijas avots ar pozitīvu polu p tipa materiālā. Priekšnosacījumi saules enerģijas ģenerēšanai ar fotoelementu, ir līdzīgi priekšnosacījumiem diodei ar tiešo sprieguma nobīdi. Spriegums uz fotoelementa kontaktiem U_f mainīsies atkarībā no strāvas stipruma ārējā ķēdē robežās no 0 (īssavienojuma nosacījums) līdz U_{os} (atvērtā ķēde, $I = 0$). Maksimālo enerģiju ārējā slodze saņem, ja tās pretestība R_L vienāda ar iekšējo avota pretestību R_{int}. Taču fotoelementa iekšējo pretestību R_{int} nosaka fotonu plūsmas absorbcija, tāpēc labai enerģētiskai fotoelementa saskaņošanai ar slodzi nepieciešams, lai slodzes pretestība R_L mainītos saskaņā ar apstarojuma izmaiņu.

Foto elementa strāvu I var noteikt ar fotodiodes tumsas strāvas I_D un fotonu inducētās strāvas starpību I_L. Pie pretēja virziena nobīdes I_D ir negatīva un vienāda ar termiski ģenerējamo strāvu I_G. Strāvas I_L un I_G summējās, jo tās palielinās, palielinoties elektronu–caurumu pāru ģenerācijai:

$$I = I_L - I_D \tag{1.34}$$

Fotostrāvu nosaka p–n pārejas tuvumā absorbēto fotonu daudzumu. Pieņemsim, ka G_0 – pienākošā starojuma plūsmas blīvums, kas apstaro fotoelementa virsmu, tad laukuma vienībai dziļumā x absorbētā enerģija ir:

$$G = G_0 - G_x = G_0\left(1 - \exp\left[K(\nu)x\right]\right) \tag{1.35}$$

kur:

$$\frac{dG}{dx} = -K(\nu)G_x \tag{1.36}$$

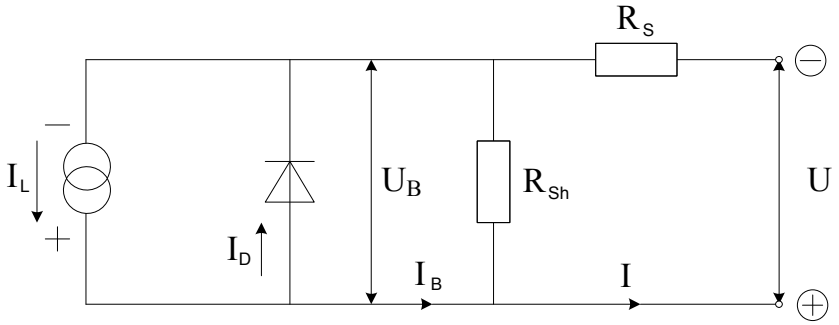
$K(\nu)$ – vājināšanās koeficients, ļoti atkarīgs no frekvences. Fotoni ar enerģiju, mazāku par aizliegtās zonas platumu, praktiski netiek absorbēti. Ja krītošā starojuma frekvence pārsniedz materiāla absorbcijas joslas robežu, tad dziļumā $1/K$ absorbējas 63 % enerģijas plūsmas, dziļumā $2/K$ – 86 %, bet dziļumā $3/K$ – 95 %. Silīcijam dziļums $2/K$ aptuveni vienāds 400 μm, šis lielums ierobežo saules elementa minimālo materiāla biezumu.

1.6.3. Ķēdes un slodzes fotoelektriskās īpašības

Fotoelementus, tāpat kā citus pārveidotājus, var izmantot elektroenerģijas ieguvei. Ekvivalentajā shēmā, 1.17. attēlā, parādīti ģenerējoša fotoelementa ekvivalentie pamatlielumi. Iekārtas pozitīvais strāvas I virziens, kopumā sakrīt ar strāvas virzienu fotoelementā.

Iegūtās enerģijas maksimums tiek sasniegts, ja izejas spriegumu U un strāvu I uztur tādus, lai to reizinājums sakristu ar fotoelementa maksimālās jaudas līkni, mainoties apstarojumam un slodzes pretestībai. Atšķirībā no tīri omiskas slodzes, kad sprieguma kritums slodzē atkarīgs no strāvas stipruma ķēdē, akumulatora baterijas gadījumā, mainoties strāvas stiprumam, potenciālu starpība paliek praktiski pastāvīga.

Tādēļ akumulatora baterijai var regulēt U un I tā, lai voltampēr raksturlīknē, tie atrastos maksimālās jaudas līknes tuvumā. Tai pašā laikā, baterijas EDS mainās atkarībā no uzlādes, maksimuma diapazonā ap 10 %. Pie jebkuras slodzes, ieskaitot akumulatoru baterijas, vislabākie slēguma parametri tiek sasniegti, izmantojot slodzes regulēšanas iekārtas, kas uztur ķēdē maksimālo iespējamo jaudu. Pēc būtības šīs iekārtas ir līdzstrāvas pārveidotāji. To izmantošana ķēdē ļauj sasniegt saules baterijas lietderīgu darbību pie slodzes pat līdz 95 % no maksimāli iespējamās izejas jaudas, ko var sasniegt pie atbilstošiem apgaismošanas nosacījumiem.



1.17. att. **Fotoelementa ekvivalentā shēma**

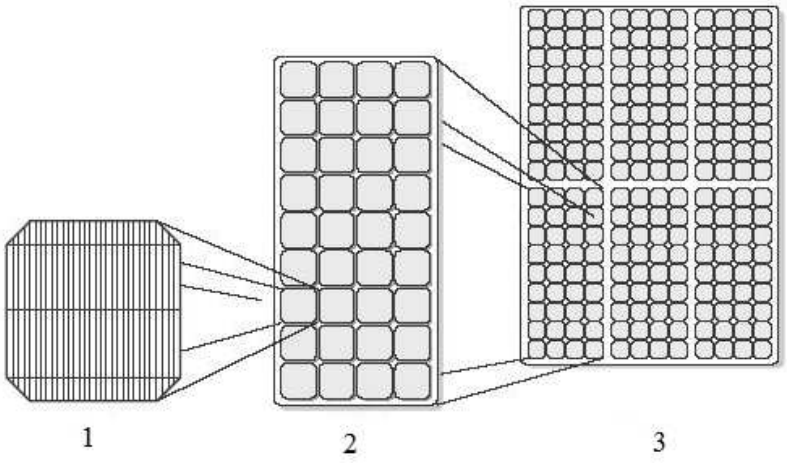
No ekvivalentās shēmas (skat. 1.17. att.) izriet:

$$I = I_L - I_D - \frac{U - IR_S}{R_{sh}} \qquad (1.37)$$

Analizējot fotoelementa ekvivalento shēmu, var secināt, ka augstu efektivitāti enerģijas iegūšanai var sasniegt, ja izpildās sekojoši nosacījumi:

1. Strāvai I_L jābūt maksimālai. To var realizēt, piemēram, samazinot līdz minimumam fotonu absorbēšanas zudumus potenciālu barjeras apgabala tuvumā, samazinot virsmas atstarošanās koeficientu, samazinot elektrisko kontaktu virsmas laukumu, paaugstinot donoru koncentrāciju un samazinot rekombinācijas centru koncentrāciju.
2. Tumsas strāvai I_D jābūt minimālai, piemēram, augstas donoru koncentrācijas rezultātā.

3. Pretestībai R_{sh} jābūt pēc iespējas augstākai. To var panākt, piemēram, rūpīgi apstrādājot fotoelementu virsmu.



1.18. att. **Tipisku foto elementu iekārtu shēmas:**
1 – šūna (elements); 2 – modulis; 3 – saules baterija.

4. Pretestībai R_s jābūt mazai. Tas iespējams, piemēram, ja ir mazi lādiņnesēju kustības attālumi līdz elektriskiem kontaktiem, un izmantojot kontaktus un slodzes ar zemu pretestību.
5. Lai sasniegtu optimālo jaudu, jāizpildās sekojošam nosacījumam:

$$R_L = R_{\text{int}} = \frac{U}{I} \qquad (1.38)$$

Saules baterija parasti ir veidota kā paralēli savienotu moduļu kombinācija. Katrs modulis, savukārt, ir virknē savienoto fotoelementu kombinācija. Bet katrs fotoelements sastāv no paralēli savienotiem virsmas elementiem (skat. 1.18. att.).

Maksimālais spriegums uz apgaismota moduļa spailēm vaļējai ķēdei ir aptuveni 15 V, maksimālā moduļa strāva 1,5 A. Var gadīties situācija, kad viens no fotoelementiem iziet no ierindas, vai iekārtas virsma netiek vienmērīgi apgaismota, dažādas gaismas koncentrācijas pakāpes rezultātā, vai ēnas gadījumā un EDS būs mazāks kā citiem paralēli slēgtajiem moduļiem. Šādā gadījumā fotoelements darbosies diodes režīmā, ar tiešo vai pretējo vadāmību, rezultātā tas var pārkarst. Lai apturētu šādu virknes caursiti, katrai fotoelementu ķēdes sērijai, nepieciešams uzstādīt

bloķējošas diodes. Pie pareizas ekspluatācijas, rūpnieciski ražoto saules bateriju bezavāriju darbs būs pietiekoši ilgs. Paredzamais darbmūžs ir vismaz 20 gadi.

1.19. att. **Viena no lielākajām SES, ASV**

1.6.4. Foto elementu efektivitāte

Foto elementu efektivitāti ierobežo dažāda veida zudumi, ir tādi no kuriem var izvairīties, bet citi ir neatņemama konstrukcijas sastāvdaļa. Daži efektivitāti ierobežojošie faktori ir acīmredzami, un tos var neatkarīgi kontrolēt, bet citi ir sarežģīti un nav kontrolējami, neiedarbojoties uz materiālu. Piemēram, piejaukumu koncentrācijas paaugstināšana materiālā var dot kā pozitīvu, tā arī negatīvu efektu.

1.2. tabulā uzskaitīti faktori, kas rada zudumus foto elementos ar silīcija p–n pāreju. Zudumi ir uzskaitīti virzienā no fotoelementa virsmas līdz pamatnei.

Kontaktu laukumu ierobežojums fotoelementa virsējā slānī (zudumi ap 1,6 %). No fotoelementa virsmas elektriskā strāva tiek savākta ar metālisku elementu režģa palīdzību. Šiem kontaktiem ir noteikts laukums un tie nosedz daļu aktīvās virsmas. Šo zudumu veidu ne vienmēr ņem vērā nosakot lietderības koeficientu.

Virsmas atstarošanās (zudumi ap 1 %). Ja neveic speciālus pasākumus, pienākošā saules starojuma atstarošanās koeficients no pusvadītāja virsmas, ir pietiekoši augsts, ap 40 %. Šo lielumu var samazināt līdz 3 % un zemāk, ja pusvadītāja virsmu pārklāj ar speciālu pārklājumu.

Apskatīsim sistēmu: gaiss – pārklājums – pusvadītājs ar gaismas laušanas koeficientiem n_0, n_1 un n_2. Dielektriskiem materiāliem atstarošanas koeficientu robežās starp divām vidēm nosaka sekojoši:

$$\rho_{ref} = \frac{(n_0 - n_1)^2}{(n_0 + n_1)^2} \qquad (1.39)$$

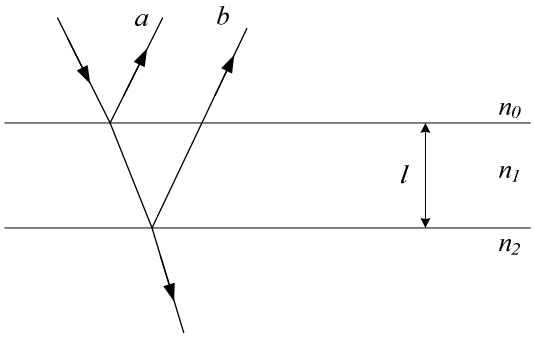
Pārejā no gaisa (n_0 = 1) pie kāda no materiāliem ar laušanas koeficientu n_1 = 1,6, atstarošanās koeficients būs ρ = 5,3 %. Gaismas laušanas koeficients pusvadītājam tiek raksturots ar kompleksu lielumu (jo tie daļēji absorbē starojumu), kas atkarīgs no starojuma frekvences, un aktīvā spektra robežās vidēji vienāds ar 3,5. Atstarošanās koeficients robežā gaiss – pusvadītājs, mainās no 34 % pie E_g = 1,1 eV, līdz 54 % pie E_g = 5 eV.

1.2. tabula

Silīcija foto elementu efektivitātes samazināšanās faktori

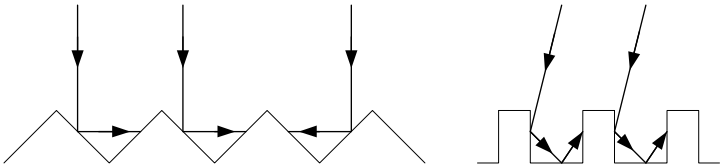
Enerģija, kas paliek pāri pēc zudumu uzskaites dotajā procesā, %	Jaudas zudumi, %	Efektivitāte	Piezīmes
77	23	0,77	Nav fotonu absorbcijas: $h\nu < E_g$
44	33	0,57	Fotonu enerģijas pārpalikums pāriet siltumā $h\nu - E_g$
43	1	0,99	Atstarošanās no virsmas
43	0,4	0,99	Kvantu lietderības koeficients
41	1,6	0,95	Kontaktu laukumu ierobežojums virsējā slānī
29	1,2	0,7	Potenciāla zudumi $eU_B<E_g$
25	4	0,87	Liekuma faktors – maksimālā jauda/$(I_{sc}U_{oc})$
23	2,4	0,9	Papildliekuma faktors A, rekombinācijas zudumi
22	0,6	0,97	Papildpretestība
21	0,2	0,99	Šuntējošā pretestība
20	–	–	Lietderīgā jauda

Plāna pārklājuma kārta (ar biezumu *l*), kura laušanas koeficienta vērtība ir starp gaisa koeficienta un pusvadītāja koeficienta vērtībām, ievērojami samazina atstarošanu (skat. 1.20. att.). Ja pie normālas staru krišanas atstarotā stara galvenajiem pamatlielumiem a un b, ir vienāda intensitāte, un, fāzē tie atšķiras par π (staru krišanas starpība ir vienāda ar 0,5λ). Lai izpildītos šis nosacījums, atstarošanās koeficientiem no katras virsmas ir jābūt vienādiem, tā kā $n_1 = \sqrt{(n_0 n_2)}$, bet kārtas biezumam būtu jābūt vienādam ar $l = \lambda/(4n_1)$. Pastāv tikai viens viļņa garums, kuram šie nosacījumi izpildās pilnībā, taču atstarošanās koeficients samazinās plašā spektra diapazonā. Silīcijam ar kārtas biezumu l = 0,08 μm, ar laušanas koeficientu n = 1,9, atstarošanās koeficients samazinās līdz 6 %. Daudzslāņainie pārklājumi ļauj samazināt šo koeficientu līdz pat 3 % un mazāk.



1.20. att. **Staru kustība plānajā atstarojošā kārtā**

Atstarošanās zudumus var samazināt, ja pusvadītāja virsmai izveido tādu profilu, ka arī atstarotais stars absorbēsies (skat. 1.21. att.).



1.21. att. **Virsmu tipi ar paaugstinātu absorbēšanās spēju:**
a) teksturētā, b) strukturētā.

Fotoni ar enerģijas daudzumu, mazāku par aizliegtās zonas platumu (zudumi ap 23 %). Fotoni ar enerģijas daudzumu $h\nu < E_g$ nevar piedalīties elektriskās strāvas ģenerēšanā. Silīcijam ar E_g = 1,1 eV neaktīvie viļņu garumi ($\lambda \geq 1{,}1$ μm) sastāda 23 % no apstarojuma. Šo fotonu absorbcija sasilda fotoelementu, rezultātā sistēmas efektivitāte samazinās vēl vairāk, jo pusvadītājam sasilstot pasliktinās daudzi parametri. Teorētiski šos fotonus var atdalīt ar filtru palīdzību. Taču enerģētiski visefektīvāk būtu lieko siltumu izmantot kombinētā elektro un siltuma energosistēmā.

Fotoni ar lieko enerģiju (zudumi ap 33 %). Aktīvo fotonu enerģijas pārpalikums ($h\nu - E_g$) arī pāriet siltumā.

Kvantu efektivitāte (zudumi ap 0,4 %). Kvantu efektivitāte parasti ir ļoti augsta, tā raksturo absorbēto fotonu daļu, kas piedalās elektronu – caurumu pāru ģenerācijā. Fotoelementu izstrādē nepieciešams paredzēt materiālu ar pietiekošu biezumu tā, lai tas absorbētu vismaz 95 % pienākošā starojuma, kā parādīts 1.6.2. nodaļā. Pārklājot aizmugurējo fotoelementa pusi ar atstarojošo kārtu, rodas iespēja atgriezt starojumu atkārtotam ceļam caur absorbējošo materiālu.

Strāvas ģenerācijas efektivitāte. Iepriekš aprakstītās zudumu komponentes nosaka strāvas ģenerācijas efektivitāti. Tā raksturo lādiņu veidošanās un savākšanas efektivitāti. Šī lietderības koeficienta komponente nosaka elektronu – caurumu pāru daļu, kas rodas starojuma plūsmas ietekmē. Pie foto elementa lietderības koeficienta 10 % strāvas ģenerācijas efektivitāte parasti ir ap 0,7. Paaugstinot šo parametru līdz 0,9, tiek paaugstināts lietderības koeficients līdz 20 % un augstāk, tāpēc strāvas ģenerācijas efektivitātes paaugstināšana ir pamatmērķis foto elementu uzlabošanā.

Pastāv dažādas iespējas, lai mainītu šo parametru. Viena no pusvadītāja fotoelementa raksturlielumu uzlabošanas iespējām, par ko vēl netika minēts, ir papildpotenciāla barjeras formēšana metāliska kontakta aizmugurējās daļas tuvumā. Aiz p – n pārejas tiek formēta papildus kārta ar paaugstinātu piejaukumu koncentrāciju (piemēram, lai izveidotu papildus barjeru ar aptuveni 200 kV/m, aiz p tipa pusvadītāja kārtas tiek veidota kārta p^+ ar biezumu 1 μm). Papildus elektroni, kas rodas p – kārtā, šīs p^+ apgabala tuvumā, „atstarojas" ar potenciāla gradientu pamat p–n pārejas virzienā

ātrāk, nekā difundē pretī potenciāla gradientam pie metāliska kontakta no elementa aizmugures puses. Tā rezultātā, rekombinācijas ātrums aizmugurējā kontaktā samazinās. Šādi diodveidīgie slāņi var tikt izveidoti arī virsējā kārtā (piemēram, n^+ uz n pusvadītāja kārtas), lai sasniegtu analoģisku efektu caurumiem. Rezultātā, uztvērēj virsmas absorbcijas koeficients nedaudz pieaug.

Potenciāla zudumi (ap 20 %). Katrs absorbētais fotons veido elektronu – caurumu pāri, ar potenciālu starpību E_g/e (silīcijam 1,1 V). Tomēr tikai daļa šī potenciāla U_B piedalās EDS veidošanā ārējā ķēdē. Potenciāla zudumus raksturo lielums:

$$F_v = \frac{eU_B}{E_g} \qquad (1.40)$$

Silīcija elementos F_v mainās no 0,6 (pie īpatnējās pretestības 0,01 Ωm) līdz 0,5 (pie īpatnējās pretestības 0,1 Ωm), attiecīgi U_B mainās no 0,66 līdz 0,55 V.

EDS zudumi ($\varphi_n + \varphi_p$) eksistē, jo atvērtajā ķēdē Fermī līmenis gar pāreju izlīdzinās ar donoru un akceptoru līmeņiem, kuri atpaliek no vadamības un valences zonas robežas attiecīgi par φ_n un φ_p. Piemaisījumu koncentrācijas palielināšana noved pie F_v paaugstināšanas (silīcija elementiem ar īpatnējo pretestību 0,01 Ωm ir lielākas U_B un U_{oc} vērtības, nekā ar īpatnējo pretestību 0,1 Ωm). Maksimāli iespējamā piemaisījumu koncentrācija Si, ir apmēram 10^{22} m^{-3} materiālam ar īpatnējo pretestību 0,01 Ωm. Fotoelementiem no GaAs $F_v \approx 0{,}8$.

Siltuma izdalīšanās lādiņnesējiem plūstot caur materiāla iekšējo pretestību var tikt ievērtēta potenciāla zudumos.

Raksturlīknes liekuma faktors F_c (tāpat saukts par piesātinājuma parametru) (zudumi aptuveni 4%). Foto elementa voltampēru raksturlīkne ir stipri atkarīga no p – n pārejas raksturlīknes. Ja spriegums uz saules elementa izejas pieaug līdz maksimālajam vaļējas ķēdes spriegumam U_{oc}, tad palielinās tiešā nobīde, kas notiek pie pārejas, kā rezultātā aug iekšēja rekombinācijas strāva I_r caur p - n pāreju. Veidojas piesātinājuma efekts. Šis efekts ir galvenais zudumu cēlonis sistēmā. Tā kā fotoelementa voltampēru raksturlīkne ir eksponenciāla, maksimālā jauda P_{max} ir mazāka par strāvas I_{sc} un sprieguma U_{oc} reizinājumu.

Liekuma faktors F_c (piesātinājuma parametrs), vienāds ar:

$$F_c = \frac{P_{max}}{I_{sc} U_{oc}} . \qquad (1.41)$$

Silīcijam maksimālā vērtība $F_c = 0{,}88$.

Raksturlīknes liekuma papildus faktors (zudumi aptuveni 5 %). Reālu foto elementu voltampēru raksturlīkni apraksta sakarība:

$$I = I_0 \exp\left[\frac{eU}{AkT} - 1\right] - I_L \qquad (1.42)$$

kur: silīcijam $I_0 \approx 10^{-7}$ A/m^2;

k – Bolcmaņa konstante;

T – temperatūra;

e – elektrona un cauruma lādiņš, e = 1,6·10^{-19};

A – korekcijas koeficients;

I_L – fotonu inducētā strāva, A.

Koeficenta A ieviešana *(*A > 2 daudziem rūpnieciskiem fotoelementiem) saistīta ar rekombināciju pastiprināšanos pārejas zonā, kas noved pie U_{os} un I_0 izmaiņām, tādēļ izejošās jaudas optimums realizēsies tikai pie A = 1.

Iepriekš jau tika minēts par iespēju pazemināt rekombinācijas ātrumu, veidojot papildu potenciālu barjeru. Fotoelementos rekombinācijas ātrumu var arī samazināt, izpildot sekojošos nosacījumus:

1. Difūzijas ceļa garums ir liels (Si > 50 ÷ 100 μm). Tas prasa lielu darbības laiku lādiņa nesējiem (Si – līdz 100 μs).
2. Pāreja ir novietota virsmas tuvumā. Vēlams novietot pāreju 0,15 μm robežās no virsmas, kā „violetajos" elementos, nekā līdz 0,35 μm, kā tas ir silīcija elementiem.
3. Materiālā ir maz defektu, kas nav saistīti ar piemaisījuma esamību.

Virspusējas rekombinācijas procesi ir arī atkarīgi no defektiem, kuri var rasties griežot kristālu vai uzputinot.

Papildpretestība (zudumi aptuveni 0,3 %). Foto elementos lādiņnesēji (no visa materiāla apjoma) difundē pie kontaktu vadītājiem. Aizmugurējās daļas kontakts ir

izgtavots pa visu elementa virsmu, un tā ieguldījums pretestības veidošanā būs ļoti mazs. Bet augšējā elementa virsma ir maksimāli jāapstaro ar Sauli, tādēļ laukums, kas ir aizklāts ar kontaktu virsmām pēc iespējas jāsamazina. Rezultātā palielinās lādiņnesēju noskrējiena garums un rodas papildpretestība. Uz doto brīdi ir sasniegti nozīmīgi panākumi šo kontaktu virsmas izgatavošanā un optimālā izvietojumā. Papildpretestība augšējai virsmai ir pazemināta līdz 0,1 Ω elementos, kuru pretestība ir 20 Ω pie maksimālās jaudas.

Šuntējošā pretestība (zudumi ir nenozīmīgi, aptuveni 0,1 %). Šuntējošās pretestības rašanās cēlonis ir fotoelementu virsmu un struktūras defekti. Mūsdienu tehnoloģija ļauj izvairīties no šo defektu rašanās un padarīt to ietekmi nenozīmīgu. Šai sakarā, monokristāliskā silīcija elementiem šuntējošās pretestības zudumus var neņemt vērā. Polikristāliskos elementos šuntējošo pretestību varbūtība ir lielāka.

Lietderīgā jauda (silīcija elementiem no 18 līdz 22 %). 1.2. tabulā ir parādīts fotoelementa izstrādās jaudas sadalījums un lietderības koeficients, ievērojot visus zudumus. Pieņemot, ka fotoelements tiek pilnīgi apstarots, slodze ir optimāli saskaņota un tiek iegūta maksimālā jauda.

Autoru vairākums paredz, ka maksimālais lietderības koeficients silīcija foto elementiem var sasniegt 22–25 %, elementiem ar heteropārejām vai pakāpienveida pārejām – 30 %, sistēmās ar enerģijas koncentrāciju un citiem papildinājumiem – līdz 40 %. Jāatzīmē, ka pienākošā saules starojuma spektrs uzstāda absolūtus efektivitātes ierobežojumus. Silīcija fotoelementiem maksimālais, teorētiski iespējamais, lietderības koeficients nepārsniedz 47 %.

1.6.5. Foto elementu konstrukcija

Ir pazīstami daudzi fotoelementu konstrukcijas un rūpnieciskās izgatavošanas tehnoloģiju varianti. Aprakstīsim vienu no šīm konstrukcijām – standarta monokristālisko silīcija fotoelementu. Fotoelementa kopskats ir parādīts 1.15. un 1.16. attēlos.

GALVENĀS TEHNISKĀS PRASĪBAS

1. Izejmateriālam jābūt ķīmiski ļoti tīram, ar noturīgām īpašībām.

2. Fotoelementus ir jāražo lielā daudzumā ar minimālām izmaksām. Nepieciešams nodrošināt augstu izgatavošanas precizitāti un kvalitātes kontroli.
3. Foto elementiem, strādājot agresīvajos apkārtējas vides iedarbības apstākļos, jābūt ar darbmūžu ne mazāk kā 20 gadi. Jāņem vērā, ka pat bez saules starojuma, fotoelementa darba temperatūra var mainīties diapazonā no –30 līdz +200 °C. Elektriskajiem kontaktiem jābūt stabiliem un aizsargātiem pret visiem korozijas veidiem. Ierīcei jābūt pasargātai no ūdens iedarbības.
4. Konstrukcijai jābūt tādai, kas nepieļauj visas sistēmas iziešanu no ierindas gadījumā, ja viens no fotoelementiem tiek sabojāts. Lai to nodrošinātu, izmanto elementu virknes un paralēlos slēgumus, kas izslēdz iespēja citu elementu iziešanai no ierindas, ja ir bojāts kāds no elementiem.
5. Saliekamajiem saules bateriju moduļiem jābūt piemērotiem transportēšanai pat grūti pieejamos un attālos rajonos.

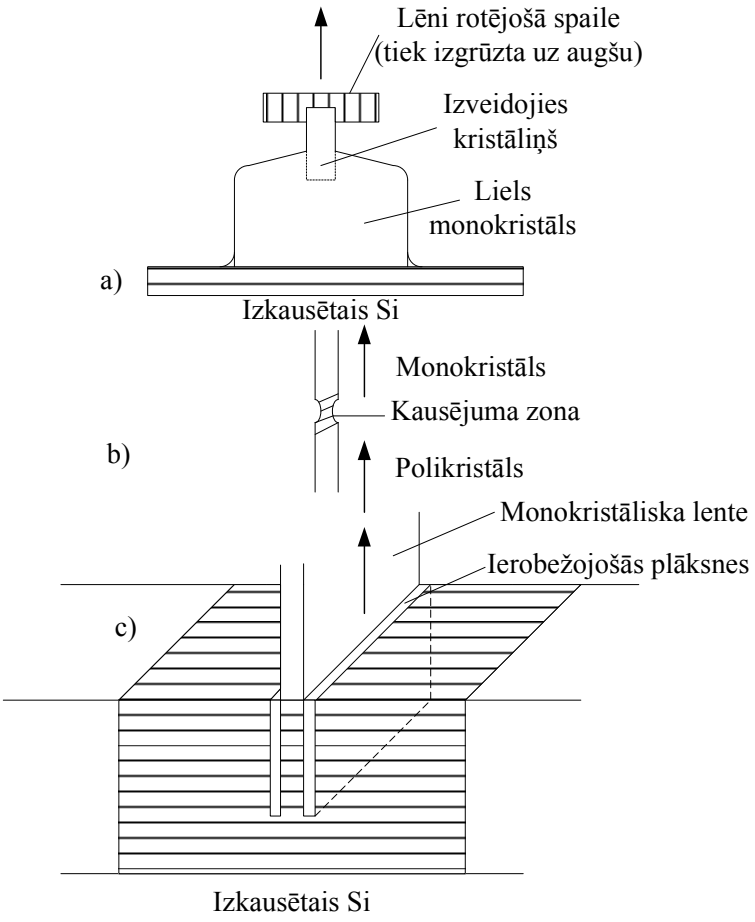
KRISTĀLU AUDZĒŠANA

Monokristālu iegūšanai izmanto ķīmiski ļoti tīras silīcija polikristālu sagataves. Piejaukumu koncentrācija kristāliskajā materiālā nedrīkst pārsniegt 1 atoms uz 10^9 atomiem, tas ir 10^{18} atomi uz 1 m^3 materiāla. Pusvadītāju ražošanas industrijā, kristāliskā silīcija ieguvei izmanto vairākas tehnoloģijas, iepazīsimies ar plāšāk izmantotajām metodēm.

Čohraļska metode. Šī labi atstrādātā monokristālu audzēšanas tehnika, sastāv no neliela kristāla iegremdēšanas izkausētajā materiālā (skat. 1.22. att. (a)). Piemaisījumi (piemēram, bors ir akceptors, lai iegūtu p–tipa monokristālu) tiek piejaukti kausējumā. Kristāls, kurš pakāpeniski izaug, izstumjas no kausējuma. Šāda kristāla diametrs var sasniegt 15 cm. Monokristāls, kurš ir izaudzēts tādā veidā (kā arī citā veidā), pēc tam tiek sagriezts daļās ar biezumu apmēram 300 μm. Pie tam tiek zaudēts aptuveni 40–50 % no kristāliskā materiāla, kas padara monokristālu audzēšanu par nepietiekami efektīvu.

Zonu kausēšana (rekristalizācija). Polikristāliskam materiālam piešķir stieņa formu. Stieni kausē, kausējuma zonu silda ar augstfrekvences strāvu vai ar lāzera palīdzību (skat. 1.22. att. (b)). Šis process attīra materiālu, un formē monokristālu. Monokristālu nepieciešams sagriezt un apstrādāt, tāpat kā citos veidos.

Lenšu metode. Šī metode izslēdz kristāla plāksnīšu griešanu un neizbēgamu pārpalikumu rašanos, jo uzreiz tiek izaudzēta plāna monokristāla lente ar platumu līdz 10 cm un 300 μm biezumu (skat. 1.22. att. (c)). Lente var glabāties satīta liela diametra rullī. Fotoelementu izgatavošanai, no tās nogriež nepieciešamā izmēra sagataves.



1.22. att. **Monokristālu audzēšanas metodes:**
a) Čohraļska metode, b) zonu rekristalizācija jeb uzsilde ar lāzeru,
c) lenšu metode.

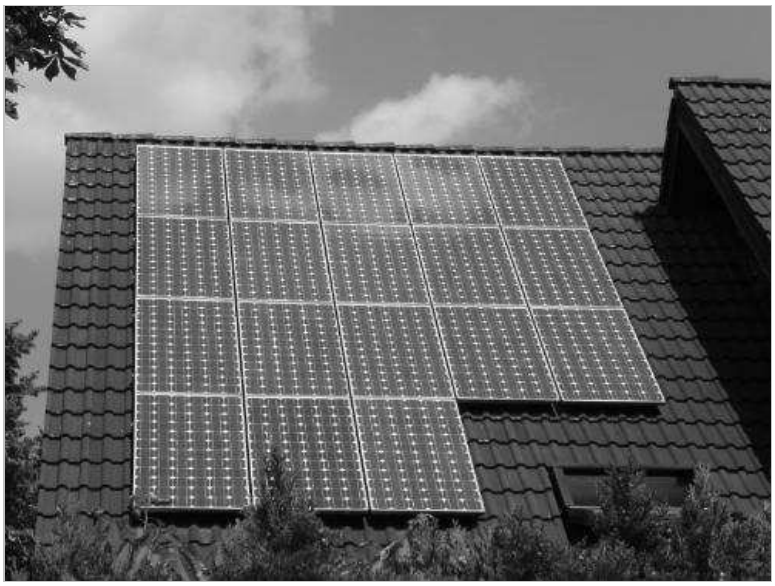
Uzputināšana vakuumā. Šo metodi var izmantot dažādās fotoelementa izgatavošanas stadijās, piemēram, lai formētu virspusēju metāla kārtu Šotkija diodēm. Silīcija vakuuma uzputināšana ir sarežģīta un ne vienmēr mēdz būt sekmīga.

Lējumi. Šajā metodē rodas polikristālisks materiāls. Procesa lētums var kompensēt rezultātā iegūto fotoelementu zemo efektivitāti.

PLĀKSNĪŠU APSTRĀDE

Plāksnītes ar 300–400 μm biezumu ķīmiski kodina. Plāno virsējo n – tipa pusvadītāja materiāla kārtiņu veido ar difūzijas procesu pievienojot silīcijam donoru (piemēram, fosfora) atomus. Viens no paņēmieniem, kā pievienot donorus plāksnītes virskārtai, ir plāksnīti sakarsējot līdz 1000 °C vakuumkamerā, kurā pievada P_2O_5, bet visbiežāk izmanto plāksnītes karsēšanu slāpekļa atmosfērā ar $POCl_3$ piejaukumu.

Elektrisko kontaktu sieta noformēšanai tiek izmantota fotolitogrāfijas metode. Lai veidotu zemomīgu kontaktu ar silīciju, pirmo uzklāj titānu, pēc tam ļoti plānu pallādija kārtiņu, lai novērstu ķīmisku titāna mijiedarbību ar sudrabu. Sudraba kārtiņa ir pēdējā, tā veido strāvu vadošu sietu. Citas metodes pamatojas uz iespied montāžas un galvanostēģijas tehnoloģijām.



1.23. att. **Saules bateriju izvietojums uz mājas jumta**

Pēdējās vakuumu iztvaikošanas procesā tiek uzklātas pretatstarojošās kārtas. Alumīnija difūzijas procesā pie aizmugurējās p–tipa materiāla virsmas izveidojas papildu potenciāla p^+ barjera. Uz tās tiek uzklāts elektrisks metālisks kontakts relatīvi biezas ārējas kārtas veidā. Teksturētās pretatstarojošās virsmas iegūst ķīmiski kodinot.

MODUĻI UN ĶĒDES

Atsevišķus fotoelementus ar laukumu apmēram 10×10 cm^2 apvieno moduļos pa 30 elementiem. Katrs modulis parasti sastāv no trīs līdz piecām virknē savienotām fotoelementu kolonnām. Tāda ierīce rada EDS ap 15 V, kas pilnīgi pietiekams 12 V akumulatora bateriju uzlādei. Labi, ja akumulatora baterija ir speciāli izgatavota izmantošanai komplektā ar fotoelementiem. Atkarībā no nepieciešamā saules baterijas izejas sprieguma, var izmantot arī citus fotoelementu slēgumus un moduļu konfigurāciju (skat. 1.23. att.).

Blīvi saliekot apaļas formas fotoelementus, tiek pazaudēts līdz 15 % no moduļa laukuma. Fotoelementus novieto inertā pildvielā starp caurspīdīgo priekšējo vāku, kas parasti pagatavots no plastikas, vai stikla, kas nelaiž cauri ultravioletu starojumu, un plāksni no aizmugurējās malas, kurai jābūt pietiekami izturīgai un ar zemu termisku pretestību. Vākam ir jābūt hermētiski aizlodētam un ūdensnecaurlaidīgam pie jebkurām ārējām iedarbēm, ieskaitot termiskas slodzes.

1.24.att. **Dārza lampa ar saules bateriju**

Izplatītākie no saules fotoelementiem, kurus izgatavo rūpniecība, ir plakani plākšņveida silīcija elementi. Eksistē tāpat daudzveidīgas alternatīvas konstrukcijas,

kuras izstrādātas efektivitātes paaugstināšanai un saražotās enerģijas izmaksu pazemināšanai, samazinot saules baterijas izmaksu.

Mūsdienās saules baterijām tiek atrastas daudz dažādas pielietošanas iespējas. Piemēram, piemājas teritorijas apgaismošanai ar visāda veida dizaina lampām, laternām. Dārza lampa ar saules bateriju ir parādīta 1.24. attēlā. Šī dārza lampa sastāv no LED lampas, saules baterijas, neliela uzlādējamā akumulatoriņa un fotoreleja. Tā var saturēt NiCd AA baterijas, 2 V 40 mA saules bateriju un 12 000 – 15 000 mcd LED lampiņu. To var izmantot iebraucamā ceļa, dārza apgaismošanai, kā arī mājas iekšpusē kā galda lampu lasīšanai. Akumulatorā uzkrātā enerģija šāda veida lampai ļauj degt no 8 līdz 10 stundām.

Interesants saules bateriju izmantošanas veids ir izgudrots Jaunzēlandē. Cepures nagā iebūvētas divas LED lampiņas, un uz tā izvietots neliels fotoelements. Dienas laikā, niķeļa baterijas akumulē saules enerģiju, bet vakara stundās lampiņas apgaismo mājupceļu (skat. 1.25. att.).

Eiropā un citviet, jau sen tiek pielietotas ceļa trajektoriju apgaismojošas lampiņas, kuras var apskatīt 1.26. attēlā. Plaši tiek ieviestas arī ielu apgaismojuma laternas ar saules baterijām.

1.25. att. **Cepure ar saules bateriju**

1.26. att. **Ceļa trajektoriju apgaismojošās lampiņas**

1.27. att. **Lidaparāts un automašīna, kuri darbojas no Saules enerģijas**

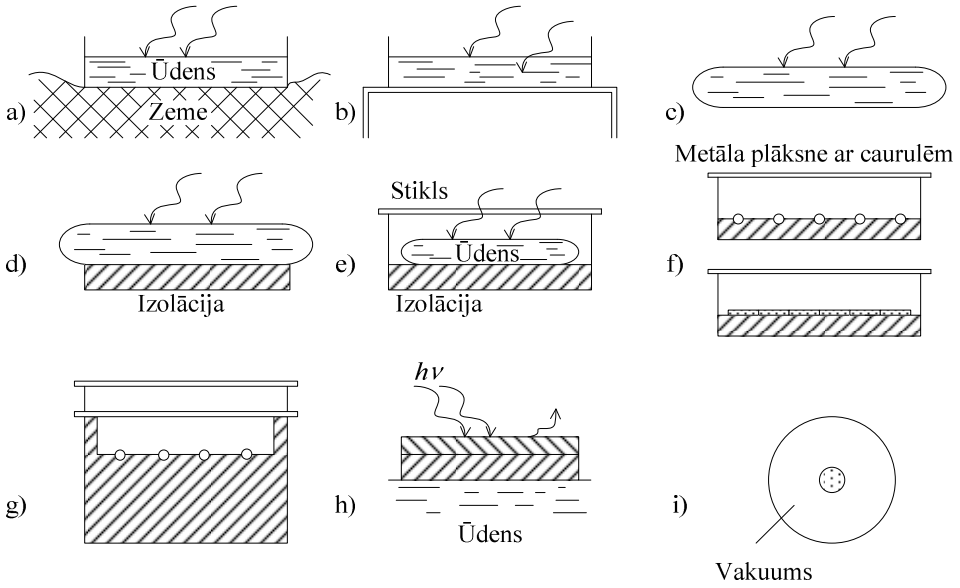
Saules bateriju pielietošanai nav robežu. 1990. gadā, lidaparāts, kas tika aprīkots ar Saules baterijām, šķērsoja Amerikas Savienotās Valstis. Austrālijā tiek konstruētas automašīnas, vadāmas vienīgi no saules enerģijas. Tās gan nav tik ātras un jaudīgas, bet, toties videi draudzīgas, kā arī, jāpiemin – enerģija, ko iegūst no Saules ir par brīvu.

1.7. Ūdens sildīšana ar saules starojumu

Saules enerģiju plaši izmanto gaisa un ūdens uzsildīšanai. Rajonos ar aukstu klimatu ir nepieciešama dzīvojamo ēku apkure un karstā ūdens apgāde. Rūpniecībā tāpat ir nepieciešams liels daudzums karstā ūdens. Austrālijā, piemēram, šķidruma uzsildīšanai līdz temperatūrām zemāk par 100 °C tiek patērēts gandrīz 20 % enerģijas. Sakarā ar to daudzās valstīs, īpaši Austrālijā, Izraēlā, ASV, Japāna, kā arī Eiropas valstīs, aktīvi paplašinās saules siltuma sistēmu ražošana.

Saules enerģija tiek izmantota ūdens un gaisa sildītājos, saules destilētājos, graudu žāvētavās, saules torņos (torņu tipa saules enerģētiskās iekārtas). Šīs sistēmas ir apskatītas 1.10. nodaļā.

Dotajā nodaļā ir aplūkotas saules siltuma sistēmas, kas ir shematiski parādītas 1.28. attēlā. Saules starojuma uztvērēji sakārtoti secībā pēc to efektivitātes. Saules siltuma sistēmas galvenais elements ir uztvērējs, kurā notiek saules starojuma absorbēšana un enerģijas pārvade šķidrumam.



1.28. att. **Saules starojuma uztvērēji efektivitātes un izmaksu pieauguma secībā**

1.28. attēlā parādīti saules starojuma uztvērēji: (a) – uz zemes virsmas novietots atklāts rezervuārs, kur siltums viegli nonāk zemē; (b) – atklāts rezervuārs, kas izolēts no zemes. Tīrs ūdens nav labs absorbētājs. Iztvaikošanas dēļ veidojas ievērojami siltuma zudumi; (c) – melns rezervuārs. To plaši izmanto Japānā ūdens uzsildīšanai ūdens vannām. Tas tiek raksturots ar lieliem siltuma zudumiem, it sevišķi vējainos laika apstākļos, ar tā palīdzību nav iespējams saglabāt silto ūdeni naktī; (d) – melns rezervuārs ar no zemes izolētu apakšējo slāni. Siltuma zudumi tajā notiek augšējā slānī, tādēļ siltuma zudumi tikai divreiz mazāki nekā iepriekšējā gadījumā; (e) – melnais rezervuārs konteinerī ar stikla vāku. Polietilēna vāku izmantošana ir lētāka, bet tie saules starojuma ietekmē ātri sabrūk; (f) – metāla plāksne ar caurulēm un aizpildītu plakano tvertni. Standarta rūpnieciskais uztvērējs, uzsildāmais šķidrums plūst caur uztvērēju, un tiek uzkrāts speciālā rezervuārā. Ar ūdeni aizpildīta plāksne ir daudz efektīvāka par plāksni ar caurulēm; (g) – plākšņveida uztvērējs ar dubulto stiklojumu; (f) – plākšņveida uztvērējs ar labāku izolāciju, šķidrumu var uzsildīt līdz 100 °C. Stikls, kas nesatur dzelzi, mazāk absorbē, nekā logu stikls; (h) – selektīvā virsma, radiācijas zudumi zemāki (absorbētais saules starojums, pavājinātais

starojums); (i) – vakuuma uztvērējs. Siltumnesēja šķidrums iekšējā melnajā caurulē, arējā caurule ir no stikla. Caur ārējo virsmu nav konvektīvo zudumu.

Plakanie uztvērēji savāc gan tiešo, gan izkliedēto starojumu, un tādēļ tie var darboties arī mākoņainos laika apstākļos. Saskaņā ar to, kā arī ievērojot to nosacīti nelielās izmaksas, plakanie uztvērēji tiek izmantoti šķidrumu uzsildīšanai līdz temperatūrām zemākām par 100 °C.

Vienkārši saules starojuma uztvērēji (skat. 1.28. att. (a – e)) silda visu šķidruma apjomu vienlaicīgi. Sarežģītākas konstrukcijas uztvērēji (skat. 1.28. att. (f – i)) noteiktā laikā uzsilda tikai nelielu šķidruma daudzumu, kurš pēc tam, uzkrājas atsevišķā rezervuārā, tas kopumā ļauj samazināt sistēmas siltuma zudumus.

1.7.1. Atklātie sildītāji

Atvērtais rezervuārs uz virszemes. 1.28. attēlā (a), ir parādīts vienkāršākais iespējamais ūdens sildītājs, piemēram, baseins. Tilpums, kas ir piepildīts ar ūdeni, sasilst saules starojuma iedarbības rezultātā, tomēr ūdens temperatūras paaugstināšana ir ierobežota, jo siltums viegli tiek nodots zemei.

Atklātais rezervuārs, kas ir izolēts no zemes (skat. 1.28. att. (b)). Siltuma zudumi ir mazāki salīdzinājumā ar iepriekšējo gadījumu, temperatūras paaugstināšana ir ierobežota zemā ūdens absorbcijas koeficenta dēļ ($\alpha = 1 - \tau \ll 1$). Bez tam, nozīmīgā daļa absorbētā siltuma pāriet ūdens iztvaikošanā, kas tāpat traucē temperatūras paaugstināšanu.

Melns rezervuārs (skat. 1.28. att. (c)). Šajā gadījumā šķidrums ir noslēgtā tvertnē ar melnu matētu virsmu, kas parasti novietojama uz ēkas jumta. Siltuma zudumi iztvaikošanai dotajā konstrukcijā ir pielīdzināmi nullei. Melna tvertnes virsma absorbē starojumu daudz labāk, nekā caurspīdīgs ūdens (parasti $\alpha = 0.9$). Absorbētā siltuma daļa tiek nodota šķidrumam.

Šāda tipa sildītāji nav dārgi, tie ir vienkārši izgatavojami un ļauj uzsildīt ūdeni līdz temperatūrai tuvu 45 °C. Tādus sildītājus plaši pielieto Japānā, kur ar to palīdzību uzsilda ūdeni vakara vannām. Sildītāja parametrus ierobežo siltuma zudumu palielināšanās vējainos laika apstākļos. Cita problēma ir tā, ka daudzi lēti melni

ūdensnecaurlaidīgi materiāli (piemēram, vecas automobiļu riepas, polietilēna tvertnes) ātri noārdās saulē, un pēc dažiem mēnešiem sāk laist cauri ūdeni. Tomēr dažos gadījumos var izrādīties izdevīgāk periodiski aizstāt vecas tvertnes ar jaunām, nekā izmantot sarežģītākas konstrukcijas. Jāatzīmē, ka materiālam, no kura ir pagatavota sildītāja tvertne, nav obligāti jābūt melnā krāsā, tam pietiek būt ar melnu segumu.

Melns rezervuārs ar izolētu apakšējo slāni. Siltuma zudumus sistēmā, kas ir attēlota 1.28. att. (c), var samazināt gandrīz 2 reizes, ja izolē uztvērēja apakšējo slāni (skat. 1.28. att. (d)). Kā izolāciju var izmantot praktiski jebkuru porainu materiālu, kura poru izmēru nepārsniedz 1 mm, piemēram, stiklšķiedra, putu polistirols, kokšķiedra, utt. Šo materiālu siltumvadītspēja ir salīdzināma ar gaisa siltumvadītspēju ($\lambda \sim 0{,}03$ W/m*K). Poru izmēriem nevajadzētu būt pārāk lieliem, citādi būs ievērojama konvektīvā siltuma pārnešana, bez tam, porām jābūt sausām, jo ūdenim siltumvadītspēja ir augstāka, nekā gaisam.

1.7.2. Noslēgtie sildītāji

Noslēgtie melnie sildītāji. Rezervuārs, kas novietots atvērtā saulainā vietā, ar apakšējo daļu izolētu no zemes (skat. 1.28. att. (d)), parasti vējā atdziest. Aizsargāt sildītāja tvertni no vēja var, novietojot to konteinerī ar caurspīdīgu vāku, kas laiž cauri saules starojumu (skat. 1.28. att. (e)).

Labāks materiāls vākam ir stikls. Caurspīdīga polietilēnu plēve ir lētāka, bet to pārāk bieži nākas mainīt, jo saulē tā ātri bojājas. Stikla caurlaidības koeficents infrasarkanā spektra apgabalā ir mazāks kā polietilēnam, tātad, radiācijas uztvērēja zudumi ar stikloto vāku ir zemāki, nekā ar polietilēna vāku. Saules starojuma uztvērējiem pielieto arī speciālos segumus no plastikas, kuru īpašības ir līdzīgas stiklam, un ir mazāk trausli.

Tādu noslēgtu sildāmo sistēmu ir jēga izmantot gadījumos, kad karsts ūdens nav nepieciešams agrās rīta stundās (piemēram, mājas saimniecībā). Sildītāja tvertni var uzpildīt pašrocīgi.

1.7.3. Saules enerģijas kolektori, un to veidi

Silta ūdens ražošanai izmanto tehniskas iekārtas – saules kolektorus, kuri var būt dažādu konstrukciju: plakanie, saules starus koncentrējošie (fokusējošie), vakuuma cauruļu kolektori u.c. Saules enerģijas kolektori ir iekārtas, kas uztver saules starojuma enerģiju un pārvērš to siltumā, ko izmanto ūdens vai gaisa, vai kāda cita siltumnesēja sasildīšanai. Ar kolektoru iegūtā enerģija pa cauruļvadu sistēmu tiek novadīta uz akumulācijas tvertni. Visplašāk tiek izmantoti plakanie kolektori, kuri savas vienkāršās konstrukcijas dēļ ir lētāki.

Kā pamatprodukcija saules enerģijas iekārtām ir ar stiklu pārklāti saules kolektori, kurus izmanto karstā ūdens sagatavošanai. Šāda tipa kolektori ir 90 % no Eiropā uzstādīto kolektoru kopējās virsmas laukuma.

Kā otros varētu minēt absorbētājus, kurus galvenokārt izmanto, lai uzsildītu ūdeni atklātos peldbaseinos. Absorbētāji ir ražoti no polipropilēna paneļiem vai no presētām caurulēm. Ik gadu Eiropā, galvenokārt, Francijā, Anglijā, Vācijā un Holandē tiek uzstādītas šādas sistēmas ar kopējo platību, apmēram, 35 000 m^2. Pašlaik šādas saules iekārtas Ziemeļeiropā izmanto vairāk kā 250 sabiedriskajos peldbaseinos.

1.3. tabula

Izplatītāko saules kolektoru veidu parametri

Saules kolektora tips	Darba temperatūra, °C	Lietderības koeficients, %	Relatīvais darba virsmas laukums, %	Sekošana saules kustībai
Plakanais kolektors	30–100	30–50	100	–
Vakuuma caurules	90–300	40–60	50–75	–
Paraboliskscilindrisks koncentrators	Līdz 500	50–70	30–50	vienā plaknē
Heliostatu lauks ar centrālo absorberu	līdz 1000	60–75	20–40	divās plaknēs

Trešā pamatprodukcija ir gaisa kolektori, kurus galvenokārt izmanto telpu apkurei un kaltēšanas nolūkiem. 1990. gadā Eiropā (pārsvarā Vācijā) bija uzstādīti

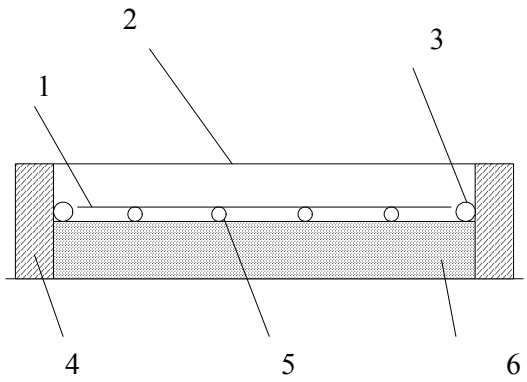
gaisa kolektori ar kopējo platību vismaz 3000 m^2, kurus izmantoja siltā gaisa iegūšanai tiešai lietošanai vai kombinācijā ar siltuma sūkņiem telpu apkures vajadzībām. Lauksaimniecības produktu kaltēšanai, gaisa kolektori ir uzstādīti vairākās Eiropas valstīs. Vislielākais šo kolektoru pielietojums ir Zviedrijā, kur uz šķūņu jumtiem, siena žāvēšanai, ir uzstādīti kolektori ar kopējo platību apmēram 200 000 m^2.

Aktīvajās saules siltuma sistēmās uztvertais saules starojums tehniskā iekārtā – kolektorā – tiek pārvērsts siltumā, ko pēc tam saņem patērētāji (karstā ūdens uzglabāšanas tvertne, telpu apkure, peldbaseins).

Dažāda veida kolektoru parametri apkopoti 1.3. tabulā. Kā izriet no tabulas datiem, pielietojamā kolektora tipu pamatā nosaka iegūstamās temperatūras diapazons.

1.7.4. Plakanie kolektori

Plākšņveida vai plakanais kolektors ir visvairāk izplatītais saules kolektoru tips. Vienkāršākais plakanais kolektors (skat. 1.29. att.) sastāv no koka, plastmasas vai metāla kastes, kurā ievietota siltuma izolācijas materiāla kārta (piemēram, akmens vate) un metāla (vara, tērauda) plāksne – absorberis.



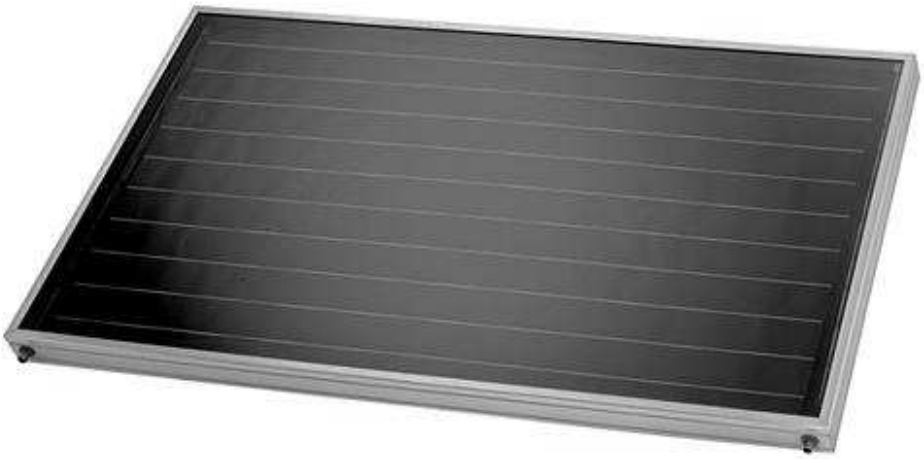
1.29. att. **Plakanais kolektors**:
1– absorberis; 2 – caurspīdīga virsma; 3 – kolektora caurule, siltuma pārvadei; 4 – rāmis;
5 – vidēja caurule siltuma pārvadei; 6 – izolācija.

Kasti noslēdz ar caurspīdīga materiāla (stikla) plāksni – vāku. Uz sauli vērsto absorbera plāksnes pusi nokrāso ar melnu matētu krāsu, bet pretējā pusē piestiprina (pielodē, piemetina) siltuma apmainītāju – izlocītu metāla cauruli, caur kuru plūst

siltumu nesošais šķidrums (siltumnesējs). Kolektora siltuma ražība paaugstinās, ja absorbera plāksnes priekšpusi pārklāj ar speciāliem siltuma absorbciju pastiprinošiem selektīviem pārklājumiem – melno hromu, melno niķeli u.c., vai to veido līdzīgu bišu šūnām, piestiprina dažādas speciālas formas plāksnītes utt., šādi samazinot siltuma staru atstarošanu no absorbera virsmas.

Uz kolektoru krītošais saules starojums iziet cauri stikla apvalkam un sasniedz absorberu. Absorbcijas procesā radiācijas enerģija tiek pārvērsta siltumā. Absorbera temperatūra paaugstinās un sasilda tai piestiprināto siltuma apmainītāju, no kura tālāk siltums tiek atdots siltumnesējam. Kā siltumu nesošo šķidrumu parasti izmanto ūdeni vai antifrīza maisījumus, kuru pamatā ir glikols. Siltumnesēja plūsmas kanāli var būt izveidoti arī tieši absorbera plāksnē.

Pazīstami arī kārbas veida plakanie absorberi, kurus gatavo no divām metāla plāksnēm, attālums starp kurām neliels. Plakanos kolektorus parasti iesaka novietot uz mājas jumta dienvidu pusē. Taču ne visas mājas ir orientētas tā, ka viena jumta puse ir vērsta uz dienvidiem un arī jumta slīpums ne vienmēr nodrošinās saules staru krišanu tam perpendikulāri pat dienas vidū. Tāpēc lauku saimniecībām ieteicamāki būtu uz zemes novietojami un pret sauli pagriežami kolektori. Karstā ūdens tvertni šajā gadījuma novieto augstāk, piemēram, mājas bēniņos, un pārklāj ar siltuma izolāciju.



1.30. att. **Saules enerģijas plakanais kolektors**

Siltuma zudumus iespējams samazināt, uzstādot otru stikla pārklājumu. Taču šajā gadījumā tiek apgrūtināta starojuma izkļūšana cauri stikla pārklājiem, tādējādi samazinās kopējā kolektora jauda. Tāpēc kolektori ar diviem stikla pārklājiem ne vienmēr ir efektīvi. Otrā stikla pārklāja vietā bieži tiek izmantotas caurspīdīgas plastikāta plēves, kurām arī ir labas izolācijas īpašības. Parasti šādas sistēmas ir efektīvākas nekā sistēmas ar diviem stikla pārklājiem. Plākšņveida tipa kolektorus var izmantot, lai iegūtu karsto ūdeni līdz pat 100 ºC temperatūrām.

1.31. att. **Saules kolektors uz Aizkraukles ģimnāzijas jumta**

Šāda tipa kolektorus var uztaisīt arī mājas apstākļos. To tehnoloģiskie risinājumi, uzbūves principi un sastāvdaļu komplektācija neprasa specifiskas un padziļinātas zināšanas un iemaņas, kā arī prasmes šādu kolektoru uzstādīšanā un veicot to tehnisko apkopi.

Galvenās šāda kolektora iezīmes ir:

a) augsta enerģijas pārneses spēja;
b) absorbētāja virsma ir noklāta ar augstas saules starojuma absorbcijas un zemas izstarošanas spējas virskārtu, augstas vadītspējas absorbera plāksne ar ribotu

cauruļu konstrukciju vai zemas vadītspējas (kondukcijas) absorbera plāksne ar īsiem siltumvadītāju kontūriem cauri visai plāksnei;

c) siltumu pārnesošā darba viela (siltumnesējs) – šķidrums ir ciešā kontaktā ar absorbējošo plāksni vai virsmu;
d) zem absorbera plāksnes vai virsmas ir izolācija, kas izturīga pret atmosfēras un klimata pārmaiņu ietekmi.

Ir sastopami plakanie saules kolektori, kas nav ievietoti kastē. Šādi saules kolektori ir piemēroti siltā ūdens ar zemu temperatūru sagatavošanai un uzsildīšanai. Kā ekonomiski pamatotu piemēru var minēt peldbaseinu ūdens sildīšanu, kur peldbaseina ūdens cirkulē cauri plastmasas saules absorberiem, kas ir izvietoti tieši uz jumta. Tomēr tos nevar pielietot, kur ir sastopami izteikti ziemas apstākļi.

Tiek ražoti un ir pieejami arī plakanie saules kolektori, kur tiek sildīts gaiss. Galvenā atšķirība starp gaisu un ūdeni sildošajiem saules kolektoriem ir nepieciešamība uzkonstruēt tādu absorberu, kas var nosegt siltumpārejas samazinājumu, ko dod mazāks siltumpārejas koeficients starp gaisu un absorberu. Gaisa siltumietilpība ir mazāka nekā ūdenim, līdz ar to nepieciešams nodrošināt lielāku gaisa caurplūdes apjomu, rezultātā ir nepieciešams lielākas jaudas gaisa sūknis. Lai sasniegtu optimālu siltuma pāreju no absorbera uz gaisa plūsmu, izmanto rievainus vai porainus absorberus, tā palielinot siltumpārejas un siltumatdeves virsmu.

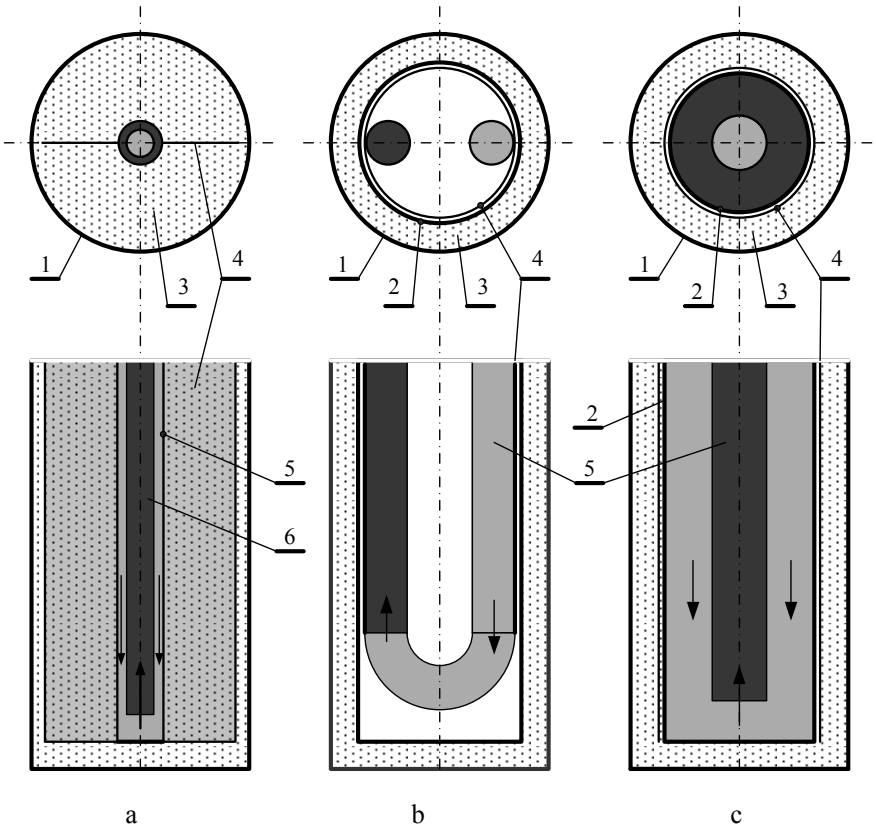
1.7.5. Vakuuma kolektori

Piedāvā gan cauruļu, gan plākšņveida formas vakuuma saules kolektorus. Vakuuma cauruļu kolektoros absorberi atrodas stikla caurulēs, no kurām ir atsūknēts gaiss. Rezultātā ievērojami samazināti enerģijas zudumi, kurus izraisa gaisa molekulu kustība kolektora iekšpusē. Vakuuma izraisītie spēki stikla caurules iekšpusē, tiek viegli pārvarēti, pateicoties caurules formai. Cauruļu tipa kolektora papildus priekšrocība ir tā, ka neskatoties uz jumta nelabvēlīgo orientāciju, tās var pagriezt dienvidu virzienā.

Bez vakuuma cauruļu kolektoriem ar tiešo caurplūdi ir arī kolektori, kuru darbības pamatā ir siltuma cauruļu princips. Siltums no katras caurules tiek novadīts individuālā iztvaikošanas un kondensācijas ciklā. Šāds cikls ir siltuma caurules

darbības pamatā. Siltuma enerģiju uzņem otrs siltumnesējs, kas novada to uz akumulācijas tvertni. Vakuuma cauruļu kolektorus iespējams lietot temperatūras diapazonā līdz 150 ºC.

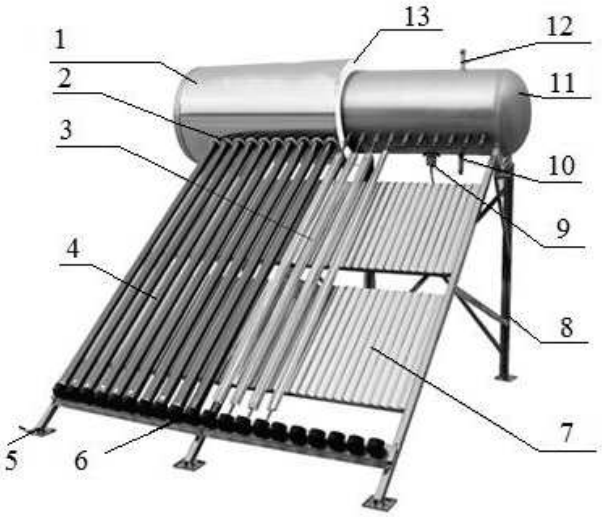
Vakuuma cauruļu kolektori sastāv no atsevišķām caurulēm, lieto divu tipu vakuuma caurules (skat. 1.32. att.): vienas stikla caurules (a) un divu cauruļu (caurule – caurulē, (b) un (c)). Pirmajam variantam, stikla caurulē 1 ievietots, piemēram, plakans absorberis 4, kuram piemetinātas dzesētāja šķidruma pievadīšanas 5 un aizvadīšanas 6 metāla caurules. Stikla caurules gali ir hermētiski noslēgti un no caurules izsūknēts gaiss (līdz aptuveni 1,33 Pa), radot vakuuma telpu 3. Kā trūkums šādai konstrukcijai ir samērā kaprīzs (sakarā ar dažādiem lineārās izplēšanās koeficientiem), hermētisks stikla – metāla savienojums.



1.32. att. **Saules kolektoru vakuuma cauruļu konstrukcijas**

Tāda trūkuma nav divu stikla cauruļu variantam, kurš konstrukcijas ziņā līdzīgs, sen pazīstamam, termosam. Šim variantam, vienā caurulē 1 ievietota otra 2, gali starp caurulēm hermētiski noslēgti un no telpas starp caurulēm 3 izsūknēts gaiss. Saules starojumu absorbējošais slānis var būt uzklāts iekšējās caurules 2 iekšpusē (b), vai uzklāts iekšējās caurules ārpusē (vakuuma telpā, (c)).

Pirmajā gadījumā absorberis ir kontaktā ar „U" veida cauruli 5, pa kuru cirkulē siltuma novadīšanas šķidrums, bet otrajā gadījumā, caurules 2 iekšpusē ievietota vēl viena, dzesējošā šķidruma novadīšanas caurule 5, bet dzesējošā šķidruma pieplūde notiek telpā starp caurulēm 2 un 5. Šis ir viens no vienkāršākajiem un lētākajiem saules enerģijas kolektora vakuuma caurules variantiem. Kā trūkums šim variantam ir liels dzesējošā šķidruma tilpums stikla caurulē un caurules saplīšanas gadījumā, šķidrumam iztekot, kolektors pārstās darboties.



1.33. att. **Vakuuma saules kolektors:**
1 – ārējais ūdenstvertnes korpuss, 2 – cauruļu gredzeni, 3 – siltumcaurule, ar alumīnija cauruli iekšpusē, 4 – vakuumcaurule, 5 – atbalsta statnis, 6 – balsta kronšteins, 7 – reflektors, 8 – rāmis, 9 – aukstā ūdens ieplūde, 10 – karstā ūdens izplūde, 11 – hermetizēta ūdenstvertne, 12 – atgaisošanas vārsts, 13 – izolācija.

Cauruļveida cilindriskie vakuuma saules kolektori ir saslēgti kontūrā un siltuma enerģijas savākšanai izmanto metāla absorbera plāksni, kas atrodas stikla caurulē, vakuumā. Siltumenerģija tiek pārnesta no absorbējošās plāksnes uz cirkulējošo darba

šķidrumu, kas plūst caur metāla cauruli un ir ciešā kontaktā ar plāksni. Caurule iet cauri kolektora stikla apvalkam, tāpēc ir nepieciešams speciāls savienojums, kas nodrošina hermētiskumu starp siltumnesēja metāla cauruli un apvalka stikla cauruli. Šāda saules kolektora galvenais trūkums un nepilnība ir šis speciālais savienojums, kur metāliskie siltumnesēja plūsmas kanāli iet cauri stikla apvalkam. Stiklam un metālam ir dažādi termiskās izplešanās koeficienti. Saules kolektors strādā plašā temperatūru diapazonā, temperatūras izmaiņas rezultātā notiek kolektora sastāvdaļu un elementu dažāda izplešanās un savstarpējā mijiedarbība. Ir sarežģīti nodrošināt šādu savienojumu hermētiskumu un ilgstošu resursu. Cilindrisko vakuuma cauruļu saules kolektoru var aplūkot 1.33. attēlā.

Pilnveidojot plākšņveida vakuuma kolektorus, tika mēģināts apvienot vakuuma kolektora priekšrocības ar standarta plākšņveida kolektora izmaksu priekšrocībām, jo plākšņveida vakuuma kolektori pēc formas ir līdzīgi standarta kolektoriem. Salīdzinājumā ar vakuuma cauruļu kolektoriem, spiediens un līdz ar to izolācijas efekts, tomēr ir mazāks plākšņveida vakuuma kolektoriem. Atmosfēras spiediens, kas iedarbojas uz vakuuma kolektoru, tiek pārvarēts pateicoties nelieliem stienīšiem, kas ir iemontēti vakuuma kolektora iekšpusē. Taču šie stienīši darbojas arī kā siltuma novadītāji un tādējādi samazina kolektora efektivitāti. Vakuumu plākšņveida kolektorā ir regulāri jāatjauno. To var izdarīt kolektora sistēmas uzstādītāji ikgada apsekošanas laikā, jeb arī izmantojot vakuuma sūkni, kurš automātiski nodrošinātu vakuumu kolektoros.

1.7.6. Kolektori ar caurspīdīgu termisko izolāciju

Jauns un interesants attīstības virziens ir saules kolektori ar caurspīdīgu termisko izolāciju, kas atrodas zem kolektora stikla. Šis materiāls ir no plastikas un tam ir šūnu veida struktūra, kura atrodas perpendikulāri attiecībā pret absorbētāju. Pateicoties šai struktūrai, ir ievērojami uzlabotas stikla pārklāja izolējošās īpašības. Starojums, izejot cauri stiklam, samazinās tikai nedaudz. Tehnisku iemeslu dēļ, vairums gadījumos konstruē caurules tipa kolektorus. Šajā gadījumā, tieva absorbētāja caurule ar segumu aizvērta iekšpusē zem ļoti vieglas caurspīdīgas virsmas. Starp caurspīdīgo vāku un absorbētāju, siltuma zudumi ir ārkārtīgi samazināti.

Līdz šim caurspīdīgie izolējošie materiāli tika izgatavoti no plastikas. Tā kā tie ir nepietiekami izturīgi pret augstām temperatūrām, tie nav piemēroti standarta plākšņveida kolektoriem, jo šajos kolektoros temperatūra var pārsniegt 200 ºC, kaut arī parasti kolektoram darbojoties, temperatūra ir ievērojami zemāka par 100 ºC. Šādos apstākļos materiāls no plastikas izkusīs un izolācija tiks sabojāta. Caurspīdīgos siltumizolējošos materiālus var izmantot tādās saules iekārtās, kurās pat ekstremālos darba apstākļos temperatūra nepaceļas pārāk augstu, piemēram, termosifona sistēmā.

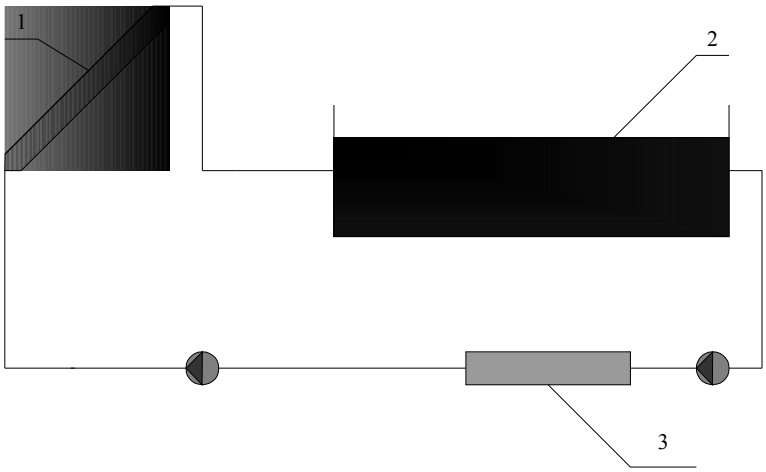
Pirmā caurspīdīgā termoizolācija, kuru pārbaudīja, bija stikla kapilāri. Izmantojot stikla kapilārus, ekspluatācijas laikā tos ir iespēja pakļaut ievērojami augstākām temperatūrām. Tomēr pašlaik stikla kapilāru izmaksas ir tik augstas, ka tie nespēj konkurēt ar citiem termiskās izolācijas materiāliem.

1.7.7. Absorbētāji

Bez stikla kolektoru absorbētāju sistēmas tiek izmantotas gadījumos, kad nav nepieciešamas augstas temperatūras, piemēram, peldbaseinu sildīšanai, siltumsūkņu virsmas siltummaiņiem u.c. Pateicoties plastmasas absorbētāju ierobežotajai spiediena un temperatūras izturībai, lielākā daļa plastmasas kolektoru tiek izmantota peldbaseinu ūdens sildīšanai. Šajā gadījumā, vēlamais temperatūru līmenis – tikai dažus grādus, augstāks nekā apkārtējas vides temperatūra. Peldbaseina hlorētais ūdens cirkulē tieši caur absorbētājiem ar sūkņa palīdzību un nekāds siltummainis nav vajadzīgs. Ja filtra sūknis jau eksistē, tas var tikt izmantots ūdens cirkulācijai caur saules kolektoru. Plastmasas kolektori darbojas tikai vasaras mēnešos un tiem ir jābūt iztukšotiem pirms pirmā sala.

Vislielākais saules starojums ir tieši peldēšanās sezonas laikā, no maija līdz oktobrim. Pieprasījums pēc siltuma enerģijas un saules pieejamība ir vienlaicīgi. Peldbaseina ūdeni ir nepieciešams uzsildīt ne vairāk kā 28 ºC. Tajā pašā laikā, plānotā temperatūra karstā ūdens sagatavošanai mājas vajadzībām ir vismaz 45 ºC. Nosacīti ziemā ūdens temperatūra atklātos peldbaseinos ļauj izmantot vienkāršus un lētus kolektorus, kuri darbojas pie zemām temperatūrām, bet ar augstu efektivitāti. Atsevišķa akumulācijas tvertne, kura ir nepieciešama citām saules iekārtām, lai kompensētu pieejamās saules enerģijas izmaiņas, peldbaseinam nav vajadzīga, jo

ūdens pats kalpo kā īslaicīgs siltuma akumulētājs. Tā kā akumulācijas tvertne nav nepieciešama, saules iekārta peldbaseiniem ir vienkāršāka un lētāka. Saules iekārtas peldbaseinu uzsildīšanai var būt vienkontūru vai divkontūru. Ūdens vienkontūra sistēmā cirkulē caur absorbētāju un tiek uzsildīts tieši. Divkontūru sistēmā, peldbaseina ūdens netiek uzsildīts tieši absorbētājā, bet gan cirkulējot caur siltummaini, kurš savieno saules iekārtas kontūru ar peldbaseina kontūru.



1.34. att. **Saules sistēma baseinam:**
1 – kolektors; 2 – peldbaseins; 3 – filtrs.

Papildus šiem lietojumiem, ir arī iespēja apvienot peldbaseina ūdens uzsildīšanu ar karstā ūdens sagatavošanu. Tādēļ ir jāuzstāda plākšņveida kolektors, jo karstā ūdens sagatavošanai nepieciešama augstāka ūdens temperatūra. Šādās sistēmās siltummainis ir jāuzstāda starp saules kolektoru un peldbaseina kontūru.

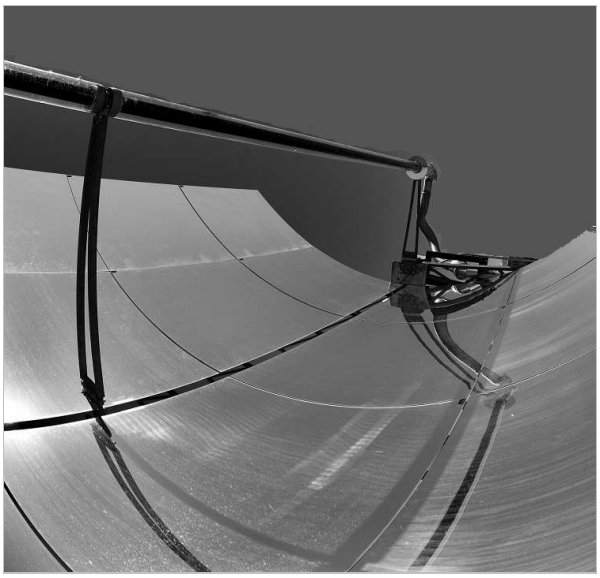
Atklātu peldbaseinu ūdens uzsildīšanai, saules iekārtas katrs kolektora kvadrātmetrs nodrošina no 200 līdz 300 kWh sezonā. Atkarībā no esošās apkures sistēmas efektivitātes, ar katru uzstādītā kolektora kvadrātmetru sezonā ir iespējams ietaupīt apmēram 25–35 l šķidrā kurināmā. Proporcijai starp kolektora un peldbaseina virsmu laukumiem vajadzētu būt 0,5 un 0,8, atklātiem peldbaseiniem. Mazākiem peldbaseiniem absorbētāja virsmas laukumam vajadzētu būt apmēram tikpat lielam kā peldbaseina virsmas laukumam. Kolektorus var uzstādīt uz horizontālas vai 45º slīpas, uz dienvidiem vērstas virsmas (novirze +/–45º). Saules enerģijas sistēmas peldbaseinu

uzsildīšanai ir īpaši efektīvas tad, ja ir iespējams pilnīgi atslēgt papildus apsildes sistēmu. Daudzu gadu pieredze ir pierādījusi, ka papildus apsildes sistēma peldēšanās sezonā nav vajadzīga. Tomēr atklātu peldbaseinu uzsildīšanai tikai ar saules enerģiju ir trūkums, jo baseina ūdeni nav iespējams uzturēt ar vēlamo temperatūru gadījumā, ja ilgāku periodu ir slikts laiks. Sabiedrisko peldbaseinu vadīšanas pieredze tomēr rāda, ka lielākā daļa cilvēku apmeklē atklātos peldbaseinus tikai saulainā laikā un tāpēc, pateicoties saules iekārtām, ūdens temperatūra peldbaseinos ir patīkama.

1.7.8. Fokusējošie kolektori

Pasaules praksē saules siltuma izmantošanā pazīstami arī fokusējošie kolektori, tos lieto, lai iegūtu augstu temperatūru, pat 800 °C un vairāk. Šais kolektoros saules enerģijas koncentrēšanai izmanto reflektorus – liektos spoguļus.

Speciālas konstrukcijas saules kolektori ir dārgi, paredzēti speciāliem gadījumiem. Kā piemēru šeit var minēt – saules kolektori saules kombinētajām siltumenerģētiskajām sistēmām, kas paredzēti, lai vasaras sezonā pasargātu sistēmu no pārkaršanas un citām ar to saistītajām problēmām. Šāds kolektors, ir paredzēts nepieciešamajam siltuma daudzumam un ir redzams 1.35. attēlā.



1.35. att. **Fokusējošais saules enerģijas kolektors**

Kolektora un absorbera ģeometrija ļauj sasniegt zemu kolektora optisko lietderību vasarā, kad nepieciešamais siltuma daudzums ir mazs, bet saules staru krišanas leņķis pret horizontālo plakni ir liels. Un sakarā ar to, ka šādam kolektoram absorbera virsma ir tikai apmēram trešā daļa no stiklotās virsmas laukuma, siltuma zudumi no kolektora ir mazāki, salīdzinot ar plakanajiem kolektoriem. Šāda kolektora konstrukcija arī ir relatīvi lētāka, jo reflektora materiāls ir aptuveni trīs reizes lētāks nekā absorbera materiāls.

Bez šāda veida speciālajiem saules kolektoriem ir arī sastopami līdzīgas konstrukcijas saules kolektori, kur tiek izmantots reflektors jeb atstarotājs, kas ir izliekts asimetriski (nesimetriski), bet kolektora absorberis spēj saules starojumu uztvert no abām pusēm, jo īpaši tad, kad tiek izmantota saules starojuma sakoncentrēšana. Atstarotājs praktiski ir parabolisks un tā optiskā ass veido 45° lielu leņķi ar horizontālo plakni. Tas nozīmē, ka saules starojums, kas krīt ar leņķisko augstumu 45° un mazāk, tiks atstarots uz divpusējā absorbera otras puses. Vasaras laikā, kad netiek izmantota saules starojuma sakoncentrēšana, līdz ko saules starojuma leņķiskais augstums ir lielāks par 45°, absorberis saņem tikai tiešo saules starojumu uz augšējās virsmas. Šāda veida speciālie saules kolektori ir domāti pielietošanai uz jumtiem. Ja tiek izmantota saules starojuma sakoncentrēšana, tad ir iespējams palielināt iegūtās enerģijas apjomu un daudzumu no absorbera virsmas, var izmantot mazāku absorbera virsmas laukumu nekā parasti ir pieņemts saules siltumenerģētiskajās sistēmās.

Vēl viena iespēja, kā izvairīties no sistēmas pārkaršanas vasaras sezonā, ir palielināt kolektora novietojuma leņķi pret horizontālo plakni – tie ir t.s. fasādes kolektori, kam novietojuma leņķis pret horizontālo plakni ir līdz 90°. Vasaras sezonā uz šādiem kolektoriem krītošais saules starojums ir mazāks, tas pasargā sistēmu no pārkaršanas. Ir pārbaudīts, ka Centrāleiropā gada kopējais saules starojums uz šādiem fasādes kolektoriem var būt mazāks aptuveni par 30 % salīdzinot ar kolektoriem, kas izvietoti uz jumta, ir vērsti pret dienvidiem un to novietojuma leņķis pret horizontālo plakni ir 45°. Ir nepieciešama lielāks fasādes saules kolektoru virsmas laukums, lai saražotu tik pat lielu enerģijas daudzumu, bet būtiskākā atšķirība ir tā, ka saules kombinētajām siltumapgādes sistēmām ar lielu fasādes saules kolektoru virsmas

laukumu, iespēja vasaras laikā pārkarst ir gandrīz neiespējama vai vismaz samazināta līdz minimumam.

Notiek nepārtraukts izpētes un zinātniskais darbs pie esošo saules kolektoru konstrukcijas un termiskās efektivitātes paaugstināšanas, kā arī tiek meklēti ar vien jauni konceptuāli saules kolektoru veidi un tipi, kas sevī ietver inovatīvus un progresīvus risinājumus, lai tos efektīvāk varētu izmantot saules kombinētājās siltumenerģētiskajās sistēmās.

1.8. Ūdens sildīšanas sistēmas

Saules iekārta karstā ūdens sagatavošanai parasti tiek projektēta, lai ar to vasaras mēnešos varētu pilnīgi nosegt nepieciešamo karstā ūdens patēriņu, neizmantojot papildus apkures katlu. Pārējos gadalaikos šīs sistēmas izmanto, lai primāri uzsildītu auksto ūdeni. Kaut arī saules sistēma neaizvieto tradicionālo apkures sistēmu, tomēr tā var nosegt no 50 % līdz 80 % no karstā ūdens ikgada slodzes.

Saules iekārtu izmantošana karstā ūdens sagatavošanai ir divas priekšrocības:

1. ja vasaras laikā karstais ūdens tiek sagatavots pateicoties tikai saules enerģijai, tad apkures katlu var vispār neizmantot. Tā ir priekšrocība, jo īpaši vasaras mēnešos tradicionālās apkures sistēma, darbojas ar zemu efektivitāti;
2. neizmantojot apkures katlu vasarā, samazinās arī piesārņojuma daudzums, jo vasaras mēnešos īslaicīgas katlu darbināšanas rezultātā rodas slāpekļa oksīda (NO) un oglekļa oksīda (CO) izmeši, kuru koncentrācija ir virs vidējā līmeņa.

Saules enerģijas izmantošana siltumapgādes sistēmās it īpaši ir attīstījusies Dānijā un Zviedrijā. Tā kā abās valstīs siltumapgādes un karstā ūdens apgādes sistēmas ir jau izveidotas, tad saules enerģijas iekārtas tajās ir relatīvi viegli integrējamas. Ja sistēmas, kurās kā enerģijas avotu izmanto sauli, ir projektētas, lai nosegtu tikai daļu no vasaras slodzes, tad tās var strādāt ar maksimālu jaudu arī bez lielas siltuma akumulācijas tvertnes. Dānijā viens uzstādīta saules kolektora kvadrātmetrs spēj saražot līdz 430 kWh gadā. Siltumapgādes sistēmas Dānijā, kurās ir

uzstādīti saules kolektori ar vairāku tūkstošu kvadrātmetru platību. Tas ne tikai samazina piesārņojumu, bet ir arī ekonomiski izdevīgi.

Lielāko uzmanību Eiropas ražotājfirmas pievērš nelielām saules iekārtām, kas paredzētas ģimenes mājām. Neskatoties uz to, pieaug arī īstenoto projektu skaits, kuros tiek uzstādītas lielas kolektoru platības, jo ražotājfirmas šādiem projektiem var piedāvāt īpašas kolektoru iekārtu cenas. Ietaupīt var arī pateicoties efektīvākai sistēmas uzstādīšanai, īsākām cauruļvadu sistēmām, kā arī labākai vadībai, akumulācijas tvertnēm un pievienojumam pie apkures sistēmas. Lielas kolektoru platības var izmantot vietās, kur vasarā ir liels karstā ūdens patēriņš vai vietās, kur ir iespēja apvienot vairākus individuālos siltuma patērētājus vienotā siltumapgādes sistēmā.

Saules kolektoru sistēmas ražība ir atkarīga no tās sastāvdaļu kvalitātes un savstarpējās mijiedarbības.

Saules enerģijas iekārtu pielietojums katrā valstī ir atšķirīgs:

- Grieķijā, Kiprā un Turcijā karstais ūdens mājas vajadzībām tiek sagatavots izmantojot termosifona metodi;
- Vācijā un Holandē saules kolektorus galvenokārt izmanto karstā ūdens sagatavošanai, kā arī atklāto peldbaseinu ūdens uzsildīšanai;
- Francijā un Spānijā saules iekārtas vairāk tiek izmantotas sabiedriskajās iestādēs;
- Dānijā un Zviedrijā lielākās investīcijas tiek ieguldītas, lai veicinātu saules apkures sistēmu izmantošanu sabiedriskajās iestādēs.

Saules iekārtu uzstādīšana karstā ūdens sagatavošanai vai telpu apkurei ir ekonomiski īpaši izdevīga tad, kad ir nepieciešama esošās siltumapgādes sistēmas atjaunošana. Plānotā saules iekārtas slodzes daļa, attiecībā pret papildus apkures sistēmu, ir mainīga atkarībā no gadalaika. Papildus siltuma avota slodzes daļa parasti tiek nosegta darbinot apkures katlu, kā kurināmo izmantojot gāzi, koksni, šķidro kurināmo vai elektrību.

Visvienkāršākās alternatīvas ir izmantot saules enerģiju, lai uzsildītu ūdeni mājas vajadzībām, tādām kā ēdiena gatavošanai un mazgāšanai, jo karstais ūdens ir nepieciešams katram mājas iemītniekam visu gadu. Ar kolektoru iegūtā saules enerģija

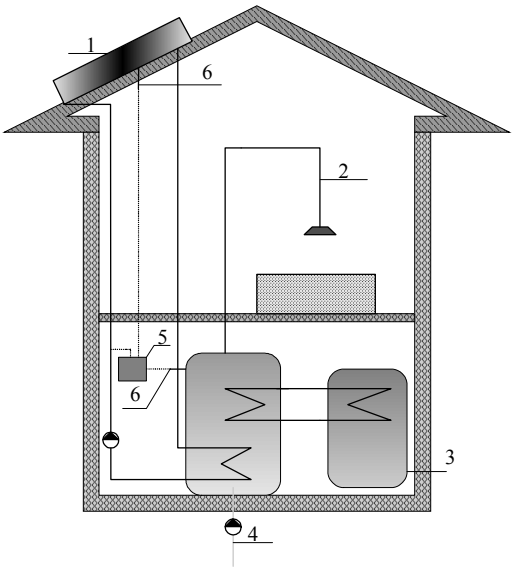
un karstā ūdens slodze īpaši sakrīt vasaras mēnešos, kā arī pavasarī un daļēji arī rudenī. Tas ir labs nosacījums saules enerģijas izmantošanai.

Karstā ūdens sagatavošanai uz katru mājas iemītnieku ir nepieciešams uzstādīt no 1 līdz 2 m^2 lielu kolektoru platību un apmēram 80 – 100 l lielu akumulācijas tvertni. Tas nozīmē, ka privātmājām nepieciešamā kolektoru platība ir apmēram 4 – 12 m^2 liela. Siltumnesēja plūsmas ātrumam cauruļvados būtu jābūt 1 litram minūtē attiecībā uz katru kolektora kvadrātmetru, t.i., ja kolektora laukums ir 4 m^2, tad siltumnesēja plūsmas ātrums būs 4 litri minūtē. Tomēr galīgais saules iekārtas lielums ir atkarīgs no patērētāja pieprasījuma un vajadzīgās karstā ūdens temperatūras.

Gadījumā, ja ar saules sistēmu ir plānots nosegt 100 % no vasaras pieprasījuma un daļēji arī pavasara un rudens, tad var uzskatīt, ka ar saules sistēmu var nosegt 40 % līdz 60 % no kopējās gada siltuma slodzes. Atskaitot siltuma zudumus no uzglabāšanas tvertnes, ikgada kolektora ražība, kurš ir uzstādīts uz privātmājas, ir 200 – 500 kWh/ m^2.

1.8.1. Sistēmas ar piespiedu cirkulāciju

Pašlaik, uzstādītajās saules iekārtās karstā ūdens sagatavošanai, kā siltumnesējs tiek izmantots salizturīgs maisījums (ūdens un glikola maisījums). Šis maisījums cirkulē noslēgtā kontūrā un kolektorā uzņemtā siltuma enerģija izmantojamam ūdenim tiek novadīta tam plūstot caur siltummaini. Tāpēc siltumnesēja maisījums nenonāk tiešā saskarē ar izmantojamo karsto ūdeni. Šādas sistēmas ir tā sauktās divkontūru sistēmas.

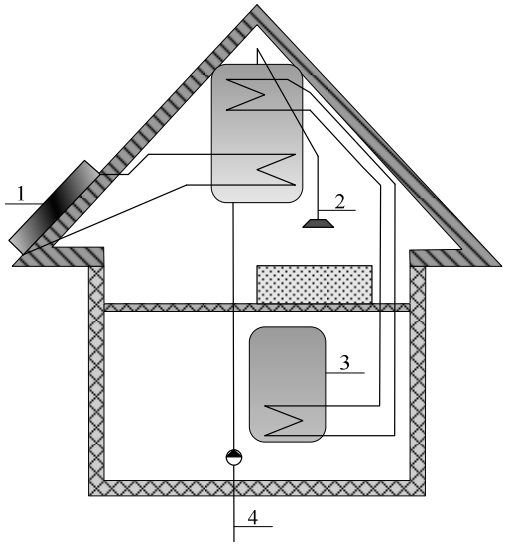


1.36. att. **Divkontūru sistēma ar piespiedu cirkulāciju:**
1 – kolektors; 2 – karstais ūdens; 3 – apkures katls; 4 – aukstais ūdens; 5 – vadības iekārta, 6 – temperatūras devējs.

Lai maisījums varētu cirkulēt

šādā sistēmā, tiek izmantots sūknis, vadības ierīce un devēji.

1.8.2. Sistēmas ar dabisko cirkulāciju



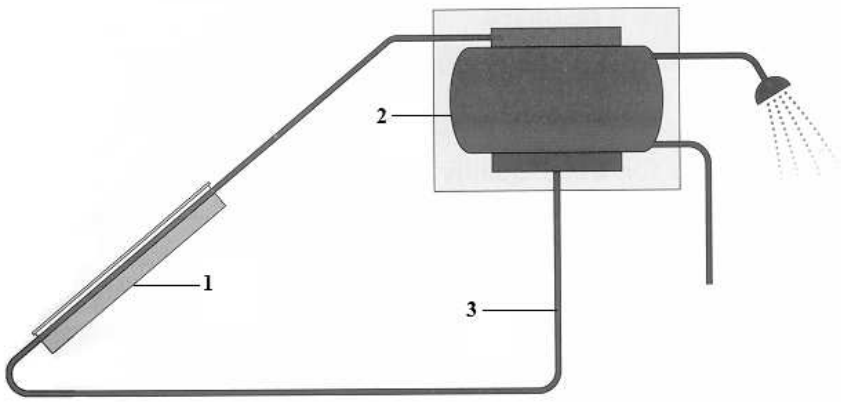
1.37. att. **Termosifona sistēma:**
1 – kolektors; 2 – karstais ūdens; 3 – apkures katls; 4 – aukstais ūdens.

Sistēmas ar dabisko cirkulāciju jeb termosifona sistēmas uzbūve ir vienkāršāka. Siltumnesējs saules kontūrā cirkulē brīvi. Sūknis, vadības ierīce un devēji šai sistēmai nav nepieciešami. Salīdzinājumā ar piespiedu cirkulāciju, termosifona sistēmā šķidrums cirkulē pateicoties dabīgajai konvekcijai. Vienkārši šo sistēmu varianti, parasti bez salizturīgā siltumnesēja, ir bieži sastopami Dienvideiropas valstīs.

Uzsildītais karstais ūdens ir "vieglāks" nekā aukstais ūdens un tāpēc paceļas saules kontūra visaugstākajā punktā. Tā siltuma enerģija izmantojamam ūdenim tiek novadīta, pateicoties siltummainim. Siltumnesējs atdziest un nonāk saules kontūra lejasdaļā, kur cikls atkal atkārtojas.

1.8.3. Uz grunts novietojama kolektoru sistēma

Vienkāršākā slēguma shēma ir, kad kolektors savienots ar aukstā ūdens padeves vadu vai siltā ūdens tvertnes apakšējo daļu (skat. 1.38. att.). Caur kolektoru izgājušais un sasilušais ūdens uzkrājas tvertnes augšējā daļā un tiek padots patērētājam. Šeit sasilušā ūdens daudzums un temperatūra ir atkarīgi no saules starojuma intensitātes, kolektora izmēriem, pieplūstošā ūdens temperatūras un siltā ūdens patēriņa daudzuma. Šādu iekārtu var novietot mājas pagalmā un sildīt ūdeni mazgāšanās vajadzībām, vai novietojot ganībās pasildīt ūdeni dzīvnieku, piemēram, govju dzirdināšanai.



1.38. att. **Kolektora slēguma shēma ar siltā ūdens tvertni un ūdens patērētāju:**
1 – kolektors; 2 – ūdens tvertne; 3 – ūdens caurule.

1.8.4. Akumulācijas tvertnes kolektoru sistēmas

Sistēmas, kurās ūdens akumulācijas tvertne ir iebūvēta tieši kolektorā, ir vēl vienkāršākas. Šie, tā sauktie akumulācijas kolektori, pasaules tirgū ir jau vairākus gadus. Cirkulācijas sūkņi un vadības sistēmas šajā gadījumā nav nepieciešamas. Šīm sistēmām nav nepieciešami ne kontūri siltumnesējam, ne siltummainis. Izmantojamais ūdens tiek uzsildīts un uzglabāts tieši kolektorā. Kad karstais ūdens no kolektora tiek lietots, tajā no apakšas tiek iesūknēts aukstais ūdens. Ja nepieciešams, ūdens tiek papildus uzsildīts ar caurplūdes tipa sildītāju.

1.9. Saules kolektoru un ūdens sildīšanas sistēmu efektivitāte

Plakanajiem saules kolektoriem ir lielākā absorbcijas virsma, tomēr viņiem ir lielākie siltuma zudumi, salīdzinot ar cita veida un tipa kolektoriem. Šis apstāklis galvenokārt ietekmē, kā arī limitē ekspluatācijas un darba temperatūras režīmu, kas ir zemāks par 80 °C, ja kolektora efektivitātes koeficients lielākas par 0,25. Lai gan ir iespējams ar dubulto stiklošanu, konvekcijas samazināšanu vai vakuuma izolāciju panākt un palielināt ekspluatācijas un darba temperatūras režīmu robežu. Plakano saules kolektoru efektivitātes koeficients parasti ir apmēram no 0,3 līdz 0,4. Var

efektivitātes koeficientu palielināt, ja ir iespējas kolektoru grozīt vai arī mainīt kolektora slīpuma leņķi atkarībā no saules augstuma virs horizonta. Pagriežot kolektoru pret sauli trīs reizes dienā – no rīta, dienas vidū un vakarā – tā saražoto siltuma daudzumu iespējams palielināt vismaz par 30 %. Ņemot vērā relatīvi zemo saules starojuma intensitāti Latvijas teritorijā, šāds ieguvums ir vērā ņemams un būtiski palielina kolektora efektivitāti. Jo lielāka būs starpība starp kolektorā ieplūstošā un izplūstošā siltumnesēja temperatūrām, jo lielāks būs kolektora lietderības koeficients.

Ja kolektora darba temperatūra ir tuva apkārtesošās vides jeb ārgaisa temperatūrai, tad pārklājums un siltuma izolācija nav nepieciešama. Augstām temperatūrām un apstākļos, kad ārgaisa un saules kolektora darba temperatūras starpība ir ievērojamāka, lai samazinātu siltuma zudumus, absorberi ievieto vakuumā.

Uzstādīto kolektoru nepieciešamais lielums ir arī atkarīgs no jumta slīpuma un mājas izvietojuma. Jumtam vajadzētu būt 45° leņķī un tam nevajadzētu būt novirzei no dienvidiem lielākai par 45°. Jebkura novirze no dienvidiem samazina kolektora jaudu. Novirze par 30° samazina kolektora jaudu par 4 %, bet novirze par 30°– 45° samazina kolektora jaudu līdz pat 10 %. Optimālos saules enerģijas kolektoru uzstādīšanas leņķus var noteikt pēc 1.3. nodaļā aplūkotiem aprēķiniem. Uzstādot kolektorus ir jāizvairās no ēnainām vietām. Peldbaseinu absorbētājus var arī uzstādīt uz horizontālas virsmas.

Izmantojot kolektorus telpu apkurei, vajadzētu izvēlēties apkures veidus ar pēc iespējas zemākām siltumnesēja temperatūrām, piemēram, apsildāmās grīdas. Samazinot siltumnesēja atpakaļgaitas temperatūru, paaugstināsies visas saules enerģijas iekārtas efektivitāte.

1.9.1. Saules kolektoru sistēmas ražība

Saules kolektoru sistēmas ražība ir atkarīga no tās sastāvdaļu kvalitātes un savstarpējās mijiedarbības. Novērtējot saules kolektoru iekārtu kvalitāti, uzmanības centrā parasti ir kolektors. Tā ražība tiek novērtēta izmantojot efektivitātes līknes, kuras parāda vairāku tipu kolektoru efektivitāti dažādos darbības apstākļos.

Tā kā saules starojuma vērtības mainās atkarībā no diennakts stundas, gadalaika, kā arī no laika apstākļiem, tad izmantojot šīs līknes nav iespējams novērtēt saules kolektora iekārtas patieso ražību. Tikai efektivitātes līknes aprēķini ar ikstundas saules starojuma vērtībām un temperatūrām visa gada garumā var sniegt patiesu saules kolektora ražības novērtējumu. Bez tam ir jāņem vērā, ka tā nav kolektora ražība, bet gan visas saules kolektora iekārtas ražība, kurai pateicoties tiek aizvietots zināms kurināmā daudzums.

1.9.2. Saules kolektora jauda

Plakana saules kolektora siltuma jaudu nosaka izmantojot Hottela – Uillera – Blisa vienādojumu:

$$P_k = S[P_s \cdot \eta_0 - k_k (T_s - T_g)] \qquad (1.43)$$

kur: P_k – saules kolektora jauda, W;

S – kolektora absorbera virsmas laukums, m^2;

P_s – saules starojuma jauda uz kolektora virsmas, W/m^2;

η_0 – kolektora optiskais lietderības koeficients;

k_k – kolektora siltuma zudumu koeficients, W /(m^2 °C);

T_s – absorbera siltumnesēja temperatūra, °C;

T_g – apkārtējā gaisa temperatūra, °C.

Izmantojot eksperimentālos datus, saules kolektora jaudu var aprēķināt pēc izteiksmes:

$$P_k = M \cdot c_P (T_{s2} - T_{s1}), \qquad (1.44)$$

bet saražotās enerģijas daudzumu izmantojot:

$$Q_k = m \cdot c_P \cdot \Delta T, \qquad (1.45)$$

kur: M – siltumnesēja patēriņš, kg/s;

c_p – siltumnesēja siltumietilpība, J /(kg °C)

(ūdenim $c_p = 4{,}18 \cdot 10^3$ J /(kg °C));

(T_{s2}–T_{s1}) – attiecīgi no kolektora absorbera izejošā un ieejošā dzesētāja šķidruma temperatūra, °C;

Q_k – kolektora saražotā enerģija, Wh;

m – patērētā siltumnesēja daudzums, kg;

ΔT – patērētā siltumnesēja temperatūras izmaiņa, °C.

1.9.3. Kolektoru tehniskie parametri

Lietojamo materiālu fizikālos raksturojumus, kuri ietekmē kolektora efektivitāti, var novērtēt izmantojot divus kolektora parametrus:

1. Optiskā efektivitāte – saules kolektora optiskais koeficients η_0, kas raksturo kolektora absorbciju un pārklājuma caurlaidību.
2. Siltuma zudumu koeficients k_k, kas raksturo kolektora siltuma zudumus.

η_0 – vērtībai vajadzētu būt pēc iespējas augstākai, bet k–vērtībai – pēc iespējas zemākai. Vienai no vērtībām vajadzētu balstīties uz mērījumu rezultātiem un nevis uz ražotāju dotajiem skaitļiem.

Enerģijas plūsma kolektorā ir noteikta izmantojot šos abus parametrus.

Faktori, kuri nosaka optisko efektivitāti (η_0–vērtību) ir:

- ✓ Kolektora pārklāja caurspīdīgums.

Pārklājuma caurspīdīgumu raksturo tā caurlaidības koeficients. Parasti caurlaidības koeficients pārklājam ir 0,90. Tas nozīmē, ka 90 % no izstarotās saules enerģijas pārklājam iziet cauri.

- ✓ Absorbētāja absorbcija.

Pašreizējo absorbētāju absorbcijas koeficients ir līdz 0,96. Tas nozīmē, ka absorbētājs uzņem 96% no ienākošās saules enerģijas.

- ✓ Siltuma enerģijas pārvades kvalitāte.

Ideālais absorbētājs pārvada saņemto siltumu ātri un efektīvi. Tāpēc ir jābūt labai absorbētāja materiāla siltumvadāmībai, kā arī absorbētāja kanālu pareizam dizainam.

SAULES KOLEKTORA OPTISKAIS KOEFICIENTS

Saules kolektora optiskais koeficients:

$$\eta_0 = \tau_c \cdot \alpha_c \qquad (1.46)$$

kur: τ_c – stiklojuma saules staru caurlaidības koeficients (0,6 – 0,95),

α_c – absorbera saules starojuma absorbcijas koeficients (0,85 – 0,98).

Kolektora optiskais koeficients nav atkarīgs no saules starojuma jaudas, absorbera siltumnesēja un apkārtējā gaisa temperatūru starpības.

Faktori, kas nosaka siltuma zudumus (k–vērtības) ir:

- ✓ Kolektora pārklāja izolācijas raksturojums.

Jo labāka ir sistēmas izolācija, jo zemāki ir siltuma zudumi.

- ✓ Absorbera atstarošanās.

Tā ir atkarīga no absorbera virsmas īpašībām. Izvēloties īpašu pārklājumu, var iegūt atstarošanos no 0,1 līdz 0,2. Tas nozīmē, ka no absorbētā starojuma tiek atstaroti tikai 10 līdz 20 %. Ja absorbētāja pārklājums netiek īpaši izvēlēts, tad melns absorbētājs var atstarot līdz pat 80 % no absorbētā starojuma. Absorbētāji ar īpašu pārklājumu tiek izmantoti augstas kvalitātes plākšņveida, kā arī vakuuma cauruļu saules kolektoros. k_k samazina lietderības koeficientu, un palielinās, pieaugot ΔT.

Plakanā kolektora optiskā un siltuma zudumu koeficienta skaitliskās vērtības atkarīgas no kolektora tipa un konstruktīvā izpildījuma.

Stiklojums aizsargā kolektora absorberi pret nokrišņiem un samazina konvekcijas siltuma zudumus k_k. Stiklam jābūt ar iespējami lielāku caurlaidību ultra un redzamam starojumam (0,3–2,5μm), un jābūt necaurlaidīgam infrasarkanajam starojumam ar viļņa garumu > 2,5μm, ko izstaro absorbera virsma. Lielāka gaismas caurlaidība ir stiklam ar mazu dzelzs oksīda saturu. Kvalitatīvu saules kolektoru izgatavošanai izmanto selektīvos stiklus.

SAULES KOLEKTORA LIETDERĪBAS KOEFICIENTS

Saules kolektora lietderības koeficientu nosaka kolektora saražotās siltumenerģijas daudzuma attiecība pret saules starojuma enerģijas daudzumu, ko saņēmusi kolektora absorbera virsma, tas ir:

$$\eta_k = \frac{Q_k}{E_k S} \qquad (1.47)$$

kur: E_k – Saules starojuma enerģija, Wh/m^2;

Q_k – kolektora saražotā enerģija, Wh;

S – kolektora absorbera virsmas laukums, m^2.

Kolektora lietderības koeficientu ietekmē:

1) meteoroloģiskie faktori – saules starojuma jauda un gaisa temperatūra;
2) kolektora konstruktīvie parametri un absorbera siltuma absorbcijas spējas; loksnes biezums, materiāls un attālums starp kanāliem, stikla kārtu skaits un to saules starojuma caurlaidības spējas, siltumizolācijas biezums un tās siltumvadāmība;
3) kolektora darba parametri – siltumnesēja patēriņš un temperatūra.

SAULES IEKĀRTU VISPĀRĒJA ENERĢIJAS BILANCE

Plakanā saules kolektora siltumbilances vienādojums:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_a \qquad (1.48)$$

kur: Q – no Saules saņemtais siltuma daudzums;

Q_1 – no stiklojuma atstarotais siltuma daudzums;

Q_2 – no absorbera atstarotās enerģijas daudzums, īsviļņu (λ < 2,5 μm) starojuma veidā;

Q_3 – no absorbera atstarotās enerģijas daudzums, infrasarkanā (λ < 3 μm) starojuma veidā;

Q_4 – siltuma zudumi caur kastes siltumizolāciju (aizmugures no sānu sienām);

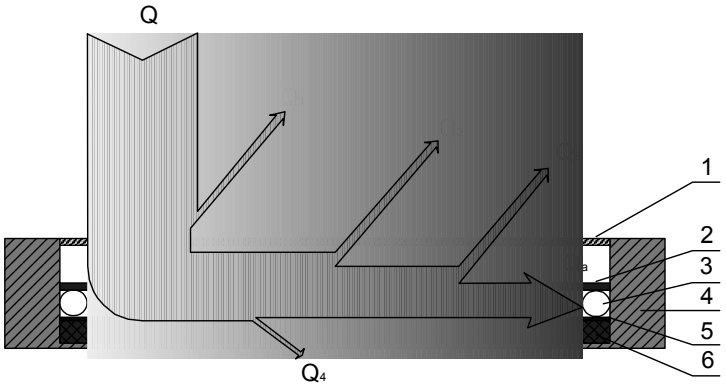
Q_a – absorberī iegūtais siltuma daudzums.

No stiklojuma atstarotā un caur stiklojumu izgājušā siltumu daudzumu attiecību raksturo ar stiklojuma caurlaidības koeficientu τ_c un tā vērtība, atkarībā no stiklojuma kārtu skaita un materiāla, var svārstīties robežās no 0,6 – 0,95.

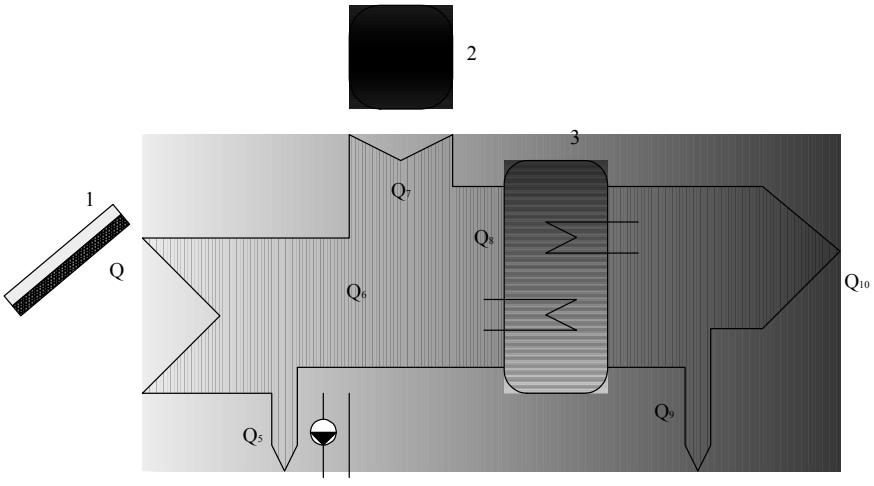
Faktori, kas ietekmē saules iekārtas enerģijas bilanci ir: izvietojums, patērētāja pieprasījums un iespēja pievienoties pie apkures sistēmas. Bez tam, tas ir atkarīgs arī no visas sistēmas tehniskajiem parametriem.

Kolektors uzkrāj saules enerģiju un pārvērš to siltumā (skat. 1.40. att.). Ar kolektoru iegūtā enerģija pa cauruļvadu sistēmu tiek novadīta uz akumulācijas tvertni.

Cauruļvados rodas siltuma zudumi Q_5. Siltuma daudzums Q_8, kas ir summa no saules siltuma Q_6 un papildus apkures sistēmas siltuma Q_7, tiek nogādāts akumulācijas tvertnē. Atņemot siltuma zudumus Q_9 no akumulācijas tvertnes, izmantojamais siltuma daudzums ir Q_{10}.



1.39. att. **Plakanā saules kolektora konstruktīvais izpildījums un siltuma sadalījums:**
1 – stiklojums; 2 – metāla loksne, absorberis; 3 – absorberim piestiprināti vai iebūvēti siltumnoņēmēja kanāli (caurules); 4 – kaste; 5 – spoguļplēve; 6 – siltumizolācija.



1.40. att. **Enerģijas plūsma saules enerģijas iekārtā:**
1 – kolektors; 2 – apkures katls; 3 – akumulācijas tvertne.

1.10. Saules enerģijas pielietojums gaisa sildīšanai

Saules enerģiju var izmantot arī gaisa uzsildīšanai. Siltuma pārvadīšanas un uzkrāšanas teorētiskie aspekti ir izklāstīti 1.7. nodaļā, tādēļ šajā nodaļā aplūkosim pamatelementus, kas saistīti tikai ar gaisa sildīšanu.

Ar saules enerģiju var uzsildīt gaisu, lai to izmantotu ēku apsildei, biomasas kaltēšanai, lauksaimniecības produktu pirmapstrādei, siltumnīcu un fermu mikroklimata nodrošināšanai, un citos procesos. Šie enerģijas izmantošanas veidi ir ekonomiski nozīmīgi. Ievērojama graudu ražas daļa pasaulē zūd pelējumu sēnīšu dēļ, no tā var izvairīties, pareizi žāvējot graudus. Graudu kaltēšanai iekārtām, kur izmanto šķidro fosilo degvielu, uz katru iztvaicēto ūdens kilogramu, jāiztērē aptuveni kilograms degvielas... Valstīs ar aukstu klimatu, ēku apsildei apkures sezonā, tiek patērēts līdz pat pusei gadā izlietoto enerģētisko resursu. Daļēja enerģētikas atslodze, ko dod saules siltuma izmantošana, gada laikā ļauj ietaupīt lielus naudas līdzekļus, kuri tiek tērēti par fosilo kurināmo. Lai varētu izmantot saules enerģiju ir nepieciešama atbilstoša ēku projektēšana un pārbūve.

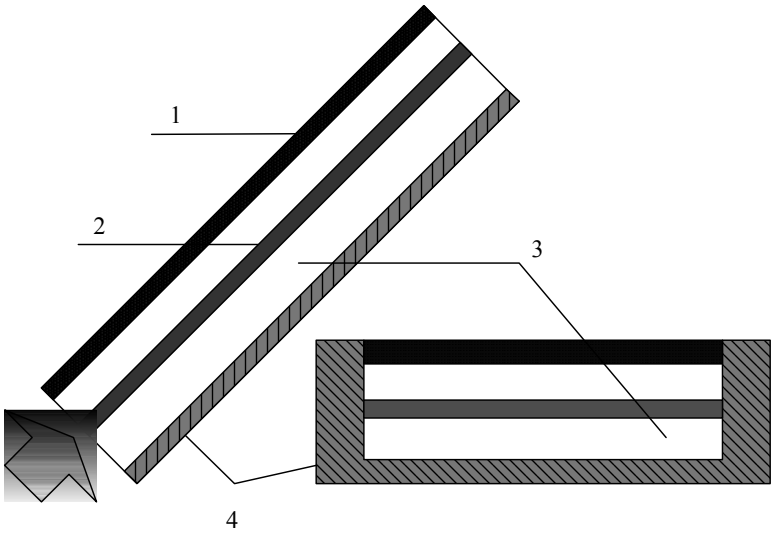
1.10.1. Gaisa kolektori

Saules gaisa sildītāji ir līdzīgi ūdens sildītājiem (skat. 1.7. nodaļu), izmantotais siltumnesējs ir gaiss, kas uzsilst kontaktējot ar starojuma uztvērēja virsmu. 1.41. attēlā parādīta saules gaisa kolektora uzbūve.

Virsmas orientācijas un siltuma zuduma ietekme uz kolektora darbības efektivitāti, gan ūdens, gan gaisa saules kolektoriem ir ļoti līdzīga.

Gaisam, kā siltuma nesējam, ir nepieciešamās īpašības, lai to izmantotu apsildīšanai ar zemām temperatūrām, jo:

- gaisu, kas izplūst no kolektora ar relatīvi zemu temperatūru (25–28 ºC) var izmantot tieši ;
- ir iespējama siltuma reģenerācijas, ventilācijas un pasīvo saules enerģijas sistēmu kombinācija.



1.41. att. **Gaisa kolektors:**
1 – stikla pārklājs; 2 – absorbētājs; 3 – gaisa kanāls; 4 – izolācija.

Izmantojot gaisa kolektorus, samazinās enerģijas patēriņš apkures vajadzībām. Kolektorā uzsildīto gaisu var piegādāt tieši istabās vai uzglabāt akumulācijas tvertnēs. Taču, izmantojot gaisa kolektorus, ir nepieciešami ventilatori, kurus darbinot tiek patērēta elektroenerģija.

Ir lauksaimniecības produkti, kas labāk un ilgāk uzglabājas, ja tos kaltē. Saules uzsildīto gaisu lauksaimniecības produktu kaltēšanai izmanto galvenokārt no jūnija līdz oktobrim, kad saules enerģijas intensitāte ir visaugstākā.

Enerģiju, kas tiek atdota gaisam no uztvērēja virsmas laika vienībā nosaka sakarība:

$$P_u = \rho c Q\ (T_2 - T_1) \qquad (1.49)$$

Gaisa blīvums ir 0,001 no ūdens blīvuma, tādēļ pie viena un tā paša enerģētiskā ieguldījuma gaisa apjoma patēriņš Q, var būt daudz lielāks.

Tomēr, ņemot vērā, ka gaisa siltumvadītspēja ir ievērojami zemāka nekā ūdenim, pie līdzīgiem nosacījumiem, enerģijas pārvadīšana no uztvērēj virsmas uz siltumnesēju notiek daudz vājāk. Siltuma pārvades analīze ir samērā sarežģīta, jo grūti sadalīt lietderīgo siltumu un zudumus, jo siltuma plūsmas uztvērēj plāksnes iekšpusē un no plāksnes līdz stikla segumam ir savstarpēji saistītas.

Gaiss plūst vertikāli caur kolektoru, kura ieeja un izeja ir savienota ar gaisa kanālu sistēmu. Visa kolektoru sistēma tiek noregulēta uz katra kolektora izplūdes kanāla uzstādot regulēšanas vārstu. Tādējādi visos sistēmas kolektoros tiek panākta vienāda gaisa plūsma.

Gaisa kolektoru sistēmas darbības laikā, āra gaiss tiek iesūkts saules kolektoru sistēmā, caur kuru plūstot, tas uzsilst. Siltais gaiss pa kolektoru kanāliem tiek nogādāts pie kaltējamiem produktiem. Šādas kaltēšanas efektivitāte galvenokārt ir atkarīga no gaisa temperatūras un relatīvā mitruma kaltēšanas procesa laikā.

Jāatzīmē, ka gaisa sildītāji:

- ir lētāki par ūdens sildītājiem;
- tos nav jāpiepilda ar šķidrumu;
- tos var pagatavot no pieejamiem materiāliem;
- nav nepieciešamības tos aizsargāt no sala.

Gaisa kolektori gaisu izmanto kā darba vidi enerģijas savākšanai un pārvadīšanai. Līdz ar atsevišķu istabu apkurināšanu gaisa kolektorus var izmantot iepriekšējai gaisa sasildīšanai, kas vēlāk var tikt nogādāts rekuperācijas ventilatorā vai gaisa siltumsūkņa siltummainī.

Gaisa kolektorus, salīdzinājumā ar šķidruma kolektoriem, diennakts laikā var izmantot ilgāk. Tā ir galvenā šo kolektoru priekšrocība – karstā laikā gaisa kolektors saražo vairāk enerģijas, nekā līdzīga izmēra šķidruma kolektors. Atšķirībā no šķidruma kolektoriem, gaisa sistēma neaizsalst, nesagādā būtiskas problēmas, ko var izraisīt noplūde kolektorā un izvadkanālos (lai gan noplūdes tikai nedaudz mazina produktivitāti).

Taču gaiss nav tik labs siltumnesējs, kā šķidrums, tādēļ kopumā šķidruma kolektoram raksturīgs augstāks lietderības koeficients, kā gaisa kolektoram.

Vecā parauga sistēmās gaiss tika virzīts cauri grants siltuma akumulatoram, mūsdienās šo metodi neatzīst, jo grants akumulatora izmantošana veicina ūdens tvaiku kondensāciju un izraisa pelējuma sēnīšu vairošanos grantī, rezultātā tas pasliktina gaisa kvalitāti telpās. Lai ar siltumu nodrošinātu vienu vai vairākas istabas, gaisa kolektoru iespējams montēt uz jumta vai ārsienas (dienvidu pusē). Lai gan šobrīd tirgū

ir piedāvāts diezgan plašs rūpnieciski izgatavoto kolektoru klāsts, daži saimnieki tomēr labprāt kolektoru konstruē patstāvīgi.

Kolektora konstrukcijā ietilpst hermētisks, termoizolēts metāla rāmis un melna metāla plāksne, kas absorbē siltumu un stiklota virsma. Saules starojums uzsilda plāksni, kas savukārt silda gaisu kolektorā. Ar elektrību darbināms ventilators sūc gaisu no istabas un virza to cauri kolektoram, bet vēlāk uzsildītais gaiss tiek padots atpakaļ istabā. Uz jumta ierīkotā kolektora veiksmīgai funkcionēšanai ir nepieciešami papildus kanāli, pa kuriem istabas gaiss var nokļūt kolektorā un atpakaļ. Savukārt uz sienām ierīkotajiem kolektoriem nav nepieciešami gaisa kanāli, jo atveres gaisa ieplūdei un izplūdei tiek izurbtas tieši sienā.

Vienkāršākos logu kolektorus ierīko esošajās logu ailēs. Tie var būt aktīvi (aprīkoti ar ventilatoru) vai pasīvi. Pasīvajā kolektorā gaiss nonāk iekārtas apakšējā daļā, tad, uzsilstot, virzās uz augšējo daļu, no kurienes nonāk istabā. Lai sliktā laikā telpas gaiss nenonāktu atpakaļ uz kolektora paneļa, tas tiek aprīkots ar speciālu gaisa vārstu. Jāņem vērā, ka logu sistēmas ar nepietiekošu virsmas platību siltumapgādes ziņā nav īpaši produktīvas.

1.10.2. Graudu kaltes

Lielu daļu lauksaimniecības produktu, pirms novietošanas glabātuvēs, nepieciešams kaltēt, jo kukaiņi un pelējumu sēnītes, kas ātri savairojas paaugstināta mitruma nosacījumos, padarīs šos produktu nederīgu lietošanai. Tas skar, piemēram, graudus, zirņus, rapsi, griķus, zāļu sēklas, sienu, šķeldu, kokmateriālus utt. Mēs apskatīsim tikai graudu kaltes, jo pārējo produktu kaltēšana ir līdzīga. Kaltējot notiek mitruma pārvadīšana no kaltējamā produkta uz apkārtējo gaisu un aizvadīšana prom. Mitrums atbrīvojas no produkta ūdens tvaiku veidā.

Kaltēšanas process notiek nevienmērīgi. Liela mitruma daļa lauksaimniecības produktos ir šķidruma veidā, kas atrodas porās, pēc ražas novākšanas tas ātri izžūst. Ūdens pārpalikumu daļa, parasti 30–40 %, ir piesaistīta produktam ķīmiski, un, tāpēc no tās atbrīvoties ir grūtāk, nepieciešama kaltēšana. Svarīgi, ka graudus nepieciešams kaltēt pietiekami ātri, dažu dienu laikā pēc ražas novākšanas, jo mitros graudos ātri

vairojas pelējums, notiek bioloģiska degradācija, mitri graudi sakarst dažu stundu laikā.

1.42. att. **Profesora A.Grunduļa saules kalte**

Pagājušā gadsimta deviņdesmito gadu sākumā (1992. g.) Jelgavas rajona Vircavas pagasta zemnieku saimniecībā „Tolēni" (šodien „Vegas"), LLU profesora Anša Grunduļa vadībā tika uzbūvēta saules kalte ar kuras palīdzību ražas novākšanas laikā varēja izkaltēt visu saimniecībā iegūto graudaugu ražu (skat. 1.42. att.).

A.Grunduļa graudu kaltei tika izmantots saules kolektors ar aktīvo absorbera virsmas laukumu 120 m^2, saulainās augusta mēneša dienās tas attīstija jaudu ap 100 kW. Jaudīgs ventilators (motora jauda 11 kW) pūta sasildīto gaisu uz diviem graudu kaltēšanas apcirkņiem, kuru izmēri ir 4x7x2 metri. Vienlaicīgi varēja kaltēt 100 tonnas kviešu. Piemēram, 2000. gadā, lai izkaltētu graudus ar tradicionālo kaltēšanas iekārtu darbināmu ar šķidro degvielu, bija jāmaksā ap 15 USD par tonnu, vai par 100 tonnām tas bija ap 1500 USD. Izmantojot saules kalti bija jāmaksā tikai par ventilatora piedziņai patērēto elektroenerģiju. Graudu kaltēšana ar šādu saules kalti ir aptuveni 10 reizes lētāka un kalte atmaksājas 1...2 gadu laikā, pie tam tiek ievērojami taupīti energoresursi.

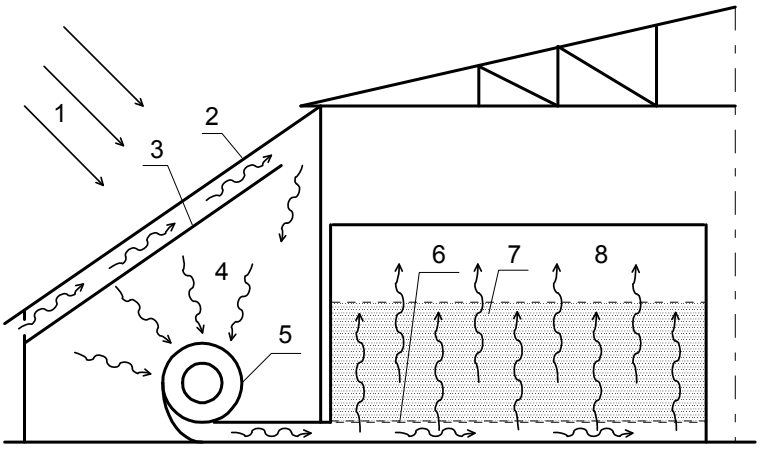
Ar saules kalti nav iespējams pārkarsēt kaltējamos graudus, tāpēc graudi, kas ir kaltēti ar šo kalti ir ļoti kvalitatīvi ar augstu dīgtspēju. Saules kaltes sevišķi izdevīgi izmantot sēklas materiāla kaltēšanai.

1.43. att. **Profesors A.Grundulis pie saules kolektora**

Pēc saules kaltes 10 gadu ekspluatācijas, profesors Ansis Grundulis atzina, ka stikla jumts šāda izmēra saules kolektora izgatavošanas izmaksas būtiski sadārdzina un ziemas laikā stiklu bojā sniega svars. Stikls ir smags materiāls, tāpēc sevišķa uzmanība konstruējot jāvelta nesošajām konstrukcijām, jo pat neliela atbalsta spāru ieliekšanās, pakļauj deformācijai stikla segumu un tas lūzt. Šāda izmēra saules kolektoram bojāto liela izmēra stikla lokšņu nomaiņa ir sarežģīta. Pēc pirmo trīs gadu ekspluatācijas, saules kolektora stikla segums tika nomainīts ar polietilēna plēvi, kuru uzlika tikai sezonas laikā. Plēvi var izmantot vairākas sezonas. Šāds tehniskais risinājums izrādījās ekonomiski un tehniski efektīvāks par stikla seguma izmantošanu. Ja izmanto stikla segumu, tad nesošās konstrukcijas ir jāizgatavo no metāla, līdzīgi, kā to dara liela izmēra siltumnīcām.

1.44. attēlā ir parādīta visvienkāršākā saules kaltes konstrukcija. Saules starojums caur caurspīdīgu jumtu nonāk uz absorbera virsmu. Absorbers ir izgatavots no metāla loksnēm, kas nokrāsotas melnā krāsā. Ideālā gadījumā absorbera krāsošanai var izmantot speciālo solāro laku. Tā ir ļoti laba melnas krāsas laka, kas veido matētu pārklājumu un satur abrazīvas daļiņas, kuras palielina absorbera aktīvo virsmas

laukumu. Ar labiem panākumiem ir izmantojams, nesalīdzināmi lētāks un pietiekami efektīvs pārklājuma materiāls melnā, matētā betonakrilkrāsa (asfaltlaka).



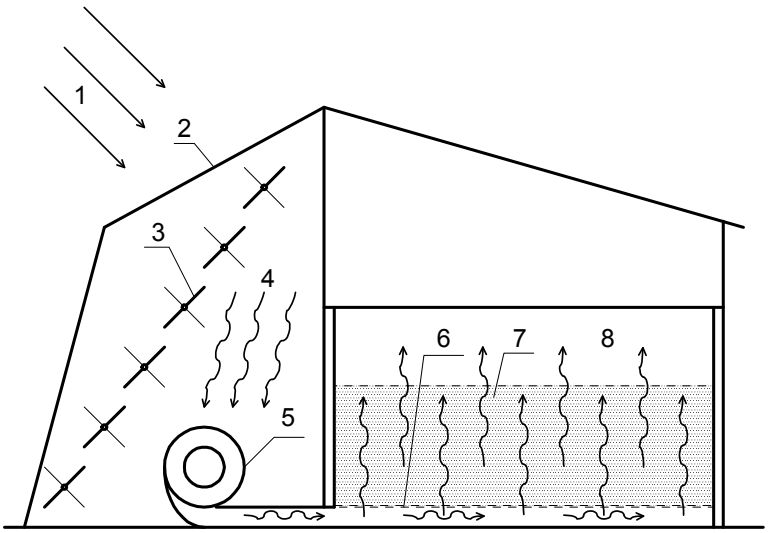
1.44. att. **Vienkāršas saules kaltes shēma:**
1 – saules starojums; 2 – caurspīdīgs jumta segums (stikls vai plēve); 3 – absorbers; 4 – siltā gaisa plūsma; 5 – ventilators; 6 – perforēta graudu tilpnes grīda; 7 – graudi (rapsis, griķi utt.); 8 – izplūstošais mitrais gaiss.

Absorbera virsma sasilst līdz 50...70 ^{o}C un izstaro siltumu. Absorbera augšējās virsmas siltums sasilda ieplūstošo gaisa plūsmu, bet apakšējā virsma izstaro siltumu un silda saules kolektora telpu. Ja ir ieslēgts ventilators, notiek intensīva gaisa kustība un temperatūra saules kolektora telpā nostabilizējas ap 30 ^{o}C. Uzsildīto gaisu pūš cauri graudu slānim un tas iznes mitrumu no graudiem. Ja kāda iemesla dēļ ventilators izslēdzas, saules kolektora telpā temperatūra palielinās līdz 50...60 ^{o}C un veikt remonta darbus ir sarežģīti.

Vienkāršas saules kaltes galvenā nepilnība ir tā, ka nav iespējams mainīt absorbētā siltuma jaudu. Tā ir atkarīga tikai no saules starojuma jaudas, bet absorbers paliek nemainīgs. Saules kolektora ekspluatācijas laikā tika mēģināts izmainīt absorbera plākšņu skaitu un novietojumu, rezultātā radās ideja izveidot modernizētu saules kaltes konstrukciju ar regulējamiem absorberiem.

Modernizētajai saules kaltei (skat.1.45. att.), ir izmainīta saules kolektora konstrukcija, absorberi ir nostiprināti savādāk, tos var grozīt. Šādā veidā var mainīt

absorberu jaudu no maksimālās, kad tie ir pavērsti perpendikulāri pret saules stariem, līdz minimālajai jaudai, kad tos pagriež par 90^o leņķi.



1.45. att. **Uzlabotas konstrukcijas saules kalte:**
1 – saules starojums; 2 – caurspīdīgs jumta segums (stikls vai plēve); 3 – grozāmas absorbera plāksnes; 4 – siltā gaisa plūsma; 5 – ventilators; 6 – perforēta graudu tilpnes grīda; 7 – graudi (rapsis, griķi utt.); 8 – izplūstošais mitrais gaiss.

Nepieciešamība mainīt saules kolektora jaudu ir tad, ja jāveic remonta darbi saules kolektorā, kā arī tad, ja kolektoru neizmanto. Gadījumos, kad nedarbojas ventilators, temperatūra saules kolektora telpā virs absorbera plāksnēm palielinās tā, ka norobežojošais caurspīdīgās plēves jumta materiāls sāk deformēties, šādos gadījumos absorberu jauda ir jāsamazina.

Dažreiz kaltēšanas tehnoloģiskajā procesā ir nepieciešamība samazināt pievadītā gaisa temperatūru. Samērā kaprīza ir rapša sēklu kaltēšana. Vienkāršākajā variantā, gaisa temperatūras samazināšanu var izpildīt ar rokas vadību – pagriežot absorberus, tas var būt risināts arī ar automātiskās vadības paņēmieniem, izmantojot kaltējamajā materiālā izvietotus mērīšanas pārveidotājus.

2. VĒJA ENERĢĒTIKA

2.1. Ievads

Vēja enerģētika ar savu tehnisko nodrošinājumu, šodien ir izveidojusies par stabilu enerģētikas nozari. Vēja enerģētiskās iekārtas ar jaudu no dažiem kilovatiem līdz megavatam un lielākas, ražo Eiropā, ASV un citās pasaules daļās. Liela daļa šo iekārtu tiek izmantotas elektroenerģijas ražošanai un tiek pieslēgtas elektriskajam tīklam vai arī tiek darbinātas autonomā režīmā.

Vēja rotora attīstīto mehānisko jaudu var aprēķināt izmantojot sakarību:

$$P = C_p S \frac{\rho v^3}{2}, \qquad (2.1)$$

kur v – vēja ātrums, m/s;

ρ – gaisa blīvums, kg/m^3;

S – vēja rotora laukums, m^2;

C_p – vēja izmantošanas koeficients.

No sakarības (2.1) redzams, ka jauda P_r ir proporcionāla vēja rotora laukumam S un vēja vidējā ātruma v kubam. Vēja izmantošanas koeficients C_p ir atkarīgs no vēja rotora konstrukcijas un vēja ātruma, tas raksturo cik efektīvi tiek izmantota vēja plūsmas enerģija.

Tā kā vēja ātrums nav pastāvīgs un jauda ir ļoti atkarīga no vēja ātruma, tad optimālās vēja rotora konstrukcijas izvēle galvenokārt ir atkarīga no enerģijas patērētāja prasībām. Parasti gada vidējā jauda, kuru var iegūt no vēja rotora laukuma vienības ir proporcionāla C_p, gaisa blīvumam un vēja vidējā ātruma kubam.

Maksimālā projektējamā vēja enerģētiskās iekārtas jauda tiek aprēķināta pie noteikta standarta vēja ātruma. Parasti šis vēja ātrums ir aptuveni 12 m/s, šai gadījumā, no 1 m^2 vēja rotora laukuma var iegūt 300 W, ja vēja izmantošanas koeficients C_p ir 0,35 līdz 0,45.

Vēja enerģētikai labvēlīgos rajonos, vēja ģeneratoru saražotā elektroenerģija ir no 25 līdz 33 % no maksimālā projektētā lieluma. Vēja ģeneratoru ekspluatācijas laiks

ir ne mazāks par 15 līdz 20 gadiem, to uzstādīšanas izmaksas svārstās no 1000 līdz 1500 ASV dolāri par 1 kW projektēto jaudu.

Jau pirms vairākiem simtiem gadu, vēja enerģiju izmantoja mehānisko iekārtu piedziņai, piemēram, ūdenssūkņiem, dzirnavām utt. Dažādas vēja piedziņas iekārtu konstrukcijas intensīvi tika izstrādātas no 1930. gada līdz pagājušā gadsimta piecdesmito gadu vidum. Naftas cenas šai laikā bija zemas un rezultātā vēja enerģētiskās iekārtas neguva plašu pielietojumu. Pēc straujā naftas cenu pieauguma 1973. gadā, interese par vēja iekārtām atkal atjaunojās. Vidējas un lielas jaudas vēja enerģētiskās iekārtas tika uzbūvētas jau pagājušā gadsimta septiņdesmito gadu beigās un astoņdesmito sākumā. Šai laikā izgatavoja mūsdienīga tehnoloģiskā līmeņa iekārtas ar vadības sistēmu, kas veidota uz mikroelektronikas bāzes.

Viens no pamatnosacījumiem projektējot vēja iekārtas ir nodrošināt aizsardzību pret spēcīgām, postošām vēja brāzmām. Vēja radītā slodze ir proporcionāla vēja ātruma kvadrātam. Ik pēc 50 gadiem mēdz būt vēji ar ātrumu, kas 5 līdz 10 reizes pārsniedz vidējo ātrumu, tāpēc vēja enerģētiskās iekārtas ir jāprojektē ar ļoti lielu stiprības rezervi. Vēja ātrums ir ļoti svārstīgs, rezultātā, mehāniskās konstrukcijas pakļautas cikliskai slodzei, tas var būt par cēloni konstrukciju sagruvumam no mehāniskā noguruma. Uz vēja rotora spārniem iedarbojas arī mainīga gravitācijas slodze, kas 20 gadu ekspluatācijas laikā var sasniegt pat 10^7 ciklus.

Viens no vēja izcelsmes cēloņiem ir tas, ka Zemes atmosfēra absorbē Saules starojumu, notiek gaisa sasilšana un izplešanās un rodas konvekcijas plūsmas. Globālā mērogā, šīm termiskajām parādībām piesummējas arī Zemes rotācija, kas veido raksturīgos vēja plūsmas virzienus.

Bez šīm vispārīgajām un sinoptiskajām likumsakarībām, būtisks iespaids uz vēja raksturlielumiem ir vietas īpatnībām, ko nosaka noteikti ģeogrāfiskie un ekoloģiskie faktori. Vēja ātrums palielinās palielinoties augstumam. Vēja horizontālā komponente ir būtiski lielāka par vertikālo komponenti. Vertikālā vēja komponente ir cēlonis straujām vēja brāzmām un daudziem citiem efektiem. Summārā kinētiskā enerģija vējam tiek novērtēta ar lielumu ap $0{,}7 \cdot 10^{21}$ džouli. Šī enerģija tiek izkliedēta nepārtrauktā berzes procesā galvenokārt atmosfēras slāņos, kā arī gaisam slīdot pa

zemes un ūdens virsmu, šī procesa jauda ir ap 1200 TW ($1,2 \cdot 10^{15}$ W), tas ir aptuveni 1 % no absorbētās saules enerģijas.

2.1. tabula

Vēja stiprums pēc Boforta skalas un tā iedarbība uz vēja agregātu

Boforta balles	Vēja ātrums, m/s	Vēja stiprums	Novērojumi	Vēja agregātu darba apstākļi pie dotā diapazona vidējā vēja ātruma un iedarbība
0	0,0-0,4	Bezvējš	Dūmi no skursteņa paceļas vertikāli	nav
1	0,4-1,8	Kluss	Dūmi paceļas gandrīz vertikāli	nav
2	1,8-3,6	Viegls	Ar seju ir jūtams vējš, kustas koku lapas	Slikti visa veida agregātiem
3	3,6-5,8	Vājš	Līgojas koku lapas, sāk plīvot karogi	Apmierinoši darbojas sūkņi un daži ģeneratori. Sāk darboties lēngaitas vēja rotori.
4	5,8-8,5	Mērens	Līgojas tievi zariņi, paceļas putekļi un papīri	Labi vēja ģeneratoriem. Sāk griezties vēja ģeneratoru rotori.
5	8,5-11	Svaigs	Sāk šūpoties lapu koki	Ļoti labi. VES jauda sasniedz 30% no projektētās jaudas.
6	11-14	Spēcīgs	Šūpojas koku lielie zari, dūc telefona vadi	Pieņemami izturīgām mazgabarīta iekārtām. VES jauda tuvu maksimālajai.
7	14-17	Stiprs	Visi koki šūpojas	Galēji pieļaujamie. Maksimālā jauda.
8	17-21	Ļoti stiprs	Lūzt koku zari, grūti iet pret vēju	Darbība nav pieļaujama. Vēja iekārtas aptur.
9	21-25	Vētra	Nelieli postījumi	Visas vēja iekārtas apturētas
10	25-29	Stipra vētra	Ievērojami postījumi, kokus izrauj ar saknēm	Pieļaujamās mehāniskās slodzes.
11	29-34	Ļoti stipra vētra	Plaša mēroga postījumi	Atsevišķu mezglu bojājumi.
12	Virs 34	Viesulis	Ārkārtīgi postījumi	Nopietni bojājumi, pat līdz iekārtas sagraušanai.

Ticami novērtēt, kādu vēja enerģijas daļu var lietderīgi izmantot, nav iespējams, vienīgi var paredzēt par cik palielināsies vēja enerģijas izmantošanas īpatsvars valstīs,

kas izmanto šo enerģiju. Pieaugot energoresursu cenām, vēja enerģētisko iekārtu izmantošana var būtiski palielināties, tas sevišķi attiecināms uz autonomo vēja staciju izmantošanu apsildei un elektroenerģijas ražošanai, vietās, kur nav pieejams elektriskais tīkls.

2.2. Vēja iekārtu klasifikācija

Vēja enerģētiskās iekārtas klasificē pēc divām galvenajām pazīmēm, pēc vēja rotora ģeometrijas un novietojuma attiecībā pret vēja plūsmu.

2.2. tabula

Dažādas jaudas vēja rotoru parametri pie vēja ātruma v = 12 m/s, vēja izmantošanas koeficienta *Cp* = 0,3, gaisa blīvuma ρ = 1,2 kg/m^3, ātrgaitas koeficienta Z = 6

Vēja iekārtas klase	Projektētā jauda, aprēķinu jauda P, kW	Vēja rotora diametrs D, m	Vēja rotora apgrieziena periods T, s
Mazās	10 25	6,4 10	0,3 0,4
Vidējās	50 100 150	14 20 25	0,6 0,9 1,1
Lielās	250 500 1000	32 49 64	1,4 2,1 3,1
Ļoti lielās	2000 3000 4000	90 110 130	3,9 4,8 5,7

Galvenie vēja rotoru klasifikācijas nosacījumi:

1. Kāds ir vēja rotora rotācijas ass novietojums attiecībā pret vēja plūsmu? Ass ir paralēla vēja plūsmai – šai gadījumā iekārta būs ar horizontālu ass novietojumu. Ass ir perpendikulāra vēja plūsmai – ass parasti ir vertikāli novietota.
2. Kāds spēks griež rotoru, spied spēks F_s vai cēlējspēks F_c? Vēja iekārtās, kur piedziņai izmanto spied spēku, rotora spārnu lineārais ātrums ir mazāks par vēja ātrumu. Iekārtās, kur izmanto aerodinamisko cēlējspēku, rotora spārnu galu

lineārais ātrums ir būtiski lielāks par vēja ātrumu. Šai gadījumā līdzīgi, kā jahtas tipa buru kuģiem, pārvietošanās ātrums var pārsniegt vēja ātrumu.

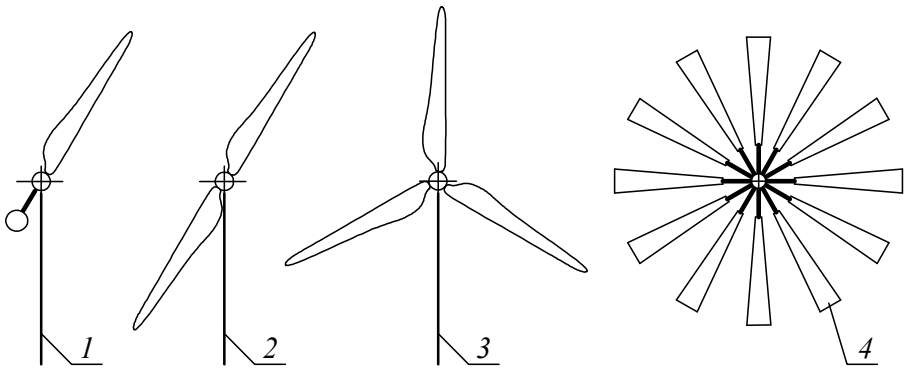
3. Cik daudz spārnu ir vēja rotoram? Tas raksturo vēja rotora ģeometrisko aizpildījumu. Vēja iekārtas ar lielu ģeometrisko aizpildījumu – ar lielu spārnu skaitu, attīsta ievērojamu jaudu pie maza vēja ātruma un sasniedz maksimālo jaudu pie neliela rotācijas ātruma. Vēja iekārtas ar mazu ģeometrisko aizpildījumu – ar mazu spārnu skaitu, sāk griezties pie salīdzinoši liela vēja ātruma un sasniedz maksimālo jaudu pie liela rotācijas ātruma. Daudzspārnu iekārtas parasti izmanto ūdenssūkņiem, kur jau pie neliela vēja ātruma iekārta sāk darboties, bet īpaši lielu jaudu neattīsta, bet droši izpilda savas funkcijas. Savukārt elektroģeneratoru piedziņai izdevīgāk izmantot ātrākas gaitas vēja rotorus, kuri efektīvāk paņem vēja enerģiju no lielāka ātruma gaisa plūsmas.
4. Kādām mērķim kalpo vēja enerģētiskā iekārta? Iekārta, kas paredzēta tiešai mehāniskā darba veikšanai parasti sauc par vēja dzirnavām, vai vēja turbīnām. Ja vēja enerģētiskā iekārta paredzēta elektroenerģijas ražošanai, tad to sauc par vēja ģeneratoru, vai vēja elektrostaciju VES.
5. Vai vēja rotora rotācijas frekvence ir konstanta, vai tā ir atkarīga no vēja ātruma? Vēja ģeneratori ar sinhrono vai asinhrono ģeneratoru, kas tiešā veidā pieslēgti jaudīgai energosistēmai darbojas ar konstantu rotācijas frekvenci, tie tiek sinhronizēti ar tīkla frekvenci. Šīs vēja iekārtas mazāk efektīvi izmanto vēja enerģiju, kā iekārtas ar mainīgu rotora rotācijas frekvenci.
6. Vēja rotors tiešā veidā cieši saslēgts ar elektroģeneratoru vai caur enerģijas pārveidotāju, kas izpilda bufera funkciju? Bufera izmantošana samazina vēja rotora rotācijas frekvences svārstību (fluktuāciju) iedarbību un efektīvāk tiek izmantota vēja enerģija un ģeneratora jauda. Vēja ātruma svārstību ietekmi uz elektroģeneratora saražotās enerģijas kvalitāti samazina vēja rotora inerce un elastīgs – neciešs savienojums starp vēja rotoru un ģeneratoru. Arī vēja rotora spārnu elastīgs stiprinājums samazina vēja fluktuāciju ietekmi.

2.2.1. Vēja rotori ar horizontālu asi

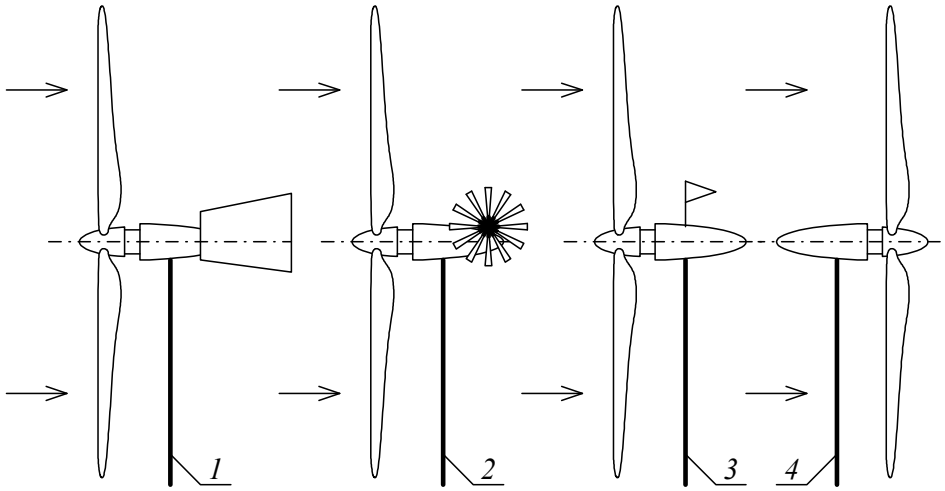
Ar horizontālu asi visizplatītākie ir propellera tipa vēja rotori. Galvenais dzenošais spēks, kas liek rotēt šiem rotoriem, ir aerodinamiskais cēlējspēks. Attiecībā pret vēja plūsmu vēja rotors darba laikā var atrasties pirms torņa un aiz torņa. Ja rotors atrodas pirms torņa, ir nepieciešams aerodinamisks stabilizators, vai kāda cita ierīce, kas vēja rotoru notur vējā. Ja rotors atrodas aiz torņa, tad tornis daļēji aizēno vēja rotoru un pienākošā gaisa plūsma daļēji kļūst turbulenta. Rotoram veidojas cikliskas slodzes, kas palielina troksni. Ir vērojama izejas parametru fluktuācija. Vēja virziens var mainīties samērā ātri, vēja rotoram ir jāseko vēja virziena izmaiņai. Vēja elektrostacijām ar jaudu virs 50 kW parasti rotora iestatīšanai vējā izmanto elektriskos servodzinējus.

Vēja ģeneratoriem parasti izmanto divu un trīsspārnu vēja rotorus. Trīsspārnu rotori ir ar daudz laidenāku gaitu. Ģenerators un paātrinošais reduktors (multiplikators) parasti atrodas torņa augšā, vēja iekārtas gondolā (grozāmajā galvā). No ekspluatācijas viedokļa, ģeneratoru ērtāk būtu novietot lejā, bet mehāniskā rotācijas enerģijas pārvade būtiski sarežģī šādu risinājumu, tāpēc izdevīgāk ģeneratoru novietot augšā.

Daudzspārnu vēja rotori attīsta lielu griezes momentu pie neliela vēja ātruma, tos izmanto ūdens sūknēšanai un citiem mērķiem, kur nav nepieciešams liels rotācijas ātrums.



2.1. att. **Horizontālas ass rotoru iedalījums pēc spārnu skaita:**
1 – vienspārna; 2 – divspārnu; 3 – trīsspārnu; 4 – daudzspārnu.



2.2. att. **Horizontālas ass rotoru iedalījums pēc orientācijas vējā:**
1 – ar stabilizatoru; 2 – ar papildus sānu rotoru; 3 – ar servomotoru; 4 – ar pašorientāciju.

2.2.2. Vēja rotori ar vertikālu asi

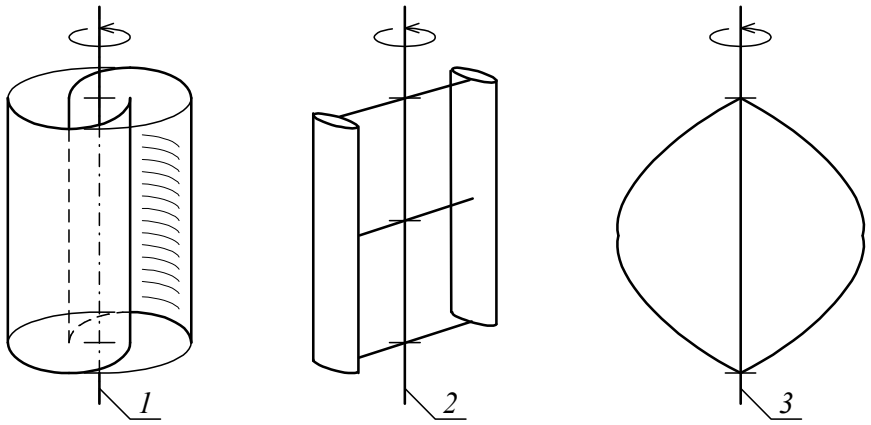
Pateicoties konstrukcijai, vēja rotori ar vertikālu asi vienmēr atrodas darba pozīcijā, neatkarīgi no vēja virziena. Konstrukcija ļauj novietot reduktoru un ģeneratoru torņa lejas daļā.

Galvenie trūkumi šādām iekārtām ir:

- Konstrukcijas daudz vairāk pakļautas noguruma lūzumiem, jo bieži veidojas pašsvārstību procesi;
- Griezes momenta pulsācijas, kas pasliktina ģeneratora izejas sprieguma parametrus.

KAUSIŅU TIPA ROTORS

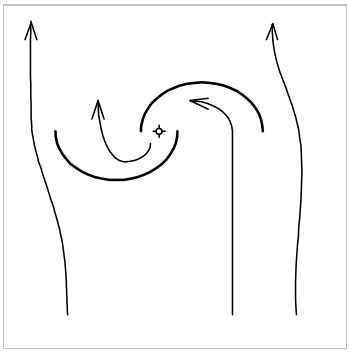
Kausiņu tipa rotoru izmanto anemometram vēja ātruma mērīšanai. Šī tipa vēja rotors griežas tikai ar spiedspēku. Kausveida lāpstiņas nodrošina praktiski lineāru sakarību starp rotora rotācijas frekvenci un vēja ātrumu.



2.3. att. **Vertikālas ass rotori:**
1 – Savoniusa rotors; 2 – Evansa rotors; 3 – Darjē rotors.

SAVONIUSA ROTORS

Šis rotors griežas tikai ar spiedspēku, tas nozīmē, ka lāpstiņu lineārais ātrums nepārsniedz vēja ātrumu. Rotora lāpstiņas izgatavo no plānām izliektām taisnstūra formas loksnēm. Konstrukcija ir vienkārša un lēta. Griezes moments veidojas no atšķirīgā pretestības spēka vēja plūsmai apejot izliektu un ieliektu virsmu. Savoniusa rotoram ir liels ģeometriskais aizpildījums un tas attīsta lielu griezes momentu, to izmanto ūdens sūknēšanai.



2.4. att. **Savoniusa rotors vējā**

DARJĒ ROTORS

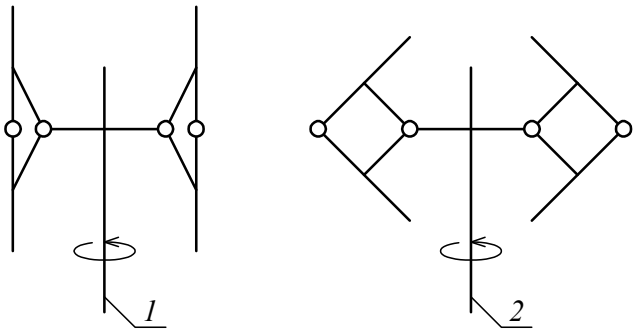
Darjē rotoru izmanto vēja ģeneratoros. Griezes momentu veido cēlējspēks, kas rodas diviem vai trim rotora spārniem, izgatavotiem no plāna, aerodinamiska profila. Cēlējspēks ir vislielākais tajā brīdī, kad rotora spārns ar lielu ātrumu šķērso vēja plūsmu. Darjē rotors pats nespēj uzsākt griezties, tāpēc to ir jāiegriež ar ģeneratoru to darbinot dzinēja režīmā.

MASGRUVA ROTORS

Darba laikā, šī rotora spārni ir izvietoti vertikālā stāvoklī, tie rotē ap vertikālu asi. Lielā vējā Masgruva rotors izslēdzas sakļaujas ap horizontālo stieni.

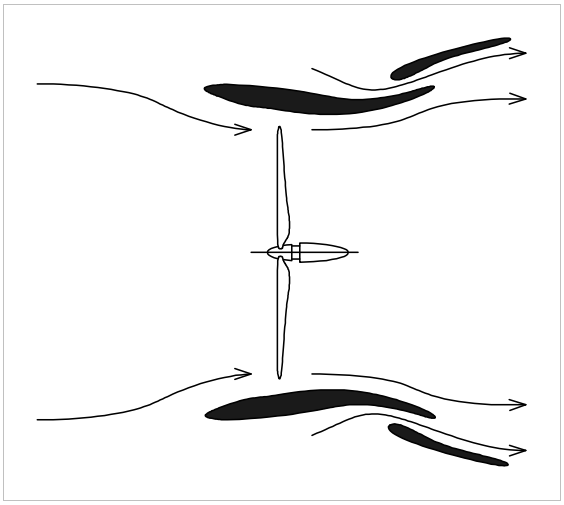
Evansa rotors.

Šim rotoram, to izslēdzot avārijas gadījumos un regulējot darba laikā spārni tiek grozīti ap savu vertikālo asi.



2.5. att. **Masgruva rotors:**
1 – darba stāvoklī; 2 – izslēgtā stāvoklī.

2.2.3. Vēja koncentratori



2.6. att. **Vēja plūsmas koncentrators**

Vēja enerģētiskās iekārtas jauda ir atkarīga no vēja plūsmas enerģijas izmantošanas efektivitātes. Viens no paņēmieniem vēja izmantošanas efektivitātes paaugstināšanai ir vēja koncentratoru izmantošana. Propellera tipa vēja rotoriem tie var būt difuzori vai konfuzori – deflektori, kas novirza papildus vēja plūsmu uz rotoru. To darbības rezultātā, izmantotais vēja plūsmas laukums

ir lielāks kā vēja rotora laukums. Praksē plašu pielietojumu vēja koncentratori nav guvuši.

2.3. Vēja rotoru teorijas pamatjēdzieni

2.3.1. Vēja plūsmas enerģija

Vējam piemīt milzīgi enerģijas krājumi, kas ir proporcionāli kustīgā gaisa blīvumam, plūsmas šķērsgriezumam un ātrumam kāpinātam trešajā pakāpē. Šī enerģija atmosfēras telpā ir pārāk izkliedēta un nevienmērīgi sadalīta, pie kam šī izkliede un sadalījums nepārtraukti mainās. Tas arī raksturo pastāvošo inženierproblēmu – ar kādām iekārtām visefektīvāk piesaistīt, paņemt kaut daļu vējam piemītošās enerģijas un pārvērst to citos, izmantošanai piemērotākos enerģijas veidos, kā to izdarīt, lai vēja enerģētiskās iekārtas darbotos ne tikai tehniski nevainojami, bet arī ekonomiski izdevīgi un nekaitētu dabai.

Gaisa masai, kas pārvietojas ar ātrumu v kinētiskā enerģija ir:

$$W = \frac{m \cdot v^2}{2} , \qquad (2.2)$$

kur W – gaisa kinētiskā enerģija, J;

m – gaisa masa, kg;

v – gaisa masas pārvietošanās ātrums, m/s.

Var noteiktu $\dot{m}$, kas izplūst caur laukumu S sekundes laikā:

$$\dot{m} = S \cdot \rho \cdot v , \qquad (2.3)$$

kur $\dot{m}$ – gaisa masa, kas izplūst caur laukumu S sekundes laikā, kg/s;

S – gaisa plūsmas laukums, m^2;

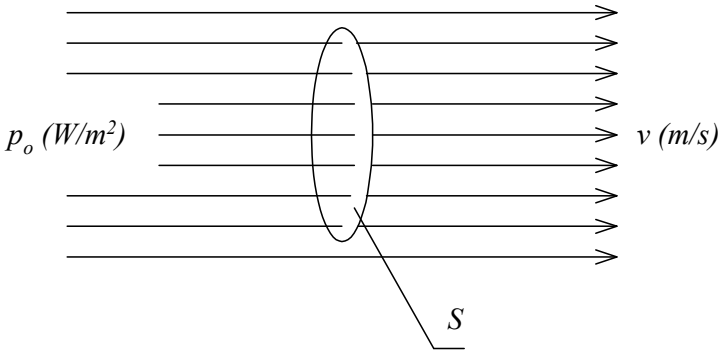
ρ – gaisa blīvums, kg/m^3;

v – gaisa masas pārvietošanās ātrums, m/s.

Ievietojot gaisa plūsmas masas aprēķina sakarību (2.3), kinētiskās enerģijas sakarībā (2.2), iegūstam gaisa plūsmas jaudas aprēķinu sakarību:

$$P_0 = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2}, \qquad (2.4)$$

kur P_0 – gaisa plūsmas jauda, W;



2.7. att. **Vēja plūsmas enerģija:**
p_0 – vēja īpatnējā jauda; S – vēja plūsmas laukums; v – vēja ātrums.

Vēja plūsmas īpatnējo jaudu nosaka ar sakarību:

$$p_0 = \frac{1}{2}\rho \cdot v^3, \qquad (2.5)$$

kur p_0 – vēja plūsmas īpatnējā jauda, W/m^2;
ρ – gaisa blīvums, kg/m^3, sausam gaisam jūras līmenī,
pie temperatūras 15C^o, ρ =1,225 kg/m^3;
v – vēja vidējais ātrums, m/s.

Caur laukumu S plūstošas neturbulentas vēja plūsmas jaudu apraksta sakarība:

$$P_0 = p_0 \cdot S = \frac{1}{2}\rho \cdot S \cdot v^3, \qquad (2.6)$$

kur P_0 – vēja plūsmas jauda, W;
S – vēja plūsmas laukums, m^2;

Enerģijas daudzums, ko var iegūt no vēja ir proporcionāls vēja turbīnas rotora aprakstītajam laukumam un vēja ātruma kubam. Vēja ātrumam palielinoties divas

reizes, enerģijas daudzums palielinās astoņas reizes. Tas nozīmē, ka vēja enerģijas daudzums, mainoties vēja ātrumam, ir ļoti mainīgs.

Praktiski mēs varam paņemt tikai daļu no vēja plūsmas jaudas P_0, to nosaka vēja izmantošanas koeficients. Labākajām aksiālajām, ātrgaitas vēja turbīnām tas ir 0,45...0.47. Tas nozīmē, ka mēs iegūstam mazāk kā pusi no vēja enerģijas. Paštaisītām un lēngaitas vēja turbīnām šis rādītājs ir daudz zemāks.

2.3.2. Idealizēts vēja rotors, Betca kritērijs un vēja izmantošanas koeficients

Vēja rotora teorētiskajā aprakstā izmanto idealizētu vēja rotora modeli. Vēja rotors tiek aizstāts ar iedomātu plānu apļa veida laukumu S_1, caur kuru plūst laminära vēja plūsma, tas novietots vēja plūsmas ceļā un rada noteiktu pretestību gaisa plūsmai, absorbē daļu no vēja kinētiskās enerģijas. Normālos darba apstākļos starp gaisa plūsmas ātrumiem pirms un pēc vēja rotora ir attiecība $v_2 < v_1 < v$ .Vēja radītais spēks F, kas iedarbojas uz vēja rotoru ir vienāds ar gaisa masas kustības daudzuma izmaiņu laika vienībā:

$$F = \dot{m}v - \dot{m}v_2, \tag{2.7}$$

kur $\dot{m}$ – gaisa masa, kas izplūst caur vēja rotoru laika vienībā, kg/s;
v – vēja ātrums pirms vēja rotora, m/s;
v_2 – vēja ātrums aiz vēja rotora, m/s.

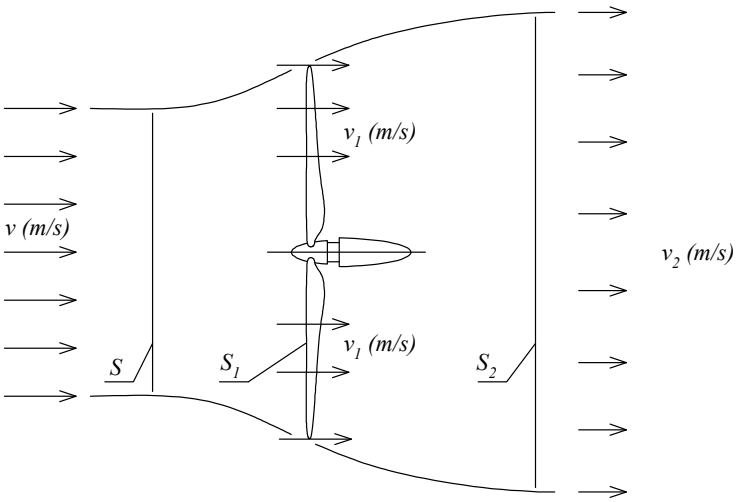
Šis spēks iedarbojas uz vēja rotoru vēja plūsmas virzienā un tas spiež uz rotoru. Jauda, kuru attīsta spēks F ir vēja rotora jauda un to var aprēķināt:

$$P = F \cdot v_1 = \dot{m} \cdot (v - v_2) \cdot v_1, \tag{2.8}$$

kur P – vēja rotora jauda;
v_1 – rotorā ieplūstošā gaisa ātrums:

$$v_1 = \frac{(v + v_2)}{2}, \tag{2.9}$$

$$(v - v_2) \cdot v_1 = (v - v_2) \cdot \frac{(v + v_2)}{2} = \frac{1}{2} \cdot (v^2 - v_2^2), \tag{2.10}$$



2.8. att. **Gaisa plūsmas ātruma izmaiņa:**
v – vēja ātrums; v_1 – rotorā ieplūstošā gaisa ātrums; v_2 – izlietotā gaisa plūsmas ātrums aiz vēja rotora; S – vēja plūsmas šķērsgriezuma laukums; S_1 – vēja rotora šķērsgriezuma laukums; S_2 – no vēja rotora izplūstošā gaisa plūsmas šķērsgriezuma laukums.

Ievietojam (2.10) izteiksmi (2.8) izteiksmē un iegūstam sakarību:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v^2 - v_2^2), \qquad (2.11)$$

Šī jauda P ir enerģija, kuru vēja plūsma atdod laika vienībā.

Gaisa masu, kas laika vienībā izplūst caur vēja rotoru ar laukumu S_1, var izteikt ar sakarību:

$$\dot{m} = S_1 \cdot \rho \cdot v_1, \qquad (2.12)$$

Ja šo sakarību ievietojam ja udas aprēķina sakarībā (2.8), tad iegūstam sakarību:

$$P = S_1 \cdot \rho \cdot v_1^2 \cdot (v - v_2), \qquad (2.13)$$

No sakarības (2.9) var izteikt v_2, un ievietot sakarībā (2.13):

$$P = S_1 \cdot \rho \cdot v_1^2 \cdot (v - (2v_1 - v)) = 2S_1 \cdot \rho \cdot v_1^2 (v - v_1), \qquad (2.14)$$

Izteiksim pienākošā *vēja plūsmas bremzēšanas koeficientu a*. Koeficients *a* ir relatīvais ātruma samazinājuma koeficients vēja rotoram pienākošajai gaisa plūsmai:

$$a = \frac{(v - v_1)}{v}, \tag{2.15}$$

Izteiksim v_1,

$$v_1 = (1 - a) \cdot v, \tag{2.16}$$

Ievietojot (2.16) sakarībā (2.14):

$$P = 2S_1 \cdot \rho \cdot (1 - a)^2 v^2 [v - (1 - a) \cdot v] = \frac{1}{2} \cdot S_1 \cdot \rho \cdot v^3 [4a \cdot (1 - a)^2], \tag{2.17}$$

Ja salīdzinām iegūto izteiksmi (2.17) ar (2.6), tad esam ieguvuši sakarību:

$$P = C_P \cdot P_0, \tag{2.18}$$

kur P – vēja rotora jauda, W;

P_0 – vēja plūsmas jauda, W;

C_P – enerģijas daļa, kas tiek atdota vēja rotoram – vēja izmantošanas koeficients.

Vēja izmantošanas koeficientu var aprēķināt pēc sakarības:

$$C_P = 4a(1 - a)^2, \tag{2.19}$$

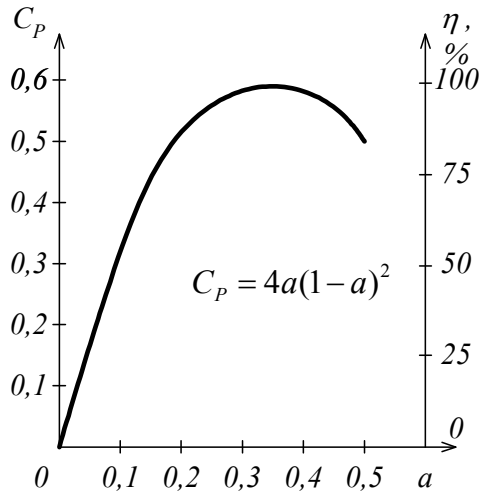
Maksimālā C_P koeficienta vērtība sasniedz pie a=1/3, tas ir *Betca kritērijs*:

$$C_{P_{\max}} = 16 / 27 = 0{,}5926, \tag{2.20}$$

Betca kritērijs ir attiecināms uz visām enerģētiskajām iekārtām, kur tiek izmantota *brīvi plūstošu* gāzu vai šķidrumu plūsmas kinētiskā enerģija. Šis rādītājs neattiecas uz tradicionālajām hidroturbīnām, jo tām ūdeni pievada pa cauruli, nevis brīvā plūsmā.

Tikai daļu no vēja plūsmas kinētiskās enerģijas var pārvērst mehāniskajā darbā. Pārējā, caur vēja rotoru plūstošā gaisa kinētiskā enerģija, tiek iztērēta gaisa daļiņu berzes, rotora radītās gaisa plūsmas pretestības un citu zudumu pārvarēšanai. Vērā ņemama daļa enerģijas paliek gaisa plūsmai, kas ir izgājusi caur vēja rotoru, gaisa masai aiz vēja rotora ir nepieciešama kinētiskā enerģija, lai aizplūstu projām.

Spārnu tipa vēja rotoru teorija pierāda, ka gaisa plūsmas ātrums aiz vēja rotora nevar būt vienāds ar nulli un ka vislabākais vēja dzinēja darba režīms būs, ja gaisa plūsmas ātrums aiz vēja rotora būs 2/3 no pienākošā vēja ātruma.

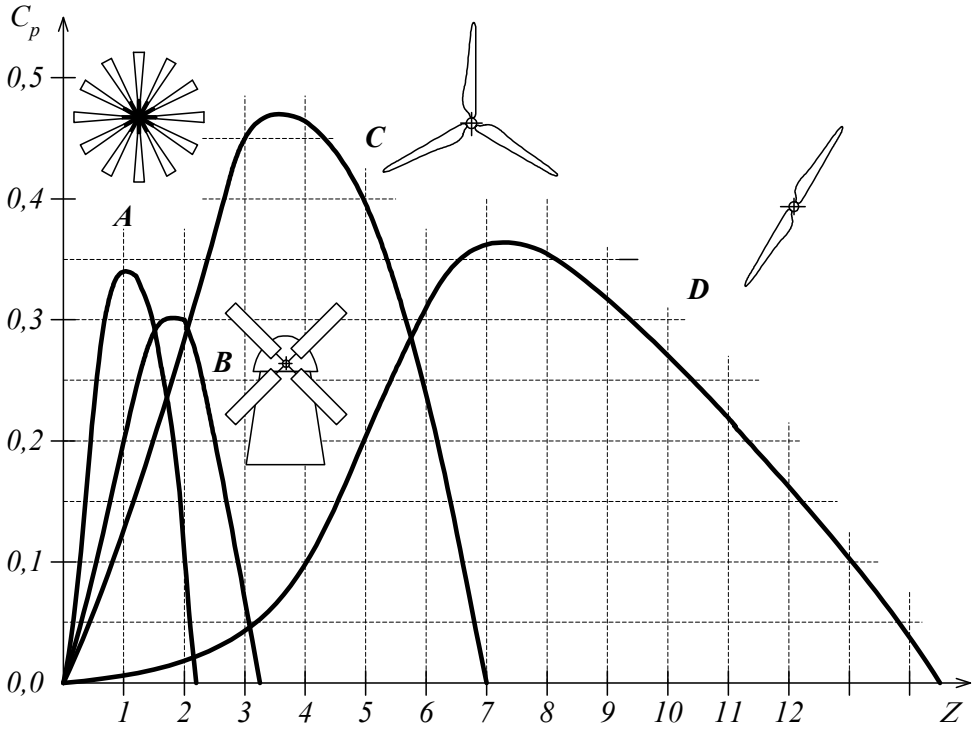


2.9. att. **Vēja izmantošanas koeficients C_P un lietderības koeficients η atkarībā no vēja plūsmas bremzēšanas koeficienta a**

Betca kritērijs nozīmē, ka labākajā gadījumā ir iespējams no vēja plūsmas paņemt nedaudz vairāk kā pusi enerģijas.

Vēja izmantošanas koeficients C_P raksturo vēja rotora efektivitāti un vēja enerģijas daļu, kuru paņem vēja rotors no caurplūstošās gaisa plūsmas. Vēja izmantošanas koeficients pirmkārt ir atkarīgs no vēja rotora tipa, spārnu formas un izgatavošanas kvalitātes, kā arī no daudziem citiem faktoriem.

Labākajiem vēja rotoriem ar aerodinamiska profila spārniem, vēja izmantošanas koeficients ir no 0,42 līdz 0,47. Tas nozīmē, ka šāds vēja rotors var pārvērst mehāniskajā enerģijā 42-47 % caur rotoru izplūdušā vēja enerģijas.



2.10. att. **Vēja izmantošanas C_p un ātrgaitas koeficients Z dažādiem rotoriem:** A – Amerikas vēja sūkņu rotori ar 16 lāpstiņām, Z = 1; B – Holandes vējdzirnavas ar 4 spārniem, Z = 2; C – trīsspārnu vēja rotori, Z = 4; D – divspārnu vēja rotori, Z = 7.

Dažkārt tiek dots rotora lietderības koeficients. Nosakot vēja rotora lietderības koeficientu η pieņem, ka maksimālais enerģijas daudzums, ko var paņemt no vēja plūsmas ir C_{Pmax} = 0,5926 un tas atbilst η = 100 %. Ja vēja ģeneratora vēja izmantošanas koeficients ir 0,4, tad lietderības koeficients šādam rotoram ir:

$$\eta = \frac{C_P}{C_{P\max}} \cdot 100\% = \frac{0{,}4}{0{,}59} \cdot 100\% = 68\% . \qquad (2.21)$$

Attēlā 2.10 dots klasisko horizontālas ass vēja rotoru vēja izmantošanas koeficients C_P atkarībā no rotora tipa un ātrgaitas koeficienta *Z*.

Vislabākais vēja izmantošanas koeficients, līdz 0,47, ir modernajiem, aerodinamiska profila, ātrgaitas, trīsspārnu vēja rotoriem. Šo rotoru ātrgaitas koeficients ir ap 4. Tas nozīmē, ka rotora spārnu galu ātrums ir 4 reizes lielāks par vēja ātrumu. Lēngaitas rotoriem, kuros neizmanto aerodinamiskas formas spārnu profilu,

vēja izmantošanas koeficients ir no 0,27 līdz 0,33, spārnu galu ātrums nepārsniedz vēja ātrumu un ātrgaitas koeficients *Z* ir ap 1.

No attēlā 2.10 parādītajām raksturlīknēm redzam, ka visaugstākais vēja izmantošanas koeficients C_P katram rotoram ir pie noteikta ātrgaitas koeficienta Z, tas nozīmē, ka pie katra vēja ātruma ir viens vienīgais rotora rotācijas ātrums, pie kura vēja enerģija tiek izmantota visefektīvāk, C_P ir vislielākais.

2.3.3. Vēja rotora ātrgaitas koeficients

Pēc rotācijas ātruma vēja rotorus iedala lēngaitas un ātrgaitas rotoros. Vēja rotora *ātrgaitas koeficients* raksturo, cik reizes rotora aploces ātrums pārsniedz vēja ātrumu:

$$Z = \frac{v_a}{v} = \frac{R \cdot \omega}{v}, \qquad (2.22)$$

kur Z – vēja rotora ātrgaitas koeficients;

v_a – vēja rotora spārnu galu ātrums, m/s;

v – vēja ātrums, m/s;

ω – rotora leņķiskais ātrums, rad/s;

R – rotora rādiuss, m.

Vēja rotora aploces ātrumu v_a var aprēķināt, ja ir zināma rotora rotācijas frekvence un rādiuss:

$$v_a = \omega \cdot R = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{60} \cdot n, \qquad (2.23)$$

kur R – rotora rādiuss, m;

ω – rotora leņķiskais ātrums, rad/s;

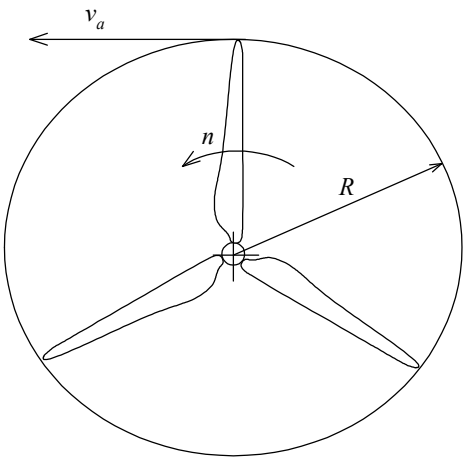
n – rotora rotācijas frekvence, apgr./min.

Rotora rādiusu *R* aizstājam ar diametru *D = 2R* un no iepriekšējām sakarībām varam izveidot sakarību ātrgaitas koeficienta noteikšanai:

$$Z = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot v}, \qquad (2.24)$$

Vēja rotora rotācijas ātrumu no sakarības (2.24) var izteikt:

$$n = \frac{60 \cdot Z \cdot v}{\pi \cdot D}, \qquad (2.25)$$



2.11. att. **Vēja rotora aploces ātrums**

Lēngaitas vēja rotoriem spārnu skaits ir no 4 un vairāk, ātrgaitas ir ar spārnu skaitu no 1 līdz 4. Samazinoties spārnu skaitam, palielinās vēja rotoru ātrgaitas koeficients. Tas nozīmē, jo mazāks spārnu skaits, jo ātrāks rotors. Visātrākais ir viena spārna rotors ar ātrgaitas koeficientu ap15.

Ātrgaitas vēja rotoriem, salīdzinot ar lēngaitas rotoriem, ir vairākas būtiskas priekšrocības:

- tos ir vienkāršāk salāgot ar elektroģeneratoriem, jo tiem ir nepieciešama liela vārpstas rotācijas frekvence;
- tie ir daudz vieglāki par lēngaitas rotoriem;
- tiem ir daudz lielāks vēja izmantošanas koeficients.

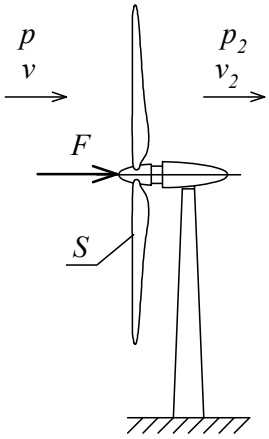
Ātrgaitas rotoru lielākais trūkums ir salīdzinoši mazais palaišanas griezes moments, tas ir daudzkārt mazāks, kā lēngaitas rotoriem.

2.3.4. Gaisa spiediens uz vēja rotoru

Gaisa spiediena starpība uz idealizētu vēja rotoru ir aprakstāma ar sakarību:

$$\Delta p = p - p_2 = \frac{(v^2 - v_2^2) \cdot \rho}{2}, \qquad (2.26)$$

kur Δp – statiskā spiediena starpība spiedienam pirms un pēc vēja rotora;
p – spiediens pirms vēja rotora;
p_2 – spiediena pēc vēja rotora;
v – vēja ātrums pirms vēja rotora;
v_2 – vēja ātrums pēc vēja rotora;
$\rho \cdot v^2 / 2$ – dinamiskais spiediens.



2.12. att. **Gaisa spiediens uz vēja rotoru**

Maksimālais spiediens būs, ja vēja ātrums aiz vēja rotora samazināsies līdz 0, $v_2 = 0$, vējā būs novietots gaisu necaurlaidīgs disks, šai gadījumā:

$$\Delta p_{\max} = \frac{\rho \cdot v^2}{2}. \qquad (2.27)$$

Maksimālā slodze, kas darbojas uz vēja rotoru, šai gadījumā būs:

$$F_{\max} = \frac{\rho \cdot S \cdot v^2}{2}. \qquad (2.28)$$

Uz horizontālās ass vēja rotoram ass virzienā darbojas spēks, kas vienāds ar vēja plūsmas gaisa masas kustības daudzuma izmaiņas ātrumu, to sauc par *pieres spēku*:

$$F = \dot{m} \cdot (v - v_2), \qquad (2.29)$$

kur $\dot{m}$ - gaisa masa, kas izplūst caur vēja rotoru laika vienībā;

v – vēja ātrums pirms vēja rotora;

v_2 – vēja ātrums aiz vēja rotora.

Sakarībā (2.29) ievietojot sakarības (2.12), (2.9), (2.15), (2.16) var izteikt:

$$F = \frac{\rho \cdot S \cdot v^2}{2} \cdot 4a \cdot (1 - a), \qquad (2.30)$$

kur $\rho \cdot S \cdot v^2 / 2$ - ir spēks, kas darbojas uz perpendikulāri vēja plūsmai novietotu necaurlaidīgu disku ar laukumu *S*. Spēku kas iedarbojas uz konkrētu vēja rotoru, var noteikt ar sakarību:

$$F = C_F \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^2}{2}, \qquad (2.31)$$

kur C_F – pieres spiediena spēka koeficients,

$$C_F = 4a \cdot (1 - a), \qquad (2.32)$$

kur pēc (2.15) sakarības pienākošā vēja plūsmas bremzēšanas koeficients *a,*

$$a = \frac{(v - v_1)}{v} = \frac{(v - v_2)}{2v} \quad . \tag{2.33}$$

Maksimālais lielums $C_F = 1$, tas ir pie $a = 1/2$, tas atbilst vēja ātrumam aiz vēja rotora $v_2 = 0$. Saskaņā ar Betca kritēriju, visaugstākais vēja izmantošanas koeficients vēja rotoram ir pie $a = 1/3$, šai gadījumā pieres spiediena spēka koeficients ir $C_F = 8/9$.

Malu efektu iedarbības rezultātā pieres spiediena spēka koeficients necaurlaidīgam diskam praktiski pārsniedz 1 un sasniedz 1,2.

2.3.5. Griezes moments

Vēja rotora maksimālais griezes moments *nevar pārsniegt* maksimālā spēka un maksimālā rotora rādiusa reizinājumu:

$$M_{\max} = F_{\max} \cdot R \,, \tag{2.34}$$

kur M_{max} – maksimālais griezes moments, Nm;

F_{max} – maksimālais spēks, kas iedarbojas uz vēja rotoru, N;

R – rotora rādiuss, m.

Lielākais spēks, kas darbojas uz rotoru tika noteikts ar (2.28) sakarību, tad:

$$M_{\max} = \frac{S \cdot \rho \cdot v^2 \cdot R}{2}, \tag{2.35}$$

Vispārīgā veidā vēja rotora griezes momentu var aprakstīt ar sakarību:

$$M = C_m \cdot M_{\max} \,, \tag{2.36'}$$

kur C_m – griezes momenta koeficients.

No ātrgaitas koeficienta Z aprēķinu sakarības (2.22) izsakām R:

$$R = \frac{Z \cdot v}{\omega}, \tag{2.36}$$

Griezes momenta aprēķinu sakarībā (2.35) rādiusu R aizstājam ar sakarībā (2.36) izteikto:

$$M_{\max} = \frac{S \cdot \rho \cdot v^2 \cdot (Z \cdot v)}{2\omega} = \frac{P_0 \cdot Z}{\omega}, \tag{2.37}$$

kur P_0 – vēja plūsmas jauda no sakarības (2.6).

Mehāniskā jauda uz vēja rotora vārpstas ir jauda *P*, kuru attīsta vēja rotors, tad:

$$P = M \cdot \omega . \qquad (2.38)$$

Rotors no vēja plūsmas jaudas P_0 var paņemt tikai, $P = C_P \cdot P_0$, (2.18), tāpēc sakarības (2.36) un (2.38) varam apvienot un pārrakstīt:

$$C_P \cdot P_0 = C_m \cdot M_{\max} \cdot \omega . \qquad (2.39)$$

Sakarībā (2.39) ievietojot (2.37), iegūstam:

$$C_P \cdot P_0 = C_m \cdot P_0 \cdot Z \; ; \; C_P = C_m \cdot Z . \qquad (2.40)$$

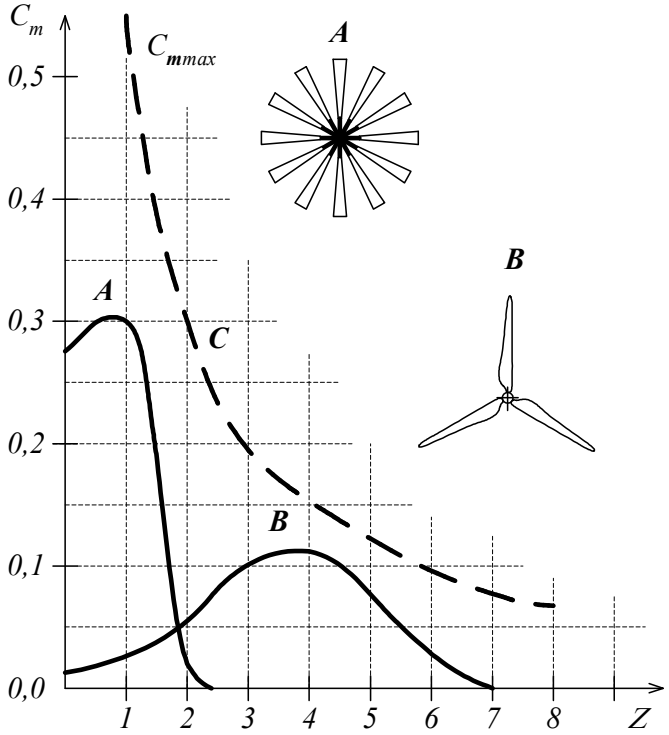
Svarīgi atzīmēt, ka koeficienti C_P un C_m nav konstanti lielumi, tie mainās atkarībā no ātrgaitas koeficienta *Z* (skat. 2.13. att.), bet ātrgaitas koeficients *Z* mainās no vēja ātruma *v* un rotora rotācijas frekvences.

Ņemot vērā Betca kritēriju, maksimālā koeficienta C_P vērtība ir 0,59, tāpēc ideālā gadījumā *griezes momenta koeficients* C_m nevar pārsniegt vērtību:

$$(C_m)_{\max} = \frac{0{,}59}{Z} . \qquad (2.41)$$

Salīdzinot vienāda izmēra vēja rotorus, ir redzams, ka griezes moments un palaišanas moments lēngaitas vēja rotoram ir daudzkārt lielāks kā ātrgaitas rotoram (skat. 2.13. att.). Palielinoties rotora ātrgaitas koeficientam, proporcionāli samazinās griezes momenta koeficients.

Ir svarīgi saprast, ja vēja rotora spārni ir izgatavoti vienāda profila un vienādas kvalitātes, vēja rotora jauda ļoti maz ir atkarīga no rotora spārnu skaita. Cēlonis ir tas, ka vēja dzinēja, kā arī jebkura cita dzinēja jauda, ir griezes momenta M un leņķiskās frekvences ω reizinājums, $P = M \cdot \omega$ (2.38). Griezes moments M, kuru attīsta vēja rotors, samazinot spārnu skaitu samazinās, bet proporcionāli pieaug vārpstas rotācijas frekvence - pieaug leņķiskā frekvence. Šādā veidā, neatkarīgi no rotora spārnu skaita, reizinājums $M \cdot \omega$ praktiski paliek nemainīgs. Protams, ja salīdzina rotorus ar dažāda profila un kvalitātes spārniem, ir jāņem vērā vēja izmantošanas koeficients.



2.13. att. **Griezes momenta koeficients C_m atkarībā no ātrgaitas koeficienta Z:**
A – lēngaitas vēja rotors; B – ātrgaitas vēja rotors; C – *Betca kritērija* līkne.

Pie vienāda vēja ātruma, lēngaitas vēja rotoram ir daudz lielāks griezes moments, kā ātrgaitas rotoram, rezultātā, tas sāks strādāt pie mazāka vēja ātruma. Tas ir ļoti svarīgi no vēja rotora ekspluatācijas viedokļa, jo lēngaitas rotora darba stundu skaits būs lielāks nekā ātrgaitas rotoram.

2.3.6. Vēja spiedspēks un cēlējspēks

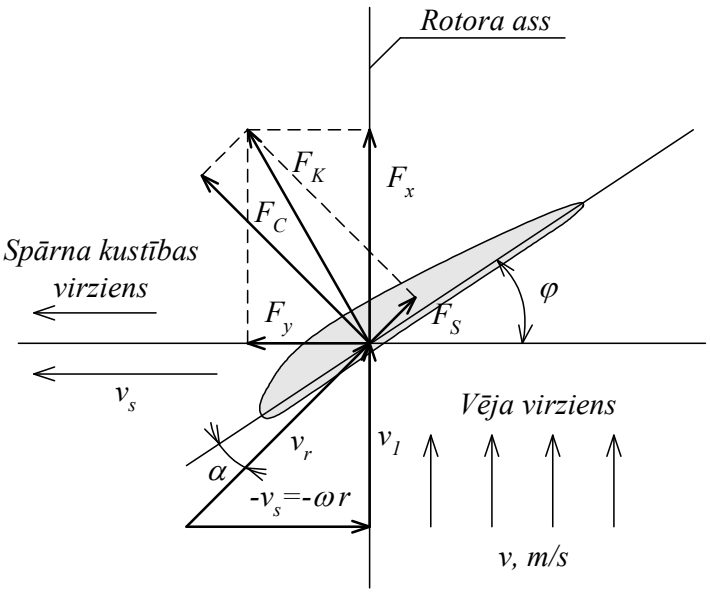
Vēja rotora spārni griezes momentu iegūst no vēja spiediena spēka uz spārna virsmas un no aerodinamiskā cēlējspēka, kas veidojas aerodinamiska profila spārniem. Spiedspēku izmanto lēngaitas vēja rotoru piedziņā, piemēram, vecās vējdzirnavās ar plakaniem un izliektiem spārniem, mūsdienās to izmanto kausiņu anemometriem, kā arī daudzspārnu rotoros ūdenssūkņiem. Vēja lēngaitas rotoriem, kas neizmanto

aerodinamisko spārnu cēlējspēku, bet darbojas tikai ar spiedspēku, vēja izmantošanas koeficients C_p nepārsniedz 0,33. Tas nozīmē, ka ar spiedspēku nav iespējams paņemt no vēja vairāk kā trešo daļu enerģijas.

Nozīmīgu ieguldījumu vēja enerģētisko iekārtu attīstībai deva aviācija ar veiktajiem aerodinamikas pētījumiem. Modernajiem vēja rotoriem izmanto aerodinamiska profila spārnus un tiek izmantots spārna cēlējspēks (skat. 2.14. att.).

Uz kustībā esoša spārna katru elementu iedarbojas cēlējspēks F_C un spiedspēks F_S, kas atkarīgi no relatīvā gaisa ātruma v_r un gaisa plūsmas virziena pret spārna elementu.

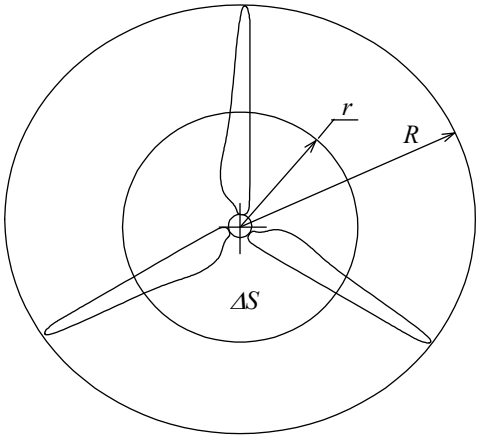
Relatīvais gaisa ātrums v_r ir pieplūstošā vēja ātruma v_1 un spārna elementa pārvietošanās ātruma $-v_s$ ģeometriskā summa, v_s virziens vektoru diagrammā ņemts pretēji spārna kustības virzienam, jo gaiss uzplūst spārnam.



2.14. att. **Spēku sadalījums uz vēja rotora spārna segmenta:**
v – vēja ātrums; v_1 – pieplūstošā vēja ātrums; v_s – spārna segmenta pārvietošanās ātrums; v_r – relatīvā vēja komponente; F_S – spiedspēks; F_C – cēlējspēks; F_K – cēlējspēka un spiedspēka summa; F_x – aksiālā spēka komponente; F_y – griezes momentu veidojošā komponente; φ – spārna uzstādīšanas leņķis, starp spārna profila hordu un vējrata rotācijas plakni; α – relatīvā vēja v_r uzplūdes leņķis, starp spārna profila hordu un relatīvā vēja virzienu.

Cēlējspēks F_C rodas gaisa plūsmai aptekot spārna abas puses ar atšķirīgu ātrumu. Spārna pusē ar lielāko gaisa plūsmas ātrumu rodas retinājums, kas veido šai virzienā vērstu cēlējspēku. F_C vērtība ir atkarīga no gaisa uzplūdes leņķa α, tas atkarīgs no spārna uzstādīšanas leņķa φ, vēja ātruma v_1 un spārna pārvietošanās ātruma v_s. Cēlējspēka F_C un spiedspēka F_S radītais kopīgais spēks F_K veido spēka aksiālo komponenti F_x un tangenciālo spēka komponenti F_y. Aksiālā spēka komponente F_x rada aksiālo spiedienu uz vēja rotora asi un slogo torni. Tangenciā spēka komponente F_y griež vēja rotoru. Jo lielāka ir cēlējspēka un spiedspēka attiecība, jo labāka ir spārna aerodinamika, jo augstāks vēja izmantošanas koeficients.

Virzienā uz spārna smaili, spārna elementa ātrums v_s pieaug. Lai iegūtu cēlējspēka un spiedspēka attiecību tuvu maksimālajai visā spārna garumā un vēja ātruma darba diapazonā, spārna uzstādīšanas leņķis φ tiek samazināts spārna smailes virzienā. Pareizi veidotam spārnam ir savērpts profils, spārna smaile ir gandrīz paralēla rotācijas plaknei.



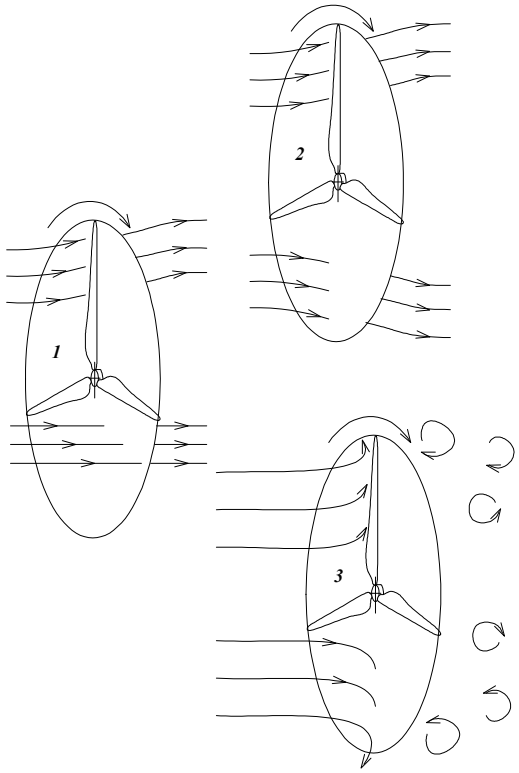
2.15. att. **Vēja rotora segments**

Vēja rotoram ir jāspēj palaisties no miera stāvokļa. Ja palielinās vēja ātrums, griezes momentam jābūt pietiekamam, lai rotors sāktu kustēties. To panāk palielinot spārnu skaitu, vai palielinot spārna laukumu.

2.3.7. Vēja rotora darba režīms

Vēja rotors strādā nenorobežotā gaisa plūsmā un nenotiek cauri rotoram izgājušā gaisa aizvadīšana no pieplūstošā gaisa zonas. Gaisa plūsmai ir jāsaglabā pietiekams ātrums, lai tā pati atstātu vēja rotora darba zonu un netraucētu pieplūstošajam gaisam. Saskaņā ar Betca kritēriju, vēja rotors no pieplūstošā gaisa var paņemt ne vairāk kā 59 % kinētiskās enerģijas. Uz hidroturbīnām Betca kritērijs

neattiecas, jo tur tiek izmantota norobežota plūsma un turbīnās izlietotais ūdens tiek aizvadīts.



2.16. att. **Vēja plūsmas iedarbe uz vēja rotoru pie dažāda rotācijas ātruma:**
1 – maza rotācijas frekvence, daļa vēja plūsmas iziet caur rotoru uz spārniem neiedarbojoties; 2 – optimālā rotācijas frekvence, visa vēja plūsma iedarbojas uz spārniem; 3 – pārmērīgi liela rotācijas frekvence, notiek vēja plūsmas turbulizācija.

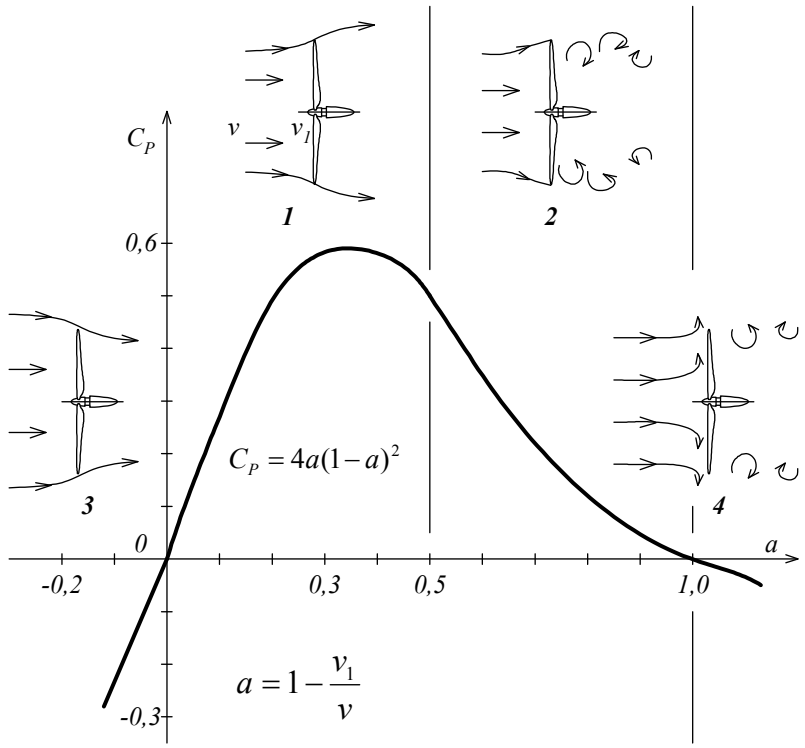
Vēja plūsmas enerģijas pārveidošanas efektivitāte būs mazāka par optimālo (skat. 2.16. att.), ja

- rotors rotē pārmērīgi ātri, vai rotora spārni būs izvietoti tik blīvi, ka veidojas turbulenta vēja plūsma rotora spārnu priekšā;
- rotors rotē tik lēni, vai spārni izvietoti tik reti, ka ievērojama daļa vēja plūsmas iet cauri rotora laukumam, neiedarbojoties uz rotora spārniem.

Lai panāktu maksimālo vēja rotora efektivitāti attiecīgās ģeometriskās konfigurācijas spārniem, katram vēja ātrumam ir atbilstoša visefektīvākā rotācijas frekvence.

Vēja rotora un propellera raksturīgie režīmi atkarībā no *vēja plūsmas bremzēšanas koeficientu a* (2.12), ir apskatīti 2.17. attēlā.

- Ja $a < 0$, tad C_P ir ar mīnusa zīmi. Tas ir aviācijas propellera darba režīms, rotora spārni rada vilces spēku. Šai režīmā spēks uz propellera asi ir pretēji vērsts vēja ātruma v virzienam, parasti to izmanto, lai lidaparāts pārvietos uz priekšu. Līdzīgi darbojas arī ventilators. Enerģija no rotora spārniem tiek atdota gaisa plūsmai un tās ātrums tiek palielināts.



2.17. att. **Vēja izmantošanas koeficients dažādiem vēja rotora darba režīmiem:**
1 – vēja rotora nominālais darba režīms; 2 – neefektīvs darba režīms, jo notiek spēcīga gaisa plūsmas turbulizācija; 3 – propellera vilces režīms, enerģija no rotora tiek atdota gaisa plūsmai; 4 – vēja rotora reversēšana, gaisa plūsma vērsta pret vēja virzienu.

- Ja $0 < a < 0{,}5$, tad vēja izmantošanas koeficients C_P sasniedz maksimumu. Vēja rotoram brīvi rotējot bez mehāniskās slodzes, rotorā ieplūstošā gaisa ātrums un vēja ātrums ir vienādi $v_1 = v$, rezultātā, $a = 0$ un arī $C_P = 0$. Vēja rotoru slogojot, rotorā ieplūstošā gaisa ātrums v_1 samazinās un vēja izmantošanas koeficients C_P palielinās, maksimālo vērtību, tas sasniedz pie $a = 1/3$, kad $v_1 = 2v/3$, skatīt (2.19) un (2.16). Pie $a = 0{,}5$ ir maksimālā pieres slodze rotoram un griezes momenta koeficients $C_m = 1$.
- Ja $0{,}5 < a < 1$, tad C_P pakāpeniski samazinās līdz nullei. Pie lieluma $a = 0{,}5$ sākas gaisa plūsmas turbulence un lineārās gaisa plūsmas teorija vairs nav pielietojama. Kad $a = 1$, vēja izmantošanas koeficients $C_P = 0$, vēja rotors

griežas intensīvi turbulizējot gaisa plūsmu, bet lietderīgo griezes momentu uz vārpstas vairs nedod.

- Ja $a > 1$, ir tad, kad rotoram pieplūstošā gaisa ātrums v_1 ir vērsts pretējā virzienā. Šādā režīmā strādā lidmašīnas propellers veicot bremzēšanu pēc nosēšanās. Tas tiek darīts mainot rotora spārnu iestatījuma leņķi, mainot vilces virzienu. Rotora priekšā veidojas gaisa virpuļi, tiek patērēta papildus enerģija.

2.4. Vējdzirnavas

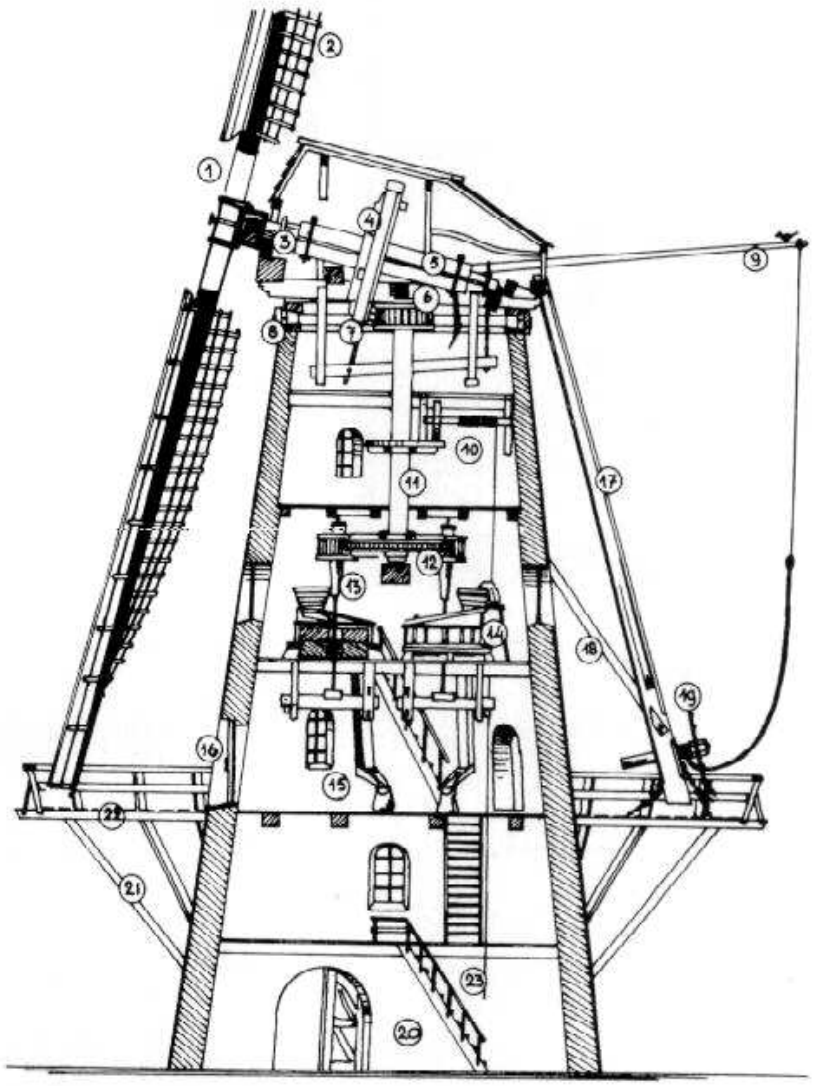
2.4.1. Holandiešu vējdzirnavas

Vējdzirnavas ir pazīstamas jau tālā senatnē, jau pirms 4000 gadiem cilvēks izmantoja vēja spēku darba veikšanai un ceļošanai. Mūsu laikmeta cilvēkiem vējdzirnavas asociējas ar klasiskā Holandiešu tipa vējdzirnavām, kuras tika izmantotas, gan graudu malšanai, gan putraimu izgatavošanai, bet šo dzirnavu izcelsmes valstī Holandē galvenokārt ūdens sūkņu darbināšanai, jo bija jāpasargā sauszemes teritorijas no applūšanas ar ūdeni.

2.18. att. **Vējdzirnavas Holandē**

Vējdzirnavu torni mūrēja no laukakmeņiem vai arī izgatavoja no koka, mēdz izmantot arī kombinētas konstrukcijas. Parasti izgatavoja četru spārnu rotoru, kas

darbojās pavērsts pret vēju. Dzirnavām ir 7 stāvi, graudu malšana notiek ceturtajā stāvā. Klasisko Holandiešu vējdzirnavu uzbūve un kinemātiskā shēma ir parādīta 2.19. attēlā. Detalizēti, ar fotogrāfijām, to apskatīsim nākošajā nodaļā.



2.19. att. **Holandiešu vējdzirnavu uzbūve:**
1 – vēja rotora rumba; 2 – spārni; 3 – gultnis; 4 – primārais zobrats; 5 – primārā vārpsta; 6 – sekundārais zobrats; 7 – kāsis; 8, – virziena mehānisms; 9 – sajūga svira; 10 – vinča maisu celšanai; 11 – sekundārā vārpsta; 12 – zobrats; 13 – dzirnakmeņu piedziņas vārpsta; 14 – bīdelēšanas iekārta; 15 – miltu caurule; 16 – balkona durvis; 17, 18 – galvas virziena regulēšanas sviras balsts; 19 – virziena rats; 20 – ieejas durvis; 21 – balsts; 22 – balkons; 23 – kāpnes.

2.4.2. Vējdzirnavas Latvijā

Latvijā 19. gadsimtā darbojās apmēram 600 vējdzirnavu, galvenokārt tās bija Holandiešu tipa. Šodien saglabātas un restaurētas ir tikai dažas. Īpašnieki galvenokārt izmanto šo vējdzirnavu mūrus un būvi. Šobrīd vislabāk atjaunotas ir 1862. gadā Zviedru celtās Ribbes vējdzirnavas Ceraukstes pagastā Bauskas rajonā. Dzirnavām ir 4 spārnu rotors, spārna gals sasniedz 28 m augstumu, dzirnavām ir 7 stāvi un 1 balkons. To tehniskais stāvoklis ir tuvu funkcionālajam. Tur graudu malšana ar vēja piedziņu notikusi vēl pagājušā gadsimta sešdesmitajos gados, bet tad dzirnavas pārkārtotas uz elektropiedziņu. Šobrīd tās ir atjaunotas un ir interesants, sakārtots tehnikas vēstures un tūrisma objekts.

2.20. att. **Ribbes vējdzirnavas**

Vējdzirnavu grozāmo galvu dažkārt par cepuri sauca. Vējdzirnavu galvā atrodas primārā vārpsta ar primāro zobratu. Vārpsta ir nostiprināta slīdgultņos un vērsta slīpi uz augšu. Primārās vārpstas augstākajā galā ir nostiprināti četri spārni, tos apvilka ar audeklu. Spārnu stiprinājums redzams attēlā.

2.21. att. **Vējdzirnavu galva**

Vējdzirnavu galva ir grozāma, tas dod iespēju noorientēt vēja rotora spārnus darba režīmā pret vēju un nepieciešamības gadījumā izgriezt no vēja un to apstādināt.

2.22. att. **Vējdzirnavu galvas grozīšanas mehānisms**

Galvas grozīšanu nodrošina piedziņas mehānisms. Tas sastāv no skriemeļa, kas piedzen gliemežreduktora primāro vārpstu, uz reduktora sekundārās vārpstas ir nostiprināts galvas grozīšanas pārnesuma mazais zobratiņš, kas ir sazobē ar torņa augšējā vainaga zobratu.

2.23. att. **Vējdzirnavu galvas rullīšu gultnis**

Lai samazinātu spēku, kas nepieciešams vējdzirnavu galvas grozīšanai, starp torņa augšējo vainagu un galvu ir izmantots rullīšu gultnis. Pa sliedēm, kas piestiprinātas torņa augšējai malai un galvas apakšējai aplocei, veļas rullīši, kas grozot galvu nodrošina tikai rites berzi.

2.24. att. **Vējdzirnavu primārā vārpsta un zobrats**

Vislielākais griezes moments un lielākā dinamiskā slodze ir vējdzirnavu primārajai vārpstai, tāpēc šis elements ir izgatavots no vismasīvākā materiāla. Ņemot vērā, ka vēja jauda palielinās pēc kubiskas raksturlīknes un konstrukcijām ir jāiztur arī vētru radītās pārslodzes, šīm detaļām ir ļoti augsts rezerves koeficients.

2.25. att. **Sekundārās vārpstas gultnis un zobrats**

Lielākā daļa vējdzirnavu detaļas izgatavotas no koka, izdilušās detaļas ekspluatējot vējdzirnavas regulāri jānomaina.

2.26. att. **Pirmā zobratu pārnesuma pakāpe**

Primārā zobratu pakāpe darbojas kā multiplikators – paātrinošs zobratu pārnesums. Primārajam zobratam ir ap 100 zobu, bet sekundārajam 40. Sekundārā vārpsta griežas 2,5 reizes ātrāk nekā primārā.

2.27.att. **Sekundārā vārpsta**

Vējdzirnavās tika izmantots transmisijas piedziņas princips. No sekundārās vārpstas, kas parasti bija novietota vertikāli un atradās vējdzirnavu torņa vidū, tika noņemta mehāniskā enerģija dažādu tehnoloģisko procesu izpildei. Graudu malšana nebija vienīgais process, kam izmantoja ar vēja rotoru iegūto enerģiju.

2.28.att. **Sekundārās vārpstas gala gultnis**

Lai nodrošinātu pareizu zobratu sazobi, sekundārās vārpstas gala gultnis ir iestatāms.

No sekundārās vārpstas apakšējā galā izvietotajiem zobratiem tika darbināta dzirnakmeņu piedziņa un sijājamā mašīna, arī šeit ir multiplikatora zobratu pārnesuma pāris. Piedziņu ieslēdz saslēdzot zobratu sazobi.

2.29. att. **Jaudas noņemšana no sekundārās vārpstas**

Vējdzirnavās parasti izmantoja dzirnavu akmeņus, tie nodila un regulāri bija jāsagatavo darbam. Akmeņu sagatavošanas darbs bija līdzīgs akmeņkaļa darbam.

2.30. att. **Dzirnavas**

Darbs dzirnavās bija maksimāli mehanizēts un racionalizēts, bija padomāts tehnoloģiskais process, atrisināta smago dzirnakmeņu pacelšana un apgriešana, graudu un miltu maisu celšanu un citu smago darbu izpilde. Neskatoties uz to, dzirnavās bija ievērojami daudz fiziskā darba.

2.31. att. **Vinčas piedziņa**

Lai graudu maisus paceltu augšā izmantoja mehāniskas piedziņas vinču. Vinčas piedziņu ieslēdz ar frikcijas sajūgu, piespiežot ar gravitācijas spēku vinčas vārpstas skriemeli pie vējdzirnavu sekundārās vārpstas skriemeļa.

2.5. Vēja ūdens sūkņi

Dzīvojot urbanizētā vidē, kur ūdens tāpat kā elektrība „no kaut kurienes" pienāk ir grūti iedomāties, cik sarežģīta ir ūdens ieguve un ūdens apgāde. Ziemeļamerikā bija raksturīgi, ka ūdens ieguvei lietoja dziļas akas. Tas bija smags darbs. Sevišķi aktuāla bija fermu ūdensapgāde. Eksperimentu rezultātā tika attīstīta un izveidota droša un efektīva ūdens sūknēšanas tehnoloģija izmantojot vēja enerģiju. Amerikā 19. gadsimta beigās 77 firmas ražoja vēja ūdens sūkņus. Šo tehnoloģiju mēs šodien pazīstam kā Amerikāņu vēja ūdens sūkņi, kas uz visiem laikiem izmainīja Amerikas lauku ainavu.

1854. gadā Daniels Halladays izgudroja pirmās pašregulējošas vējdzirnavas. Līdz šim laikam melderiem vēja rotors bija jāiegriež vējā un vētras laikā jāizgriež ārā no vēja. Halladays visu izmainīja uzkonstruējot daudzspārnu rotoru, kas spēcīgā vējā automātiski atvērās līdzīgi lietussargam (skat. 2.32. att. kreisajā pusē). Šī tipa vēja rotors kļuva ļoti populārs pie fermeriem. Uzbūvējot Amerikas dzelzceļu, aktuāla kļuva

tvaika lokomatīvju apgāde ar ūdeni, arī tur izmantoja vēja ūdens sūkņus. Vēja rotori sasniedza diametru līdz pat 18 metriem.

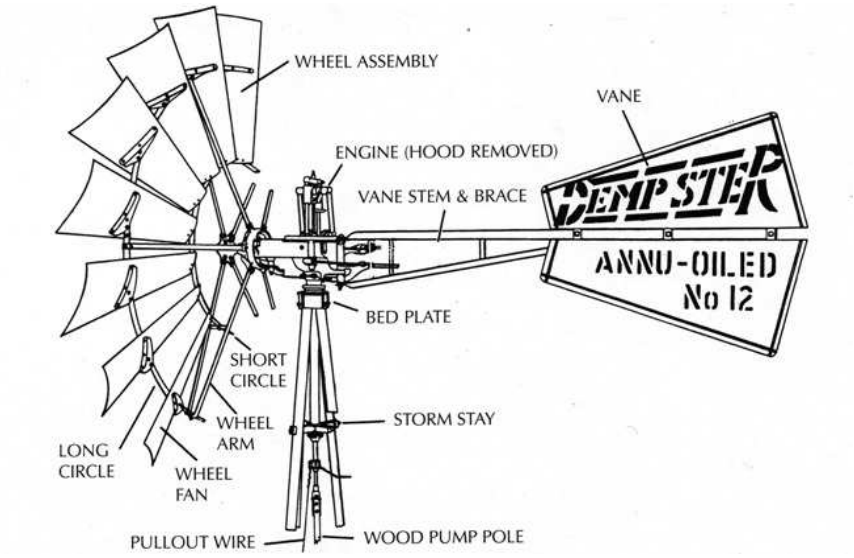
2.32. att. **Vēja ūdens sūkņi vējdzirnavu muzejā Shattuck, Oklahoma ASV**

Klasiskos „Čikāgas stila" fermu vēja ūdens sūkņus pirms 125 gadiem sāka ražot firma Dempster Industries pilsētiņā Beatrice, Nebraskas štatā. Atšķirībā no konkurentu ražojumiem, kuriem izmantoja Babīta slīdgultņus, šiem rotoriem bija rullīšu gultņi, kas kalpoja ilgāk. Klasiskais Amerikāņu vēja ūdens sūknis bija ilgmūžīga konstrukcija. Šis modelis bez konstruktīvām izmaiņām tika ražots 40 gadus. Dažas no iekārtām ir jau nostrādājušas vairāk kā 80 gadus un turpina nevainojami darboties. Fermu vēja rotori joprojām ir populāri, tie darbojas. Joprojām tiek pārdotas rezerves daļas.

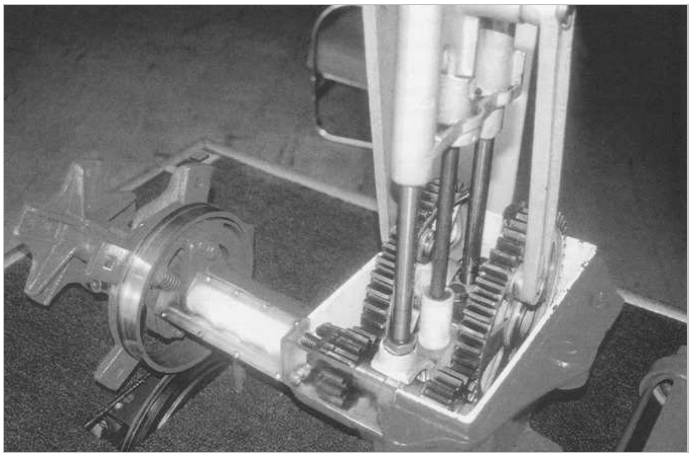
Visā pasaulē izplatītais standarta konstrukcijas mehāniskais vēja ūdens sūknis, ko piedāvāja Dempster Industries (skat. 2.33. att.).

Vairums fermu vēja ūdens sūkņiem kloķa klaņa piedziņai ir izmantots palēninošs zobratu pārnesums, tas nozīmē, ka vēja rotors veic vairākus apgriezienus, lai izpildītu vienu sūknēšanas ciklu. Attēlā 2.34. no kreisās puses skatoties redzam vēja rotora rumbu, rotora cilindra tipa bremzes, skrūves tipa eļļas sūkni, kas eļļo rotora gultni,

divus paralēlus klaņus un zobratus. Vēja rotoram parasti ir bremzes, lai to varētu apturēt, ja nepieciešams veikt apkopes, vai vētras gadījumā. Eļļu Dempstera vēja rotora mehanismiem maina reizi gadā.



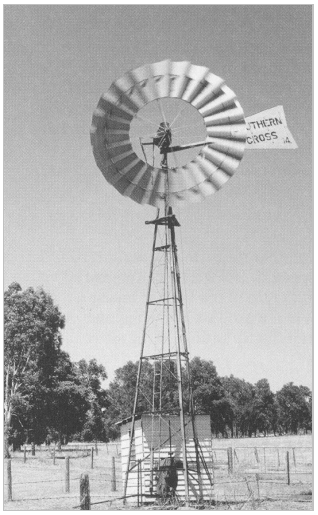
2.33. att. **Čikāgas vai Amerikāņu fermas vēja rotors**



2.34. att. **Dempster vēja ūdens sūkņa mehanizms**

Amerikāņu vēja ūdens sūkni (2.35. att.) parasti izvieto tieši virs akas un sūknis tiek darbināts ar stiepni, kas cikliski kustās uz augšu un uz leju. Ūdens sūknēšanai izmanto cilindra tipa klasisko ūdenssūkni, kas ir iegremdēts ūdenī.

Viens no vēja enerģijas paņemšanas paņēmieniem ir Savoniusa rotors (2.36. att.). Attēlā redzamā konstrukcija raksturīga ar to, ka te izmantots četrusekciju rotors. Nav svarīgi no kuras puses pūš vējš.



2.35. att. **Amerikāņu fermas vēja ūdens sūknis virs akas**

2.36. att. **Vēja ūdens sūknis ar Savoniusa rotoru**

2.6. Vēja ģeneratori

Iekārta, kas vēja kinētisko enerģiju pārveido elektriskajā ir vēja ģenerators. Lielos vēja ģeneratorus sauc arī par *vēja turbīnām*, angļu un vācu valodā rakstītajā tehniskajā dokumentācijā mēdz lietot apzīmējumu *vēja enerģijas pārveidotājs*.

2.6.1. Ģeneratori un piedziņas veidi

Elektriskais ģenerators pārvērš vēja rotora ražoto mehānisko enerģiju elektriskajā enerģijā, kuru iespējams atdot elektriskajam tīklam, vai izmantot autonomu patērētāju elektroapgādē. Mehānisko enerģiju no vēja rotora līdz ģeneratoram pārnes pārvads.

Parasti tas ir paātrinošs, vairāku pakāpju zobratu pārvads. Zobratu pārvadu, kas palielina ātrumu sauc par multiplikatoru, bet palēninošs zobratu pārvads ir reduktors.

ĢENERATORA PIEDZIŅAS VEIDI

Vēja ģeneratoriem ir iespējama trīs veidu piedziņa:

- Fiksēta ātruma piedziņa, kas sastāv no zobratu pārvada un asinhronā ģeneratora. Tas var būt ar pārslēdzamu polu pāru skaitu, kas pieļauj divus fiksētus ātrumus;
- Maināma ātruma piedziņa, kas sastāv no zobratu pārvada, ģeneratora un elektroniska sprieguma pārveidotāja;
- Tiešās piedziņas ar sinhrono ģeneratoru un elektronisku sprieguma pārveidotāju. Iekārta ir bez zobratu pārvada.

Vispirms iepazīsimies ar elektrisko ģeneratoru veidiem, to darbības principiem un tad ar fiksēta un mainīga ātruma piedziņas priekšrocībām un trūkumiem.

ĢENERATORU VEIDI UN UZBŪVE

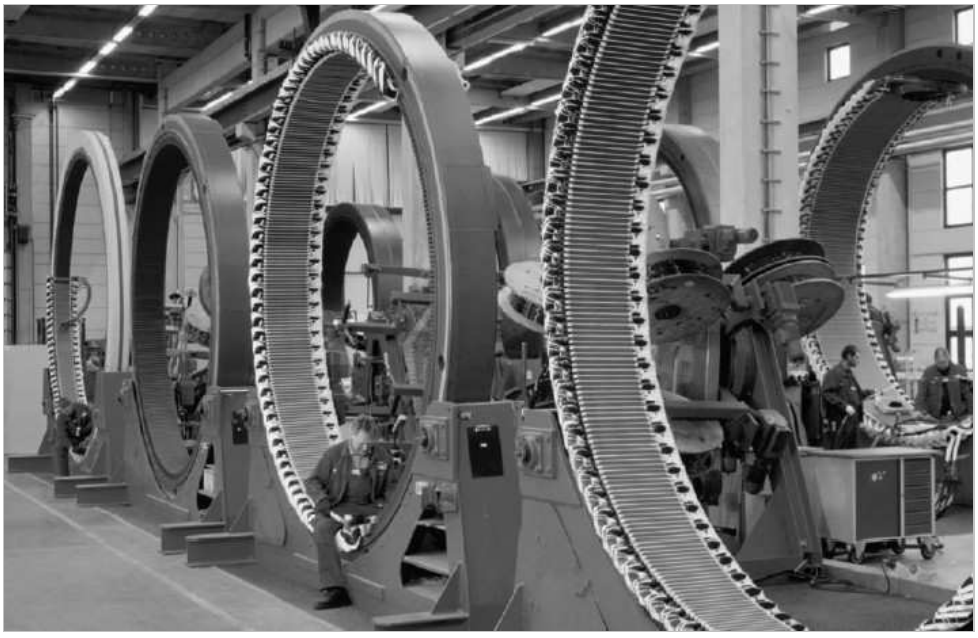
Vēja ģeneratoriem parasti izmanto divu veidu elektriskos ģeneratorus, sinhronos un asinhronos. Angļu valodā asinhronās mašīnas apzīmēšanai parasti lieto terminu *induction machine,* tāpēc tās mēdz saukt arī par indukcijas mašīnām. Jebkura elektriskā mašīna attiecīgos apstākļos var strādāt gan kā motors, gan kā ģenerators.

STATORS

Gan sinhronajai, gan asinhronajai mašīnai ir cilindrisks, nekustīgi nostiprināts stators, tā iekšienē atrodas rotors. Stators vienmēr ir nekustīgs. Statoram ir trīs simetriski izvietoti tinumi. Tie ir pieslēgti elektriskā tīkla trim fāzēm. Pa šiem trim fāzēm pieslēgtajiem tinumiem plūst sinusoidāli mainīga strāva, kas statorā rada mainīgu magnētisko lauku. Šo trīs tinumu radītais magnētiskais lauks summējas un veido vienu vienīgu nemainīgas amplitūdas magnētisko lauku, kurš rotē statora iekšienē.

Tinumus statorā var izvietot tā, lai magnētiskais lauks rotētu ar ātrumu 50 apgriezieni sekundē, vai 3000 apgriezieni minūtē (apgr./min), tas ir lielākais magnētiskā lauka rotācijas ātrums pie tīkla frekvences 50 Hz un atbilst *divu polu*

tinumam. Ja polu skaitu palielina divas reizes, iegūst *četru polu* mašīnu kur magnētiskais lauks statorā rotē ar ātrumu 1500 apgr./min, ja palielinām polu skaitu trīs reizes, iegūst *sešu polu* mašīnu, kur magnētiskais lauks rotē ar ātrumu 1000 apgr./min utt. Jo lielāks polu skaits, jo mazāks magnētiskā lauka rotācijas ātrums statorā. Poli vienmēr ir pa pāriem. Ja ir divi poli, tas nozīmē, ka ir viens polu pāris.



2.37. att. **Statora tinumu izgatavošana ENERCON E-48 ģeneratoram 800 kW**

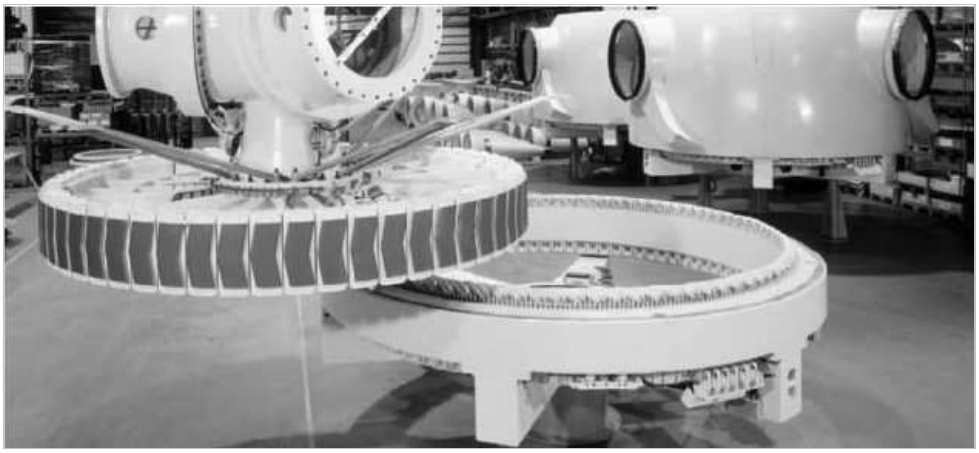
Tiešās piedziņas ģeneratoriem ir raksturīgi, ka tie attīsta nominālo jaudu pie nelielas rotācijas frekvences, piemēram, E-48 ģeneratora rotācijas frekvence ir 16 ... 32 apgr./min. Šie lēngaitas ģeneratori ir ar lielu polu skaitu, tie ir plakanas konstrukcijas ar lielu diametru. Šiem ģeneratoriem izmanto daudzpolu rotoru.

Statora konstrukcija gan sinhronajām, gan asinhronajām mašīnām ir vienāda. Galvenā atšķirība ir rotorā.

SINHRONĀ MAŠĪNA

Sinhronās mašīnas rotoram ir pašam savs, fiksēts, pastāvīgs magnētiskais lauks. Divpolu rotoram ir viens ziemeļpols un viens dienvidpols, četrpolu rotoram ir divi

ziemeļu un divi dienvidu poli utt. Šis magnētiskais lauks cenšas pielāgoties statora radītajam rotējošam magnētiskam laukam, un rotors griežas tieši tikpat ātri, kā rotējošais magnētiskais lauks, tāpēc šo mašīnu sauc par sinhrono mašīnu.



2.38. att. **ENERCON E-48 iekārtas sinhronā ģeneratora montāža**

Ja sinhronās mašīnas rotora vārpstai tiek pielikts griezes moments, rotora magnētiskais lauks nedaudz apsteidz statora rotējošo magnētisko lauku, mašīna darbojas kā ģenerators. Stabilā režīmā rotora ātrumu pilnīgi nosaka barošanas sprieguma frekvence.

Rotora magnētisko lauku iespējams radīt divos veidos:

- Izmantojot pastāvīgos magnētus. Tā ir sinhronā mašīna ar pastāvīgajiem magnētiem.
- Rotoram uztin spoles, lai iegūtu elektromagnētu, tām pievada līdzstrāvu. Tā ir sinhronā mašīna ar rotora tinumu.

Rotora tinumu mašīnai ir tāda priekšrocība, ka rotora magnētisko lauku iespējams regulēt. Tas savukārt ļauj regulēt ģeneratora spriegumu un izejas jaudu. Trūkums ir tas, ka līdzstrāva rotoram ir kaut kā jāpievada, vai nu izmantojot kontaktgredzenus vai kādu citu ne mazāk sarežģītu paņēmienu.

2.39. att. **E-48 sinhronā ģeneratora rotora polu kurpes**

ASINHRONĀ MAŠĪNA

Visvienkāršākais ir asinhronās mašīnas *īsi slēgtais rotors*, tas ir līdzīgs vāveres ratam, tāpēc vēsturiski šādu nosaukumu ir ieguvis. Īsi slēgto rotora tinumu veidoto no vara vai alumīnija stienīšiem, kas izvietoti pa cilindrisko virsmu rotora serdes rievās, abos galos tos savieno apaļi diski, izveidojot tā saukto "vāveres ratu" (squirrel cage).

Ja rotors griežas sinhronā ātrumā, tādā pašā ātrumā kā statora magnētiskais lauks, magnētiskais lauks rotorā nemainās un ar rotoru faktiski nekas nenotiek. Turpretī, ja rotors griežas nedaudz lēnāk par sinhrono ātrumu, magnētiskais lauks rotorā sāk izmainīties un stienīšos sākt plūst strāva. Šī strāva rada pati savu, pretēju magnētisko lauku, kas cenšas rotoru atgriezt atpakaļ sinhronā ātrumā.

Asinhronā mašīna spēj pārvērst elektrisko enerģiju mehāniskajā enerģijā, darboties kā motors tikai tad, ja rotora ātrums ir nedaudz mazāks par sinhrono ātrumu. Līdzīgi tā spēj darboties arī kā ģenerators, ja rotora ātrums ir mazliet lielāks par sinhrono ātrumu. Starpību starp rotora ātrumu un sinhrono ātrumu sauc par *slīdi* un parastam vējturbīnas asinhronajam ģeneratoram pie pilnas jaudas slīde ir 1 %. Mazas un vidējas jaudas asinhronajām mašīnām slīde ir 5…7 %.

Asinhrono ģeneratoru plašais pielietojums vējturbīnās izskaidrojams ar vienkāršo konstrukciju, lētumu un iespēju pieslēgt tieši tīklam bez elektroniskiem sprieguma pārveidotājiem. Pateicoties slīdei, vēja rotora aerodinamiskās jaudas izmaiņas var izpausties, kā rotora griešanās ātruma izmaiņas. Ja spēcīga vēja brāzma, liek pieaugt

rotora griešanās ātrumam, uz vējturbīnas rotora inerces momenta rēķina uzkrāj enerģiju. Samazinoties vēja ātrumam, šī enerģija tiek atdota atpakaļ. Rezultātā pārvadu griezes momenta un izejas jaudas svārstības izlīdzinās. Tiešā veidā elektriskajam tīklam pieslēgts sinhronais ģenerators to nespēj izdarīt.

ĢENERATORA DARBĪBA AR MAINĪGU ĀTRUMU

Ģeneratora darbība pie fiksēta ātruma ir raksturīga klasiskajam risinājumam, kas sastāv no fiksēta ātruma zobratu pārvada un asinhronā ģeneratora, tas ir vienkāršs, robusts un viegli pieslēdzams elektriskajam tīklam. Šāds vēja ģenerators ir „bāzes variants", ar kuru salīdzina visus pārējos variantus.

Ģeneratora darbība pie mainīga ātruma ir iespējama pateicoties elektroniskajiem frekvences pārveidotājiem, kuri ļauj ģeneratoram strādāt pie mainīga ātruma un ražot mainīgas frekvences strāvu, kuru pēc tam pārveido atbilstošu pieslēgšanai fiksētas frekvences elektriskajam tīklam. Elektronisko frekvenču pārveidotāju konstrukcijas tiek pilnveidotas, tie kļūst kompaktāki, gudrāki un lētāki. Tuvākajā nākotnē ir sagaidāms mainīga ātruma piedziņas enerģētisko rādītāju, izmēru un cenu efektivitātes pieaugums.

Darbība pie mainīga ātruma plašā izmaiņu diapazonā ir, ja ātrums izmainās diapazonā 2,5 vai 3 pret 1, tas nodrošina šādas priekšrocības:

- Pie maziem vēja ātrumiem mazu rotācijas ātrumu un, līdz ar to, zemu trokšņu līmeni, līdzīgi kā fiksēta ātruma ģeneratoram ar diviem ātrumiem;
- Labāku vēja enerģijas izmantošanu pie maziem ātrumiem, gandrīz tas pats ir arī iespējams divu ātrumu ģeneratoram;
- Mazāku griezes momentu pie vēja ātrumiem, kuri pārsniedz nominālo;
- Mazāku kāpes regulēšanas iekārtas noslogojumu;
- Ļauj adaptīvi izmantot vēja rotora optimālo mehānisko raksturlīkni.

Darbība pie mainīga ātruma plašā izmaiņu diapazonā dod arī priekšrocības elektriskā tīkla pieslēgumam:

- Ļoti mazas jaudas fluktuācijas un mazs sprieguma flikers, ja vēja ātrums pārsniedz nominālo;

- Atkarībā no pārveidotāja konstrukcijas ir iespējams izmainīt izejas jaudas koeficientu.

Mainīga ātruma sistēmas galvenie trūkumi saistās ar izmaksām un papildus enerģijas zudumiem dažu procentu apmērā, kas veidojas pārveidojot strāvu. Pārveidotājs rada arī harmonikas – strāvas sastāvdaļas, kuru frekvence vairāk kārt atšķiras no pamat frekvences. Harmonikas tīklā ir nevēlamas. Pārveidotāji var radīt subharmonikas – zemāko kārtu harmonikas. Tās iespējams samazināt ar filtriem, bet tas maksā papildus naudu. Uzlabotas konstrukcijas pārveidotāji gandrīz nemaz nerada zemas kārtas harmonikas. Subharmoniku izraisītais piesārņojums, ir visbīstamākais un uz to parasti koncentrē uzmanību elektroapgādes uzņēmumu standarti. Pārveidotāji var radīt būtiskas augšējo kārtu frekvenču harmonikas un interharmonikas. Veidojas uzskats, ka vējturbīnas ir galvenie augstas kārtas harmoniku un interharmoniku avoti tīkla vājākajos posmos.

Pārveidotāju praktiskā izmantošana neatšķiras no citu rūpniecisku ražojumu izmantošanas. Iekārtu ražotāji ir daudzi un ir iespējami dažādi tehniskie varianti. Tos iespējams izmantot gan ar asinhronajiem, gan ar sinhronajiem ģeneratoriem.

Darbība pie mainīga ātruma ierobežotā izmaiņu diapazonā, kur ātruma izmaiņu diapazons apmēram 1,5 vai 2 pret 1. Šajā diapazonā saglabājas visas plašā izmaiņu diapazona priekšrocības, kaut arī trokšņu samazinājums, enerģijas izmantošanas iespējas un jaudas izmantošanas koeficienta vadības iespējas nav tik plašas.

Vienā no konstruktīvajiem variantiem izmanto dubultās barošanas (double-fed) asinhronās mašīnas, kuru stators tāpat kā fiksētā ātruma mašīnām ir tieši pieslēgts tīklam, bez tam enerģiju iegūst arī no fāzu rotora ar elektronisko pārveidotāju. Rotorā ģenerēto enerģiju pievada frekvences pārveidotājam izmantojot kontaktgredzenus vai magnētiski. Caur frekvences pārveidotāju plūst tikai daļa, parasti 25 vai 30 % no izejas jaudas, tādēļ pārveidotāji ir mazāki. Salīdzinot ar mainīga ātruma plaša izmaiņu diapazona sistēmām, tiem ir vairākas priekšrocības:

- Zemākas kapitālizmaksas;
- Augstāka kopējā efektivitāte;
- Zemāks harmoniku līmenis.

Darbība pie mainīga ātruma šaurā izmaiņu diapazonā, kur ātruma izmaiņa ir diapazonā 1,1 līdz 1. Tas nodrošina sekojošas priekšrocības:

- Mazas pārvadu griezes momenta svārstības;
- Mazas izejas jaudas svārstības un mazs flikera efekts;
- Ļoti zems harmoniku līmenis.

Šīs priekšrocības nodrošina asinhronais ģenerators ar fāzu rotoru. To var tiešā veidā, bez strāvas pārveidotājiem, slēgt pie elektriskā tīkla. Šim ģeneratoram ir mainīga slīde, ko var vienkārši pārregulēt. Ja rodas nepieciešamība pēc lielām ātruma izmaiņām, lai absorbētu griezes momenta svārstības, slīdi iespējams izmainīt, vajadzības gadījumā pat līdz 10 %. Slīdes korekcija notiek ar elektroniski maināmu pretestību, kas ir ieslēgta virknē ar rotora tinumiem. Tā kā paaugstinātu rotora pretestību izmanto tikai īslaicīgi, tad zudumi, kas rodas sakarstot pretestībām, ir mazi. Elektroniskais pārveidotājs, ko lieto, lai izmainītu rotora ķēdes pretestību, ir daudz lētāks un tik mazs, ka to var samontēt tieši uz ģeneratora rotora, lai nevajadzētu lietot kontaktgredzenus.

TIEŠĀ PIEDZIŅA

Tiešās piedziņas galvenā priekšrocība ir tā, ka var atteikties no paātrinošā zobratu pārvada. Tiešajai piedziņai izmantojot liela diametra daudzpolu ģeneratoru, kas darbojas vēja rotora ātrumā. Tiešās piedziņas priekšrocības ir:

- Mazākas izmaksas nekā sistēmai ar zobratu pārvadu;
- Mazāka torņa galā novietotā masa un īsāka gondola;
- Par vairākiem procentiem augstāks lietderības koeficients.

Tiešās piedziņas vēja iekārtās izmanto gan pastāvīgo magnetu, gan tinumu sinhronos ģeneratorus. Vēja iekārta var strādāt ar mainīgu ātrumu. Ja pieslēgšanai tīklam izmanto elektronisku strāvas pārveidotāju, tad ģenerators var strādāt ar izejas frekvenci zem 50 Hz, kas vienkāršo šādu lēngaitas mašīnu konstrukciju.

Sinhronajiem ģeneratoriem, kas strādā ar fiksētu ātrumu un ir tiešā veidā pieslēgti pie tīkla, pēkšņas un lielas griezes momenta izmaiņas fiksēta ātruma mašīnu var bojāt, jo šiem ģeneratoriem trūkst slodzes izmaiņu kompensējoša elementa.

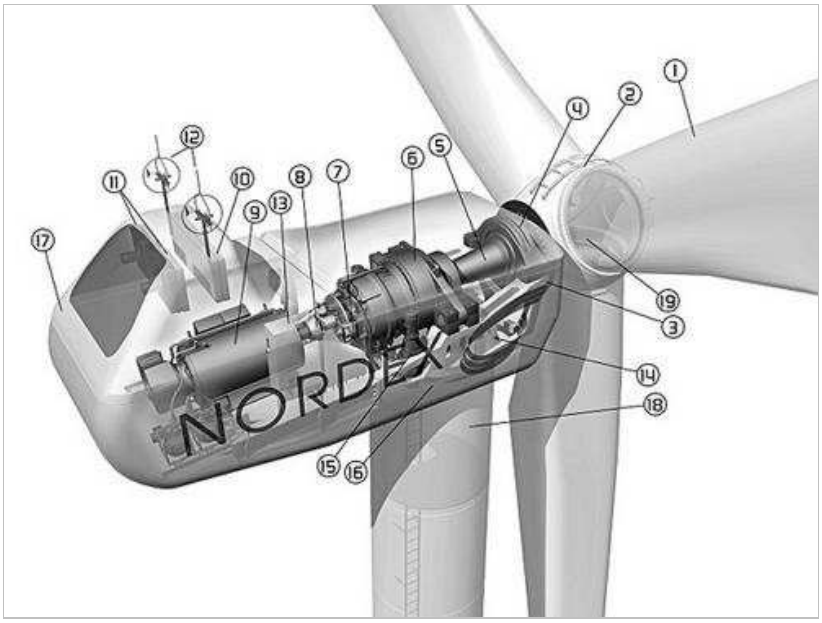
Zobratu pārvada izmaksas ir atkarīgas no pārvadāmā griezes momenta, bet vēja rotoru griezes moments pieaug ļoti strauji. Līdz ar to lielākām vēja iekārtām arī zobratu pārvadi kļūst relatīvi lielāki, smagāki un dārgāki. Šī iemesla dēļ, tiešā piedziņa izraisa sevišķu interesi lielo vēja ģeneratoru ražotājiem.

Lai samazinātu gondolas masu un izmaksas, varētu būt izdevīgi, izveidot integrētu zobratu pārvada, rotora galveno gultņojumu un gondolas pamatnes konstrukciju. Tomēr ir iebildumi par labu dalītiem agregātiem apkopes un nomaiņas ērtību dēļ un arī, lai izvairītos no monopolizācijas tendencēm. Iepriekš minētais, it sevišķi, attiecināms uz jūrā izmantojamajiem vēja ģeneratoriem.

Šodien Latvijā visveiksmīgāk darbojas vācu firmu NORDEX un ENERCON vēja ģeneratori. Šo vēja ģeneratoru konstrukcija ir būtiski atšķirīga, jo pirmā firma piedāvā klasisko ģeneratora piedziņu ar paātrinošo zobratu pārvadu, bet otrai ir tiešas piedziņas daudzpolu sinhronais ģenerators un strāvas pārveidotājs. Iepazīsimies ar šo vēja ģeneratoru darbības principiem un konstrukciju variantiem.

2.6.2. Netiešās piedziņas vēja ģeneratora uzbūve

Užavas VES un Alsungas VES tiek izmantoti NORDEX N-54/1000 vēja ģeneratori ar jaudu 1000 kW, bet perspektīvajos vēja parku projektos paredzēts izmantot 2500 kW ģeneratorus NORDEX N-80/2500, tāpēc iepazīsimies ar šo ģeneratoru uzbūvi un tehniskajiem rādītājiem.



2.40. att. **Netiešās piedziņas vēja ģeneratora uzbūve:**
1 – rotora spārni; 2 – rotora rumba; 3 – pamatne; 4 – rotora vārpstas gultnis; 5 – rotora vārpsta; 6 – divu pakāpju planetārais pārvads; 7 – diska bremzes izvietotas uz ātrgaitas vārpstas; 8 – elastīgs ģeneratora sajūgs; 9 – asinhronais ģenerators ar šķidruma dzesēšanu; 10 – reduktora dzeses sistēmas radiators; 11 – ģeneratora dzesētāji; 12 – vēja mērīšanas sistēma, anemometrs un virziena mērītājs; 13 – vadības bloks; 14 – hidrauliskā sistēma gondolas virziena fiksēšanas un sekundārās vārpstas bremžu darbināšanai; 15 – vēja virziena sekošanas piedziņas motorreduktors; 16 – gondolas gultņi; 17 – ārējais apvalks; 18 – tornis; 19 – trīs neatkarīgi spārnu iestatīšanas motori.

2.41. att. **NORDEX N-80/2500 vēja ģenerators**

2.3. tabula

Vēja enerģētiskas iekārtas NORDEX N-80 tehniskie dati

Rotors	
Spārnu skaits	3
Rotācijas frekvence	10,9... 18,9 apgr./min
Rotora diametrs	80 m
Rotora laukums	5026 m2
Jaudas regulēšana	izmainot spārnu iestatījuma leņķi (pitch regulated)
Iedarbināšanas vēja ātrums	no 3 m/s
Apstādināšanas vēja ātrums	25 m/s
Nominālā jauda pie	15 m/s
Iztur vēja ātrumu līdz	70,0 m/s
Rotora vārpstas gultnis	Dubultais sfēriskais rullīšu gultnis
Spārnu leņķa regulēšana (Pitch)	Individuāla spārnu iestatījuma regulēšana
Svars ar spārniem	52 000 kg
Spārni	
Spārnu garums	38,8 m
Izgatavotājs	LM
Materiāls	Stiklaplasts, polistirols GRP
Svars	9 000 kg
Pārnesumkārba	
Konstrukcija	Trīspakāpju planetārajā pārnesumkārba
Pārnesuma attiecība	1: 68,1
Svars	18 500 kg
Eļļas daudzums	360 l
Eļļas nomaiņa	Ikgadēja kontrole, nomaiņa vajadzības gadījumā
Galvenās vārpstas gultnis	Cilindrisku rullīšu gultnis
Ģenerators	
Jauda	2500 kW
Tips	Asinhronais (double-fed)
Dzesēšanas sistēma	Šķidruma dzesēšana
Rotācijas frekvence	740 - 1310 apgr./min
Aizsardzības klase	IP 54
Sajūgs	Gumijas sajūgs un pārslodzes sajūgs
Nominālais spriegums	660 V
Svars	12 500 kg
Ievadīšana vēja virzienā	
Gondolas atbalsta gultnis	Grozāms vainags uz lodīšu gultņiem
Bremzes	Hidrauliskās diska bremzes
Piedziņa	Divi asinhronie motori ar pārnesumu
Griešanās ātrums	0,6 grādi/sekundē
Svars	2 300 kg

Vadības sistēma	
Veids	Programmējamais loģiskais kontrolleris PLC, RFC (Remote Field Controller)
Tīkla pieslēgšana	Caur IGBT pārveidotāju
Bremzes	
Izveidojums	Trīs neatkarīgas bremžu sistēmas. Droša pret atteikumiem (individuāla spārnu pārstatīšana), Sešas atšķirīgas bremzēšanas norises secības
Darba bremze	Individuāla spārnu regulēšana (pitch)
Mehāniskās bremzes	Diska bremzes
Fiksācijas bremze	Plākšņu bremze
Tornis	
Caurules tipa tornis	Ar apsmidzināšanu cinkots, gruntēts un seguma pārklājums, rumbas augstums 80 m
Svars	213 400 kg

Vēja ģeneratori Nordex N-80/2500 kW tiek ražoti un ir ekspluatācijā no 1999. gada. Tiem ir augsta efektivitāte un drošums.

Nordex N80/2500 vēja iekārtai ir trīs lāpstiņu, rotors ar horizontālo griešanās asi un jauda regulējama ar lāpstiņu pagriešanas leņķi (pitch controll).

Izmantojot augstas kvalitātes komponentes un izvēloties vadošos vēja ģeneratoru uzstādītājus un augstas kvalitātes komplektējošos elementus, pasūtītājam tiek garantēta VEI nepārtraukta un augstas efektivitātes darbība.

Katra VEI komponente ir izstrādāta daudz lielākām slodzēm, nekā tās ir dabā.

ROTORS

Nordex N-80/2500 rotora diametrs 80 m un 5026 m^2 apteces laukums.

Stacijas pamat mezgli ir no augsti kvalitatīva tērauda, kas nodrošina konstrukciju izturību. Bez tam, pielietotie materiāli novērš trokšņu izplatīšanos no rotora uz stacijas pamatu.

Nordex N-80/2500 – ir ar regulējamu rotora apstādināšana, izvēršot lāpstiņas flugera virzienā, kas izslēdz ģeneratora pāreju ventilatora režīmā, kad lietderības koeficients ir ar negatīvu vērtību.

Rotora konstrukcijā nav elementu uz kuriem darbojas berze, tas nodrošina maksimālu izturību pret nodilumu.

SPĀRNI

Spārni izgatavoti, pēc optimizēta profila no viskvalitatīvākajiem materiāliem - stiklaplasta, polistirola. Tos ražo viens no vadošiem izgatavotājiem. Tas dod iespēju samazināt spārnu svaru un attiecīgi slodzi uz rotora vārpstas, nodrošina virsmas gludumu. Lai novērstu gaismas atstarošanos, spārnus krāso pelēkā tonī.

Spārnu pagriešanas leņķis var izmainīties diskrēti ar 85 soļiem, tas nodrošina augstu lietderīgās darbības aerodinamisko koeficientu un, ja ir nepieciešamība, iespēju savlaicīgi veikt vēja rata bremzēšanu.

Normālas darbības laikā spārni darba stāvoklī tiek turēti ar hidraulisku cilindru palīdzību, kuri novietoti to pamatā.

Ja rotora griešanās ātrums pārsniedz nominālo vērtību vai hidrauliskā sistēmā izzūd spiediens, centrbēdzes spēks liek spārniem sagriezties tā, lai palēninātos griešanās frekvence. Šis princips darbojas, lai pārtrauktu stacijas darbību avārijas gadījumā.

Spārni ir apgādāti ar standarta aizsardzības sistēmu pret zibeni, kas ir kompleksā ar vienotu visas stacijas aizsardzības sistēmu, tas novērš zibens spērienu bojājumus.

PĀRNESUMU KĀRBA

Pārnesumu kārbu izgatavo viena no vadošām vēja enerģētisko iekārtu mehānisko pārnesumu mezglu ražotājām firmām. Pēc firmas Nordex Energy GmbH pasūtījuma izgatavota 3-pakāpju planetārā pārnesumu kārba. Tāds tehniskais risinājums ir viskompaktākais un pamatots. Reduktora korpuss ir aizsargāts ar divslāņu gumijas apvalku, kas pasargā citas stacijas daļas no trokšņa un slāpē mehāniskās slodzes, kas rodas pie pārejas un maksimuma režīmiem, pasargā no bojājumiem.

Pārnesumu kārbas eļļa tiek dzesēta radiatorā, kas savienots ar ģeneratora dzesēšanas sistēmu. Nepārtraukta eļļas temperatūras kontrole garantē, ka optimālā temperatūra tiek sasniegta ar maksimāli iespējamo ātrumu un tālāk neizmainās. Visi stacijas mehāniskie mezgli darbojas pastāvīgos optimālajos apstākļos.

ĢENERATORS

Elektriskais ģenerators ir 6 polu asinhronā mašīna, ar nominālo jaudu 2500 kW, nominālo spriegumu 660 V un frekvenci 50 Hz. Ģeneratoram ir šķidruma dzesēšanas sistēma.

Ģenerators optimizēts visaugstākajai efektivitātei pie slodzes koeficienta ¾, kas, pie reāliem vēja ātrumiem dabā, ļauj sasniegt visaugstāko ražotspēju.

Ģeneratora izolācijas sistēma izpildīta atbilstoši F klasei, bet reāli tiek ekspluatēta pie zemākas klases B apstākļiem. Tas kopā ar efektīvo dzesēšanas sistēmu nodrošina temperatūras režīmu, kas ievērojami palielina ģeneratora kalpošanas laiku. Kardānā pārvadam, kas savieno ģeneratora vārpstu ar reduktora vārpstu, ir minimāli berzes zudumi.

SEKOŠANAS SISTĒMA

Aktīvā sekošanas sistēma dod iespēju vēja turbīnai pareizi orientēties pēc vēja virziena. Vēja turbīnas gondola balstās uz četriem lodīšu gultņiem un to groza ar diviem planetārajiem motorreduktoriem, kuru asinhronos elektrodzinējus baro no frekvenču pārveidotāja. Pie tam spēka slodze, pēc sekošanas sistēmas komandas, tiek vienmērīgi sadalīta starp dzinējiem.

Sekošanas sistēmai ir kopēja disku veida bremze ar sešiem hidrauliskajiem bremžu cilindriem, ir arī divas ātras apstādināšanas bremzes. Visa bremžu sistēma nodrošina gludu sekošanas procedūru un gondolas stingru fiksāciju, ja nav virziena korekcijas komanda no sekošanas sistēmas. Sekošanas sistēmas darbību vada galvenais dators, kurā no vēja mērītāja nepārtraukti pienāk informācija par vēja ātrumu un virzienu. Tā nodrošina pastāvīgu vēja turbīnas orientāciju uz vēju.

BREMŽU SISTĒMA

Vēja iekārtai Nordex N-80/2500 kW ir divas neatkarīgas bremžu sistēmas. Primārā – aerodinamiskā, sekundārā – mehāniskā disku veida sistēma, kura novietota uz reduktora sekundārās vārpstas. Abas sistēmas darbojas stabili un nepārtraukti.

Vēja iekārtai darbojoties normālā režīmā, optimālā spārnu orientācija automātiski tiek noturēta ar hidrauliskiem cilindriem, kas atrodas rotora pamata daļā. Hidrauliskā

spiediena padošana uz cilindriem piespiedu kārtā, vai arī pēc bojājumu komandas, sagriež lāpstiņas, un rotoru apgriezieni samazinās, rotora griešanās ātrums samazinās līdz konstruktīvi dotajam lielumam, pēc kā ieslēdzas mehāniskā disku veida bremzēšanas sistēma, un vēja turbīna laideni apstājas.

Vēja iekārtās Nordex tiek izmantots programmu nodrošinājums, kurās dots bremžu sistēmas darba algoritms. Tas nozīmē, ka bremžu procesu elastīgi vada galvenais dators saskaņā ar ramload – funkciju, kas nodrošina slodzi uz rotora vārpstas.

Rodoties avārijas situācijai, aerodinamiskā un mehāniskā bremžu sistēma aktivizējas vienlaicīgi.

TORNIS

Nordex N-80/2500 kW var pacelt ar dažāda augstuma koniskas formas tērauda caurules tipa torņiem. Tornis apgādāts ar iekšējām kāpnēm, ar drošības vadu, strādnieku platformām un apgaismošanas sistēmu. Pacelšanās uz gondolu notiek torņa iekšienē. Krāsojums un pretkorozijas apstrāde veikta saskaņā ar DIN ISO 12944 Class Dlbt 3.

AIZSARDZĪBA PRET ZIBENI

Paaugstinoties torņa augstumam, palielinās risks iekārtas bojājumiem no zibens spēriena. Šis apstāklis pamudināja firmu Nordex pieņemt svarīgus piesardzības paņēmienus, lai minimizētu tādus riskus. Vēja iekārtas Nordex N-80/2500 kW aizsardzības sistēma pret zibeni izgatavota atbilstoši standartam IEC-61024 un DIN VDE 0185.

Ja zibens iesper spārnā vai gondolā, drošības sistēma novada radušos strāvu uz iezemētu kontūru, ar minimālu risku bojāt jebkuru iekārtas daļu.

Elektriskie un elektroniskie komponenti ir pasargāti ar varistoriem, bet iekārtas iekšējie sakari notiek caur optisko šķiedru kabeļu tīklu, kuri nav jutīgi pret elektriskā sprieguma izmaiņām.

VADĪBAS SISTĒMA

Vēja iekārtas sistēmai ir divi neatkarīgi datori. Galvenais dators novietots torņa sadalītāja punkta apakšējā daļā, bet otrais – gondolā. Visa informācija no devējiem un pārveidotājiem nokļūst pa optisko šķiedru kabeļu tīklu uz katru datoru, kuri kontrolē visu VEI sistēmu darbību.

Pienākošie dati attēlojas uz galvenā datora displeja. Vadības un kontroles ierīce uz sadales priekšējā paneļa, ļauj izlases kārtībā nolasīt vajadzīgos parametrus un arī uzdot jaunas VEI parametru vērtības, ja tas ir vajadzīgs.

TĀLVADĪBA

Vēja iekārtu Nordex N80/2500 kW kontrole un vadība var notikt arī no attāluma caur pastāvošajiem telekomunikāciju kanāliem.

Pie tam iespējams nolasīt visus parametrus un vadīt iekārtas darbību.

Gadījumā, ja kāds parametrs neatbilst sākuma vērtībai, vadības sistēma automātiski paziņo par to un caur telekomunikācijas kanālu un saglabā šo informāciju galvenā datora atmiņā.

VĒJA IEKĀRTAS DARBĪBA

Vēja iekārtas Nordex N-80 darbība ir pilnībā automatizēta. Tas nozīmē, ka iekārta patstāvīgi uzsāk darbību, kad vēja ātrums sasniedz 3 m/s. Elektroenerģijas izstrāde notiek pie vēja ātruma diapazonā 3-25 m/s. Pie vēja ātruma 3-25 m/s ģeneratora tinumi saslēgti uz 0-2500 kW režīmu.

Pie vēja ātruma lielāka par 25 m/s drošības dēļ vēja iekārta apstājas. Ja ir bijuši iekārtas bojājumi, automātiska palaišana no jauna notiek, tikai tad, kad likvidēti bojājumi. Ja bojājumi vēl pastāv, tad tie jāanalizē un tie jānovērš pirms iekārtas palaišanas.

2.6.3. Tiešās piedziņas vēja ģeneratora uzbūve

Modernākais lielas jaudas vēja ģeneratoru attīstības virziens ir tiešās piedziņas iekārtu izgatavošana. Galvenais ieguvums ir kompaktāka, vieglāka, klusāka, lētāka iekārta, nav nepieciešams zobratu pārvads, mazāks skaits mehāniski kustīgu daļu un

slīdes pāru skaits, palielinās lietderības koeficients, samazinās ekspluatācijas izdevumi utt. Trūkums – nepieciešams izgatavot speciālu, liela diametra, daudzpolu sinhrono ģeneratoru un to izvietot gondolā, palielinās gondolas diametrs (skat. 2.42. att.).

2.42. att. **Vēja ģenerators ENERCON E-33**

Tiešās piedziņas lielas jaudas vēja iekārtas pirmie izstrādāja un kopš 1993. gada sērijveidā ražo vācu firma ENERCON. Latvijā šodien darbojas 34 šīs firmas ģeneratori, 33 iekārtas E-40 (600 kW) Grobiņā un viena E-66 (1800 kW) Liepājā. Kā piemēru apskatīsim vienu no mazākajām ENERCON vēja iekārtām E-33, kuras jauda ir 330 kW. Ir pazīstamas tiešas piedziņas vēja iekārtas E-33 (330 kW), E- 40 (600 kW), E-48 (800 kW), E-66 (1800 kW), šobrīd jaudīgākā ir E-112 (4500 kW), to parasti uzstāda jūrā. Palielinoties jaudai iekārtas mehāniskā konstrukcija kļūst masīvāka un nedaudz sarežģītāka, bet struktūra nemainās. Elektroniskā vadība dažāda izmēra iekārtām ir līdzīga.

Pamatprincipi, kas ir ievēroti konstruējot tiešas piedziņas ENERCON vēja iekārtas ir:

- Izveidot iekārtas konstrukciju ar augstu drošumu;
- Samazināt vēja iekārtas slodzi, rezultātā, izveidot iekārtu ar garu darba mūžu;

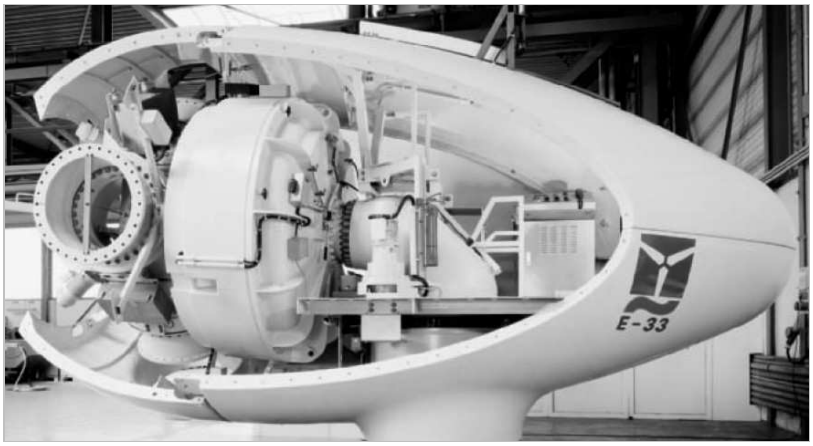
- Izmantot spēka vadību plašā ātruma diapazonā, nodrošinot rotora darbību ar visaugstāko efektivitāti.

2.43. att. **Tiešās piedziņas vēja ģeneratora E-33 uzbūve:**
1 – mašīntelpa; 2 – galvas grozīšanas motors; 3 – ģenerators; 4 – spārna stiprinājuma atloks; 5 – rotora rumba ar spārnu grozīšanas mehānismu; 6 – spārni.

Tiešās piedziņas ENERCON vēja ģeneratoriem ir šādas īpašības:

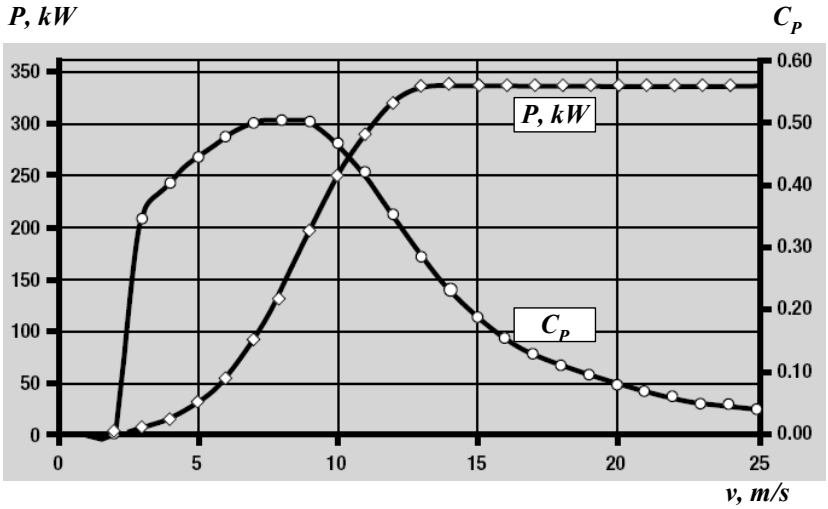
- Vēja iekārtas rotējošā daļa ir ģeneratora rotors un vēja rotors. Ģeneratora rotors ir tieši piestiprināts vēja rotora rumbai, tādā veidā nodrošināts vienāds rotācijas ātrums. Nav dārgā, masīvā zobratu pārvada ar ātri kustīgām daļām, kas rada troksni, enerģijas zudumus, patērē eļļu, dilst un nolietojas.
- Ar elektroniska pārveidotāja palīdzību vēja iekārtas saražoto enerģiju atdod tīklā. Ģenerators var strādāt gan ar pilnu, gan daļēju jaudu.

- Katrs rotora spārns ir aprīkots ar elektriski vadāmu pagriezējmehanizmu (pitch control). Iestatot spārna leņķi, var regulēt rotora ātrumu un no vēja iegūto griezes momentu.



2.44. att. **Tiešās piedziņas vēja ģeneratora gondola**

Iekārtas E-33 darbības efektivitāti var novērtēt pēc vēja ātruma – jaudas – vēja izmantošanas koeficienta raksturlīknēm (skat. 2.45. att.). Ģenerators tiek ieslēgts pie vēja ātruma 2,5 m/s, vēja rotors visaugstāko vēja izmantošanas koeficientu vai efektivitāti C_P = 0,5 sasniedz pie vēja ātruma 7...9 m/s un attīsta jaudu 300 kW, palielinoties vēja ātrumam līdz 13 m/s, iekārta sasniedz maksimālo jaudu 330 kW un nepieļauj tās palielināšanu koriģējot rotora spārnu iestatījuma leņķi. Iekārta stabili turpina strādāt līdz vēja ātrums sasniedz 25 m/s.



2.45. att. **Vēja rotora E-33 jauda P un vēja izmantošanas koeficients C_P atkarībā no vēja ātruma**

.

2.46. att. **Vēja virziena un ātruma mērītājs**

Pēc tehniskajiem datiem, atslēgšanas vēja ātrums ir 28 līdz 34 m/s. Tātad, enerģijas ražošana notiek arī pie lielā vēja ātruma. Vēja parametru mērīšanai ir izmantots kausiņu tipa anemometriskais vēja ātruma devējs un virziena devējs, tie parasti tiek izvietoti virs vēja iekārtas gondolas (2.46. att).

VĒJA ROTORS

E-33 rotora spārni ir izgatavoti no stikla šķiedras, balzas koka un pastiprinātas ar plastikas armējumu. Rotora diametrs 33,4 m, laukums 876 m^2, rotācijas ātrums 18 līdz 45 apgr./min, rotē pulksteņa rādītāja virzienā. Spārnu aploces ātrums 31 līdz 79 m/s. Spārnu forma un profils nodrošina:

- augstu vēja enerģijas izmantošanas koeficientu;
- lielu darba resursu;
- zemu slodzi;
- zemu trokšņa līmeni;
- zemu materiāla izlietojumu, izgatavojot.

Lai samazinātu gaisa turbulenci un troksni, spārnu galiem izveidots speciāls, atliekts profils. Spārni izgatavoti darbam ar dažādiem ātrumiem un iestatījuma leņķi. Spārnu ārpuse ir aizsargāta ar poliuretāna pārklājumu. Spārnu izgatavošanai izmantota vakuuma formēšanas tehnoloģija, kas nodrošina augstāku kvalitāti, nav poru, neveidojas nesalīmētas kabatas starp slāņiem.

ĢENERATORS

Vēja iekārtā izmantots sinhronais ģenerators ar tiešu piedziņu no vēja rotora. Ģeneratora rotors ar diviem vienrindas cilindrisku rullīšu gultņiem uzmontēts uz nekustīgas ass. Salīdzinot ar līdzīgu ģeneratoru, kuru izmanto hidroelektrostacijās, tas ir vieglāks.

2.47. att. **E-33 ģeneratora montāža**

Ģeneratora tinumi strādā labvēlīgos apstākļos, jo sakarā ar zemo rotācijas ātrumu un vada lielo šķērsgriezumu tinumu darba temperatūra ir relatīvi zema. Tinumos izmanto vadu ar F klases (155 ^{o}C) izolāciju. Nelielās temperatūras un slodzes izmaiņas darba laikā nodrošina tinumiem un konstrukcijai ilgu darba mūžu.

Mainīga ātruma izmantošana samazina griezes momenta impulsu negatīvo ietekmi uz ģeneratoru.

BERMZĒŠANAS SISTĒMA

Bremzēšanas sistēma nepieciešama, lai apstādinātu vēja rotoru vētras un arī bezvēja apstākļos, kā arī, lai veiktu tehniskās apkopes un remontu. Bremzēšana notiek pagriežot vēja rotora spārnus paralēli vēja plūsmai (skat. 2.42. att.), lai aerodinamiskais cēlējspēks samazinātos līdz nulles vērtībai. Rotoram ir arī mehāniskās bremzes un mehāniskā bloķēšana. Katram spārnam sava, neatkarīga piedziņa ar pastāvīgu, atsevišķu barošanu. Bezvēja vai vētras gadījumā, spārnu pagriešana notiek dažu sekunžu laikā. Lai samazinātu rotora ātrumu pietiek pagriezt pat vienu spārnu.

Rotors nedrīkst būt mehāniski fiksēts pat tad, ja ģenerators ir izslēgtā stāvoklī. Tas var brīvi kustēties ar nelielu ātrumu. Pilnībā nobloķē rotoru tikai tehnisko apkopju laikā. Šai gadījumā izmanto papildus bremzes.

VADĪBAS SISTĒMA

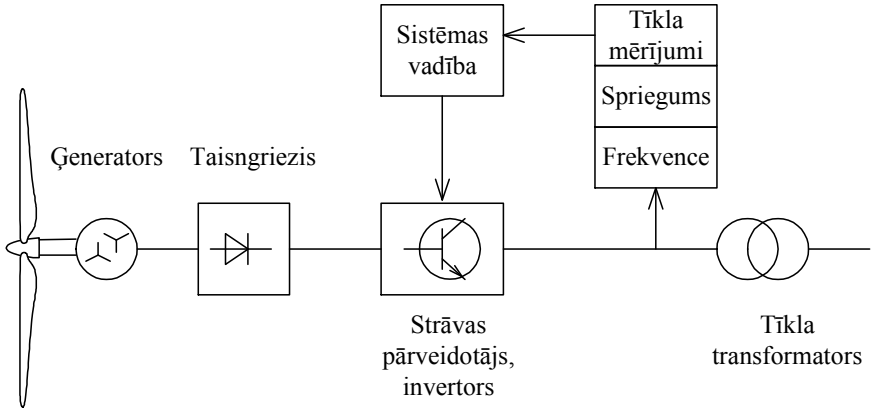
Vēja enerģētiskās iekārtas vadības operācijas automātiski veic mikroprocesoru vadības sistēma, kas informāciju saņem no iekārtā izvietotajiem sensoriem.

Daži svarīgākie parametri, rotora ātrums, ģeneratora temperatūra tiek kontrolēti ar vairākiem neatkarīgiem sensoriem.

PIEVIENOŠANA ELEKTRISKAJAM TĪKLAM

Elektroenerģija no ģeneratora tiek atdota tīklam caur strāvas pārveidotāju. Pieslēgums ļauj precīzi kontrolēt un regulēt izejas jaudu no 5 līdz 330kW diapazonā un samazināt zemās frekvences jaudas svārstības.

Kontroli un regulēšanu atbilstoši iestatītajiem parametriem nodrošina elektronisks automātiskās vadības bloks.



2.48. att. **ENERCON vēja ģeneratora pieslēgšana elektriskajam tīklam**

2.6.4. Moderno vēja ģeneratoru spārnu izgatavošana

Modernā vēja ģeneratora spārns ir dobja konsolveida aerodinamiska profila konstrukcija, kas ir līdzīga lidmašīnas spārnam. Tā ir ļoti izturīga, ar augstu slodzes spēju. No lidmašīnas spārna tā atšķiras ar to, ka vēja ģeneratoru spārnus gandrīz vienmēr izgatavo, formējot no kompozītu materiāliem. Lielu izmēru spārniem visbiežāk lietotais materiāls ir plastmasa armēta ar stikla šķiedru un koka un epoksīdsveķu laminēts.

SPĀRNU IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJA UN MATERIĀLI

Spārnu izgatavo no divām daļām. Virsējo un apakšējo daļu formē atsevišķi, katru savā formā. Pēc tam abas puses precīzi sastiprina un salīmē. Tad piestiprina nepieciešamos papildelementus – skrūves, fiksācijas izciļņus utt.

Ar stikla šķiedru armētus spārnus izgatavo, stikla šķiedru ieklājot formā, kurā ir iepildīti sintētiskie sveķi (skat. 2.49. att.). Spārnu izgatavošanai izmanto poliestera (GRP) sveķus vai epoksīda (GRE) sveķus. Stikla šķiedra parasti aizņem 40-50 % no kompozīta tilpuma, tas ir apmēram divas trešdaļas no konstrukcijas svara. Spārnu formēšanai izmanto stikla audumu vai stikla pavedienus un šķidros sveķus. Sveķus sajauc ar cietinātāju, tie reaģē un sacietē. Cietēšanas laiks ir atkarīgs no temperatūras. Sveķu cietēšanas laikā notiek reakcija un izdalās siltums.

2.49. att. **Vēja ģeneratora E-112 spārna izgatavošana**

Spārnu izgatavošanas tehnoloģija ir pārņemta no laivu būves. Stikla audumu ieklāja formā un ar rokas instrumentu uzklāj sveķus. Vēl pirms dažiem gadiem šī samērā darbietilpīgā tehnoloģija bija vienīgais veids, kā izgatavot stikla šķiedras spārnus. Ar roku darbu izgatavotajiem spārniem aptuveni 40 % no kompozīta tilpuma bija stikla šķiedras pildviela. Izmantojot roku darbu spārnu formēšanā, bija grūti nodrošināt viendabīgu konstrukcijas biezumu. Šodien ieklāšanu ar rokām pilnīgi aizstāj modernākas metodes, tādas kā sveķu infūzijas metode (RIM) vai jau iepriekš piesūcināta stikla auduma izmatošana.

Ja spārnus izgatavo ar RIM metodi, formā ieklāj sausu stikla audumu, formu aizver, noblīvē, izsūknē gaisu un ar vakuumu iesūc sveķus. Paņēmiens ir ļoti efektīvs, stundas laikā iespējams iesūkt vairākus simtus kilogramu sveķu. Šādi izgatavotais kompozīts pēc tilpuma satur 50 % stikla šķiedras, tas nodrošina ļoti labu stiprību un stingumu. Šādi izgatavotiem spārniem starp stikla šķiedras slāņiem neveidojas atslāņojumi un burbuļi.

Mazākus spārnus arī tagad turpina izgatavot izmantojot roku darbu. Ļoti grūti izgatavot ar rokām lielos megavatu turbīnu spārnus, tie ir vairākus metrus plati. Attēlā

2.49. parādīta ENERCON firmas 4,5 MW vēja ģeneratora E 112 spārna izgatavošana, notiek spārna vienas puses formēšana. Spārna garums 52 metri.

Koka epoksīda laminmāta izgatavošanai izmanto epoksīda sveķus un koka finiera skaidas. Tās iegūst koka kluču, saēvelējot, 2,5–4 milimetru biezās skaidās. Lai nodrošinātu zemu un stabilu mitruma saturu, skaidas kaltē. Laminmāta spārnu izgatavo izmantojot divdaļīgu formu, līdzīgi, kā to dara izgatavojot stikla šķiedras spārnu. Skaidas vai nu ar roku vai ar mašīnu pārklāj ar epoksīda sveķiem un ievieto formā (skat. 2.50. att.). Laminmāta formēšanai var izmantot arī vakuuma metodi.

2.50. att. **Firma SIEMENS gatavojas formēt spārnus vienā lējumā**

2.50. att. **Koka laminmāta spārna izgatavošana**

Laminăta izgatavošanai vispiemērotākā koksne ir bērzam un Duglasa eglei. Šos kokus plaši izmanto finiera ražošanai, Latvijā, Somijā bērzu un ASV Duglasa egli. Ķīnā plāno spārnu ražošanai izmantot bambusa laminātu.

Atšķirībā no saplākšņa, finiera skaidu sagataves spārnā laminē, orientējot šķiedru tikai vienā virzienā – pa spārna garumu, tas nodrošina spārna maksimālo stiprību un stingumu.

Spārnu izgatavošanai no stikla šķiedras kompozīta ir vairākas priekšrocības, salīdzinot ar koka laminăta izgatavošanu:

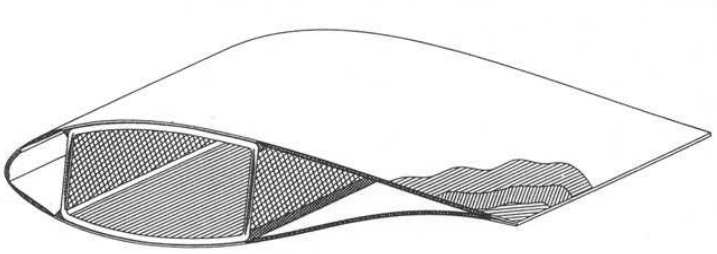
- Lietojot stikla šķiedru ir mazāka darbietilpība;
- Iespējams izmantot progresīvākas formēšanas metodes. Koka epoksīda tehnoloģijā nav formēšanas metodes, kas būtu līdzvērtīga infūzijas formēšanai.

Priekšrocības izmantojot koka laminātu:

- Koka un epoksīda tehnoloģija balstās uz ilgtspējīgiem resursiem;
- Epoksīda sveķu patēriņš ir mazs, jo tie veido tikai plānu līmes kārtiņu starp koksnes slānīšiem, bet nevis pildmateriālu, kā tas ir stikla šķiedras kompozītam.

SPĀRNU KONSTRUKCIJA

Spārna pamatne (root) ir sevišķi svarīgs spārna elements, tā satur kopā visu spārnu, spārna augšējo un apakšējo daļu un caur samērā nelielu saskares virsmas laukumu pārnes visu spārna slodzi uz rotora rumbu. Uz vēja rotora spārnu darbojas statiskā un dinamiskā slodze, kas slogo spārna pamatni, tāpēc šai daļai ir uzstādītas sevišķas prasības. Dažām agrāk izgatavotajām spārnu konstrukcijām bija problēmas ar spārna pamatnes noguruma plaisām.



2.51. att. **Spārna pamatne**

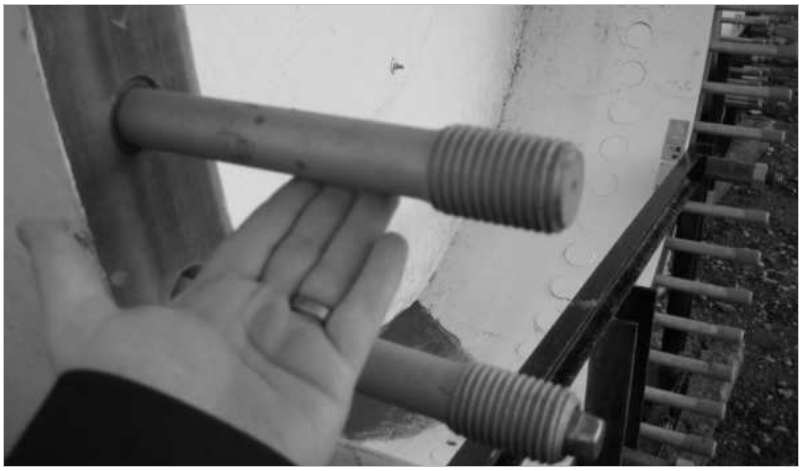
Daudzu gadu garumā notika visu industriju aptveroša pētnieciska darbība, rezultātā ir sasniegts stāvoklis, kad spārna pamatni raksturo augsts drošums un ir sasniegta konstruktīvā pilnība. Pie šāda rezultāta nonāca izmantojot progresīvas stiprināšanas metodes un pakāpeniski izmainot spārna pamatnes ģeometrisko formu, lai palielinātu spārna stingumu.

2.52. att. **Skats spārna iekšpusē**

Spārna pamatnes savienojumā ar rotora rumbu saskaras kompozīts ar metālu. Šim savienojumam ir atrasti vairāki konstruktīvie risinājumi. Stikla šķiedras spārniem var izmantot plastmasā ielīmētas vai mehāniski iestiprinātas tapskrūves. T-veida tapskrūves pa aploci spārna pamatnē ir mehāniski nostiprinātas ar uzgriežņiem. T-veida skrūvju savienojums nodrošina vienmērīgu slodzes sadalījumu pa spārna pamatni un nospriego laminātu spiedē, šādā veidā nodrošinot augstu nogurumizturību un atvieglo izgatavošanu un salikšanu.

2.53. att. **Spārna tapskrūves**

Spārnos, kas izgatavoti no koka un epoksīda kompozīta, nostiprina tērauda tapskrūves vai skrūvju turētājus (detaļas ar iekšējo vītni), ielīmējot spārna pamatnē ar sabiezinātiem epoksīdsveķiem. Pamatnes tapskrūvju ģeometrijas, materiālu un virsmas apstrādes optimizācija ar mērķi maksimizēt slodzes spēju un nogurumizturību ir prasījusi lielu pētniecisko darbu.



2.54. att. **Spārna stiprinājuma skrūves**

2.55. att. **Atliekts spārna gals trokšņa samazināšanai E-48 rotoram**

Parasti skrūvju turētājus spārna pamatnē aizlej jau infūzijas formēšanas procesa laikā. Pretējā gadījumā pamatnes gala virsmā pēc spārna izgatavošanas būtu jāurbj caurumi, kuros turētājus ielīmēt. Skrūvju turētājs ir 150 mm garš, sver 660 g un tā izvilkšanai nepieciešams pielikt 34 tonnas lielu spēku.

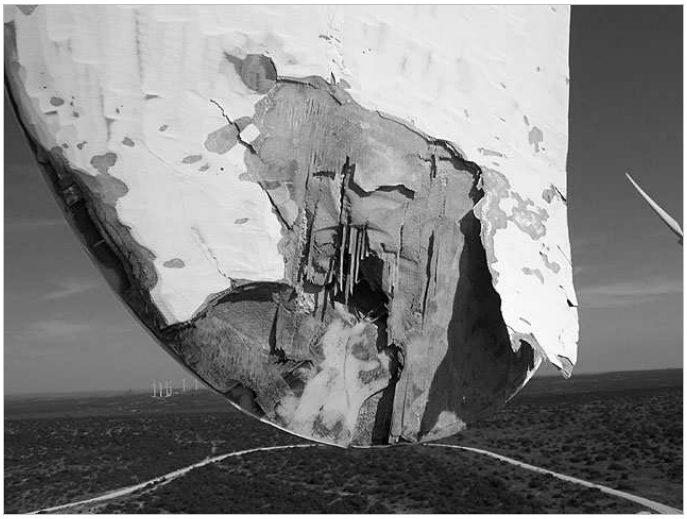
TROKŠŅU SAMAZINĀŠANA

Jaunākās spārnu konstrukcijas ļauj samazināt arī troksni. Spārnu aerodinamisko troksni ģenerē galvenokārt spārnu gali. Aizstājot agrākos nošķeltos

galus ar eliptiskiem (skat. 2.55. att.), samazinās virpuļi un to radītais troksnis. Otrs potenciālais trokšņa avots ir spārna aizmugures šķautne. To tagad izveido relatīvi plānu.

ZIBENS AIZSARDZĪBA

Gandrīz visiem lielajiem spārniem ir iebūvēta zibens aizsardzības sistēma, kas sastāv no spārnā izvietota elektrības vadītāja. Tas spēj uztvert un pa spārnu līdz pat rumbai aizvadīt lielu elektrisko lādiņu. Rezultātā tiek nodrošināts, lai gaiss zibens izlādes laikā spārna dobjajā iekšienē nesakarstu un izplešoties neizraisītu spārna bojājumu. Spārna galā mēdz iebūvēt aktīvo zibensnovedēju, kas izsaukdams gaisa jonizāciju, izraisa priekšlaicīgu elektrisko izlādi.



2.56. att. **Nepietiekami aizsargāts spārna gals pēc zibens spēriena**

Spārnu paraugiem tiek veikti zibens aizsardzības pētījumi, vispirms tos pārbauda augstsprieguma laboratorijā, pēc tam reālos apstākļos. Ja zibens aizsardzība spārniem nav pietiekami laba, tad rezultāts ir šāds, (skatīt 2.56. att.).

SVĀRSTĪBU SLĀPĒŠANA

Spārni, kuriem izmanto iestatījuma leņķa (pitch control) regulēšanu ar fiksētu kāpi, spēcīgā vējā var sākt vibrēt. Tādēļ tajos iebūvē vibrāciju slāpētājus. Vibrāciju

cēlonis ir aerodinamiski vibrējoša spārna daļa, kas no gaisa plūsmas uzņem enerģiju. Slāpētāja izmēri un novietojums ir izvēlēti tā, lai slāpēšana notiktu pie minimālā slāpētāja svara.

SPĀRNU SVARA SAMAZINĀŠANA

Veidojot jaunas spārnu konstrukcijas, ir tendence samazināt svaru. Uzmanīgi neiedziļinoties modernais trīsspārnu megavatu klases lieljaudas vēja rotors izskatās gandrīz tāds pats, kā pirms 20 gadiem izgatavotais 50 kW rotors. Ja katru šīs agrākās mašīnas spārnu elementu proporcionāli palielinātu, tad agrākā spārna modernā kopija svērtu divreiz vairāk nekā sver šodien izgatavotais spārns. Spārna konstrukcijas pilnveidojumi ir galvenais faktors, kam var pateikties par apbrīnojamo vēja rotoru izmēru pieaugumu. Var apbrīnot arī saražotā kilovata pašizmaksas samazināšanos.

2.57. att. **Otrās paaudzes vēja rotora spārni E-48**

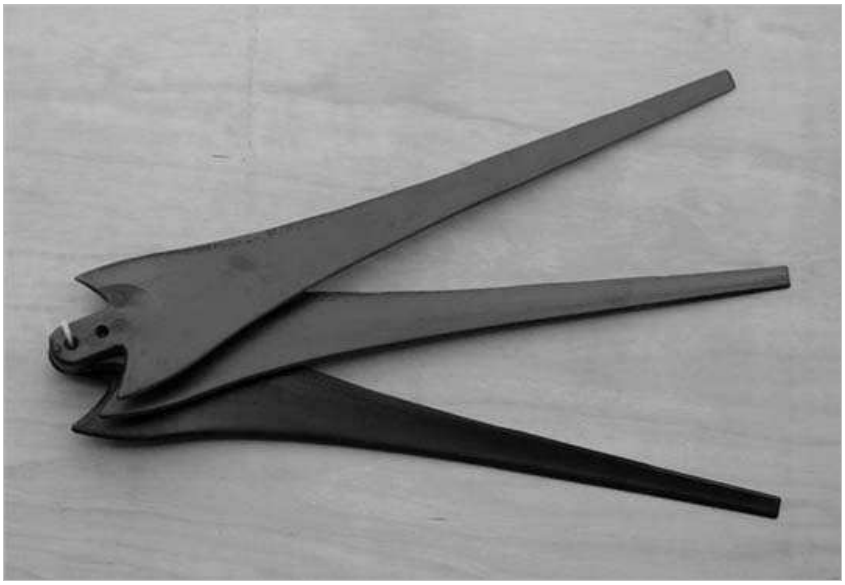
Progresu spārnu izveides attīstībā raksturo svara un rotora izmēru attiecības izmaiņas tendence. Rotoru izmēri palielinās straujāk nekā spārnu svara pieaugums. Pirmās paaudzes stikla šķiedras spārniem, kurus izgatavoja ar rokām, ieklājot pildvielu formā ar relatīvi mazu stikla šķiedras tilpumisko daļu, tika veidoti plāni spārna aerodinamiskā profila šķērsgriezumi, tādi kā lidmašīnām. Konstruktīvi nepilnīgi bija

izstrādāta spārnu pamatnes daļa, tā ekspluatācijas laikā plaisāja materiāla noguruma rezultātā. Spārniem bija liels svars.

Otrās paaudzes, šodien izgatavotajiem (skat. 2.57. att.) stikla šķiedras spārniem ir biezs, speciāli vēja industrijai konstruēts aerodinamiskais profils, optimizēta strukturālā uzbūve, izmantojot dažādus kompozītus dažādos spārna šķēlumos, infūzijas vai kāda cita progresīvā formēšanas procesa izmantošana, kas ļauj palielināt stikla šķiedras tilpumisko daļu un tāds konstruktīvais izveidojums, kam no apaļās pamatnes daļas atbilst pakāpeniska spārna profila izmaiņa. Rezultātā radīta relatīvi viegla konstrukcija ar augstu nogurumizturību.

OGLEKĻA ŠĶIEDRAS IZMANTOŠANA

Palielinoties rotoru diametram, turpināsies arī rotoru strukturālās efektivitātes pieauguma tendence, lai izmainītos izmēra un svara pieauguma tendence, ir nepieciešamas izmaiņas tehnoloģijā. Par vienu no šādām lēcienveida izmaiņām var izrādīties intensīvāks oglekļa šķiedru kompozītu pielietojums, kas varētu jūtami palielināt stiprību un stingumu.



2.58. att. **No oglekļa šķiedras izgatavoti mikroturbīnas spārni Air 403**

Oglekļa šķiedras plašāku pielietojumu kavē šī materiāla dārdzība, bet palielinoties ražošanas un izmantošanas apjomam nemitīgi krītas izejvielu cenas. Spārnu izmēru palielināšanas tendence aktualizē īpatnējā svara samazināšanas nozīmi. Tuvā nākotnē šie trendi krustosies un tad oglekļa šķiedras kompozītu izmantošana ieņems ievērojamu vietu lielo vēja ģeneratoru spārnu izgatavošanā. Jau tagad oglekļa šķiedru izmanto lielu spārnu atsevišķās vietās un ļoti pievilcīga ir arī stikla un oglekļa šķiedras hibrīda spārnu ražošanas iespējamība.

Southwest Windpower Air 403 markas mikro vēja ģeneratoru spārni ir izgatavoti no oglekļa šķiedras, aerodinamiskā forma ir ļoti precīza un šķautne ir izgatavota tik asa, ka spārnu ražotājs brīdina nesagriezties ceļot un transportējot šos spārnus (skat. 2.58. att.), 400 W ģeneratoram spārnu komplekts interneta veikalā maksā tikai 140 USD.

Pašreiz vislielāko vējturbīnu spārniem turpina izmantot stikla šķiedras un koka epoksīda kompozītus. Salīdzinot abus materiālus, var secināt, ka pie dotā rotora diametra mazāks svars ir iespējams stikla šķiedras kompozīta spārniem, jo šim materiālam ir augstāka īpatnējā stiprība. Tomēr šis slēdziens nav galīgs, jo koka laminātiem ir salīdzinoši augsts īpatnējais stingums, tas ļauj nodrošināt stingu konstrukciju pie relatīvi maza svara. Stingums ir noteicošā īpašība, domājot par spēli starp spārniem un torni, smagu slodžu apstākļos, vai par spārna aeroelastīgo stabilitāti.

SPĀRNU TRANSPORTĒŠANA

Lielu spārnu transportēšana ir nopietna problēma. Sauszemes turbīnām spārnu izmērus ierobežo vēja ģeneratora uzstādīšanas vieta un topogrāfija.

2.59. att. **E-48 iekārtas spārns, 800 kW rotora diametrs 48 metri**

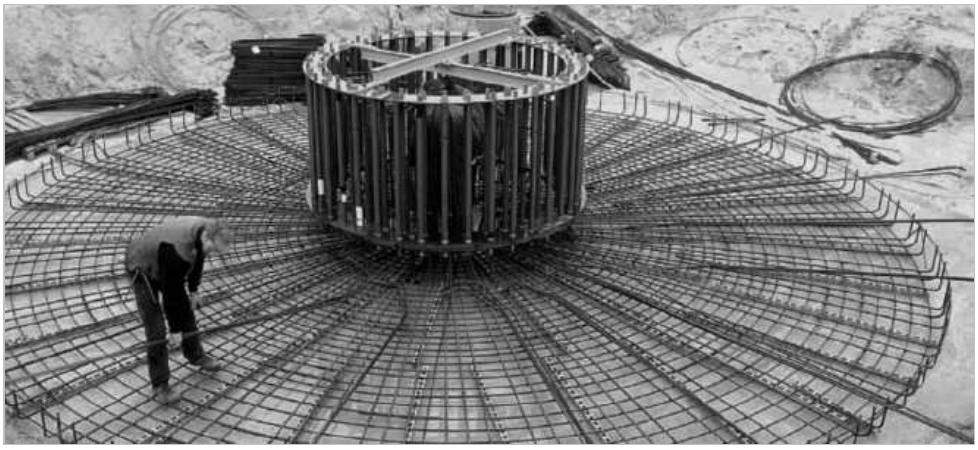
Gan spārnu, gan vēja ģeneratora pacelšanas celtņu transporta iespējas nosaka piebraukšanas ceļi, kas kalnainos vai nomaļos apvidos var sagādāt ievērojamas problēmas. Nekādi ierobežojumi spārnu izmēriem nav jūras vēja parku gadījumā. Šeit galvenā problēma ir ceļš no ražotāja uz ostu.

2.6.5. Vēja ģeneratoru uzstādīšana

Lielo vēja ģeneratoru uzstādīšanu parasti izpilda pieredzējušas firmas. Lai veiktu šo darbu, ir nepieciešams projekts un precīzs darbu plānojums. Nedrīkst aizmirst ievērtēt arī iekārtu un celšanas tehnikas transportēšanas iespējas konkrētajā apvidū.

PAMATU IZGATAVOŠANA

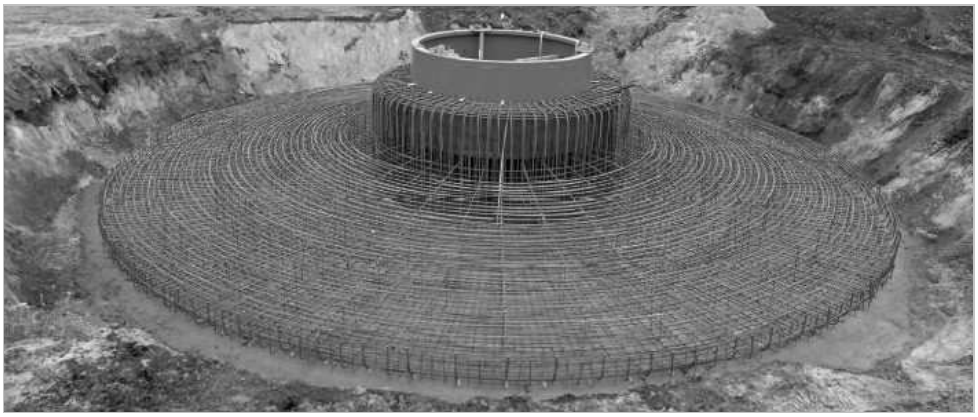
Lielajiem vēja ģeneratoriem torņa un pamata izveidē izmanto senpazīstamo principu, kas ir gadsimtiem izmantots krievu rotaļlietā „vaņka staņka". Masas centrs tiek nobīdīts iespējami viszemākajā vietā, pie tam masa pamatam un pēdai ir daudzkārt lielāka par torņa un ģeneratora masu. Šādu konstrukciju nevar apgāzt, jo tā tiecas ieņemt sākotnējo stāvokli.



2.60. att. **Vēja ģeneratora pamatu stiegrojuma izveide E-33 ģeneratoram**

Pamatu vēja ģeneratoram veido izrokot bedri, to piepilda ar ievērojamu daudzumu betona, kurā ir ielikts centrālās daļas vertikālais stiegrojums, kas sasaista

dziļākos betona slāņus un torņa stiprinājuma atloku. Tad veido pamata virsējās daļas stiegrojumu, kas veido dzelzsbetona plāksni (skat. 2.61. att.)



2.61. att. **Pamatu izgatavošana E-48 ģeneratoram**

2.62. att. **Ja nav pareizi izveidots pamats, tornis mēdz arī nogāzties**

Betona stiprība strādā tikai uz spiedi, nav bijis izveidots vertikālais stiegrojums, kas sasaista augšējo pamata slāni ar apakšējo, ja pamata slāņi var atdalīties, tad dziļākajā slānī iestrādātā betona masa vairs nestrādā (skat. 2.62. att.).

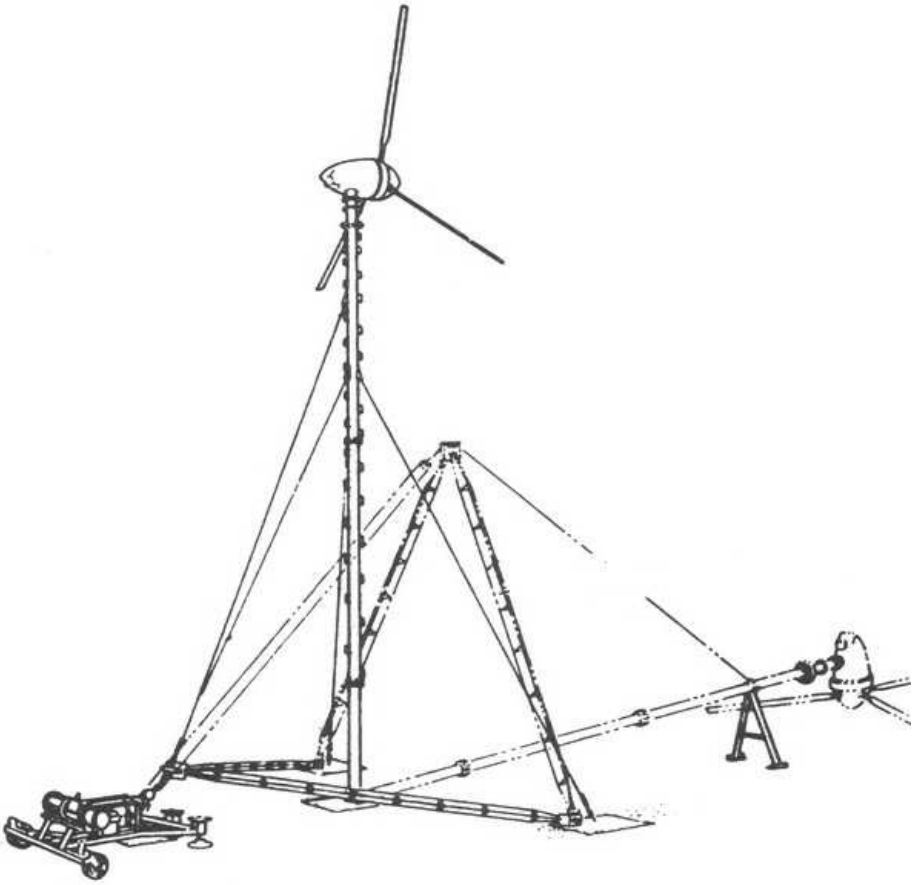
VĒJA ĢENERATORA TORNIS

Lielajiem vēja ģeneratoriem pašlaik vislabāk izstrādātā torņa konstrukcija ir caurules tipa tornis bez atsaitēm. Šāda tipa torņa izgatavošana ir samērā vienkārša. Tas ir industriāli izgatavots un tiek samontēts ģeneratora uzstādīšanas vietā. Vispirms samontē torni, tad pa daļām uzceļ un nostiprina gondolu, montē ģeneratoru (skat. 2.63. att.), pieskrūvē spārnus. Lielo gabarītu dēļ, nopietna problēma ir torņa sekciju un celšanas tehnikas transportēšana.

2.63. att. **Tiešās piedziņas vēja ģeneratora montāža**

Mazajiem vēja ģeneratoriem arī var izmantot caurules tipa torni, bet caurules diametrs ir neliels un tā var ļodzīties, tāpēc parasti izmanto atsaites. Lielu vēju laikā, spārni lokās, atsaites nedrīkst skarties pie vēja ģeneratora spārniem. Torņa lejas daļā pie pamata ir izdevīgi veidot eņģi, tas atvieglo ģeneratora un masta uzcelšanu. Celšanai var izmantot vinču (elektrisko vinču), vai traktortehniku un papildus rāmi, lai pareizi nospriegotu trosi. Ja ir pieejams autoceltnis, to izmantot celšanai ir visērtāk. Nedrīkst aizmirst, ja

kādam ķermenim esiet piešķīruši gravitācijas enerģiju to paceļot, tad šis ķermenis šo enerģiju atdos nolaižot...



2.64. att. **Mazjaudas vēja ģeneratora uzcelšana ar vinču un papildus rāmi**

Vienkāršo celšanas ierīču izmantošana (skat. 2.64. att.) atvieglo mazjaudas ģeneratora ekspluatāciju, jo apkopes un remontus var veikt ģeneratoru nolaižot lejā uz zemes. Veicot šos celšanas darbus ir jāievēro drošības tehnika, jo troses mēdz trūkt, savienojumi var atkabināties, caurules tipa masts celšanas laikā ir ar atbrīvotām atsaitēm, tas var saliekties.

2.7. Vēja ģeneratori Latvijā

Latvijā visos laikos ir bijuši entuziasti, kas nodarbojās ar vēja enerģētiku. Interese par vēja ģeneratoru izmantošanu kārtējo reizi saasinājās pagājušā gadsimta astoņdesmito gadu beigās, kad patriotisku jūtu iespaidā Latvijā tika meklēti neatkarīgi enerģijas avoti, bet interese, gan tehniskā, gan ekonomiskā ir saglabājusies līdz šodienai un ir pat pastiprinājusies. Šodien, 2008. gadā ir kļuvuši pieejami arī Ķīnā un Vācijā ražoti nelielas jaudas vēja ģeneratori, tos var nopirkt e-veikalā...

No vēja enerģētikas entuziastiem, kas nesenā pagātnē paši ir būvējuši vēja ģeneratorus var pieminēt Uldi Johansonu, Latvijas Vēja asociācijas viceprezidentu, kurš 1992. gadā uzstādīja četru kilovatu vēja elektrostaciju Svētes pagasta „Pumpuros", kas būvēta uz Krievijā ražotas vēja elektrostacijas „Vetroen" bāzes un tiek izmantota siltuma ieguvei. Ar vēja ģeneratoru popularizēšanu, konstruēšanu, un pētīšanu nodarbojās LLU profesors, habilitētais inženierzinātņu doktors Lauksaimniecības Enerģētikas institūta (LEI) bijušais direktors Ansis Grundulis. Zemnieku saimniecībā „Tolēni" tika izveidots vēja pētīšanas poligons, tur veica daudzus tehniskus eksperimentus, tai skaitā vēja parametru pētīšanu un datu savākšanu ilgstošā laika posmā. „Tolēnos" tika uzstādīts un izmēģināts arī LEI konstruētais vēja ģenerators, kas paredzēts apsildei.

Šobrīd, 2008. gadā, Latvijā veiksmīgi darbojas Ainažu VES ar diviem 600 kW ģeneratoriem, Užavas VES ar 1000 kW, Liepājas Kara ostas teritorijā izvietotā 1800 kW VES, Grobiņas vēja parks ar 33 ģeneratoriem un 2 Alsungas ģeneratori ar jaudu 1000 kW katrs, Nīcā 750 kW Vestas asinhronais ģenerators. Efektīvi darbojas arī 150 kW vēja stacija Liepājas Tramvaju parkā.

2.7.1. VEF vēja ģenerators

2.65.att. **VEF vēja ģenerators**

Latvijā vēja ģeneratorus ražoja uzņēmumā VEF vēl pirms 2 Pasaules kara. Tā bija tiešās piedziņas mikro vēja iekārta, kas sastāvēja no aptuveni divsimts vatīga līdzstrāvas ģeneratora, vadības bloka un 6V akumulatora. Ģeneratoram lietoja no koka izgatavotu divu spārnu, aerodinamiska profila rotoru. Iekārta bija izmantojama lauku māju apgaismošanai un radio darbināšanai. Vēl dažviet pagājušā gadsimta sešdesmito gadu sākumā šo VEF vēja ģeneratoru lietoja lauku māju elektriskās apgaismes sistēmai, līdz laikam, kad sākās lauku centralizētā elektrifikācija un šos ģeneratorus izmantot vairs nebija izdevīgi.

Attēlā redzamais vēja ģenerators nokalpoja visus pēckara gadus Gulbenes rajona Druvienas ciema „Upmaļos", līdz lauku teritoriju elektrifikācija sasniedza nomaļo lauku māju.

2.7.2. Glūdas vēja ģenerators

2.66. att. **Glūdas vēja ģenerators**

1992. gadā Jelgavas Ceļubūves pārvalde Glūdā nodeva ekspluatācijā eksperimentālu vēja staciju ar 60 kW jaudu. Tā bija paredzētā par bāzes iekārtu automātiskās vadības sistēmas izveidei un izpētei. Vēja ģenerators ražots padomju laikos Lietuvā, tas bija paredzēts bitumena sildīšanai un bāzes kantora apkurei. Ģenerators strādāja neilgu laiku, jo bija pieļautas konstruktīvas nepilnības, bet pārbūvei vajadzēja piesaistīt ievērojamus līdzekļus, kas deviņdesmito gadu sākumā bija problemātiski. Bitumena sildīšanai sāka

izmantot modernākas tehnoloģijas un ģenerators palika bez pielietojuma. Iekārtai atradās jauni saimnieki un šobrīd vēja stacija ir sakārtota lietošanai.

2.7.3. LEI vēja ģenerators

Kopš 1991. gada LLU Lauksaimniecības Enerģētikas institūtā ir uzsākta mazjaudas vēja ģeneratoru izstrāde zemnieku saimniecībām.

Fakultātes darbinieku spēkiem izgatavotais eksperimentālais paraugs tika uzstādīts Vircavas pagasta zemnieku saimniecībā Tolēni (skat. 2.67. att.). Pirmā izstrādne tika pilnveidota un sadarbībā ar Jelgavas Mašīnbūves rūpnīcu tika izgatavoti vēl trīs eksperimentālie modeļi.

Vēja stacijas saražotās elektroenerģijas nodošanai tīklā Lauksaimniecības Enerģētikas institūtā tika izstrādāta shēma ar taisngriežiem un pusvadītāju pārveidotājiem. Pie mainīga vēja ātruma mainās ģeneratora spriegums un frekvence, šis maiņspriegums ar taisngriezi tiek pārvērsts līdzspriegumā un padots uz jaudīgiem pārveidotājiem, kas līdzspriegumu pārvērš ar tīklu sinhronizētā 50 hercu maiņspriegumā.

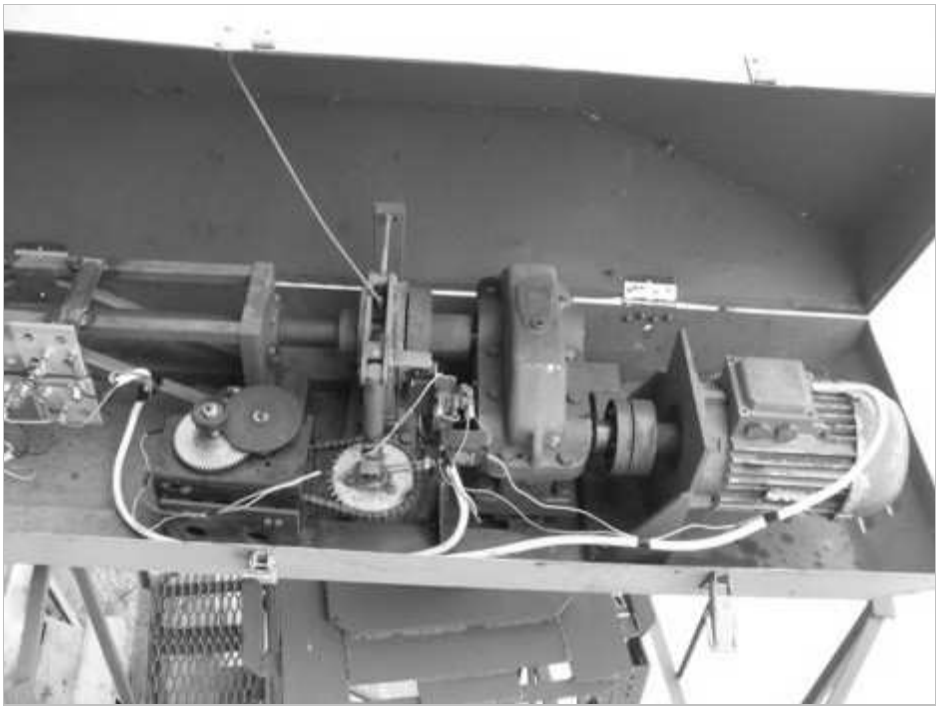
2.67. att. **LLU LEI konstruētais un izgatavotais vēja ģenerators (1995)**

2.4. tabula

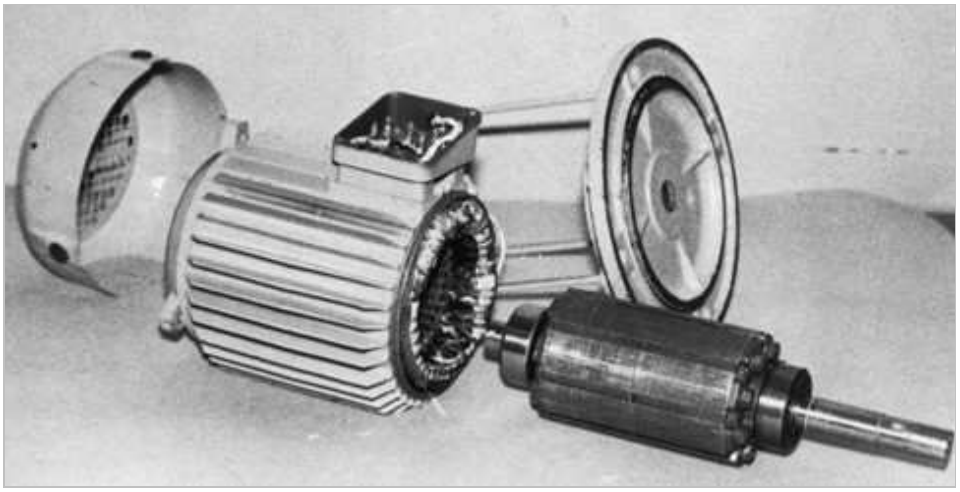
Vēja ģeneratoru LEI-6 tehniskie parametri

Ģenerators - sinhronais ar pastāvīgajiem magnētiem	
Elektriskā jauda	6 kW
Spriegums	3*380 V
Vēja turbīnas diametrs	7 m
Spārnu skaits	3
Masta augstums	22 m
Minimālais vēja ātrums	4 m/s
Maksimālais vēja ātrums	15 m/s
Gondolas masa	250 kg
Orientācija vējā - ar aizmugures vēju	

Vairākus šos ģeneratorus bija plānots uzstādīt Pāvilostā, nomainījās iekārtu īpašnieki un pašlaik viens no ģeneratoriem ir uzstādīts Kandavā un tiek izmantots mājas apsildei.



2.68. att. **LLU LEI vēja ģeneratora gondolas uzbūve**



2.69. att. **Ģenerators ar pastāvīgajiem magnētiem**

Kā ģenerators šai vēja iekārtā izmantots jaudīgs soļu motors, kas darbojas kā sinhronais ģenerators ar pastāvīgu ierosmi. Izejas spriegums šim ģeneratoram mainās tieši proporcionāli vārpstas rotācijas frekvencei, ja vārpstas rotācijas frekvence sasniedz 3000 apgr/min, tad fāzes spriegums sasniedz aptuveni 300 V pie slodzes 5 A un izejas sprieguma frekvence ir 150 Hz, bet ģeneratora tinuma nominālā strāva ir 10 A.

Pastāvīgas ierosmes ģeneratoram netiek tērēta enerģija ierosmei, ģenerators dod EDS tiklīdz sāk griezt vārpstu, bet izejas spriegumu var regulēt tikai ar vārpstas rotācijas frekvenci.

2.70. att. **Ģeneratora rotors ar pastāvīgajiem magnētiem**

2.71. att. **Spārnu montāža LEI vēja ģeneratoram** (2008. g.)

Viens no deviņdesmitajos gados izgatavotajiem LEI ģeneratoriem pirms uzcelšanas mastā 2008. gada rudenī z.s. „Vegas" Vircavas pagastā Jelgavas rajonā (bijušie z.s. „Tolēni"). Ģenerators aprīkots ar elektriski vadāmām bremzēm. Projektētā cauruļu tipa torņa vietā tiek izmantots režģu tipa tornis. Lai samazinātu celšanas tehnikas nomas izmaksas un atvieglotu vēja ģeneratora apkopju un remontu izpildi, torņa augstums samazināts.

2.72. att. **LEI vēja ģeneratori saimniecībā „Vegas"** (2008. g.)

2.73. att. **LEI vēja ģenerators** (2008. g.)

2.7.4. Ainažu VES

2.74.att. **Ainažu VES**

Pirmie divi lielas jaudas vēja ģeneratori Latvijā tika uzstādīti Ainažos. Netālu no Ainažu robežkontroles punkta, Latvijā pirmās lieljaudas vēja elektrostacijas otrais ģenerators tika montēts 1995. gada oktobrī. Ainažu vēja stacijas montāžu veica Latvijas celtnieki, piedaloties vācu speciālistiem un 29 tonnas smagās gondolas uzcelšanai 50 metru augstumā, speciāls autoceltnis bija ieradies no Vācijas.

Pašlaik Ainažu vēja elektrostacijā strādā divi TW 600 tipa vēja ģeneratori, kas ražoti Vācijas firmā

Tacke Windtechnik. Katra agregāta jauda ir 600 kW, vēja turbīnas diametrs ir 43 metri un tā strādā pie vēja ātruma no 4 līdz 25 m/s. Vadības sistēma ir 100% automatizēta. Šeit enerģiju ražo un nodod Ziemeļu elektriskajos tīklos 20 kV līnijā. Vēja stacijai gada laikā saražojamais enerģijas daudzums vidēji 1,2 miljoni kilovatstundu.

2.7.5. Užavas VES

Kopš 1999. gada, Ventspils rajona Užavas pagastā darbojas Nordex N54/1000 vēja stacija ar jaudu 1000 kilovatu. Divi līdzīgi ģeneratori ir uzstādīti arī Alsungas pagasta teritorijā 2002. gadā.

2.75.att. **Užavas VES**

2.7.6. Liepājas Kara ostas vēja ģenerators

Liepājas Kara ostas teritorijā izvietotais vēja ģenerators ir Enercon E-66 ģenerators ar 1800 kW jaudu. Ģenerators ir izvietots, tai saucamajā, jūras krasta 300 m zonā. To uzstādīja vienlaicīgi ar Grobiņas parka 33 ģeneratoriem 2002. gada novembrī. Ģeneratora uzstādīšanai bija nepieciešamas investīcijas 1,7 miljoni eiro. Enerģija tika nodota tīklā par dubulto tarifu, kuru bija spiests maksāt „Latvenergo".

2.76. att. **Vēja ģenerators Liepājas Kara ostas teritorijā**

2.7.7. Grobiņas vēja parks

2.77.att. **Grobiņas vēja parks**

Grobiņas vēja parks sastāv no 33 Enerkon E40 vēja ģeneratoriem ar jaudu 600 kW katrs, lai no Latvenergo varētu saņemt dubulto tarifu, parks juridiski sadalīts 11 uzņēmumos, viena VES uzņēmuma jauda nedrīkst pārsniegt 2 MW...

2.8. Vēja parki

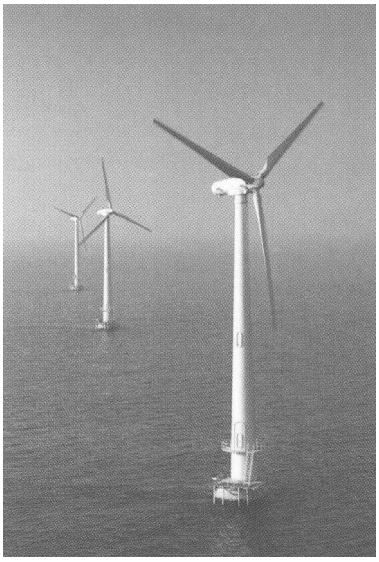
Arī vēja parku izveide nav nekas jauns, par to liecina 19. gadsimtā būvētās vējdzirnavu grupas, šodien tās mēs saucam par vēja parkiem, vai vēja fermām.

2.78. att. **Vēsturisks vēja parks Nīderlandē**

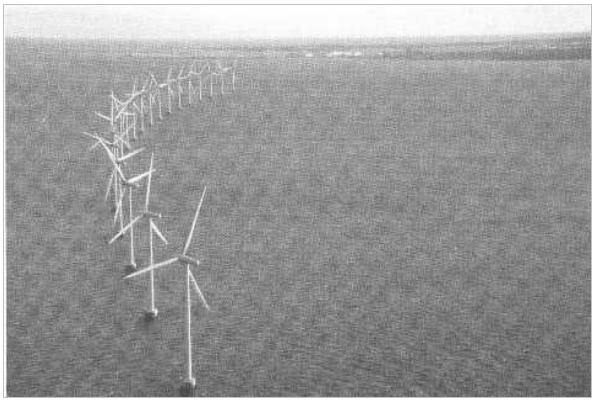
Jūrā pie Vindeby krasta Dānijā 1991. gadā tika izveidots demonstrācijas vēja parks, kas sastāv no vienpadsmit 450 kW Bonus vēja turbīnām (2.79. att.). Nākamais

Dāņu vēja parks tika veidots pie Tuno Knob 1995. gadā. Vienu 220 kW vēja turbīnu uzstādīja piekrastē pie Norgersund, Zviedrijas dienvidos.

Middelgrunnden vēja parks pie Kopenhāgenas (2.80. att.) ir pirmais kooperatīvais jūrā izvietotais vēja parks. 2001. gadā netālu no Kopenhāgenas jūrā tika uzstādītas desmit Bonus 2 MW vēja turbīnas. Tās izvietoja 3,4 km gara loka veidā. Katrai turbīnai ir 64 metrus augsts tornis, rotora diametrs 76 metri. Tās izveidotas tā, lai ražotu ap 89 miljoni kWh gadā, tas ir aptuveni 3 % no Kopenhāgenas patērētās elektroenerģijas.



2.79. att. **Demonstrācijas vēja parks Vindeby piekrastē, Dānijā**



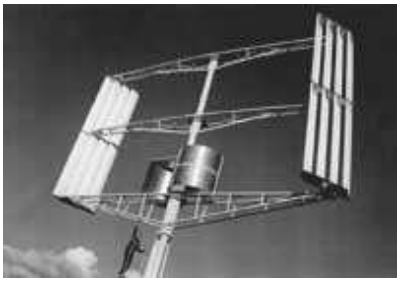
2.80.att. **Middelgrunnden vēja parks pie Kopenhāgenas**

Lielākais jūrā izvietotais vēja parks tika izveidots 2002. gadā HornsRev Dānijā, tas sastāv no 80 vēja turbīnām ar jaudu 2 MW, tās ģenerē ap 600 GWh gadā, ar to pietiek, lai nodrošinātu ar elektroenerģiju 150 000 Dāņu vienģimeņu māju.

Pirmais vēja parks Baltijā tika izveidots 2002. gada nogalē Grobiņā, Liepājas rajonā, (skat . 2.77. att.).

2.9. Jauni tehniskie risinājumi

Latvijā patentēts un izmēģināts jauns vēja ģeneratora modelis, kurš, pēc tā autoru vārdiem, salīdzinot ar pasaules vadošo kompāniju ražotajām un līdz šim praksē izmantotajām vēja enerģētikas iekārtām ir par 20 % lētāks un ar lielāku lietderības koeficentu. Jauno vēja ģeneratoru tā radītāji – firma WEA – nosaukuši par Latvijas vēja enerģētikas sākumu un nākotni.



2.81. att. **Režģveida vēja rotors**

Šim vēja ģeneratoram izmantots vēja dzinējs ar režģoto rotoru (2.81. att.). Tas ievērojami atšķiras no līdz šim izplatītā propellera tipa vēja dzinēja. Režģotā tipa rotors ir kompaktāks, salīdzinot ar propellera tipa rotoru, tas atšķiras vizuāli un aizņem mazāk vietas dabā. Vienā kvadrātkilometrā var izvietot 32 režģotā tipa rotorus un attīstīt 32 MW jaudu, bet tādā pašā teritorijā var izvietot tikai 16 tādas pašas jaudas propellera tipa rotorus un attīstīt 16 MW jaudu.

Jaunā vēja ģeneratora lietderības koeficents ir 0,82 no 1, bet līdz šim izmantoto ģeneratoru lietderības koeficents ir 0,45 no 1.

Jaunais izgudrojums ir apvienojis pētījumus divos virzienos — aerodinamikā un vēja enerģētikā, tāpēc arī iespējams šis unikālais lietderības koeficents. Vēl būtiska atšķirība ir tā, ka rotors sāk griezties, ja vēja ātrums ir 0,2 m/s, arī elektroenerģiju stabili ražo pie vēja ātruma 2 m/s, tāpēc tam nav nepieciešams iegriešanās mehānisms, turpretim aksiālās shēmas ātrgaitas ģenerators elektroenerģiju sāk ražot pie vēja ātruma 4 m/s. Pie mazākiem vēja ātrumiem jaunais vēja rotors ir daudz efektīvāks nekā tradicionālais trīsspārnu propellera rotors.

Firma WEA apgalvo, ka režģu rotora tehniskie un ekonomiskie rādītāji ievērojami pārsniedz visu propellera tipa konstrukcijas rotoru raksturlielumus. Režģu rotora priekšrocības tiek nodrošinātas ar rotora spēka elementu unikālu konstrukciju, kas izpildītas simetriski izvietojot speciāla profila turbīnas lāpstiņu blokus (režģus) paralēli vertikālajai rotora asij. Katrs bloks sastāv no četrām zemas frekvences

aerodinamiska profila turbīnas lāpstiņām. Vēja dzinējs tiek veidots no diviem, vai trīs simetriski izvietotiem aerodinamisku bloku režģiem.

Firmas WEA pētījumi liecina, ka režģu rotora lietderības koeficients ir 0,82; nominālo jaudu tas sasniedz pie vēja ātruma 11 m/s; nav vajadzīgs mehānisms orientēšanai uz vēju; nav vajadzīgs iegriešanas mehānisms; stabila darbība pie vēja ātruma virs 2 m/s; ražo par 23 % elektroenerģijas vairāk salīdzinājumā ar propellera tipa rotoriem; ātrāk atmaksājas; izmantojot vēja parkos var iegūt 2 reizes vairāk enerģijas; ekoloģiski tīra tehnoloģija; darbojas praktiski bez trokšņa, jo nepārsniedz dabas trokšņu fonu; mazie rotori netraucē putnu migrācijai; ir iespēja uzstādīt ēku tuvumā.

WEA veiktie mērījumi režģu rotora ekspluatācijas laikā būtiski atšķiras no tradicionāli ierastajiem normatīviem. Rezultāti, kādus iegūst WEA, šķiet apstrīdami… Pasaules praksē ir veikts ievērojams skaits pētījumu, bet Betca kritēriju, kas nosaka, ka no atklātas gaisa plūsmas kinētiskās enerģijas var paņemt tikai 0,59 no 1, nav pārsnieguši, jo gaiss aiz turbīnas ir jāaizvada prom. Ja šeit darbojas virzīta gaisa plūsma, vai speciāli veidoti virpuļi, varbūt tas ir iespējams.

Pasaule lielāko vēja enerģētikas organizāciju pārstāvji atzinuši, ja WEA ienāks tirgū ar savu jauno režģu rotoru, tas nespēs nodrošināt visu tirgu ar savu produkciju, būs ļoti liels pieprasījums, jo jaunais ģenerators ir gandrīz divreiz efektīvāks par līdz šim lietotajiem modeļiem.

2.82. att. **Vēja ģeneratoru koks**

Holandieši nolēmuši ieviest jauna tipa vējdzirnavas. Tās līdzinātos kokam ar zariem (2.82. att.). Uz viena „stumbra" iespējams izvietot līdz pat astoņiem „zariem" ar vēja ģeneratoriem. Šādas konstrukcijas augstums varot sasniegt pat 120 metrus.

Šādu jaunu risinājumu holandieši izgudrojuši, lai samazinātu vējdzirnavu aizņemto platību. Pie viņiem vēja ģeneratori ir ļoti populāri, bet uzstādot tos pa vienam, tie aizņem milzīgas platības. Šajā jaunajā versijā iespējams ietaupīt vietu līdz pat 8 reizēm.

2.10. Vēja enerģētisko iekārtu izvēle

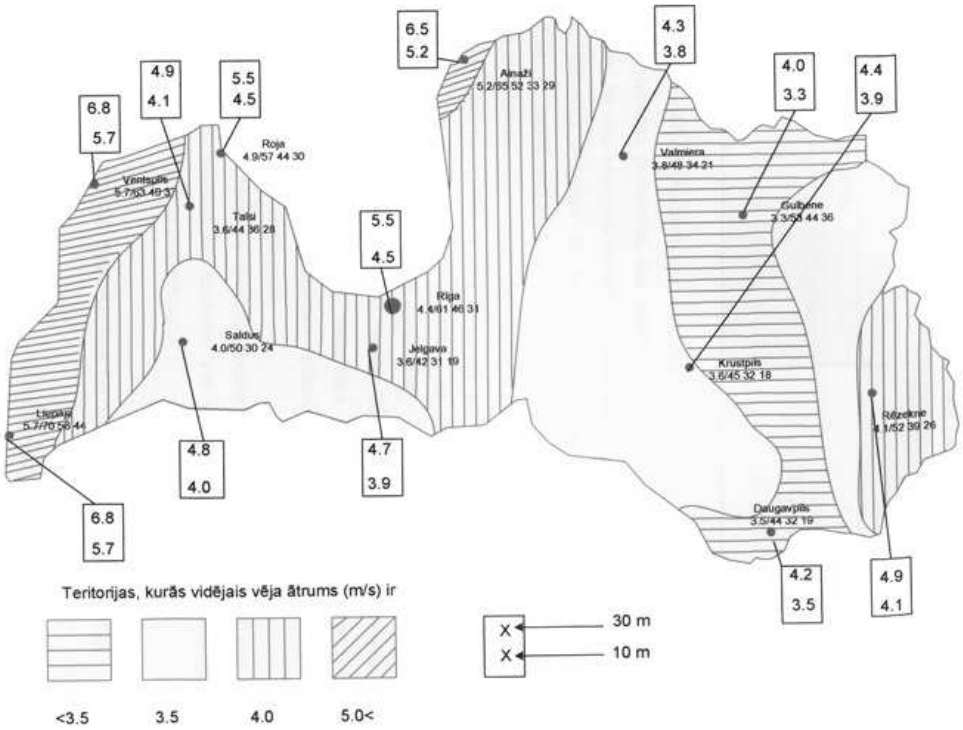
Pazīstamākās vēja ģeneratoru ražotājfirmas ir: VESTAS, ENERCON, HOWDEN, TACKE, BONUS, NORDEX.

Ļoti svarīga ir vēja ģeneratora uzstādīšanas vieta, jo dažādu firmu iekārtas sāk darboties pie dažādiem vēja ātrumiem. Vācijā ražotie tiešās piedziņas vēja ģeneratori sāk ražot lietderīgo enerģiju jau pie vēja ātruma 2,5–3 m/s.

BONUS vēja ģeneratori sāk darboties pie 3–4 m/s un pārtrauc darbu, kad vēja ātrums 28 m/s, bet visefektīvākais darbības intervāls tiem ir no 13–28 m/s. VESTAS vēja ģeneratori uzsāk darbu pie 4,5 m/s, bet pārtrauc darboties pie 25 m/s, bet vislielākā ražība ir pie 15–25 m/s, HOWDEN vēja ģeneratori sāk lietderīgi darboties pie 4,5 m/s, beidz, kad vēja ātrums ir 26 m/s un lielāks, bet visražīgākais intervāls ir pie 13–26 m/s.

Ražotājfirmas piedāvā dažāda veida, jaudas un efektivitātes iekārtas, izanalizējot tehniskos rādītājus un raksturlīknes var izvēlēties vispiemērotāko. Ir dažādu firmu līdzīgas jaudas vēja ģeneratori, kuri pie viena un tā paša vēja ātruma var saražot ļoti atšķirīgu enerģijas daudzumu, citiem tas ir nominālais vēja ātrums, bet citi vēl nav sākuši darboties. Vēja ģeneratori pārtrauc darboties arī pie dažādiem vēja ātrumiem.

Latvijā izmantojamais vēja diapazons ir 4–15 m/s un vēja ģeneratoru darba efektivitāte sasniedz 40 %. Vidējais vēja ātrums 6 m/s novērojams tikai Kurzemes piekrastē un Ainažu apkārtnē (2.83. att.). Pārējos Latvijas rajonos vēja ātrums ir mazāks par 5 m/s. Globālās sasilšanas rezultātā vēja ātrumam ir tendence pieaugt.



2.83.att. **Latvijas vēja karte 10 un 30 metru augstumam**

Palielinoties torņa augstumam, ievērojami palielinās vidējais vēja ātrums, tāpēc izvēloties iekārtas jāizmanto atbilstošas vēja kartes. Vietas izvēles efektivitāti iespaido arī reljefs. Lai iegūtu precīzu informāciju par konkrēto vietu, ir jāveic ilgstoši vēja mērījumi izmantojot datu savācēju.

2.11. Jautājumi, kas varētu interesēt ...

Kas nosaka valsts attīstības līmeni?

Enerģētika ir jebkuras valsts ekonomiskais pamats. Valsts ir bagāta un neatkarīga, ja tai ir sava lauksaimniecība un energoresursi. Pasaules pieredze rāda, ka visvairāk enerģijas patērē četras tautsaimniecības nozares: rūpnieciskā ražošana,

lauksaimniecība, transports un enerģētika. Šo nozaru īpatsvars nosaka valsts attīstības līmeni un īpatnības.

Vai modernā vēja enerģētika ir tikpat nekaitīga dabai kā vējdzirnavas?

Enerģijas ražošana saistīta ar vides piesārņojuma palielināšanos, pie mūsdienu enerģijas patēriņa tam ir globāla nozīme. Piesārņojuma daudzumu vidē var ierobežot, ja samazina izmantotā kurināmā daudzumu enerģijas ražošanā. Iespējamais risinājums ir palielināt dabīgo atjaunojamo un neizsmeļamo enerģijas avotu izmantošanu, tai skaitā, Saules, hidro un vēja enerģiju. Viena no Saules enerģijas netiešajām formām ir vēja enerģija, tā nepiesārņo apkārtējo vidi ar izmešiem, tā ir videi draudzīga enerģija.

Bet, lai paņemtu šo videi draudzīgo enerģiju ir nepieciešamas iekārtas, kuru izgatavošanai jāizlieto ievērojami energoresursi, izgatavošanas tehnoloģija un materiālu ieguve ne vienmēr ir videi draudzīga... Nedrīkst aizmirst arī nolietoto iekārtu utilizāciju un ar to saistītās izmaksas.

Vai Latvija ir vēja enerģijas izmantošanas līderis Baltijā?

Daudzās vietās uz Zemes galvenā no atjaunojamās enerģijas veidiem ir vēja enerģija. Speciālisti apgalvo, ka līdz 2010. gadam 12 % no Eiropas Savienības valstu enerģijas patēriņa dos tieši vēja enerģija. Vēja enerģijas izmantošanā pasaules līderis ir Dānija, kur pašreiz 20 % no patērētās enerģijas saražo vēja ģeneratori, bet 2015. gadā paredz sasniegt 35 %. Latvija, parakstot līgumu par iestāšanos ES, apņēmusies panākt, ka līdz 2010. gadam no atjaunojamajiem energoresursiem tiktu ražoti 49,3 % no valsts iekšzemes elektroenerģijas patēriņa. Zināms, ka minēto solījumu ierosināts iekļaut topošajā Elektroenerģijas tirgus likumā. Patlaban Latvijā no atjaunojamiem resursiem jau tiek ražoti 43–45 % elektroenerģijas – galvenokārt pateicoties Daugavas hidroelektrostaciju kaskādei. Salīdzinot ar vidējiem ES rādītājiem mēs atpaliekam tikai no Austrijas un Zviedrijas.

Pēc uzstādītās jaudas un iekārtu skaita Latvija ir vadošā vēja enerģētikas valsts Baltijā un arī bijušās PSRS teritorijā. No 2000. līdz 2003. gadam saražotās vēja enerģijas apjoms ir desmitkāršojies. Latvijā vēja elektrostaciju saražotais elektroenerģijas daudzums nākotnē varētu būt apmēram 5 % no kopējās saražotās

elektroenerģijas. Maksimālais teorētiski iespējamais vēja enerģijas potenciāls varētu būt robežās līdz 10 % no valstī patērētās elektroenerģijas. Šeit netiek ņemti vērā ne ekonomiskie, ne ekoloģiskie un tehniskie ierobežojumi. Tādējādi gan ierēdņi, gan speciālisti atdzīst, ka izaugsmes iespējas te ir gana lielas. Tomēr, kaut gan pastāv šis viedoklis un ir vērojams vēja enerģētikas uzplaukums Eiropā, progress Latvijā šajā jomā ir apstājies. Uz 2005. gadu kopējā visu VES jauda Latvijā bija 26,4 MW. 2005. gadā tika saražoti 48 GWh elektroenerģijas. Tā gan ir tikai neliela daļiņa, ap 0,7 %, no kopējā Latvijā saražotā elektroenerģijas daudzuma. Latvijā izmantojamais vēja ātruma diapazons ir 4–15 m/s un līdz ar to vēja ģeneratoru darba efektivitāte ir tikai 40 %.

Ko derētu zināt pirms sākam projektēt...

Pirms sākam projektēt vēja ģeneratoru izmantošanu, jābūt pārliecībai:

- vai attiecīgajā rajonā un konkrētajā vietā ir pietiekoši vēja resursi;
- kādas ir gaisa plūsmas reljefa iespaidā, vai vēju nenoēno;
- vai ir pietiekami daudz vietas, kur uzstādīt VG;
- vai kaimiņi piekritīs, ka uzstāda VG;
- vai pašvaldība akceptēs VG uzstādīšanu;
- vai nav dabas liegumi un ekoloģiska rakstura ierobežojumi;
- vai pār mūsu īpašumu neiet putnu migrācijas ceļi;
- vai ir iespēja pieslēgties elektriskajam tīklam un pārdot saražoto enerģiju;
- vai būs nodrošināta ģenerējošas jaudas rezervēšana;
- vai ir pietiekami finansiālie un investīciju resursi;
- vai šis pasākums atmaksāsies.

Kas nepieciešams, lai uzstādītu VG?

Lai uzstādītu vēja ģeneratoru, nepieciešams projekts un projekta saskaņošana:

- ar konkrētās zemes robežkaimiņiem;
- pašvaldības apstiprinājuma izziņa;
- reģionālās vides pārvaldes apstiprinājums.

Lai saražoto elektroenerģiju varētu pārdot tīklā, ir nepieciešams:

- līgums ar Latvenergo;
- atbilstošs tīkla pieslēgums;
- Ekonomikas Ministrijas atļauja pārdot elektroenerģiju tīklā.

Tehniski tīkla pieslēgums ir veidojams līdzīgi kā to dara ierīkojot mazo HES, vai koģenerācijas iekārtu. Ir izstrādāts nolikums par neatkarīgo ražotāju elektrostaciju pievienošanu VAS „Latvenergo" elektriskajiem tīkliem.

Kā izvēlēties vēja ģeneratoru uzstādīšanas vietu?

Projektējot VES ir jāizanalizē vēja parametri konkrētā būves vietā. Vēja ģeneratoru izmantošana ir efektīva, ja vēja ātrums ir ne mazāks par 5 m/s. Jāņem vērā, ka vēja ātrums mainās pieaugot augstumam. Mūsdienās vēja ģeneratora torņa augstums h parasti sasniedz 50–150 m, bet standarta metroloģiskajos novērojumos vēja ātrumu mēra 10–12 m augstumā. Lielos ģeneratorus ar masta augstumu 50 m, nav lietderīgi uzstādīt vietās, kur vēja vidējais ātrums ir zem 6 m/s. Izdevīgi ir veidot vēja parkus nevis uzstādīt atsevišķus VG, tas samazina iekārtas uzstādīšanas, tīkla pieslēguma un ekspluatācijas izmaksas.

Plānojot VG uzstādīšanas vietu, nedrīkst aizmirst, ka šīs iekārtas trokšņo, rada zemfrekvences vibrācijas, ēnu zibšņus, kas ir mainīgi atkarībā no saules augstuma virs horizonta un rada mainīgu atstarošanos radioviļņiem, kas izpaužas kā TV traucējumi.

Vadoties no pētījumiem par potenciālajām teritorijām, kur visizdevīgāk uzstādīt vēja elektrostacijas, kā arī ņemot vērā likumdošanas ierobežojumus, kuri noteiktās teritorijās aizliedz saimniecisko darbību, var secināt, ka vēja ģeneratorus iespējams uzstādīt Latvijas rietumu daļā, kur vidējais vēja ātrums ir 5,2–5,7 m/s, gar jūras piekrasti, kā arī nelielos rajonos ap Ainažiem un jūras šelfa zonā. Gada vidējais vēja ātrums Pāvilostā ir 9,3 m/s, līdzīgi ir arī Ventspilī un Liepājā, vējainākais laiks Latvijā ir no oktobra līdz februārim, tad arī elektroenerģijas patēriņš valstī ir salīdzinoši lielāks. Šī teritorija veido vairāk nekā 2 % no kopējās Latvijas teritorijas. Ja šo teritoriju izmanto racionāli, tad iespējams uzstādīt samērā lielu skaitu vēja ģeneratoru, jo šāda veida elektrostacijas neaizņem daudz vietas. Ja veido vēja parkus, tad vēja ģeneratori un to pieejas ceļi aizņem mazāk par vienu procentu vēja parka teritorijas. Pārējie 99 procenti no zemes var tikt izmantoti lauksaimniecībai vai lopkopībai. Vēja

ģenerators aizņem tikai 36 kvadrātmetrus vai 0,0036 hektārus, un var saražot no 1,2 līdz 1,8 miljoniem kilovatstundu gadā, tai pašā laikā biodegvielas audze aizņem 154 hektārus vītolu meža, lai saražotu 1,3 miljonus kilovatstundu gadā.

Kurzemes reģionā ir vislielākie vēja resursi, bet ir nepietiekamas elektroenerģijas ražošanas jaudas. Tāpēc būtu svarīgi izmantot vēja enerģiju elektroenerģijas ražošanai. Tomēr vēja enerģijas izmantošanai jābūt samērojamai ar tradicionālo energoresursu izmantošanu, jo vēja elektrostacijas darba režīmu nav iespējams plānot, tas ir nepastāvīgs, pilnīgi atkarīgs no vēja izmaiņām. Vējainā laikā vēja stacijas, strādājot elektriskajā tīklā, daļēji aizvieto tradicionālajās stacijās saražoto vai importēto elektroenerģiju. Periodos, kad vēja nav, elektroenerģijas pieprasījumu sedz citas stacijas vai imports. Sastādot elektroenerģijas bilances prognozi Latvijā, vēja stacijās saražotās elektroenerģijas apjomus praktiski nevar ņemt vērā un tradicionālo elektrostaciju jaudas vai importa apjomi jāparedz, nerēķinoties ar VES uzstādīto jaudu.

Kādu vēja ģeneratoru izmantot?

Projektējot konkrētu vēja elektrostaciju, ir jāzina vai tā atmaksāsies un cik ilgā laikā tas notiks. Vietās kur paredzēts celt VES, jau iepriekš jāveic vēja parametru analīze un atbilstošs ekonomiskais aprēķins. Tikai pēc vēja parametru apstrādes, izmantojot vēja turbīnu jaudas raksturlīknes, var izvēlēties atbilstošu turbīnu un izanalizēt VES lietderīgumu.

Vēja ģeneratoru izmantošana ir efektīva, ja vidējais vēja ātrums ir lielāks par 5 m/s, bet ir arī lēngaitas vēja turbīnas, kas efektīvi darbojas pie vēja ātruma 2 un 3 m/s.

Ja 600–750 kW VG cenas ir līdzīgas, nav jāizvēlas pēc iespējas lielāks ģenerators. Ja lielākās jaudas ģeneratoram būs mazāks rotors, tad tas saražos mazāku enerģijas daudzumu, kā mazākais 600 kW ģenerators ar lielāku rotoru, kas izvietots mazāk vējainā vietā.

Salīdzinot VG izgatavošanas un uzstādīšanas izmaksas 150 kW ģeneratoram ar 600 kW ģeneratoru izmaksām, aptuveni rēķinot, nepalielinās četrkārtīgi. Darbaspēka patēriņš 150 kW VG vai 600 kW izgatavošanai un uzstādīšanai būtiski neatšķiras. Aizsardzības un elektronikas aparatūras izmaksas mazai vai lielai VES ir līdzīgas.

Šobrīd Eiropā ir pieejami lietoti VG, kurus par saprātīgu cenu var iegādāties un izmantot. To jauda ir līdz 200 kW. Parasti šajās iekārtās ir izmantoti asinhronie ģeneratori, kas ir viegli pieslēdzami tīklam. Šāds ģenerators enerģiju atdod tīklā tad, kad asinhronā ģeneratora rotora apgriezieni pārsniedz statora magnētiskā lauka rotācijas ātrumu. Tas nozīmē, ka nepietiekama vēja ātruma gadījumā vai pie vēja izmaiņas enerģija tīklā netiks atdota. Mēs varam redzēt, ka vēja rotors skaisti griežas, bet asinhronais ģenerators elektroenerģiju tīklā neatdod. Šādi ģeneratori var strādāt tikai kopā ar tīklu, jo ģenerators ierosmi saņem no tīkla. Elektroenerģijas ražošanas procesā vēja turbīnas rotācijas ātruma izmaiņas ir niecīgas – līdz 7 %. Ainažu VES tika uzstādīti Latvijā pirmie divi lielas jaudas VG ar asinhrono ģeneratoru, kuru jauda ir 600 kW katrs. Šāda tipa stacijas Eiropā vairs neuzstāda, jo tās ir morāli novecojušas.

Modernajās VES izmanto sinhrono ģeneratoru, kas ražo mainīgas frekvences maiņspriegumu. Sprieguma frekvence ir atkarīga no vēja ātruma un vēja turbīnas raksturlīknes. Saražoto maiņspriegumu ar taisngriezi pārvērš līdzspriegumā, nofiltrē, tad ar invertoru, kas ir sinhronizēts no tīkla pārveido par trīs fāžu maiņstrāvu, kuru atdod tīklā. Viss šis process ir ar automatizētu vadību. Šāda veida sistēmai vadības procesors aprēķina un koriģē vēja rotora rotācijas frekvenci atkarībā no vēja ātruma, optimāli izmantojot vēja rotora mehānisko raksturlīkni. Tīklā atdotā sprieguma kvalitāti nodrošina sprieguma pārveidotājs – invertors. Piemēram, 33 šāda veida sistēmas ģeneratori ir uzstādīti Grobiņas VES. Pie tam šajos VG nav izmantots paātrinošais reduktors, jo uzstādītais daudzpolu sinhronais ģenerators ir ar tiešu piedziņu no vēja turbīnas.

Pašreiz tirgū populāri ir VG ar 1000 kW elektroģeneratoru, torni 60–80 m un rotora diametru ap 54 m.

Ir svarīgi, lai uzstādītais VG būtu piemērots konkrētā reģiona vēja klimatiskajiem apstākļiem.

Vai ir ekonomiski izmantot mazās VES?

Uzlabojoties ekonomiskajai situācijai cilvēki kļūst turīgāki un entuziastiem pēdējā laikā atjaunojas interese par mazo VES izmantošanu lauku īpašumu

energoapgādei. Tas mazāk saistīts ar iekārtas izmantošanas ekonomisko pamatojumu, bet ar tieksmi ieviest kaut ko jaunu savā saimniecībā.

Arī Latvijā ir lauku īpašumi, kas atrodas tālu no elektropārvades līnijām. Jaunu elektropārvades līniju izbūve var maksāt 10000 Ls un vairāk par 1km un ja šāda līnija netiek pietiekami noslogota, tad ieguldītās investīcijas neatmaksājas. Šādā gadījumā ekonomiski efektīvāka var būt autonomā energoapgāde izmantojot VG, koģeneratorus, saules baterijas. Tāda veida energoapgādes koncepcija var tikt izmantota ekskluzīvu viesu namu elektroapgādei ar atjaunojamajiem energoresursiem. Līdz šim mazo VG saražotā elektroenerģija nav bijusi lētāka par VAS „Latvenergo" piedāvāto elektroenerģiju. Par to liecina arī reālā situācija, jo mazie VES nav guvuši popularitāti Latvijā.

Ja salīdzina lielo VES saražotās elektroenerģijas cenu ar mazajās VES saražoto, neapšaubāmi lielās iekārtas ražo lētāku enerģiju. Šie principi darbojas pie visām enerģētikas iekārtām. Tāpēc no ekonomiskā skatījuma efektīvāk izmantot lielās VES. Pašlaik gan nav zināma pieredze, ka mazajos VES saražoto enerģiju pārdotu tīklā.

Vēja enerģija var kļūt par konkurētspējīgu enerģijas veidu, ja to izmanto autonomajā energoapgādē un kombinē ar citiem enerģijas avotiem – koģenerācijas iekārtu, saules bateriju (skat. 2.84. att.). Šāda autonomā energoapgādes sistēma nodrošina patērētāju ar elektrību visa gada garumā. Jāpiebilst, ka dārgākā iekārta šajā sistēmā ir saules baterija, 5–10 eiro par 1 W. Tā kā vējš ir nepastāvīgs enerģijas ražošanas avots, tad ir nepieciešama enerģijas akumulēšana.

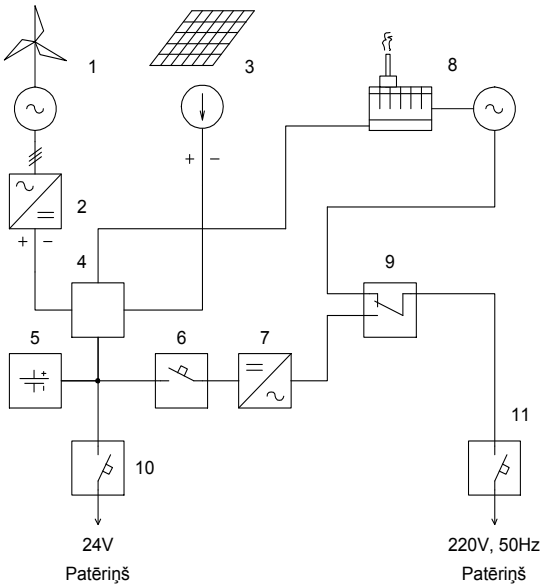
Mazās vēja enerģētikas iekārtas var izmantot:

- elektroenerģijas ražošanai savām vajadzībām;
- dzīvojamo un ražošanas telpu apsildei;
- sūkņu darbināšanai;
- tiešajai mehāniskajai piedziņai.

Latvijā mazās vēja enerģētiskās iekārtas lielākoties uzstāda entuziasti. Ir daudzi nosacījumi, kas bremzē vēja ģeneratoru izmantošanu viensētās:

- lielākajā daļā Latvijas teritorijas ir salīdzinoši neliels vēja ātrums;
- dārgas iekārtas;
- iekārtu apkopei un ekspluatācijai nepieciešams kvalificēts darbaspēks;

- zema ekonomiskā efektivitāte;
- praktiski nav valsts atbalsta;
- nepastāvīga enerģijas ražošana, papildus nepieciešams alternatīvs enerģijas avots.



2.84.att. **Kombinētā autonomā vēja, saules un iekšdedzes motora koģenerācijas elektrostacija:**
1 – sinhronais ģenerators; 2 – taisngriezis; 3 – saules baterija; 4 – komutācijas bloks; 5 – akumulatora baterija; 6 – invertora automātiskais atslēdzējs; 7 – invertors; 8 – iekšdedzes motorģenerators; 9 – maiņstrāvas pārslēdzējs; 10, 11 – slodzes automātiskie atslēdzēji.

Cik ilgi kalpo VG un kādi ir ekspluatācijas izdevumi?

Modernie lielas jaudas VG ir ar resursu ap 120 000 stundas. Tos projektē 20 gadu ekspluatācijas laikam, tomēr tas nenozīmē, ka šīs iekārtas drošums būtiski samazināsies pēc 20 gadu izmantošanas.

Lai uzbūvētu vēja enerģijas sistēmas, ir jāiegulda lielas sākuma investīcijas, tomēr tas ir pietiekoši izdevīgi, jo vēja ģeneratori var kalpot ilgi, 25–30 gadus un tie ekspluatācijas gaitā atmaksājas.

Pieredze parāda, ka VG ekspluatācijas izdevumi ir relatīvi mazi, kamēr iekārta ir jauna, palielinoties tās vecumam attiecīgi palielinās ekspluatācijas un remontu

izmaksas. Vairums gadījumos apkopju izmaksas, veicot regulāras apkopes vecajiem VG ar jaudu no 25–150 kW ir ap 3 % pa gadu, no vēja ģeneratora uzstādīšanas izmaksām. Jaunajiem lieljaudas VG apmēram 1,5–2 % gadā no uzstādīšanas izmaksām. Otrs variants, kā nosaka ekspluatācijas izmaksas ir 0.01 eiro uz 1 kWh saražotās enerģijas. Šajā gadījumā tiek ievērtēts iekārtas nolietojums atkarībā no saražotās enerģijas daudzuma.

VG ekspluatācijas laiks ir atkarīgs no diviem faktoriem,

- no izgatavošanas un instalācijas kvalitātes;
- no klimatiskajiem apstākļiem, kur VG tiek ekspluatēts.

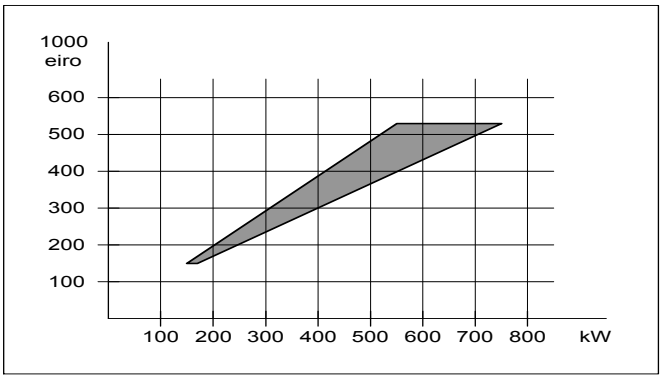
Izrādās, ka jūrā izvietotie VG strādā ilgāk, jo tur ir mazāk turbulentās un mainīgās vēja plūsmas un ģenerators tiek viendabīgāk darbināts. Visvairāk tiek slogoti un nolietojas VG spārni un reduktors. Spārnus, reduktoru vai elektroģeneratoru var nomainīt, katra šī mezgla cena ir 15–20 % no VG cenas.

Cik maksā vēja ģenerators?

Pagaidām vēja enerģija ir samērā dārga, bet tiek prognozēta izmaksu samazināšanās, tas notiks uz VES jaudas un iekārtu ražošanas apjoma palielināšanas rēķina. Modernām vēja fermām izmaksas ir 1000 eiro uz uzstādītās jaudas 1 kW. Atsevišķiem vēja ģeneratoriem cenas būs nedaudz augstākas. Katrs uzstādītā torņa metrs maksā aptuveni 1500 eiro. Tādas pašas jaudas lēngaitas vēja iekārtas ar relatīvi lielu rotora diametru, būs daudz dārgākas nekā ātrgaitas iekārtas ar mazāku rotora diametru.

Modernu, tīklam pieslēgtu Dānijā ražotu VG cenas ir parādītas 2.85. attēlā redzamajā grafikā, kur uz vertikālās ass ir cena tūkstošos eiro, bet horizontālā ass vēja ģeneratora jauda kW. Grafiks atspoguļo cenu izkliedi dažādu jaudu vēja iekārtām, dāņi, to ir nosaukuši par cenu banānu.

Lai uzceltu vēja staciju ar jaudu 1 MW, ir jāiegulda ap 1 milj. eiro, kuru var atpelnīt apmēram 10–12 gadu laikā, bet, lai kaut ko nopelnītu to jādarbina vēl 5–7 gadi. Enerģija, kura ražota ar vēja turbīnām, to 20 gadu ekspluatācijas laikā ir *astoņas reizes* lielāka nekā turbīnas celšanai, apsaimniekošanai un demontāžai izmantotā enerģija.



2.85. att. **Vēja ģeneratoru cenas**

Pieredzes apmaiņā ar Vācu vēja enerģētikas iekārtu firmas mārketinga pārstāvi izskanēja atziņa, ja par lielas jaudas VG saražoto 1 kWh elektroenerģiju maksā 0.06 eiro, tad var sākt domāt par investīciju piesaisti un iekārtu uzstādīšanu.

Izdevīgs posms mazo elektrostaciju būvniecībā bija no 1995. gada līdz 2004. gada beigām, kad par katru saražoto kWh maksāja dubulto tarifu. Dubultā tarifa ēnā sākās arī privāto vēja elektrostaciju būvniecība, kas savu augstāko punktu sasniedza 2002. gadā, kad ekspluatācijā tika nodotas kopumā 37 VES, no kurām viszināmākais ir tapušais Grobiņas vēja parks, ar 33 „Enercon" E 40 iekārtām.

Mūsdienu pasaulē ir ap 40 vēja turbīnu ražotāji. Apmēram pusi no vēja turbīnām ražo Dānija. Attīstītās valstīs vēja enerģija ir populāra, jo tā neizdala kaitīgus izmešus. Valstīs ar attīstības ekonomiku labprāt izvēlas vēja turbīnas, jo tās var ātri instalēt un nepatērē degvielu. Vēja turbīnu industrija ir ar apjomu 6 miljardi USD un tai ir perspektīva nākotne.

3. ŪDENS IZMANTOŠANA ENERĢĒTIKĀ

3.1. Ievads

Ziņojumu dēļi Kalifornijas universitātē Santa Krusā ASV 1989. gadā pārsteidza studentus un pasniedzējus – tie brīdināja par ārkārtīgi bīstamas ķīmiskas vielas atklāšanu universitātes ūdensvadā. Universitātes studenti Ēriks Lēners (Eric Lechner), Larss Norpčens (Lars Norpchen) un Metjū Kaufmans (Matthew Kaufman) brīdināja par skābekļa dihidrītu (Dhydrogen monoxide), kurš esot ļoti agresīva viela ar sekojošām pazīmēm:

- Tas ir bez īpašas garšas, smaržas un krāsas;
- Tas tiek lietots kā rūpnieciskais dzesētājs un šķīdinātājs, kā arī putustirola ražošanas sastāvdaļa;
- To lieto eksperimentos ar dzīvniekiem;
- Tas ir viens no galvenajiem elementiem, kas nodrošina kodolspēkstaciju darbību;
- Tas paātrina koroziju un rūsēšanu;
- Tas ir atbildīgs par zemes virskārtas eroziju;
- Ir pierādīts, ka tās ieelpošana izraisa nāvi;
- Atsevišķās tās formās tas var izraisīt stiprus apdegumus, necaurredzamu vai vāji caurredzamu dūmaku atmosfērā, kā arī piedalās siltumnīcas efekta radīšanā uz Zemes. Tas bojā betonu, stiklu, kā arī ceļu klājumu. Tas veicina īsslēgumu rašanos un pasliktina automašīnu bremžu darbību;
- Tas varētu būt kosmosa kuģa „Challenger" bojāejas cēlonis;
- Tas ir atbildīgs par tūkstošiem cilvēku nāvēm jaunattīstības valstīs, it sevišķi tur, kur to neprot atbilstoši apstrādāt vai nespēj palīdzēt tiem cilvēkiem, kam radušās problēmas no saskares ar to;
- Lieli tā daudzumi atklāti upēs, ezeros, jūrās, okeānos, tvertnēs, un arī ūdensvadā.
- Valsts struktūras nav apturējušas un ierobežojušas šīs vielas ražošanu, piegādi un pārdošanu.

Daudz sīkāk par šīs vielas ietekmi var izlasīt arī internetā (http://www.dhmo.org/). Daudzu pasaules valstu politiķi (Aliso Viejo, Kalifornija, ASV, 2004. gads; Jackui Dean, Jaunzēlande, 2007. gads) ir pieprasījuši (!!!) šīs vielas izmantošanas samazināšanu, bet nekas nav noticis.

Kāpēc tā? Kas tā par vielu, kura ir tik draudīga? Kā izrādījās, tas bija studentu joks par visiem zināmas vielas – ūdens, īpašībām, un par to, cik maz cilvēku aizdomājas par ūdeni, kurš ir visapkārt. Tajā pašā laikā ūdens ir dzīvības rašanās un attīstīšanās priekšnoteikums un vide, un cilvēce to lieto dažādos veidos arvien lielākos apjomos.

Kopējais hidrosfēras (ar ūdeni pārklātās Zemes teritorijas) lielums ir ap 443 milj. m^2 (jeb ap 83 % no kopējās Zemes virsmas), no kuriem ap 361 milj. m^2 ir okeānu un jūru platība, un ap 16 milj. m^2 – ledāji. Kopējā ūdens masa dažādos tā stāvokļos uz Zemes tiek novērtēta kā $1{,}5^{21}$ kg – daudzums, kuru vienmērīgi izlīdzinot pa visu Zemes virsmu, šāda ūdens slāņa biezums pārsniegtu 3000 m. 52,6 % okeānu ir ar dziļumu robežās no 4000 līdz 6000 m, un tikai 7,5 % – ar dziļumu no 0 līdz 200 m. Šāda ūdens izvietojuma struktūra ļāva nodrošināt diezgan pastāvīgu un šaurā diapazonā mainīgu temperatūru gan atmosfērā, gan arī uz cietzemes, gan arī ūdenī.

Vidējā ūdens temperatūra okeānu virsējos slāņos ir +17,8 ^{o}C. Vissiltākais ir Klusais okeāns ar +19,4 ^{o}C, visaukstākais – Ziemeļu ledus okeāns zem ledus klājumiem –0,75 ^{o}C. Okeāna virskārta ir ar diezgan homogēnu temperatūru un sāļu koncentrāciju. Sajaukšanos tajā nodrošina gan gaisa kustība (vētras, vējš), gan straumes, gan arī ūdens vertikālā kustība tā temperatūras un blīvuma sakarību dēļ (skat. tālāk). Tajā pašā laikā 100–200 metru dziļumā ūdens temperatūra lēcienveidā samazinās par 1–2 ^{o}C. Tālāk atkal līdz pat 1500 m dziļumam ūdens temperatūra lēni samazinās. Šo slāni sauc par galveno termoķīli, kurā samaisīšanās, sajaukšanās notiek ļoti lēni. Dziļumā virs 1500 m ūdens temperatūra ir gandrīz pastāvīga – robežās no +3 ^{o}C līdz +1 ^{o}C. Šajā slānī gandrīz nenotiek sajaukšanās.

Ūdens slāņainība nodrošina siltuma procesu stabilitāti un nepārtrauktību, nodrošinot nelielas svārstības Zemes virskārtai tuvajos atmosfēras slāņos.

Pateicoties ūdens fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām un tā apjomiem, uz Zemes ir radušās bioloģiskas dzīvības formas. Dzīvo organismu sastāvā ir daudz ūdens – cilvēka organismā ir vidēji 75 % ūdens, tā smadzenēs pat 80 % ūdens.

Ūdens ir arī cilvēces attīstības veicinātājs un palīgs. Ne velti cilvēces attīstība notikusi tuvu ūdeņiem – izmantojot to gan kā vietu, kur var iegūt pārtiku (zivis u.c.), gan kā transportēšanas atvieglotāju – straumes, peldlīdzekļi, gan arī kā enerģijas ražotāju – gan vienkāršākās – mehāniskās enerģijas iegūšanai, gan arī augstākā līmeņa enerģijas – elektroenerģijas, iegūšanai. Tāpēc šajā grāmatas daļā tiks apskatītas iespējas cilvēces vajadzibām nepieciešamās enerģijas iegūšanai, iesaisot šajā procesā ūdeni dažādās tā formās un stāvokļos.

3.2. Hidroenerģētika enerģijas bilancē

Ūdens arī ir atjaunojamo energoresursu saraksta augšgalā. Ūdens izmantošana enerģijas iegūšanai jeb hidroenerģētika ir vislielākais no atjaunojamās enerģijas veidiem, ko šobrīd izmanto cilvēce. Daudzos pasaules reģionos (arī Latvijā) tai ir vadošā loma kā vietējam energoresursam. Vairāk nekā 150 valstīs pasaulē hidroenerģētika ir būtiska ekonomikas sastāvdaļa.

Svarīgi saprast, ka ūdens enerģētikas iekārtas darbojoties nerada kaitīgos izmešus, kas pastiprina t.s. „siltumnīcas efektu", kura avots ir pastiprināta ogļskābās gāzes CO_2 un metāna CH_4 izplūde atmosfērā.

Žurnāla "The International Journal on Hydropower & Dams" pētījumā 1997. gadā tika konstatēts, ka 63 pasaules valstīs hidroenerģētikas saražotā elektroenerģija pārsniedz 50 % no kopējās energobilances, bet 23 valstīs pat 90 %. Desmit valstīs (Norvēģijā, Butānā, Paragvajā, u.c.) gandrīz visa elektroenerģija tiek ražota, izmantojot hidroenerģētikas iekārtas.

Kopējā hidroenerģētikas jauda ir tuvu 700 GW (ekvivalents 3.6 miljardi barelu jēlnaftas), saražojot gadā ap 2600 TWh enerģijas, kas sastāda ap 20 % no kopējās elektroenerģijas ražošanas pasaulē, nodrošinot ar elektroenerģiju varāk kā 1 miljardu cilvēku. Eiropā hidroenerģētika ir visattīstītākā (32 % no pasaules hidroenerģētikas jaudas), bet kopējā hidroenerģētikas jauda Ziemeļamerikā ir 23 % no pasaules

hidroenerģētikas jaudas. Tajā pašā laikā strauji aug hidroenerģētikas attīstība Āzijā un Dienvidamerikā. Tiek attīstīta gan lielā hidroenerģētika, gan arī mazās (mazāk kā 10 MW), mini- (mazāk kā 2 MW) un mikro- (mazāk kā 100 kW) hidrospēkstacijas.

Kopējais novērtējums par tradicionālās hidroenerģētikas potenciālu pasaulē parādīts 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Hidroenerģijas potenciāla novērtējums pasaulē (WEA, 2000)

Reģions	Kopējais teorētiskais potenciāls, TWh/ gadā	Tehniski iespējams, TWh/gadā	Ekonomiski izdevīgs, TWh/gadā	Uzstādītās hidroenerģijas jaudas, GW	Saražotā elektroenerģija, TWh/gadā
Ziemeļamerika	5817	1509	912	141.2	697
Dienvidamerika	7533	2868	1199	114.1	519
Rietumeiropa	3294	1822	809	16.3	48
Centrālā un Austrumeiropa	195	216	128	9.1	27
NVS un Krievija	3258	1235	770	146.6	498
Tuvie Austrumi un Ziemeļāfrika	304	171	128	21.3	66
Subsahāras reģioni	3583	1992	1288	65.7	225
Centrālāzija	6511	2159	1302	64.3	226
Dienvidāzija*	3635	948	103	28.5	105
Azijas klusā okeāna reģioni*	5520	814	142	13.5	41
Klusā okeāna attīstītās valstis	1134	211	184	34.2	129
Pasaulē kopā	**40784**	**13945**	**6965**	**654.8**	**2581**

* samazināts potenciāla vērtējums nepietiekama valstu ekonomiskā potenciāla dēļ.

Kā redzams no 3.1. tabulas, kopējais teorētiskais hidroenerģētikas potenciāls pārsniedz 40 000 TWh gadā, no kura ap 14 000 TWh ir tehniski iespējamais, bet 7 000 TWh ir šobrīd ekonomiski izdevīgi realizājamais potenciāls (ņemot vērā pieejamos finansu resursus, citu enerģijas avotu cenas un konkurenci enerģētikas tirgū, kā arī

atbilstoši esošajai likumdošanai un normatīvajiem aktiem). Vislielāko hidroenerģijas izmantošanas pieaugumu prognozē tieši jaunattīstības valstīs (milzīgs neizmantots potenciāls), turpretī OECD valstīs pieaugums būs minimāls – galvenokārt uz mikro un mazo ražotāju rēķina.

Būvniecības procesā ir hidroelektostacijas ar kopējo jaudu ap 100 GW. Lielākais no projektiem, kura pabeigšanu prognozē 2009. gadā, ir Ķīnā uz Janczi upes būvēt uzsāktais milzīgās 22.5 GW hidroelektrostacijas projekts, (kurš gadā saražos vairāk kā 88,5 TWh), par kura lietderību un ietekmi uz vidi joprojām tiek diskutēts (skat. 3.1. un 3.2.att. (Trīs Aizu projekts, 长江三峡大坝 (trad.ķīn.), Chángjiāng Sānxiá Dà Bà (pinyin), Three Gorges (angl.)). Daudzi jauni projekti tiek realizēti gan Eiropā, gan Āzijas, gan Dienvidamerikas valstīs.

3.1. att. **Trīs Aizu projekta hidroturbīnu bloks Ķīnā, uz Janczi upes**
(resurss: www.yangtzeriver.org)

Hidroenerģētika ir arī viens no visefektīvākajiem elektroenerģijas ražošanas veidiem. Modernās hidroturbīnas nodrošina ap 90 % efektivitāti – divas reizes augstāka efektivitāte salīdzinājumā ar visaugstāko efektivitāti, ko piedāvā ar fosilo kurināmo darbināmas spēkstacijas.

3.2. att. **Trīs Aizu projekta kopskats, Ķīna, Janczi upe**
(resurss: www.yangtzeriver.org)

Kā rāda pētījumi, hidroenerģētikas ražotās elektroenerģijas izmaksas ir vienas no viszemākajām (ASV tās tiek rēķinātas 0.7 centi par kWh – tā ir apmēram viena trešdaļa no izmaksām, ja elektroenerģiju ražo ar fosilo kurināmo vai kodolenerģiju, un viena sestdaļa no izmaksām, ja elektroenerģiju ražo, dedzinot dabas gāzi, Trīs Aizu projektā ģenerētā elektroenerģija tiek pārdota par ¥250 (32,5 USD) par MWh.

Būtiska hidroenerģētikas iezīme ir tā, ka atšķirībā no fosilā kurināmā vai kodolenerģētikas, tā ir plaši izplatīta un pieejama, līdz ar to dod iespēju nodrošināt to valstu neatkarību enerģētikas jomā, kurām nav fosilā kurināmā atradņu.

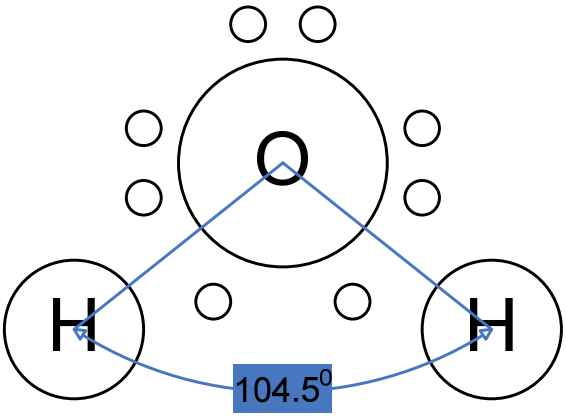
3.3. Ūdens īpašības

Ūdens ir unikāla viela, tās īpašības būtiski atšķiras no citu uz Zemes izplatītu vielu īpašībām, un arī tā izmantošana ir cieši saistīta ar tā fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām.

3.3.1. Ūdens fizikālās īpašības

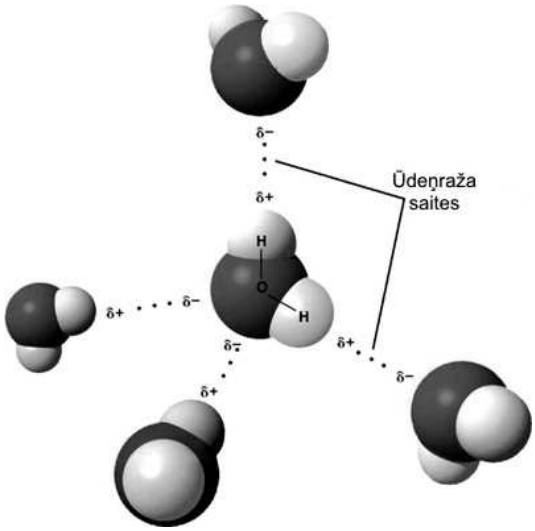
Ūdens uz Zemes (reģistrētais temperatūru diapazons no –89,2 °C Vostok stacijā Antarktīdā 1983. gadā līdz pat +57,8 °C Al 'Aziziyah (arābiski العزيزيه), Lībijā 1922. gadā) ir sastopams trīs agregātstāvokļos – cietā (ledus), šķidrā, un gāzveida stāvoklī (tvaiks).

Ūdens ķīmiskās un fizikālās īpašības ir cieši saistītas ar tā molekulas uzbūvi. Ķīmiskā ūdeņraža kovalentā saite, kurā ūdeņraža atomi kombinācijā ar skābekļa atomu rada polāru ūdens molekulu, kurai ir izteikts pozitīvais un negatīvais pols, ir īpaša ar to, ka atšķirībā no citu elementu hidrītiem (vielas un ūdeņraža savienojumiem) ūdens ir šķidrs virs 0 °C, un ciets zem 0 °C. Izveidojas attēlā redzamā molekulas V-veida forma. Ūdeņraža un skābekļa atomi neatrodas uz vienas taisnes, bet gan ir nobīdīti, un leņķis starp ūdeņraža atomiem ir 104,5° (skat. 3.3. att.).



3.3. att. **Ūdens molekulas grafiskais attēls**

Līdz ar to veidojas gan īpaša ūdens šķidrā agregātstāvokļa struktūra, gan arī tā cietās fāzes – ledus, struktūra. Molekulu savstarpējo mijiedarbību, kas nodrošina ūdens šķidrās fāzes stāvokli, parāda 3.4. attēls. Tetraedra leņķi ir 109,5°.



3.4. att. **Molekulu savstarpējā mijiedarbība ūdens šķidrajā fāzē**

Ūdens galvenās fizikālās īpašības apkopotas 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Ūdens fizikālās īpašības

Īpašība	Vērtība
Molmasa	18,015
Molārais tilpums	55,5 moli /l
Vārīšanās temperatūra (Pie 1 atm spiediena)	100 °C (373 K)
Sacietēšanas temperatūra (Pie 1 atm spiediena)	0 °C (273 K)
Trīskāršais punkts	273 K
Īpatnējais iztvaikošanas siltums	40.631 kJ/mo
Īpatnējais kušanas siltums	6.013 kJ/mol
Īpatnējā siltumietilpība	4,18 kJ /kG*K (T=293…373 K)
Virsmas spraigums	73 dyn/cm pie 20 °C
Tvaika spiediens	0.0212 atm pie 20 °C
Dielektriskā konstante	78.54 pie 25 °C
Viskozitāte	1.002 cp pie 20 °C
Blīvums (vidēji)	1 g/cm^3
Siltumvadītspēja	0,60 W/m*K

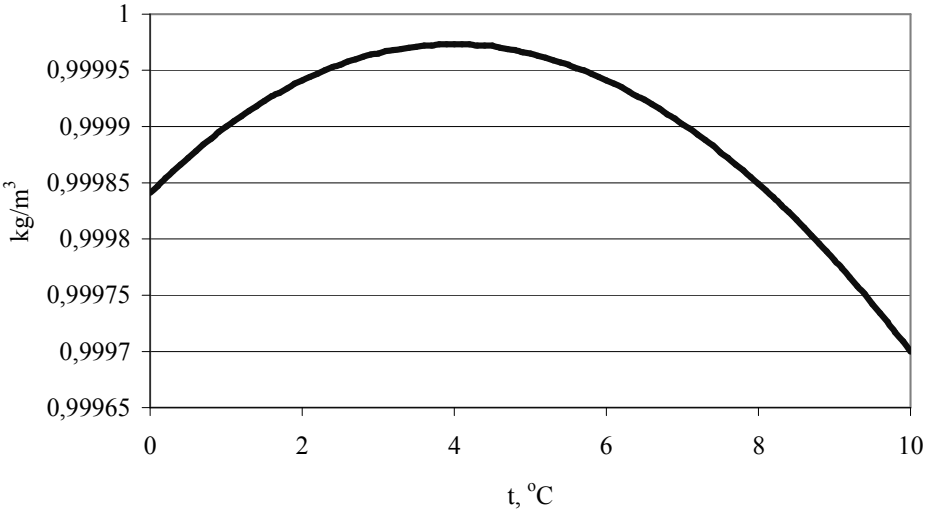
Kritskā temperatūra	647 K
Kritiskais spiediens	22.1 x 10^6 Pa
Kušanas siltums	3.34 x 10^5 J/kg
Iztvaikošanas siltums	22.6 x 10^5 J/kg
Skaņas ātrums	1480 m/s (T=293 K)
Relatīvā permeabilitāte	80 (T=298 K)

Svarīga ūdens īpašība ir tā, ka lielākais ūdens blīvums ir nevis pie 0 ^oC, bet pie +4 ^oC – veidojas nelineāra sakarība (skat. 3.5. att.). Šī īpašība nodrošina to, ka ūdens atdziestot līdz +4 ^oC temperatūrai, grimst lejā, izspiežo no ūdens krātuvju apakšas gan siltāko, gan vēsāko ūdeni, tā nodrošinot ūdens slāņu sajaukšanos. Šī īpašība arī nodrošina to, ka ūdens temperatūra 0 ^oC tiek sasniegta nevis ūdenskrātuves apakšā, gan arī tā virskārtā – tātad ūdens sasalšana notiek no ūdens virskārtas. Arī ledus blīvums, kas ir mazāks nekā ūdens blīvums, nodrošina šādu ūdenskrātuvju aizsalšanas veidu, kā arī ūdenskrātuvju atbrīvošanos no ledus segas pavasarī – ledus nevis nogrimst, bet gan atrodas ūdens virspusē, tiešos Saules staros un siltās atmosfēras ietekmē.

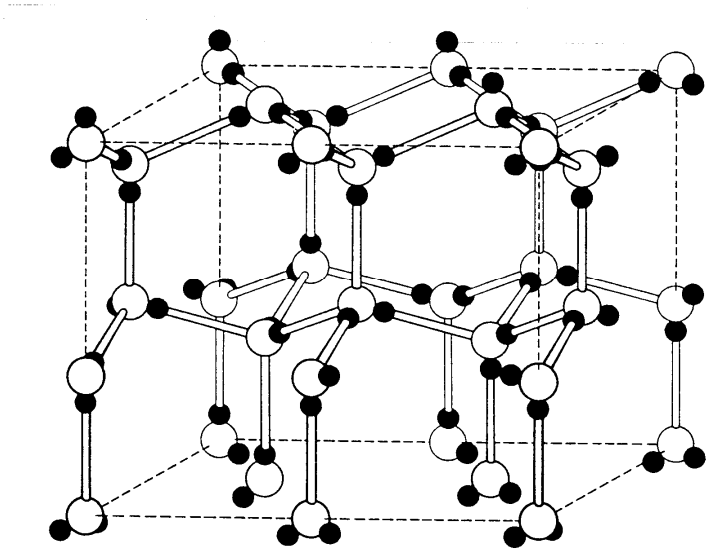
Ļoti augstā ūdens siltumietilpība nodrošina to, ka tas darbojas kā siltuma akumulators, saņemot Saules siltumu dienas (vasaras) laikā un lēni atdodot uzkrāto siltuma enerģiju nakts (ziemas) laikā. Tas neļauj atmosfērai strauji atdzist un sasilt, tā nodrošinot mērenu, dzīvībai atbilstošu klimatu.

Ūdens saspiežamība ir niecīga (saspiežamības koeficients 45.8 $Pa^{-1}*10^{-11}$ jeb 46.4 $atm^{-1}*10^{-6}$), tomēr, ņemot vērā ievērojamo ūdens apjomu un vidējo okeānu dziļumu, kas pārsniedz 4000 m, tā saspiešanās gravitācijas ietekmē dod kopējā ūdens līmeņa samazinājumu par 40 m, tā palielinot sauszemi par 5 %.

Ledus arī būtiski atšķiras no citu hidrītu cietās fāzes. Polāro ūdens molekulu savstarpējais izkārtojums ūdens cietajā fāzē – ledū, veido īpašu kvazikristālisku struktūru (skat. 3.6. att.).



3.5. att. **Ūdens blīvuma izmaiņas, mainoties tā temperatūrai**

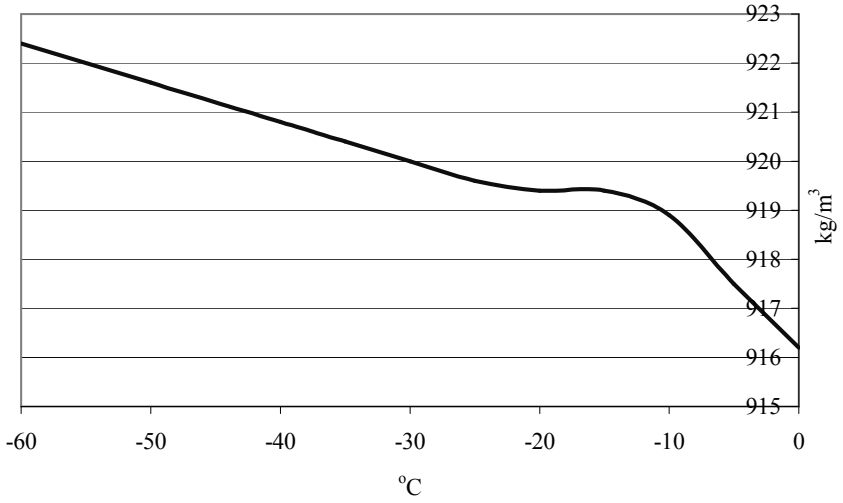


3.6. att. **Ūdens molekulu izkārtojums ledū** (temperatūra līdz –10 ^{o}C, spiediens 1 atm)

Tieši šīs īpašās struktūras dēļ ledus blīvums ir mazāks nekā ūdens blīvums – ūdens molekulas izkārtojas īpašā struktūrā, un starp tām izveidojās daudz vairāk brīvas telpas. Tāpēc tas peld ūdenī (citas vielas sacietējot kļūst blīvākas nekā šķidrā

agregātstāvoklī), un sasalstot ledus tilpums ir lielāks nekā šķidrā ūdens aizpildītais tilpums. Šādas ledus īpašības nodrošina arī to, ka tajā var izšķīst daudz lielāks gāzu daudzums nekā ūdenī.

Jāņem vērā arī tas, ka ledus blīvums mainās līdz ar temperatūras izmaiņām.



3.7. att. **Ledus blīvuma izmaiņas, mainoties tā temperatūrai**

Cita ļoti svarīga ūdens fizikālā īpašība ir tā zemā elektrovadītspēja. Tīrs ūdens praktiski ir dielektriķis (dejonizēta degazēta ūdens vadītspēja ir 0,00014 $S*m^{-1}$, dzeramā ūdens vadītspēja ir 0,0005 līdz 0,5 $S*m^{-1}$ – atkarībā no tā sāļainības, jūras ūdens vadītspēja 4,79 $S*m^{-1}$ pie sāļainības 35 g/l, salīdzinājumā ar sudraba vadītspēju $63,01*10^6$ $S*m^{-1}$). Šī īpašība ļauj vienkāršāk organizēt elektroenerģijas izmantošanu un pārvadi.

3.3.2. Ūdens ķīmiskās īpašības

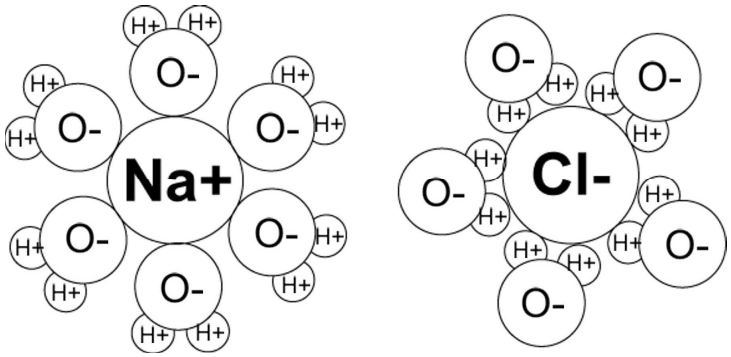
Galvenās ūdens īpatnības, kas nosaka tā ķīmisko dabu, ir sekojošas:

- Ūdens molekula ir ar ļoti mazu izmēru;
- Ūdens molekula ir polāra, ar ūdeņraža saitēm.

Ūdens molekulu mazais izmērs ļauj tām iesaistīties daudzos ķīmiskos procesos, kā arī veidot savstarpējās saites, nodrošinot tā virsmas spraigumu.

Ūdens šķidrā veidā disociē jonos – tas satur gan brīvos ūdeņraža jonu H^+ un hidroksila OH^- jonus, kuri spontāni pārvietojas no vienas molekulas uz otru. Tā izveidojas pozitīvo un negatīvo jonu maisījums.

Ūdens ir universāls šķīdinātājs tieši pateicoties tā molekulas uzbūvei. Šāds polāru molekulu un jonu maisījums, iedarbojoties uz cietu vielu molekulām, tās sadala – izšķīdina. (3.8. att. piemērs, kā ūdens izšķīdina NaCl). Tajā pašā laikā ūdens pats par sevi nereaģē ar šīm ķīmiskajām vielām – iztvaicējot ūdeni no NaCl šķīduma, atkal tiek iegūts kristālisks NaCl (vārāmā sāls).



3.8. att. **Ūdens molekulas šķīdina NaCl**

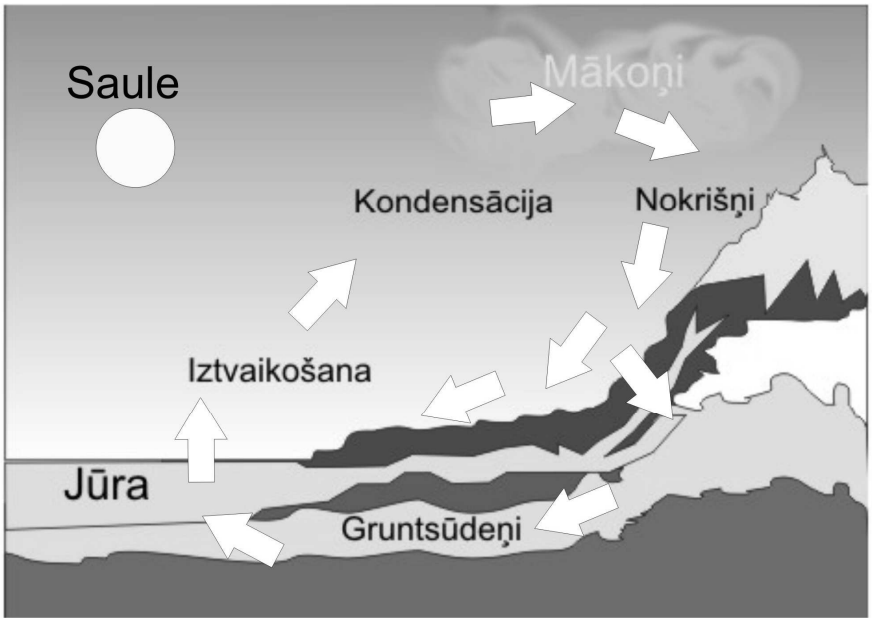
Lai varētu salīdzināt dažādu vielu šķīdumu sārmainību vai skābuma pakāpi, izveidoja mērvienību pH. To nosaka, logaritmējot brīvo ūdeņraža jonu H^+ skaitu vienā šķidruma litrā. Pētījumi rāda, ka tīrā ūdenī parasti „klejo" ap 10^7 ūdeņraža jonu H^+ un tik pat daudz hidroksila OH^- jonu. Tātad neitrālam šķīdumam $pH = \log_{10}(H+) = \log_{10}(10^7) = 7$. Jo skābāka vide, jo lielāks ūdeņraža jonu H^+ skaits, un lielāks pH. Tajā pašā laikā pat 37 ^oC temperatūrā apmēram 15 % ūdens molekulu ir saistītas ar četrām citām ūdens molekulām, veidojot īsmūžīgus klāsterus (skat. 3.4. att. iepriekš).

3.3. Ūdens aprite dabā

Ūdens uz Zemes ir nepārtrauktā kustībā. Ūdens apriti dabā sauc par ūdens jeb hidroloģisko ciklu, kurš apraksta ūdens kustību Zemes atmosfērā, uz cietzemes un cietzemē. Šim ciklam nav ne sākuma, ne beigu, un tā laikā ūdens cikliski maina savu atrašanās vietu un agregātstāvokli, pie tam dažādie cikla paralēli notiekošie procesi var būt ar dažādu ilgumu – no dažām sekundēm līdz pat miljoniem gadu. Tiek pieņemts, ka kopējā ūdens bilance uz Zemes ir nemainīga, tomēr ik pa brīdim, klausoties pasaules laika ziņas, var dzirdēt par palielinātiem nokrišņiem (sniegs, lietus), un tiem sekojošiem plūdiem kādā pasaules valstī, turpretī citā – paaugstinātu sausumu. Arī tas apliecina, ka ūdens pārvietojas.

Filosofisks skatījums uz ūdens apriti – pilnīgi iespējams, ka kāda ūdens molekula no tā ūdens, kuru jūs izdzērāt brokastu tējas krūzē, bija tā, kas piedalījās pirmās aminoskābes radīšanā daudzus miljonus gadu atpakaļ vēsturē, ir pabijusi Romas imperatora Cēzara vīna glāzē, un pilnīgi iespējams, ka šo pašu ūdens molekulu lietos savām vajadzībām jūsu mazmazmazmaz.....bērni tālā nākotnē...

Grafiski ūdens aprite dabā parādīta 3.9. attēlā.



3.9. att. **Hidroloģiskais cikls**

Galvenais hidroloģiskā cikla dzinējspēks ir Saule. Saules starojums, nonākot uz Zemes, silda gan cietzemi, gan okeānu un jūru ūdeņus. Siltuma un starojuma iedarbības rezultātā ūdens pārvēršas tvaikos. Iztvaikošana notiek arī no dzīvās dabas – augu un dzīvnieku dzīvības procesu nodrošināšanai, temperatūras uzturēšanai, tā palielinot ūdens apriti. Saules starojuma ietekmē arī no ledus virsmas notiek sublimācija – ūdens pāreja no cietā agregātstāvokļa gāzveida stāvoklī.

Līdz ar siltām gaisa masām ūdens tvaiks tiek pacelts atmosfērā uz vēsākiem slāņiem, tur atdziestot un veidojot mākoņus – notiek tvaiku kondensācija. Gan intensīvas iztvaikošanas rezultātā, gan arī ūdens tvaika un mākoņu pārvietošanās rezultātā (atmosfēras gaisa masu pārvietošanās dēļ) notiek mākoņu blīvuma pieaugums. Mākoņiem sasniedzot noteiktu ūdens koncentrāciju, kā arī saskaroties ar aukstākām gaisa masām, kas veicina ūdens tvaika tālāku kondensāciju, veidojas nokrišņu mākoņi – ūdens nokrišņu (lietus, sniega) veidā nonāk atpakaļ uz zemes virsmas un arī okeānos un jūrās. Sniegs, nokrītot kalnu apvidos un polāros apgabalos, var uzkrāties ledāju un ledus klājumu veidā, veidojot ūdens krājumus, kuri atgriežas apritē pēc daudziem tūkstošiem gadu. Sniegs kalnos daļēji kūst arī pavasaros un vasarās, piepildot ar ūdeni kalnu strautus un upes, tā veidojot ūdens plūsmu no augstākām vietām uz zemākām vietām. Sniegam nokrītot mērenāka klimata apgabalos, tas pārvēršas šķidrā agregātstāvokliī pavasarī, pieaugot gaisa temperatūrai, un atgriežas ūdens cikla apritē dažu mēnešu laikā. Sniega ūdeņi un lietus iesūcas augsnē – notiek infiltrācija, veidojot atbilstošu vidi dzīvās dabas attīstībai (augiem, dzīvniekiem), un veidojot resursu ūdens plūsmai zemes virskārtā – gruntsūdeņu plīsmu. Nokrišņi uzkrājas dīķos, ezeros un ūpēs, un tālāk nonāk atpakaļ jūrās un okeānos. Un atkal var sākties ūdens aprite dabā. Ūdens aprites apjomi apkopoti 3.3. tabulā.

3.3. tabula

Gadskārtējā hidroloģiskajā ciklā iesaistītie ūdens apjomi

Resurss		Tilpums (km^3)	% no kopējā ūdens daudzuma
Iztvaikošana	*No okeāniem, jūrām*	350 000	0.026
	No cietzemes	70 000	0.005
	KOPĀ	420 000	0.031
Nokrišņi	*Virs okeāniem, jūrām*	320 000	0.024
	Virs cietzemes	100 000	0.007
	KOPĀ	420 000	0.031
Ūdens notece (upes, strauti)		38 000	0.003
Gruntsūdeņi		1 600	0.0001
	KOPĀ	39 600	0.0031

3.4. Ūdens enerģijas izmantošanas vēsture

Ūdens kustības izmantošanas vēsture ir tik pat sena kā cilvēka attīstības vēsture. Vissenāko ūdens enerģijas izmantošanas veidu alegoriski parāda anekdote par mednieka gudrību:

Pastāsts : Pie tālā nomalē dzīvojoša mednieka atbrauc ciemos radinieks no pilsētas, un grib iet medībās. Mednieks saka: „Ja māki labi skriet, varam iet". Radinieks piekrīt, un tā viņi aiziet mežā krietni tālu no mājas un ierauga lāča alu. Mednieks paņem garu mietu un sāk bakstīt alā. No alas izlien saniknots lācis un metas medniekam virsū. Mednieks sāk skriet uz māju pusi, radinieks skrien līdz, lācis – abiem pakaļ. Tā viņi noskrien lielu gabalu, līdz pilsētniekam ienāk prātā doma: mums taču ir ieroči, kāpēc mēs bēgam? Viņš apstājas un nošauj lāci.

Mednieks arī apstājas un jautā: „Kurš viņu tagad atlikušo ceļa gabalu nesīs?!"

Mednieks šajā pastāstā vēlējās gudri izmantot lāča paša enerģiju, lai nogādātu medījumu tuvāk dzīves vietai, bet pilsētnieks ar savu „dzīves gudrību" – ātrāk paveikt sākuma uzstādījumu – nomedīt lāci, izjauca šo iespēju.

Līdzīgā veidā arī ūdens izmantošana bija seno cilvēku gudrība – samazinājās enerģijas patēriņš dažādu lietu transportēšanai, ņemot vērā upju straumes un ūdens tilpnes izveidojumu.

Ne velti civilizācijas attīstības vēsture rāda, ka straujāk attīstijās tie centri, kas atradās ūdens tuvumā. Senās Ēģiptes iedzīvotāji izmantoja Nīlas straumi materiālu transportēšanai. Granīts piramīdu iekštelpu greznošanai tika vests pa Nīlu no Asuānas – šāds transports pa sauszemi prasītu daudz vairāk pūļu.

Tomēr ilgstošu laiku vienīgais spēks, ko cilvēki lietoja, bija bioloģiska rakstura spēks – viņu pašu, viņu dzīvnieku muskuļu spēks. Tas liedza iespēju strauji attīstīties. Kā liecina daudzi pētījumi (Oswald, White), sabiedrības attīstība un progress pieaug līdz ar enerģijas patēriņa pieaugumu uz vienu iedzīvotāju, kā arī pieaugot enerģijas izmantošanas efektivitātei no instrumentu un tehnoloģoiju attīstīšanas. Ir arī viedokļi, ka arī sabiedrības kultūras attīstība ir saistīta ar enerģijas patēriņa apjomu uz vienu iedzīvotāju.

Pirmatnējā sabiedrība izmantoja ļoti maz ārējās enerģijas, un arī tehnoloģiju attīstība bija ļoti lēna.

Pirmās liecības par ūdens mehāniskās enerģijas izmantošanu attiecināmas uz laiku ap 200 g. p.m.ē. Šajā laikā radās pirmās rotācijas graudu dzirnavas, kuru darbināšanai vajadzēja daudz enerģijas. Eiropā šajā laikā dzirnavu griešanai izmantoja dzīvnieku spēku vai vergus, bet Ķīnā sāka izmantot ūdens ratus, kas ļāva izmantot ūdens mehānisko enerģiju (skat. 3.10. att.).

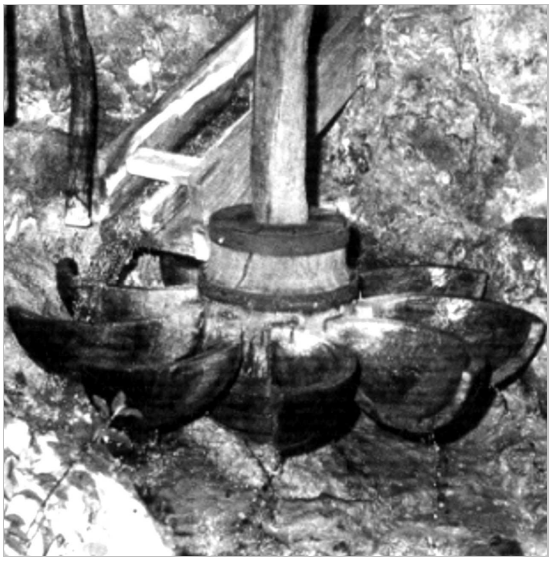
Vertikālās ass ūdensrats varēja tiešā veidā griezt dzirnakmeņus (skat. 3.11. att.), bet horizontālās ass ūdensrata izmantošanai bija nepieciešams papildus zobratu pāris, lai izmainītu ass novietojumu – dzirnavām bija nepieciešamas vertikālās ass piedziņa.

图 4-85　水转翻车
（引自（明）宋应星《天工开物》）

3.10. att. **Vertikālās ass ūdensrata pielietojuma skice,** Ķīna (Tiangong Kaiwu enciklopēdija, autors Ming dinastijas enciklopēdists Song Yingxing, 1587.–1666. g., resurss: http://www.chinapage.com/science/tiangongkaiwu/tiangongkaiwu.html)

3.11. att. **Vertikālās ass dzirnavas** (skice un reāls pielietojums)

Pirmās ziņas par liektām lāpstiņām ūdens ratam atrodamas arābu zinātnieku aprakstos (skat. 3.12. att.), tādas joprojām lieto Tuvo Austrumu valstīs.



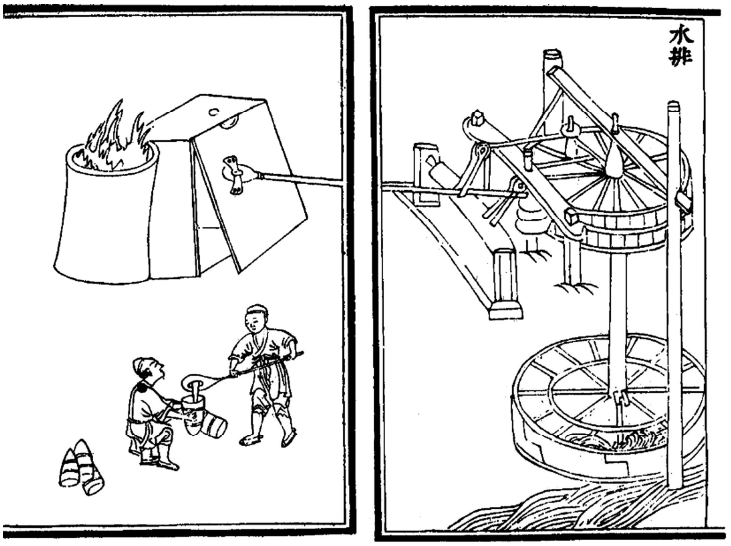
3.12. att. **Vertikālās ass ūdensrats ar liektām lāpstiņām**

Tomēr horizontālās ass ūdensrats izrādījās daudz jaudīgāks, tāpēc tā izmantošanas intensitāte strauji pieauga.

Rakstiskās liecības par ūdens ratiem atrodamas Pergijas Apollona (262. g. p.m.ē. – 190. g. p.m.ē.) darbos. Ķīniešu astronoms un matemātiķis Zhang Heng (78–139. g. m.ē) uzkonstruēja telpisku zvaigžņu karti, kuras piedziņai izmantoja ūdeni.

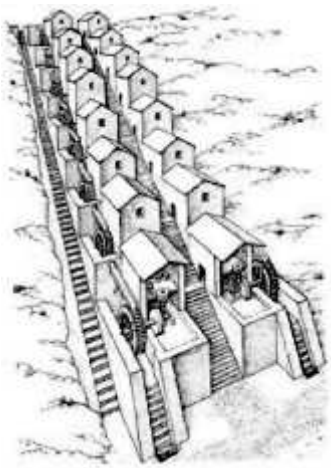
Romiešu zinātnieks un inženieris Vitrūvijs (31. g. p.m.ē. – 14. g. m.ē.) aprakstīja pirmos ūdensratus, bet atzīmēja, ka to pielietošana neesot izplatīta. Tehnoloģisko attīstību ūdensratu izmantošanā senajā Romā bremzēja ārkārtīgi lētā un plaši pieejamā darbaspēka – vergu, izmantošana.

Ķīniešu inženieris Tu Shih (31. g. m.ē.) izveidoja dzelzs kausētavas plēšu piedziņas sistēmu, kuru darbināja upes straume (skat. 3.13. att.).



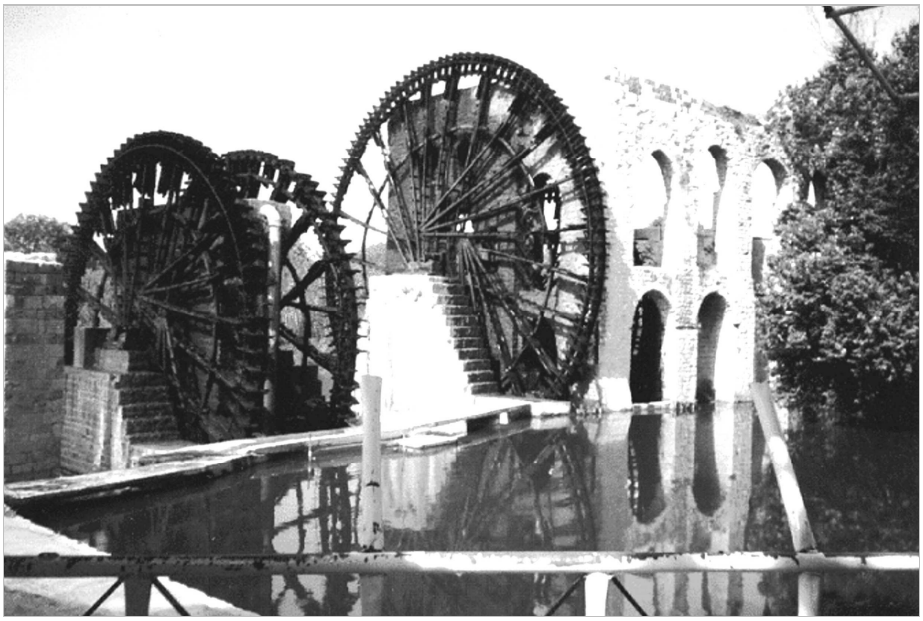
3.13. att. **Dzelzs kausētavas plēšu piedziņas sistēma** (Ķīna, 31. g. m.ē.)

Vissenākās liecības par sistēmisku pieeju ūdens izmantošanā attiecināmas uz mūsu ēras sākumu. 12 km no Arle, Francijā, izvietots Barbegal ūdensdzirnavu komplekss (4. gs. m.ē). Imperatoram Konstantīnam piederošās 16 dzirnavas spēja samalt tik daudz graudu, kas nodrošināja 12 000 iedzīvotāju vajadzības (skat. 3.14. att.). šajā kompleksā tika izmantoti ūdens rati ar augšējo ūdens padevi – visefektīvākā tehnoloģija ūdens enerģijas izmantošanā līdz pat 18. gadsimtam. Tajā pašā laikā netika veikti pētījumi ne par efektivitātes paaugstināšanu, ne jaudas palielināšanu – vergu un dzīvnieku darbaspēks joprojām bija daudz lētāks un vieglāk aizvietojams nekā jebkura tehniska sistēma.

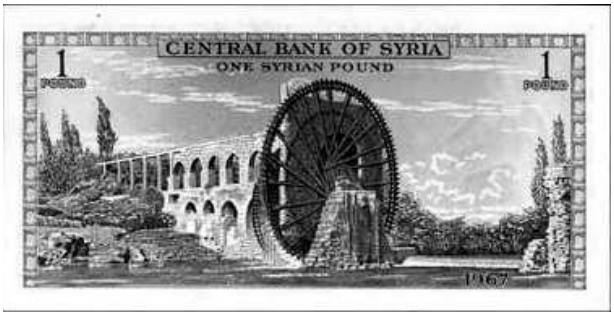


3.14. att. **Ūdensdzirnavu kompleksa skice, Barbegala, Francija**

Galvenais ūdensratu uzdevums Eiropā un Ķīnā bija nodrošināt dažādu sistēmu piedziņu. Tajā pašā laikā Tuvo Austrumu un Vidusjūras apgabalos līdzīgas ūdensratu sistēmas, sauktas par noria, tika izmantotas galvenokārt irigācijas nodrošināšanai un saldūdens piegādei uz apdzīvotām vietām (skat. 3.15.–3.16. att.).

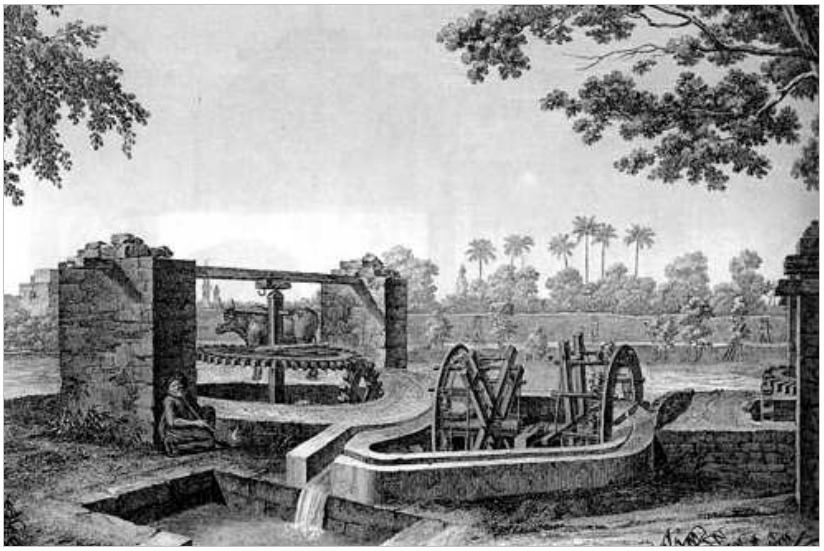


3.15. att. **Noria ūdensapgādes nodrošināšanai Hamas pilsētā, Sīrijā, uz Ornotes upes** (rata diametrs 20 m).



3.16. att. **Vienas Sīrijas mārciņas attēls ar noria attēlu** (vairs nav apgrozībā, resurss: http://www.treasuredstocks.com/C_1_1150520-013.html)

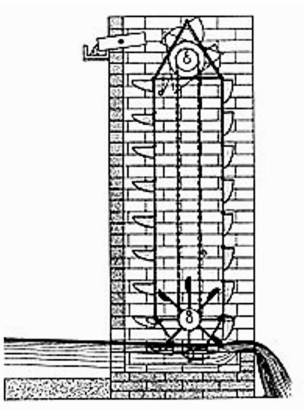
Jau no 5. gs. p.m.ē. Tuvo Austrumu zemēs ir pazīstamas arī ūdens pacelšanas ierīces, kuru piedziņai izmantoja dzīvnieku – zirgu, vēršu, spēku. Tās sauca par saqiya (skat. 3.17. att.).



3.17. att**. Ūdens pacelšanas ierīce saqiya Ēģiptē,** 1800. g.
(Resurss: http://www.qurna.org/saqiyas.html)

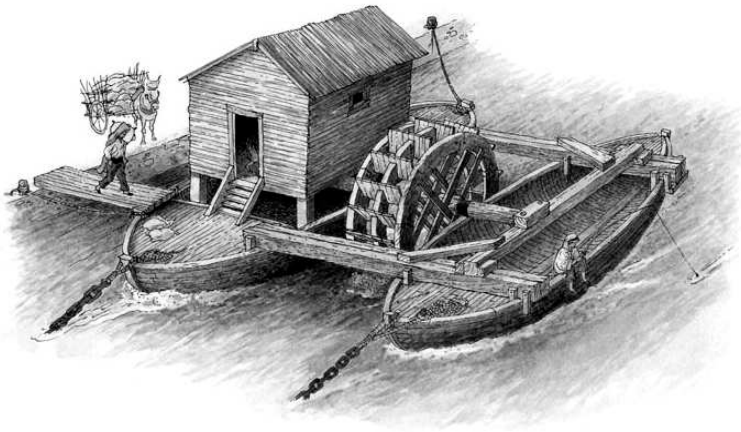
Filo no Bizantijas (Philo of Byzantium (Φίλων ο Βυζάντιος, (grieķ.)) (280. g. pm.ē. – 220. g. p.m.ē.), pazīstams arī kā Philo Mechanicus, izveidoja nedaudz savādāku ūdens pacelšanas iekārtas projektu, kura skices atrodamas viņa grāmatā Pneumatics (skat. 3.18. att.). Līdzīgas sistēmas tiek izmantotas Āfrikā un Āzijā vēl joprojām.

Ilgstošu laiku tika izmantoti galvenokārt straumes ūdens rati (water current flow waterwheel (angl.)). Kā interesantu risinājumu ārkārtas situācijās vēsturnieki apraksta notikumu gotu aplenktajā Romā 537. g. m.ē. Lai piespiestu romiešus padoties, goti sagrāva akveduktus. Bizantiešu ģenerālis Belizārs, kura karaspēks aizsargāja pilsētu, pavēlējis izveidot Tibras upē peldošu straumes ūdens ratu sistēmu – divas laivu rindas, starp kurām tika iestiprināti ūdens rati, tika noenkurotas upē, un novietoti tuvu vienam no tiltiem. Tā kā tilts ierobežoja upes plūsmu, un paātrināja



3.18. att. **Filona izgudrotā ūdens pacelšanas ierīce**

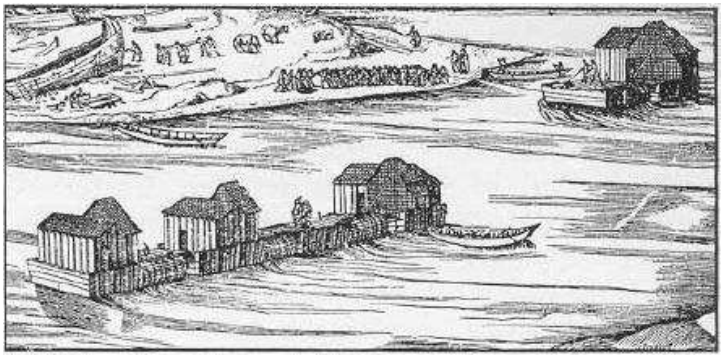
straumi, šāda peldoša ūdens apgādes sistēma spēja nodrošināt pilsētu ar ūdeni. Līdzīgi risinājumi tika pielietoti arī citur pasaulē (skat. 3.19. att.).



19. att. **Ūdensdzirnavas noenkurotā laivā**
(http://servicios.laverdad.es/murcia_agua)

Uz Tigras un Eifratas upēm Bagdādē jau 10. gs. darbojās šādas peldošas ūdensdzirnavas, kas saražoja līdz 10 tonnām miltu ik dienas, pilnībā apgādājot pilsētas iedzīvotājus.

Uz upes noenkurotas dzirnavas bija pazīstamas arī Eiropā. Tāds tika izmantpotas gan Londonā uz Temzas upes, gan Ķelnē uz Reinas, gan Parīzē uz Sēnas (skat. 3.20. att.).



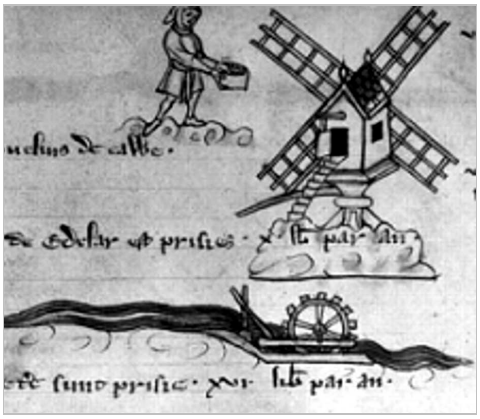
3.20. att. **Peldošu dzirnavu sistēma Reinas upē pie Ķelnes**, Vācija (1531. g.)

Šādas peldošas uz upes noenkurotas spēkstacijas vēl ir sastopamas arī Eiropā valstīs ar kalnainu ģeogrāfiju (skat. 3.21. att.).

3.21. att. **Peldošas ūdensdzirnavas uz Muri upes Slovēnijā**

Eiropā tomēr ļoti ilgi dominēja ļoti vienkāršas ūdensratu konstrukcijas – galvenokārt straumes ūdens rati (skat. 3.22. att.)

Svarīga iezīme šādai ūdens izmantošanai bija nepieciešamība pēc nepārtrauktas un pietiekoši apjomīgas ūdens plūsmas, kuru nodrošināja upes ar pietiekošu kritumu – lai būtu pietiekošs ūdens straumes ātrums.

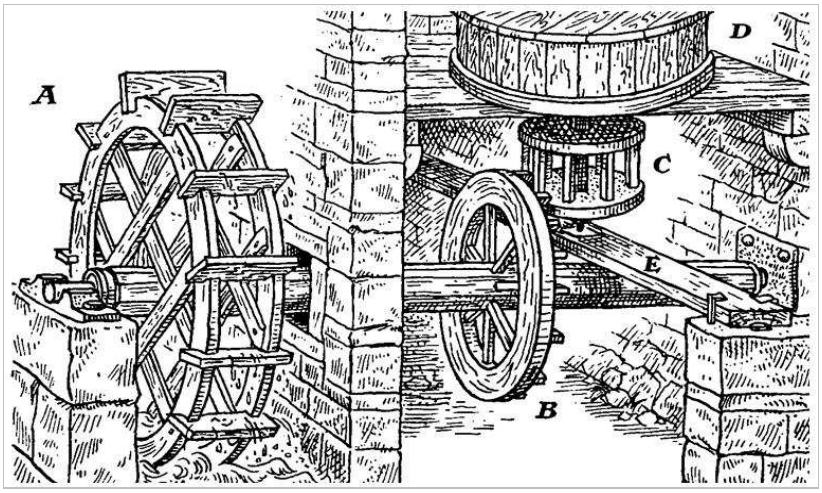


3.22. att. **Skice no grāmatas par vēja un ūdens izmantošanu,** Francija, 1270. g.

Galvenās šādu ratu priekšrocības:

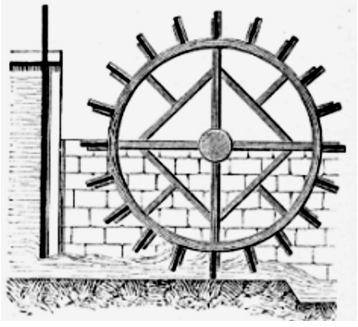
- vienkāršā uzbūve – tos varēja uzbūvēt jebkurš galdnieks,
- mazs ieguldījumu apjoms – nav nepieciešams veikt apjomīgus zemes darbus, vienkārša uzstādīšana un palaišana.

Lielākais to trūkums – tie attīstīja ļoti mazu jaudu, un to lietderības koeficients (straumes enerģijas izmantošana) nepārsniedza 40 %. Tajā pašā laikā arī piedzenamās darba mašīnas – dzirnavas, plēšas, u.c., bija ļoti mazjaudīgas, neprasīja augstus apgriezienus, līdz ar to tās spēja apmierināt tā laika vajadzības pēc enerģijas.



3.23. att. **Horizontālas ass straumes ūdensdzirnavu shēma:**
A – ūdens rats, B un C – paaugstinošais pārvads, D – dzirnakmens.

Vēl viena būtiska problēma – vasaras periodā, kad sausuma dēļ samazinājās ūdens līmenis upē, šādu ūdens ratu jauda būtiski samazinājās, reizēm rati pat vispār apstājās, jo ūdens līmenis bija zem to lāpstiņām. Viens no risinājumiem – ūdens ratus būvēja zem tiltiem vai blakus tiem. Cits – izmantot Bizantijas ģenerāļa pielietoto peldošo kuģu principu.



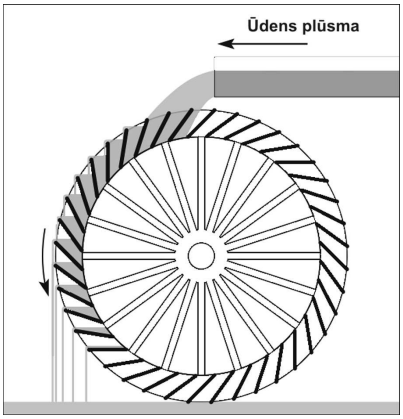
3.24. att. **Straumes ūdensdzirnavas ar aizsprostu**

Vietās, kur to pieļāva upes krasti, tika veidoti arī nelieli aizsprosti, lai nodrošinātu nepārtrauktu ūdens plūsmu uz ūdens rata lāpstiņām gan vasarā, gan pavasaros un rudeņos (skat. 3.24. att.).

Viduslaiku Eiropā būtisku sociālu un ekonomisku izmaiņu rezultātā radās nepieciešamība pēc roku darba aizvietošanas.

Sākot ar 10. gs. m.ē. Eiropā uzsākās aktīva

lauksaimniecības zemju izveide. Plaši apgabali gan Eiropas ziemeļos, gan rietumos, kur iepriekš bija ārkārtīgi zems apdzīvotības blīvums, tika pārvērsti par lauksaimniecības zemēm. Graudaugu audzēšana un pārstrāde bija galvenā nodarbošanās. Kā rāda pētījums, veikts Anglijā 1086. gadā, (Domesday Book – pirmā statistikas uzskaites grāmata Anglijā), graudaugu pārstrādē darbojās vairāk kā 5600 ūdensdzirnavu. Šāds pētījums, veikts ap 1000. g., uzskaita tikai 100 ūdensdzirnavas. Būtisku ietekmi uz citu enerģijas veidu meklēšanu atstāja ekonomiskā depresija un mēra un citu slimību epidēmijas, kuru rezultātā aizgāja bojā tūkstošiem cilvēku un dzīvnieku. Vienlaicīgi bija nepieciešams palētināt produkcijas izmaksas, un palielināt ražošanas efektivitāti. Daudzās upes ar pietiekošu un regulāru ūdens plūsmu un ūdens enerģijas izmantošanai ģeogrāfiski izdevīgu konfigurāciju kļuva par aktīvas izmantošanas avotu.

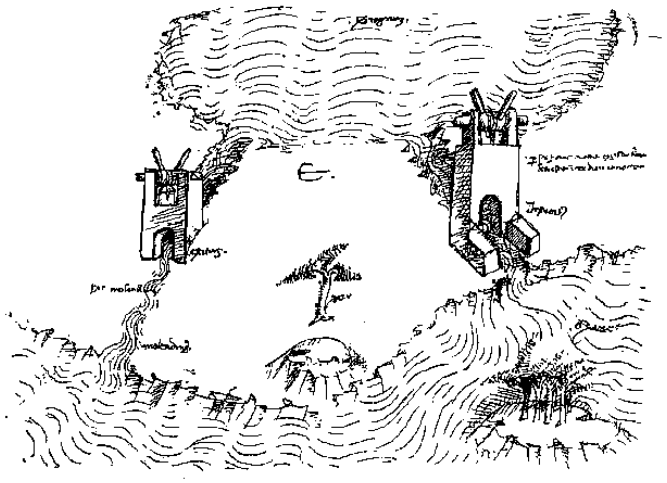


3.25. att. **Augšējās ūdens padeves ūdens rata skice**

3.26. att. **Ūdensrats ar augšējo ūdens padevi piedzen dzirnavas**

Vietās, kur to pieļāva ģeogrāfiskā konfigurācija, tika izvietoti ūdens rati ar augšējo ūdens padevi (skat. 3.25. att.). To jauda bija ievērojami lielāka, un arī efektivitāte augstāka, tomēr to darbībai bija vajadzīgas vai nu īpašas slūžas un dambji, vai arī jau minētie ģeogrāfiskie un ģeoloģiskie apstākļi – ūdenskrātuves paaugstinājumos, kalnos, u.c.

Neparasts Eiropas inženieru izgudrojums bija paisuma/bēguma dzirnavas. Ziņas par šādām dzirnavām atrodamas jau 12. gs. Anglijā un Francijā (skat. 3.27. att.).



3.27. att. **Paisuma-bēguma ūdensdzirnavas** (Jacopo Mariano, 1400. g.)

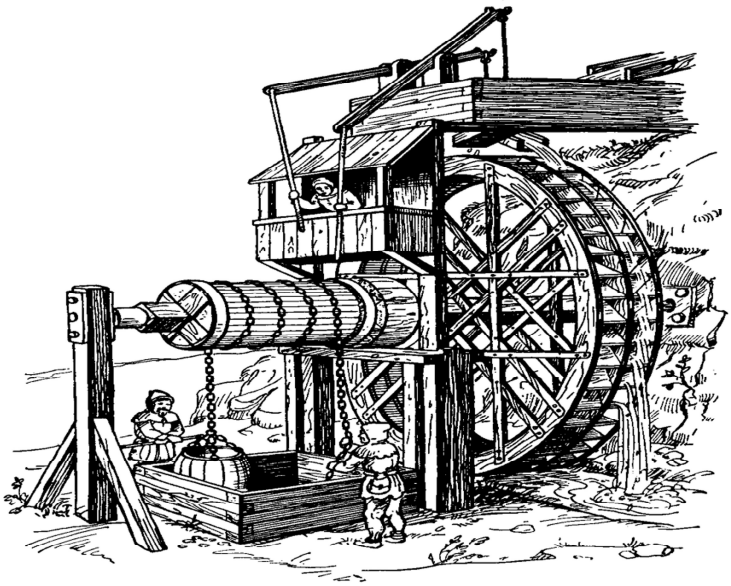
Šādas ūdensdzirnavas tika būvētas jūru un okeāna piekrastē ar lēzenu zemu krastu vai seklos līčos. Paisuma laikā tika atvērtas slūžas, ūdens ieplūda līcī. Paisumam beidzoties, slūžas aizvēra, un gaidīja bēgumu. Tad atvēra slūžas uz ūdensdzirnavām, tā periodiski darbinot malšanas ierīces. Galvenā šādu ūdensdzirnavu problēma bija to periodiskā darbība – atkarība no paisuma un bēguma.

Energotehnoloģiju attīstību zināmā mērā veicināja arī kristietības attīstība. Benediktīniešu ordenis, kurš tika dibināts kā Cisterciešu ordenis 1098. gadā, un 14 gadus vēlāk ieguva savu šībrīža nosaukumu, deklarēja, ka mūku dzīves vietai jābūt nošķirtai, attālinātai no parastu cilvēku apdzīvotām vietām. Lai šādās vietās varētu izdzīvot, mūki būtiski paaugstināja ražošanas efektivitāti, kā arī intensīvi izmantoja ūdens enerģiju. Tipiskā cisterciešu klosterī bija ūdens padeves sistēma, kas nodrošināja gan dzirnavas, gan darbnīcas, gan kokzāģētavas, gan eļļas spiestuves ar mehānisko enerģiju, gan arī piegādāja ūdeni ēdienu gaavošanai un veļas mazgāšanai, kā arī pirts un tualetes vajadzībām. Cisterciešu kolosteri bija tiem laikiem visaugstāk attīstītās rūpnīcas, un mūku radītie inženiertehniskie risinājumi tika ieviesti pa visu Eiropu.

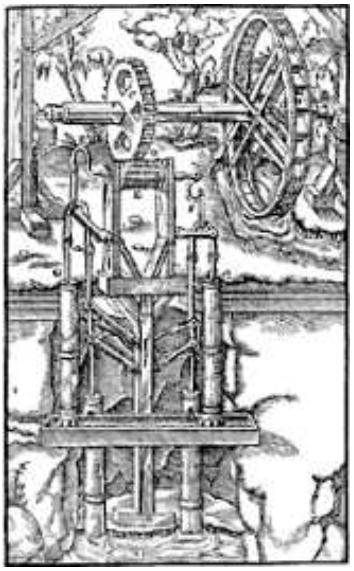
Kā būtisku citerciešu mūku izgudrojumu, jāpiemin ūdens enerģijas izmantošanu kalnrūpniecībā. Līdz ar pieaugošo metāla pieprasījumu, ikdienā radās nepieciešamība intensificēt rūdas ieguvi. Raktuves kļuva arvien dziļākas, radās grūtības gan nokļūt pie rūdas dzīslām, gan arī transportēt iegūto rūdu uz virszemi. Dziļās raktuvēs palielinājās

ūdens pieplūde, kuru vajadzēja izsūknēt. Šiem mērķiem lieti noderēja jau pazīstamā ūdensratu sistēma, kuras radītā mehāniskā enerģija tika izmantota gan sūkņu darbināšanai, gan rūdas un kalnraču transportam, gan metālkausēšanas plēšu piedziņai, gan arī jaudīgu kalēju āmuru cilāšanai (skat. 3.28.–3.30. att.).

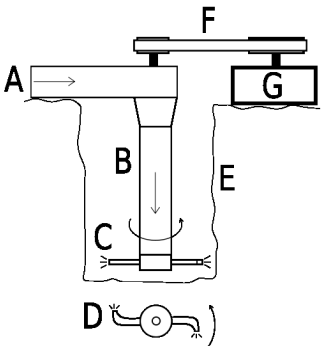
3.28. att. **Rūdas smalcināšanas ierīce ar ūdens rata piedziņu**
(grāmata De Re Metallica, Georgius Argicola, 1556. g.)



3.29. att. **Ūdens rata izmantošana rūdas transportēšanai**



3.30. att. **Ūdens sūknis** (grāmata De Re Metallica, Georgius Argicola, 1556. g.)



3.31. att. **J.Segnera reaktīvās piedziņas mašīna:**
A – ūdens ieplūde, B – vertikāla caurule ar sprauslām, C – rotējošās sprauslas, D – sprauslu sistēma, skats no augšas, E – pamatne ar padziļinājumu, F – dzensiksnas pārvads, G – piedzenamais mehānisms.

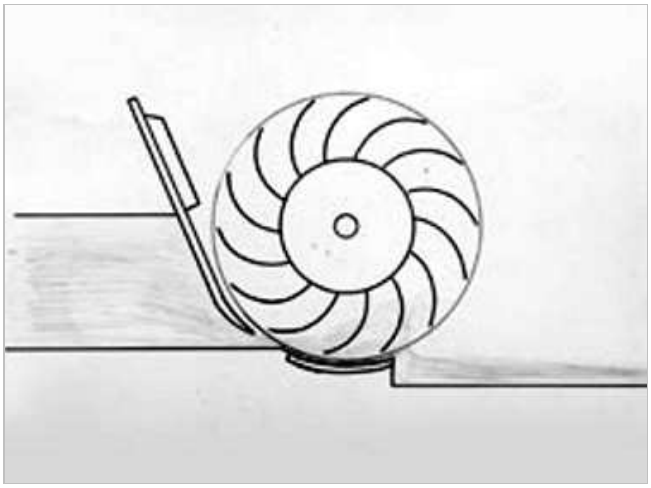
Dažāda tipa ūdens rati – gan straumes, gan ar augšējo ūdens padevi, gan reizēm arī ar ūdens padevi no sāniem, kā galvenais mehāniskās enerģijas avots tika izmantoti līdz pat 18. gadsimtam. Galvenā to iezīme – vienkārša konstrukcija.

Ūdens izmantošanā līdz pat 18. gadsimta beigām īpašu izmaiņu nebija. Atsevišķi neparasti risinājumi gan tika piedāvāti (piemēram, Jana Andreja Segnera ap 1750. gadu piedāvātā reaktīvā ūdens piedziņas mašīna (skat. 3.31. att.)).

Tomēr plaša to ieviešana nenotika, jo joprojām bija mazsvarīgi iegūt ļoti lielu enerģiju – cilvēce iztika ar pieejamo mazumiņu.

Līdz ar industriālās revolūcijas attīstību 19. gs. sākumā arvien lielāka vērība tika piegriezta enerģētikai. Tā kā ar ūdensrata piedziņu izmantojamo upju un citu ūdenskrātuvju apjoms bija ļoti ierobežots, un visās ģeogrāfiski un ģeoloģiski atbilstošajās vietās jau bija uzbūvētas šādas energoiekārtas, radās nepieciešamība un pieprasījums pēc jauniem tehniskiem risinājumiem. Kā raksta tā laika hronikās, braucot pa upi ar laivu, nepārtraukti bija redzams vismaz viens ūdensrats, kas piedzina kādu mehānisku sistēmu. Kā vēsta statistika, 1829. gadā Francijā darbojās pāri pār 60 000 ūdensratu. Francijas valdība pat bija izsludinājusi balvu fondu tiem izgudrotājiem un inženieriem, kuri piedāvās daudz efektīvāka ūdensrata konstrukciju,

jo valstī sāka trūkt brīvu enerģijas jaudu. Daudzi tā laika izcilie prāti iesaistījās šīs problēmas risināšanā.



3.32. att. **Skice Ž.V.Ponselota turbīnai.**

Pirmie tehnoloģiski un tehniski realizējamie risinājumi sāka parādīties ap 1820. gadu. Šajā laikā parādījās arī jēdziens turbīna – iespējamās tā saknes ir turbō, turbinon (latīniski) – augšpuse, kas griežas, vai στρόβιλος (grieķiski) – griešanās, rotācija. Par termina ieviesēju uzskata franču inženieri Klodu Burdēnu (Claude Burdin), kurš to izmantoja tehnisku rotējošu ierīči aprakstos.

Tomēr par visbūtiskāko atklājumu ūdens izmantošanā šajā laika posmā, var uzskatīt francūža Žana Viktora Ponselota (Jean Victor Poncelot) turbīnu (skat. 3.32. att.), par kuru tas pat saņēma Francijas Zinātņu akadēmijas apbalvojumu „Prix de Mecanique". Tās efektivitāte sasniedza pat 60-70 % ierasto 30 % vietā, un ļāva būtiski paaugstināt no ūdens iegūtās enerģijas apjomus, pie tam viņa izgudrojums darbojās pat četrkārtīgā ūdens līmeņa svārstību diapazonā. Šī tipa ūdensratus (nu jau tos var saukt arī par turbīnām) izmanto arī šobrīd vietās ar nelielu ūdens līmeņu starpību (skat. 3.33. att.).

3.33. att. **Ūdens rats, kas darbojas, izmantojot J.V.Poncelot pielietoto principu** (Hester dzirnavas, Sammervila, ASV. Resurss: http://www.waterwheelfactory.com).

Tālākā ūdens enerģijas izmantošanai nepieciešamo ierīču attīstība notika ļoti strauji, jo industriālajai sabiedrībai bija nepieciešami arvien lielāki energoresursi. Šajā posmā, kas iestiepjas līdz pat mūsdienām, jāpiemin Benuā Furneirons (Benoit Fourneyron), Džeimss Frensiss (James B.Francis), Samules Naits (Samuel Knight), Lesters Peltons (Lester Pelton), un Viktors Kaplans (Viktor Kaplan), kurus var uzskatīt par mūsdienu ūdensturbīnu teorijas un praktiskās izmantošanas pamatlicējiem. Par viņu izgudrojumiem tiks pastāstīts turpmākajās nodaļās.

3.5. Ūdens enerģētikas teorētiskie pamati

3.5.1. Ūdens enerģija

Ūdens enerģijas izmantošanas pamatā ir ūdens kustības (plūsmas) enerģijas izmantošana. Kā zināms no fizikas pamatkursa, jebkuram gravitācijas laukā augstumā

h paceltam miera stāvoklī esošam ķermenim ar masu *m* piemīt potenciālā enerģija E_p, kuru var aprēķināt:

$$E_p = m \cdot g \cdot h\,, \tag{3.1}$$

kur E_p – potenciālā enerģija, J;

m – ķermeņa masa, kg;

g – gravitācijas konstante, smaguma spēka paātrinājums, brīvās krišanas paātrinājums (uz Zemes vidēji $g = 9{,}81$ m/s^2);

h – ķermeņa pacelšanas augstums, m.

Šī formula nosaka, ka maksimālā enerģija, kuru ūdens var atdot, pārvietojoties (plūstot, krītot) no augstākas vietas uz zemāku, ir aprēķināma pēc formulas:

$$P = q \cdot \rho \cdot g \cdot h\,, \tag{3.2}$$

kur *P* – potenciālās enerģijas izmaiņa laikā jeb jauda, W;

q – ūdens plūsma, m^3/s;

ρ – ūdens blīvums, kg/m^3 (normālos apstākļos ūdens blīvums ir 1000 kg/m^3);

g – gravitācijas konstante jeb smaguma spēka paātrinājums;

h – ūdens krišanas augstums (augstumu starpība starp tā kustības sākumu un beigām), m.

Izmantojot (3.2) formulu, varam aprēķināt, ka ūdens straume ar plūsmu 1 m^3/s, sākot kustību no miera stāvokļa un pārvietojoties 1 m uz leju, var atdod maksimāli 9810 J enerģijas.

Kā redzams no (3.2) formulas, konkrētos apstākļos esošas ūdens masas jauda ir atkarīga no plūsmas un ūdens krišanas jeb ūdens pacelšanas augstuma h.

Papildus likumsakarības jāņem vērā tad, ja ūdens masa ir kustībā – jāņem vērā tās kinētiskā enerģija:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}\,, \tag{3.3}$$

kur E_k – kinētiskā enerģija, J;

m – ūdens masa, kg;

v – ūdens kustības ātrums, m/s.

Enerģija piemīt arī ūdenim, ja tas atrodas zem spiediena, piemēram, starp zemes iežu slāņiem, aiz sūkņa caurulē, u.c. Šo enerģiju parasti izsaka caur teorētisko ūdens pacelšanas augstumu h_t, un aprēķina pēc formulas:

$$h_t = \frac{p}{\rho \cdot g} \quad , \tag{3.4}$$

kur h_t – teorētiskais ūdens pacelšanas augstums, m;

p – spiediens, kg/m^2 ;

ρ – ūdens blīvums, kg/m^3 ;

g – gravitācijas konstante jeb smaguma spēka paātrinājums.

Vispilnīgāk enerģiju, kas piemīt ūdenim kā šķidrumam no mehānikas viedokļa, apraksta Bernulli vienādojums, kas apvieno gan potenciālo enerģiju, gan kinētisko enerģiju, gan arī spiediena ietekmi uz šķidrumu (šajā gadījumā ūdeni). Tas parāda kopējo teorētisko konkrētam gadījumam raksturīgo ūdens staba augstumu H :

$$H = h + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g}, \tag{3.5}$$

kur h – reālais ūdens pacelšanas augstums, m;

p – spiediens, kg/m^2 ;

ρ – ūdens blīvums, kg/m^3 ;

v – ūdens kustības ātrums, m/s;

g – gravitācijas konstante jeb smaguma spēka paātrinājums.

Tad, izmantojot (3.2) formulu, un izmantojot (3.5) formulu, iegūstam paplašinātu ūdens masai piemītošās maksimālās enerģijas formulu:

$$P_{\max} = q \cdot \rho \cdot g \cdot H = q \cdot \rho \cdot g \cdot (h + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g}), \tag{3.6}$$

kur P_{max} – maksimāli iespējamā ūdens enerģijas izmaiņa laikā jeb jauda, W;

p – spiediens, kg/m^2 ;

q – ūdens plūsma, m^3/s;

ρ – ūdens blīvums, kg/m^3;

v – ūdens kustības ātrums, m/s;

g – gravitācijas konstante jeb smaguma spēka paātrinājums;

h – ūdens krišanas augstums (augstumu starpība starp tā kustības sākumu un beigām), m.

Ja kāda no (3.6) formulas komponentēm neeksistē, piemēram, ūdens neatrodas zem spiediena, vai tas atrodas miera stāvoklī (v = 0), tad atbilstošā maksimāli pieejamās mehāniskās enerģijas komponente arī būs vienāda ar nulli.

3.5.2. Zudumi ūdens enerģētikas iekārtās

Pētot un projektējot ūdens enerģētikas iekārtas, jāņem vērā vairāki būtiski faktori, kas samazina cilvēkam pieejamās enerģijas daudzumu. Galvenie no tiem ir enerģijas pārveides procesā esošie zudumi, un zudumi starpposmā no ūdens kustības uzsākšanas līdz tā nonākšanai enerģijas pārveides iekārtā.

ENERĢIJAS PĀRVEIDES ZUDUMI

Vispirms jāņem vērā tas, ka katrai ierīcei, kuru izmanto šīs enerģijas saņemšanai un izmantošanai, ir savs lietderības koeficients η – attiecība starp pievadīto un aizvadīto enerģijas daudzumu:

$$\eta = \frac{P_1}{P}, \tag{3.7}$$

kur η – iekārtas lietderības koeficients;

P_1 – tālāk aizvadītā jauda, W;

P – pievadītā jauda, W.

Kā jau tika minēts iepriekšējās nodaļās, vēsturiski vissenākajiem – ūdens straumes piedziņas ūdensratiem lietderības koeficients nepārsniedza 0,2 jeb 20 %, turpretī modernās Frensisa un Kaplāna turbīnas uzrāda lietderības koeficientus, kas tuvojas 0,8...0,90 (80...90 %).

Pieņemot ūdensratus un tubīnas kā primārās enerģijas pārveides iekārtas, un ievērtējot to lietderības koeficientus, nedrīkst aizmirst arī par enerģijas pārvades iekārtām un ierīcēm (zobratu pārvadiem, iegultņotām vārpstām, siksnu pārvadiem, u.c.), kā arī par sekundārajā enerģijas pārveides iekārtām gadījumos, kad no

mehāniskās enerģijas tiek iegūta cita veida enerģija (siltuma enerģija, elektroenerģija). Katram starpposmam – elektroģeneratoram, pārvadam, ir savs lietderības koeficients, un kopējo ūdens enerģētikas iekārtas lietderības koeficientu aprēķina kā visu virknē slēgto pārvadītās enerģijas zudumus radošo iekārtu un elementu lietderības koeficientu reizinājumu:

$$\eta_{kop} = \eta \cdot \eta_2 \cdot \ldots \cdot \eta_n \ , \tag{3.8}$$

kur η_{kop} – kopējais ūdens enerģētikas iekārtas lietderības koeficients,

$\eta_{1\ldots}\ \eta_n$ – atsevišķu ūdens enerģētikas iekārtas sastāvdaļu lietderības koeficienti.

Tāpēc ļoti būtiski izvēlēties minimālu elementu skaitu ar augstiem lietderības koeficientiem, jo, piemēram, divas virknē saslēgtas iekārtas ar lietderības koeficientiem 70 % ir labākas nekā četras iekārtas ar liederības koeficientiem 80 % (attiecīgi $\eta_{kop\ 70\%}$=0,70*0,70=0,49 un $\eta_{kop\ 80\%}$ =0,80*0,80*0,80*0,80=0,4096).

HIDRAULISKIE ZUDUMI

Daudz enerģijas zūd starpposmā no ūdens kustības uzsākšanas sākuma līdz tā nonākšanai pie enerģijas saņemšanas ierīces. Šos zudumus sauc par hidrauliskajiem zudumiem.

Ūdenim kustoties, tas saskaras gan ar cauruļu, gan ar atvērto kanālu sienām, gan ar jebkura tajā iegremdēta ķermeņa virsmu. Saskares virsmā rodas berze, jo virsmas nav absolūti gludas. Vispārējā gadījumā, pieņemot, ka ūdens plūsma ir lamināra (tās kustības ātrums ir mazs, savstarpējā berze starp ūdens slāņiem niecīga, ūdens plūsmas ātrums samazinās no maksimālā cauruļvada centrā līdz nullei pie cauruļvada sienas, citiem vārdiem sakot, konkrētās plūsmas Reinolda skaitlis ir mazs), zudumi no berzes pret cauruļvada sienām, izteikti ar ūdens staba augstuma samazinājumu, ir aprēķināmi pēc formulas:

$$h_b = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \ , \tag{3.9}$$

kur h_b – ūdens staba augstuma samazinājums no berzes, m;

L – cauruļvada garums, m;

D – cauruļvada diametrs, m;

f – berzes koeficients (atkarīgs no cauruļvada materiāla un tā apstrādes kvalitātes);

v – ūdens kustības ātrums, m/s;

g – gravitācijas konstante, m/s^2.

Enerģijas zudumi rodas arī tad, ja izmainās ūdens plūsmas kustība – plūsmai jāturpinās paplašinātā vai sašaurinātā cauruļvadā, jāpārvar pārgāznes, cauruļvadi vai atvērtais kanāls ir ar liekumiem, tajos ir iebūvēti aizvari vai kādi citi elementi. Šī tipa zudumus uzskata par turbulences zudumiem, jo enerģija tiek patērēta, ūdens slāņiem beržoties vienam pret otru, un radot plūsmā turbulences, kas būtiski bremzē ūdens plūsmu. Šo zudumu aprēķinu veic, izmantojot specifiskas hidraulikas formulas un datu tabulas, (tās šajā grāmatā neapskatām), tomēr galvenā tendence visiem turbulences zudumiem ir vienāda – tie visi ir tieši proporcionāli šķidruma plūsmas ātruma kvadrātam, tātad lielu plūsmas ātrumu gadījumos jāveic padziļināta turbulences zudumus izraisošu konstruktīvo elementu izpēte un uzlabošana, lai minimizētu nevajadzīgus enerģijas zudumus.

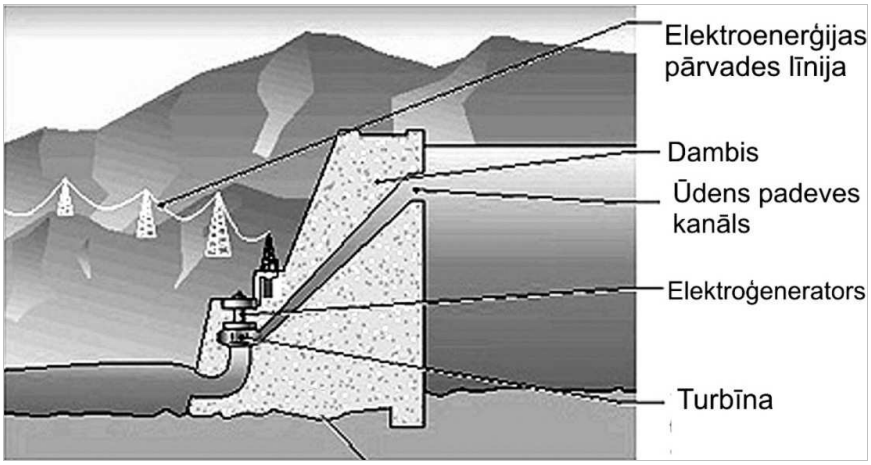
3.6. Hidroenerģētikas iekārtas

Ūdens enerģijas izmantošanas pirmsākumos katra iekārta, kas pārvērta ūdens plūsmas enerģiju cilvēkam izmantojamā veidā, bija unikāla, un bija grūti runāt par kopējām iezīmēm, kas tās raksturo. Līdz ar industriālo attīstību un apgūstamo jaudu un enerģijas apjomu pieaugumu radās nepieciešamība un iespēja apvienot visas ūdens enerģiju pārveidojošās iekārtas, izmantojot vienojošu nosaukumu – hidroenerģētikas iekārtas, kuras ietver sevī gan ēkas, gan būves (dambjus, aizsprostus), gan ūdens padeves sistēmas, gan enerģijas uztvers un pārveides iekārtas – turbīnas un elektroģeneratorus, gan iegūtās enerģijas tālāk nodošanas sistēmu (transformatoru apakšstacijas un elektroenerģijas pārvades līnijas).

3.6.1. Vispārējā spēkstacijas uzbūve

Vispārēja spēkstacijas skice parādīta 3.34. attēlā. Spēkstacijas galvenais uzdevums ir pārvērst ūdens mehānisko enerģiju plaši izmantojamā un tālāk nododamā

enerģijas veidā – elektroenerģijā. Tās darbības princips ir vienkāršs – ūdens, plūstot pa kanālu vai cauruļvadu no ūdenskrātuves, griež turbīnu, un tā savukārt elektroģeneratoru, kas ražo elektroenerģiju.



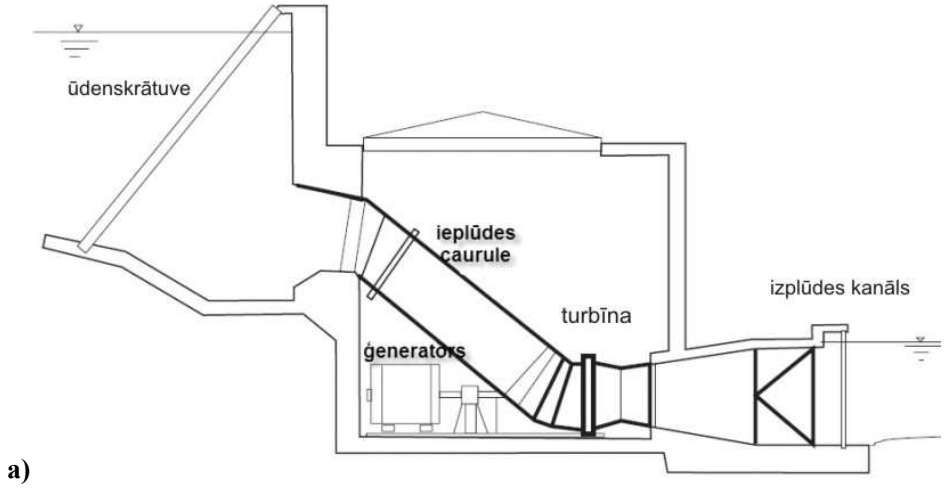
3.34. att. **Spēkstacijas vispārējā shēma**

Spēkstacijas gavenie elementi:

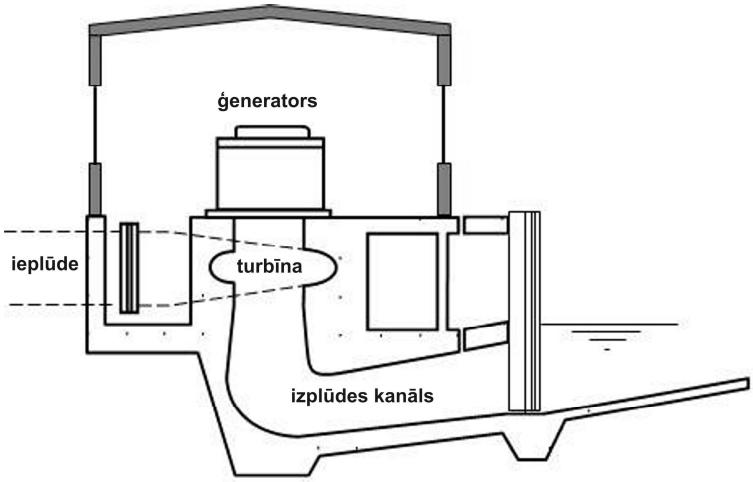
- ūdenskrātuve ar dambi;
- ūdens padeves kanāls/cauruļvads;
- turbīna ar elektroģeneratoru;
- enerģijas pārvades līnijas.

Ūdenskrātuvē līdz ar ūdens uzkrāšanu tiek uzkrāta enerģija. Dambji un aizsprosti palīdz izveidot ūdenskrātuves, apturot ūdens plūsmu. Izmantojot kustīgus aizvarus, rodas iespēja regulēt ūdens līmeni ūdenskrātuvē, tā regulējot uzkrātās enerģijas daudzumu un vadot tās pārveidošanu.

Atverot aizvarus, kas izveidoti ūdens padeves kanālos vai cauruļvados, ūdenskrātuvē uzkrātais ūdens ar tā potenciālo enerģiju uzsāk kustību, pārvēršot savu potenciālo enerģiju kinētiskajā enerģijā. Ar aizvariem ir iespējams regulēt nepieciešamo enerģijas pārveides intensitāti.



a)

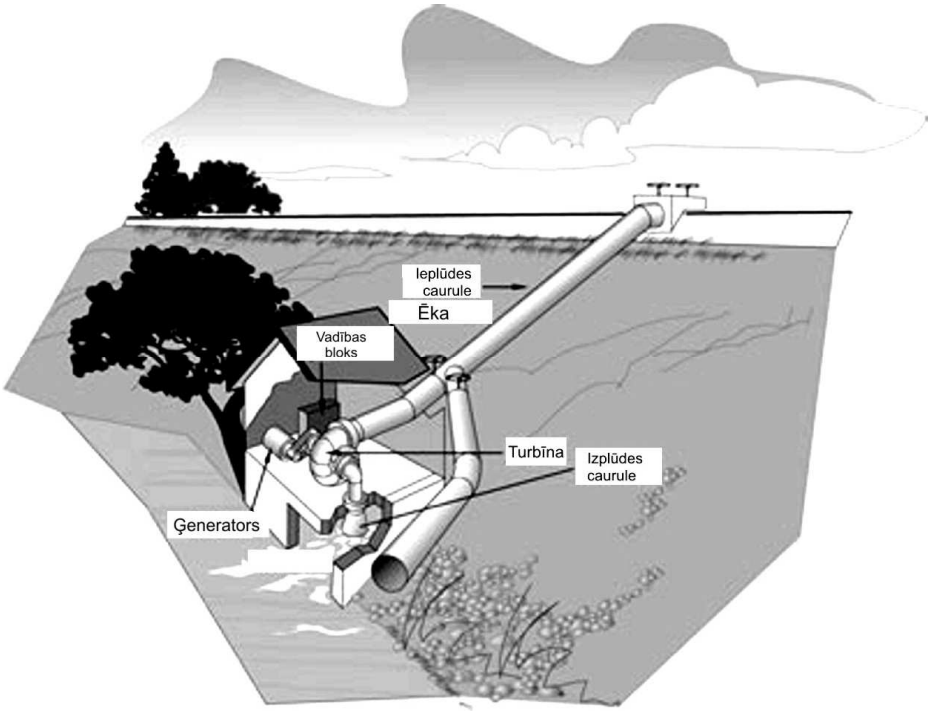


b)

3.35. att. **Spēkstacijas energobloka shēma:**
a) horizontālā vārpsta, b) vertikālā vārpsta, (resurss: "Layman's Guidebook on how to develop a small hydro site", European Small Hydropower Association)

Ūdens plūsma, kas ieguvusi kinētisko enerģiju, iedarbojas uz ūdens turbīnas lāpstiņām, nododot savu kinētisko enerģiju tām. Ūdens pats būtiski zaudē vai nu ātrumu, vai spiedienu, (vai arī abus šos parametrus), iegriežot turbīnu, kas savukārt nodod mehānisko griezes enerģiju elektroģeneratora vārpstai. Elektroģenerators ražo atbilstoša apjoma elektroenerģiju (skat. 3.35. att.).

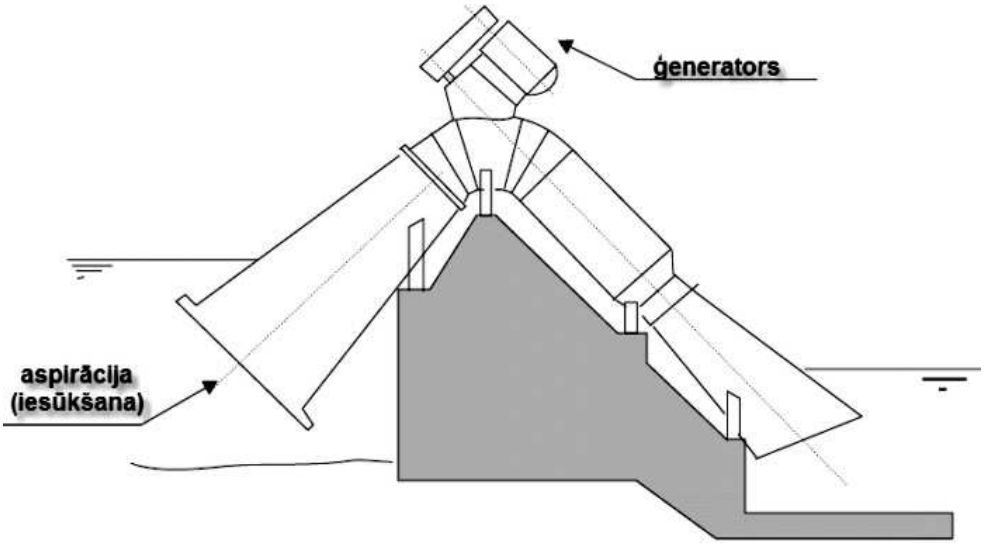
Vietās, kur jau dabiskos apstākļos ir būtiskas līmeņu starpības starp ūdenskrātuvi un izplūdes vietu, iespējams būvēt bezaizsprosta spēkstacijas (skat. 3.36. att.). Šādā gadījumā ūdens no dabiskās ūdenskrātuves tiek padots uz spēkstaciju pa cauruļvadiem.



3.36. att. **Bezaizsprosta spēkstacija**

Gadījumos, kad dažādu iemeslu dēļ nav iespējams izveidot ūdens ieplūdi ieplūdes caurulē zem ūdenskrātuves līmeņa (ģeoloģiskas grunts īpatnības, drošības apsvērumi), iespējams veidot sifona tipa ūdens padeves sistēmu (skat. 3.37. att.). Sifona ūdens padeves galvenā iezīme – turbīnas darbība jāuzsāk, ieslēdzot to sūkšanas režīmā, lai paceltu ūdeni līdz sifona augšējam liekuma punktam. Kad panākta vienmērīga ūdens plūsma, turbīnu pārslēdz ģenerācijas režīmā. Ļoti svarīgi uzmanīt, lai ūdens līmenis sifona ieplūdes caurules galā nenokrīt zem iesūkšans caurules līmeņa, kā arī nav pieļaujami neblīvumi un gaisa piesūce sifona darba laikā – sistēmas

darbība būs nestabila. Pasaules pieredze rāda, ka sifona sistēmas var tikt izmantotas ūdens līmeņu starpībām līdz pat 30 m un jaudām līdz 11 MW.

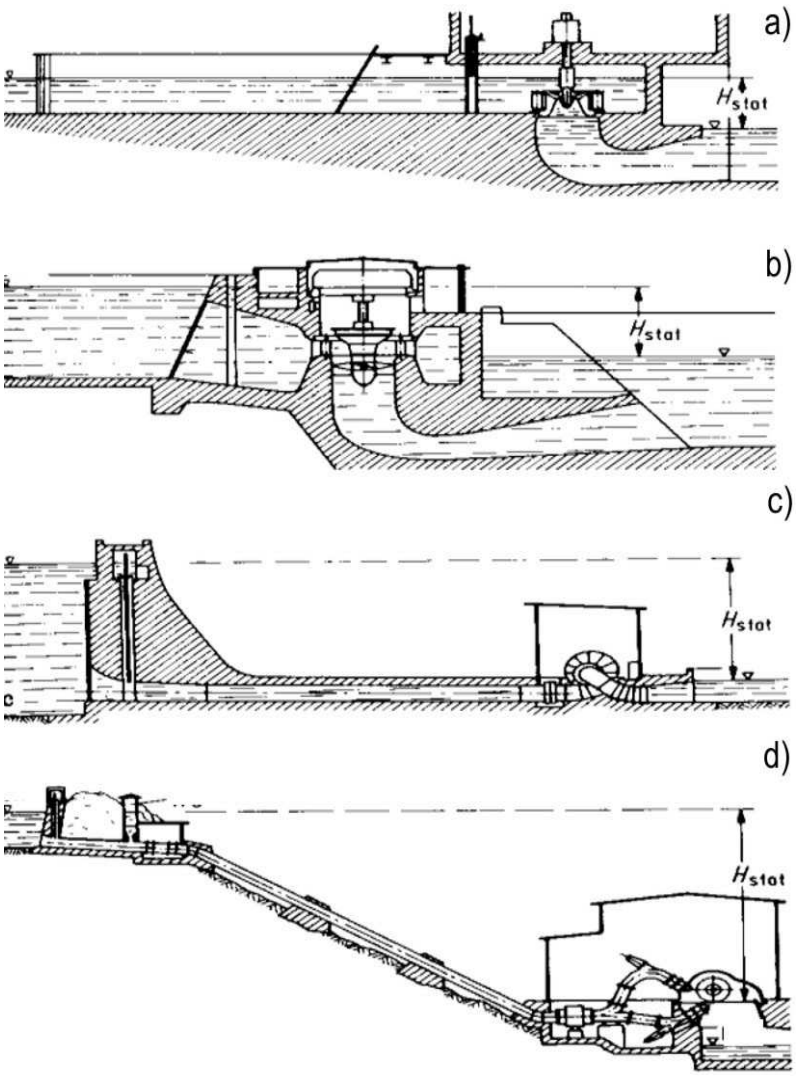


3.37. att. **Sifona tipa ūdens padeve spēkstacijā**
(resurss: "Layman's Guidebook on how to develop a small hydro site", European Small Hydropower Association)

3.6.2. Ūdenskrātuvju tipi

Ūdens enerģijas apjoms ir atkarīgs gan no ūdens plūsmas ātruma, gan arī no spiedienu starpības un ūdens līmeņu starpības ieplūdē un izplūdē. Atbilstoši šiem parametriem tiek sagrupētas arī ūdenskrātuves un ūdens rezervuāri spēkstaciju vajadzībām (skat. 3.38. att.)

Atkarībā no līmeņu starpības ūdenskrātuves iedala mazas, vidējas un lielas līmeņu starpības ūdenskrātuvēs. Līdzīgi arī atkarībā no ūdens piepūdes apjomiem ūdenskrātuves iedala mazas, vidējas un lielas ūdens pieplūdes ūdenskrātuvēs. Katrai ūdenskrātuvei atbilstoši tās parametriem jāizvēlas atbilstošais turbīnas tips un parametri.



3.38. att. **Ūdenskrātuvju tipi spēkstacijās:**
a) – maza līmeņu starpība H_{stat}, liela plīsuma q, b) – vidēja līmeņu starpība H_{stat}, vidēja plūsma q, c) – liela līmeņu starpība H_{stat}, vidēja plūsma q, d) liela līmeņu starpība H_{stat}, maza plūsma q.

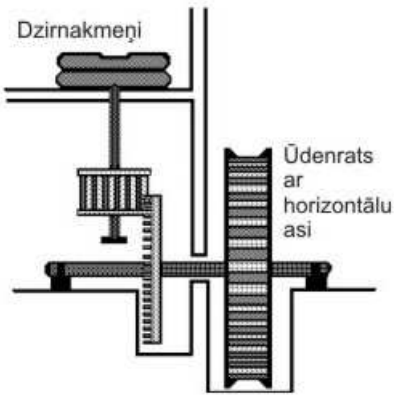
3.6.3. Ūdens energoiekārtu piedziņas iekārtas

Ūdens enerģijas uztveršanai un pārvadei uz darba mašīnām izmantojamās piedziņas iekārtas iedalās ūdensrata tipa un turbīnas tipa ierīcēs. Galvenā šādas grupēšanas iezīme ir vēsturiskā izmantošana – ūdensrati ir visvecākās ūdens enerģijas

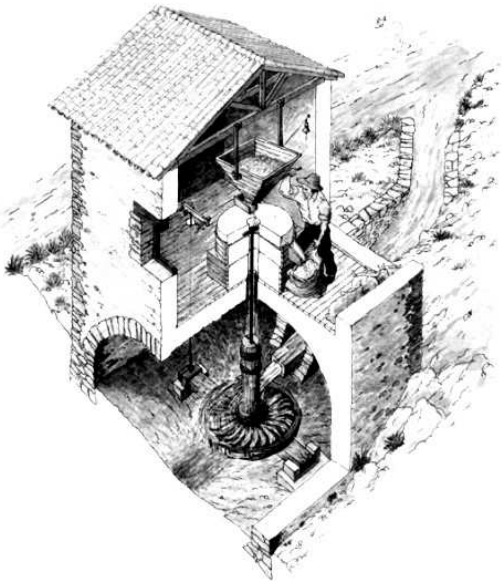
izmantošanas ierīces, savukārt turbīnu izmantošana sākusies tikai 19. gadsimtā. Kaut arī ūdensratus izmanto arī šobrīd, galvenā to iezīme – mazas jaudas (līdz 50 kW).

ŪDENSRATI

Ūdensratus iedala pēc to izveidojuma un pēc principa, kā tiek paņemta ūdens enerģija. Pēc izveidojuma ūdensrati iedalās horizontālajos un vertikālajos. Horizontālajiem ūdensratiem griešanās ass ir vertikāla (skat. 3.40. att.), bet vertikālajiem (skat. 3.39. att.) tā ir novietota horizontāli.



3.39. att. **Vertikālais ūdensrats**

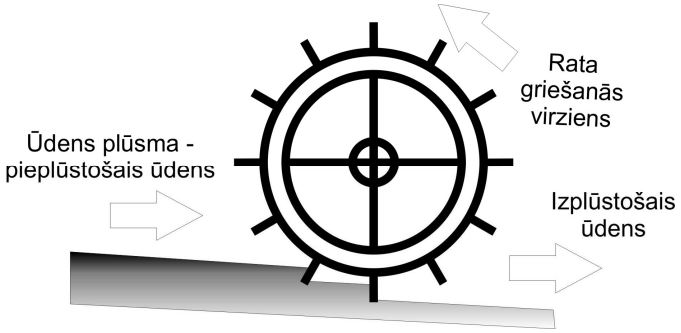


3.40. att. **Horizontālais ūdensrats**

Pēc veida, kā tiek paņemta enerģija no ūdens, ūdensratus iedala straumes ūdensratos, kas uzņem ūdens kinētisko enerģiju, un ūdensratos ar ūdens padevi no augšas (enerģija tiek iegūta, ūdens masai pārvietojoties no augstākas vietas uz zemāku vietu).

STRAUMES ŪDENSRATI

Vienkāršota straumes ūdensrata (undershot waterwheel – angl.) skice parādīta 3.41.att.



3.41. att. **Ūdens straumes rats** (vienkāršots modelis)

Tas ir vissenākais ūdensrata veids, kuru iegriež ūdens straume. Kustībā esošais ūdens triecas pret rata lāpstiņam, zaudējot daļu no kinētiskās enerģijas, un tādējādi iegriežot ūdensratu.

Šāda tipa ūdensrata priekšrocības:

- vienkārša konstrukcija bez sarežģītām detaļām;
- lēti materiāli (parasti koks, retāk metāls);
- nav nepieciešama augsta izgatavošanas precizitāte (lēni rotējošas masas, lielas pielaides izgatavošanai);
- nav nepieciešamas īpašas zināšanas gan tā izgatavošanai, gan arī izmantošanai;
- nav nepieciešamas lielas investīcijas ne paša rata izgatavošanā, ne arī būvkonstrukcijās.

Galvenie trūkumi:

- lietderības koeficients ap 20 % (Ž.Ponselota uzlabotajai versijai ar liektām ūdensrata lāpstiņām un īpašu ūdensrata gultnes formu – ap 60–70 %. Vairākās ASV universitātēs veiktie pētījumi rāda, ka, izmantojot modernus projektēšanas paņēmienus un mūsdienīgus materiālus, arī tradicionālajiem straumes ūdensratiem var iegūt līdz pat 34–40 % efektivitāti.)
- pētijumi rāda, ka visaugstākā efektivitāte šādam ūdensratam ir tad, kad tā lāpstiņas kustības ātrums ir 50 % no ūdens straumes kustības ātruma. Latvijas upēs straumes ātrums ir zem 1 m/s). Tas nozīmē, ka ūdensrata rotācijas ātrums ir zems (1…5 apgr/min).

- Jauda uz jebkuras rotējošas sistēmas, arī uz straumes ūdensrata, vārpstas ir aprēķināma pēc formulas:

$$P = F \cdot v = M \cdot \omega \ , \qquad (3.10)$$

kur P – ūdensrata jauda, W;

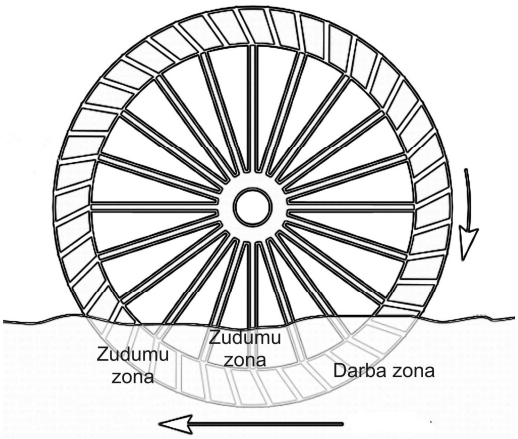
F – spēks, kas darbojas uz straumes ūdensrata lāpstiņu, N;

v – lāpstiņas kustības ātrums, m/s;

M – griezes moments uz straumes ūdensrata vārpstas, N·m;

ω – straumes ūdensrata griešanās frekvence, rad/s.

- No (3.10) formulas var secināt, ka mazu kustības ātrumu gadījumā vērā ņemamu jaudu iegūšanai jābūvē liela diametra ūdensrats ar lielām lāpstiņām, pie tam iegūtā lielā griezes momenta M pārvadei tālāk uz darba mašīnām, nepieciešama īpaši izturīga, liela izmēra vārpsta, kā arī nepieciešams pārvads, kas paaugstina tālāko vārpstu griešanās frekvenci, jo lielākajā vairumā gadījumu sabiedrībā tiek izmantotas darba mašīnas ar ievērojami augstākām griešanās frekvencēm (asinhrono elektrodzinēju rotācijas frekvenču rinda 3000 min^{-1}, 1500 min^{-1}, 1000 min^{-1}, 750 min^{-1}, 500 min^{-1})
- Būtisku iespaidu uz straumes ūdensrata darbību atstāj mainīgs ūdens līmenis upē.
  - Optimālais straumes ūdensrata darbības režīms ir gadījumā, kad apakšējā lāpstiņa ir pilnīgi iegremdēta ūdenī, bet ūdens līmenis nesniedzas pāri tai. Tad tiek iegūta maksimālā jauda.
  - Lietus periodā un plūdu periodā ūdens līmenis upē ceļas, un ar ūdeni pārklājas ne tikai lāpstiņas, kas saņem ūdens kinētisko enerģiju, bet arī tās



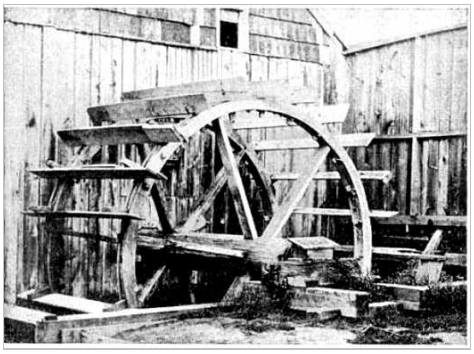
3.43. att. **Paaugstināta ūdens līmeņa ietekme uz straumes ūdensrata darbību**

lāpstiņas, kas vai nu vēl nav iegrimušas ūdens straumē, un tās, kuras atrodas tiešu plūsmas enerģiju saņemošo lāpstiņu ēnā, līdz ar to bremzējot ūdensratu, un radot zudumus (skat. 3.43. att.). Līdzīgi zudumus rada arī ūdensrata sānu malas un citas virsmas, kas saskaras ar ūdens straumi.

- Sausuma periodos, kad nokrišņi samazinās, samazinās arī ūdens līmenis upē, un samazinās arī straumes un lāpstiņas saskares laukums un arī straumes ātrums. Līdz ar to ļoti būtiski samazinās jauda uz straumes ūdensrata vārpstas. Ekstrēmos gadījumos var pat gadīties, ka ūdens līmenis ir tik zems, ka tas vispār nesniedz ūdensrata lāpstiņas – uz ūdensrata vārpstas vispār nav enerģijas.

Neskatoties uz augstākminētajiem trūkumiem, vietās ar pietiekoši lielu straumes ātrumu un ierobežojumiem citu tipu ūdens enerģijas iekārtu uzstādīšanai (ģeoloģiskie, ģeogrāfiskie, investīciju), kur nav nepieciešamas lielas jaudas, šāda tipa iekārtas joprojām tiek izmantotas (skat. 3.44.–3.46. att.).

3.44. att. **Divu straumes ūdensratu sistēma**



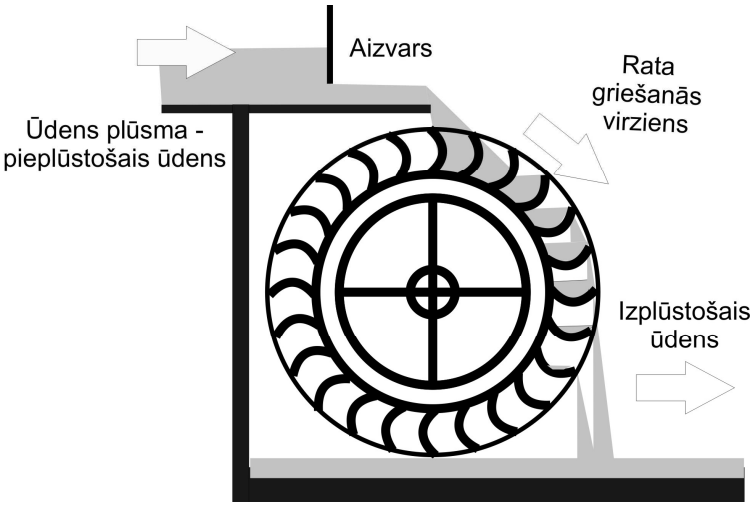
3.45. att. **Ūdensdzirnavas Bruklinā,** ASV, 1637. g.

3.46. att. **Straumes ūdensrats ar liektām lāpstiņām**

ŪDENSRATS AR AUGŠĒJO ŪDENS PADEVI

Vietās, kur bija vai nu dabiski izveidojusies ūdens līmeņu starpība (kalnaini apvidi), vai arī bija viegli ierīkot aizsprostus, kas ļāva pacelt ūdens līmeni (dziļas gravas ar atbilstošu grunts struktūru, u.c.), kā arī vietās, kur ūdens straumes ātrums bija ļoti mazs, bet ūdens pieplūde pietiekoša, tika uzstādīti ūdensrati ar augšējo ūdens padevi (overshot waterwheel – angl.) (skat. 3.47. att.).

Ūdens ūdensratā ieplūst nedaudz aiz tā augšējā punkta, piepildot starplāpstiņu telpu, kas atšķirībā no straumes ūdensrata starplāpstiņu telpas ir izveidota no vienas puses atvērta trauka veidā. Ūdens masa gravitācijas spēka ietekmē griež ūdensratu, tā apakšējā daļā izplūstot no starplāpstiņu telpas, jo starplāpstiņu telpas atvere ir pavērsta uz leju.



3.47. att. **Ūdensrats ar augšējo ūdens padevi**

Galvenā šāda ūdensrata iezīme – tiek ņemta gan ūdens plūsmas kinētiskā enerģija, bremzējot plūsmu starplāpstiņu telpā, gan potenciālās enerģijas izmaiņa, ūdens masai pārvietojoties no augstāka punkta uz zemāku punktu. Tā kā ūdensrati ar augšējo ūdens padevi tiek izmantoti vietās, kur ūdens kinētiskskā enerģija nav liela (mazs ūdens plūsmas ātrums), galveno enerģijas daļu sastāda potenciālās enerģijas izmaiņas izmantošana. Tā kā spēka lauks, kurā atrodas ūdens, ir gravitācijas lauks, tad arī potenciālās enerģijas izmaiņa jāapskata tieši smaguma spēka ietekmē.

Maksimālā teorētisko jaudu, ko var iegūt ar šāda veida ūdensratu, aprēķina, izmantojot formulu:

$$P = m \cdot g \cdot h \quad , \tag{3.11}$$

kur P – maksimālā teorētiskā jauda, W;

m – ūdens masa, kas tiek pārvietota no augstākā līmeņa uz zemāko līmeni, kg;

g – smaguma spēka paātrinājums;

h – augstumu starpība starp augšējo uz apakšējo līmeni.

Tomēr reālos apstākļos jāņem vērā tas, ka starplāpstiņu tilpuma aizpildījums mainās, ūdensratam griežoties – kustoties lejup, ūdens pakāpeniski iztek no starplāpstiņu telpas, tā samazinot ūdensrata jaudu.

Teorētiskie un praktiskie pētījumi rāda, ka ūdensrats ar augšējo ūdens padevi darbojas ar vislielāko efektivitāti, ja tas griežas ar vismazāko iespējamo rotācijas frekvenci, un vienlaicīgi spēj pārnest visu pienākošo ūdens plūsmu. Šādi izveidots ūdensrats samazina ienākošā ūdens kustības ātrumu līdz pat 10 reizēm. Vienlaicīgi efektīvai starplāpstiņu tilpuma aizpildīšanai nepieciešamas, lai ieplūstošā ūdens ātrums būtu vismaz 3 reizes lielāks, nekā ūdensrata aploces kustības ātrums, un pieplūdes pusē jābūt pietiekošam ieplūdes kanāla laukumam.

Galvenās priekšrocības ūdensratam ar augšējo ūdens padevi:

- Augsta efektivitāte – 60–80 %;
- vienkārša konstrukcija bez sarežģītām detaļām;
- lēti materiāli (parasti koks, retāk metāls);
- nav nepieciešama augsta izgatavošanas precizitāte (lēni rotējošas masas, lielas pielaides izgatavošanai);
- nav nepieciešamas īpašas zināšanas gan tā izgatavošanai, gan arī izmantošanai;
- nav nepieciešamas lielas investīcijas ne paša rata izgatavošanā, ne arī būvkonstrukcijās.

Galvenie trūkumi:

- jābūt ievērojamai ieejošā un izejošā ūdens augstumu starpībai, lai iegūtu vērā ņemamu enerģijas apjomu – nepieciešami papildus būvdarbi un citas investīcijas šādas iekārtas uzstādīšanai;

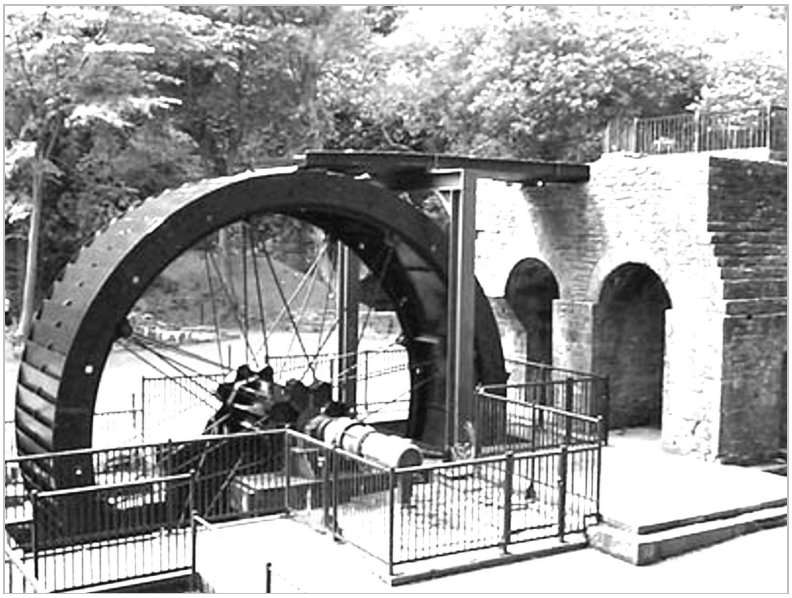
- ūdensrata diametram jābūt mazākam nekā izejošā un ieejošā ūdens augstumu starpībai, lai nodrošinātu ieplūdi no augšas, un brīvu ūdens izplūdi no starplāpstiņu telpas – tas samazina gan ūdensrata efektivitāti, gan arī pieprasa pielāgot pārvades iekārtas (piemēram, lai izveidotu ūdensratu ar 3 m diametru, nepieciešama ūdens līmeņu starpība vismaz 3,50 m);
- efektivitāti samazina konstrukcijas, kurās ūdens izplūde no starplāpstiņu telpas sākas, pirms lāpstiņas sasniedz apakšējo pozīciju;
- efektivitāti samazina arī konstrukcijas, kurās ūdens nepaspēj izplūst no starplāpstiņu telpas līdz pozīcijai, kad lāpstiņas sāk pārvietoties augšup;
- līdzīgi kā straumes ūdensratam, vērā ņemamu jaudu iegūšanai nepieciešami liela izmēra ūdensrati, kas ir materiālietilpīgi, ar mazu jaudas un iekārtas svara attiecību;
- Šāda ūdensrata griešanās virziens apakšējā tā punktā ir pretējs aizplūstošā ūdens virzienam. Paaugstināta ūdens līmeņa gadījumā izplūdes pusē var izrādīties, ka ūdensrats saskarās ar izplūstošā ūdens straumi, un tiek bremzēts (rodas zudumi);

Augstās efektivitātes un mazo investīciju dēļ arī šādi ūdensrati joprojām tiek izmantoti gan atpūtas vietās, gan arī enerģijas ieguvei (skat. 3.48. att.)

3.48. att. **Ūdensdzirnavas brīvdabas muzejā Užgorodā, Ukrainā**

Menas salas apdzīvotajā vietā Leksijā (Laxey), ūdensrats ar 70 pēdu diametru un rotācijas frekvenci 2,5 apgr./min nodrošināja 17 zirgspēku jaudu, tika izmantots ūdens atsūknēšanai no svina raktuvēm. Tas tika uzbūvēts 1854. gadā, un tika izmantots līdz pat 1929. gadam, kad raktuves stika slēgtas.

3.49. attēlā parādītais ūdensrats ir šobrīd zināmais lielākais augšējās padeves ūdenrats Eiropā, kurš piedzen elektroģeneratoru, tā jauda 25 kW.

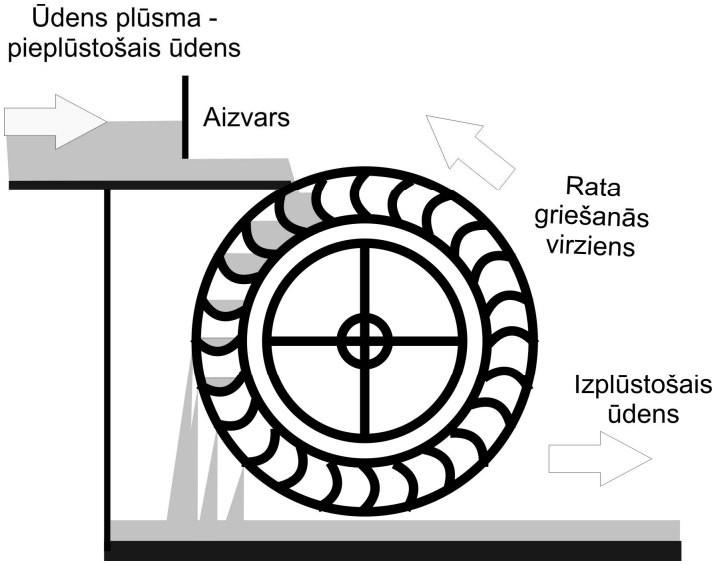


3.49. att. **Ūdensrats ar augšējo ūdens padevi** (Aberdulais Falls, Velsa, Lielbritānija)

Ņemot vērā svārstīgo ūdens līmeni gan ieplūdē, gan izplūdē, ūdensrati ar augšējo ūdens padevi tika modificēti, un izveidoti ūdensrati ar pretēju (pretplūsmas) griešanās virzienu (backshot or pitchback – angl.) un to tālākā modifikācija – ūdensrati ar ūdens padevi rata vārpstas augstumā.

Ūdensrata ar pretēju (pretplūsmas) griešanās virzienu uzbūve parādīta 3.50. attēlā. Kā redzams no attēla, šādā ūdensratā ūdens tiek padots nedaudz pirms tā augšējā punkta. Ūdensrats ir ļoti līdzīgs iepriekš apskatītajiem ūdens ratiem ar augšēju ūdens padevi, tikai uzstādīts it kā otrādi. Tā kā starplāpstiņu tilpnes aizpildās ar ieplūstošo ūdeni, tā svars smaguma spēka ietekmē sāk griezt ūdensratu, tikai griešanās notiek pretējā virzienā – tā, lai rata apakšējā daļa kustētos tajā pašā virzienā, kā aizplūstošais ūdens. Šāda konstrukcija līdz ar to nodrošina mazākus zudumus no rata un aizplūstošā ūdens saskares, un arī ūdensrata diametrs var būt vienāds vai pat lielāks par ieplūstošā un izplūstošā ūdens līmeņu starpību. Kā trūkums jāatzīmē tas, ka šāds

ūdensrata risinājums neļauj izmantot ieplūstošā ūdens kinētisko enerģiju, jo tā vektors ir vērsts pretēji rata griešanās virzienam. Tas pat zināmā mērā bremzē rata griešanos.

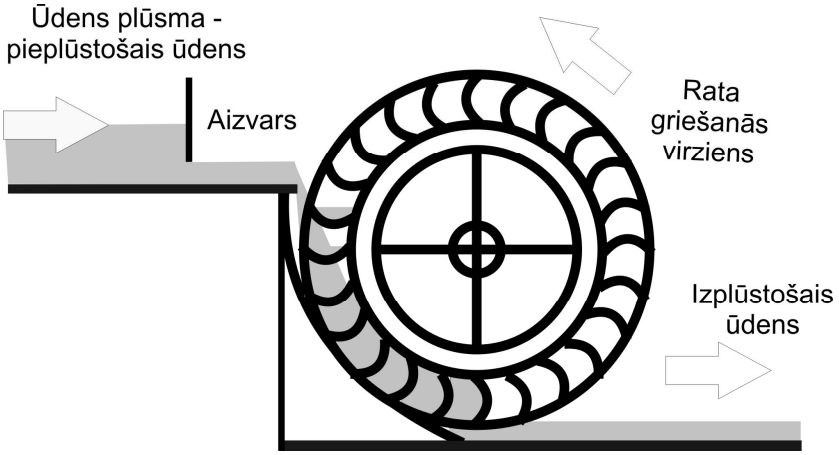


3.50. att. **Ūdensrats ar pretplūsmas griešanās virzienu**

Šāda tipa ūdensrati var strādāt pie ļoti lielām ūdens līmeņu svārstībām – tie darbojas, pat ja izplūstošā ūdens līmenis sasniedz ūdensrata ass līmeni (citu tipu ūdensrati apstājas vai tiek sagrauti pretējos virzienos plūstošu ūdens straumju ietekmē). Šie ūdensrati pat izmanto daļu no enerģijas, kas piemīt aizplūstošajai ūdens straumei. Kā vēl vienu šo ratu priekšrocību var atzīmēt arī mazākas izmaksas izplūdes kanālu izbūvē (vienkāršāku tehnisko prasību dēļ).

Vietās, kur ir ievērojama ūdens plūsma, bet nav iespējams izveidot lielu ieplūstošā un izplūstošā ūdens līmeņa starpību, bet nepieciešams liels griezes moments, izmanto ūdensratus ar ūdens padevi rata vārpstas augstumā (skat. 3.51. att.).

Būtiskais ieguvums – tiek izmantots liels ūdensrats – palielināts griezes moments, un īpaši izveidotā gultne neļauj ūdenim izplūst no rata pirms tas sasniedz zemāko punktu, kā arī tas, ka tiek pilnībā izmantota straumes enerģija.



3.51. att. **Ūdensrats ar ūdens padevi rata vārpstas augstumā**

Galvenais trūkums – palielinātie hidrauliskie zudumu saskarvirsmā starp ratu un gultni. Šādu ūdensratu efektivitāte ir ap 40...60 % – lielāka nekā straumes ūdensratu efektivitāte, bet mazāka kā pretplūsmas ūdensratu efektivitāte.

REAKCIJAS TURBĪNAS

Līdz ar pieprasījuma pieaugumu enerģijas piegādēs, attīstījās ūdens enerģijas iekārtas. Ievērojot, ka ūdens līmeņu starpība rada spiediena pieaugumu, inženieri un zinātnieki izveidoja pirmās ūdens turbīnas, kas izmantoja šo spiedienu starpību. Tās tiek sauktas par reakcijas (reaction – angl.) ūdens turbīnām, kuras samazina ūdens spiedienu, tam plūstot caur turbīnu, noņemto enerģiju pārvēršot cilvēkam izmantojamā formā. Šādas turbīna stiek izmantotas vietās ar vidēju un mazu ieplūstošā un izplūstošā ūdens līmeņu starpību.

PONSELOTA–FOURNEYRON TURBĪNA

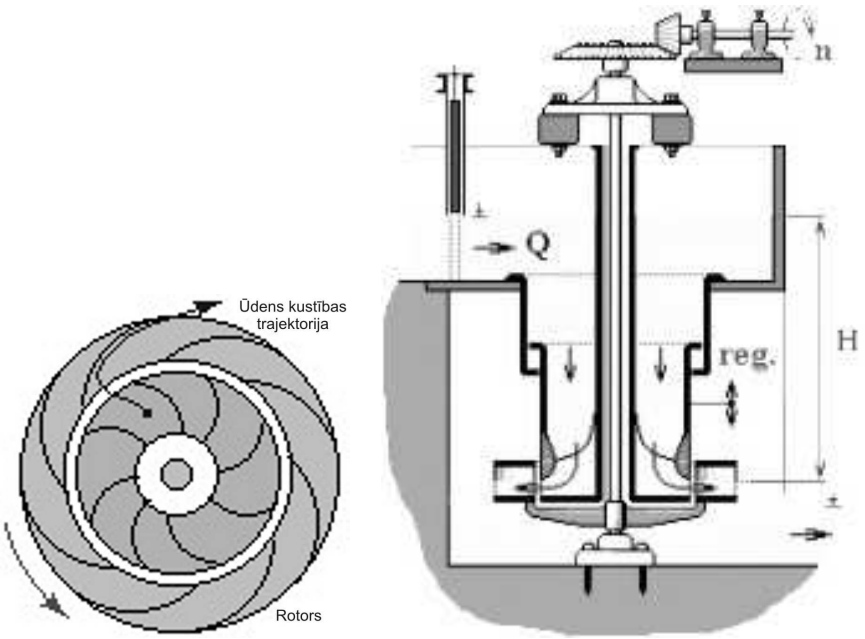
Kā pirmo turbīnu, kas izmanto nevis tikai ūdens svaru, bet arī tā kinētisko enerģiju, jāatzīmē Ž.V.Ponselota turbīnu (skat. 3.32. un 3.33. att.). Galvenā tās atšķirība no ūdensratiem – nav slēgtu tilpumu kā ūdensratiem ar augšējo ūdens padevi, bet tajā pašā laikā ļoti augsta efektivitāte, saglabājot vienkāršu konstrukciju.

Lāpstiņu izliekums Ž.V. Ponselota turbīnā bija izveidots ar tādu formu, ka ūdens plūsma, ieplūstot starplāpstiņu telpā, maina kustības virzienu, un nobremzējas, atdodot

visu enerģiju lāpstiņai, tajā pašā laikā, tā kā starplāpstiņu telpa nav noslēgta, samazinās zudumi no savstarpējās berzes un ieplūstošajai ūdens plūsmai pretī darbojošās starptelpā esošā ūdens plūsmas. Arī izplūde no starplāpstiņu telpas nav ierobežota – tā notiek brīvi.

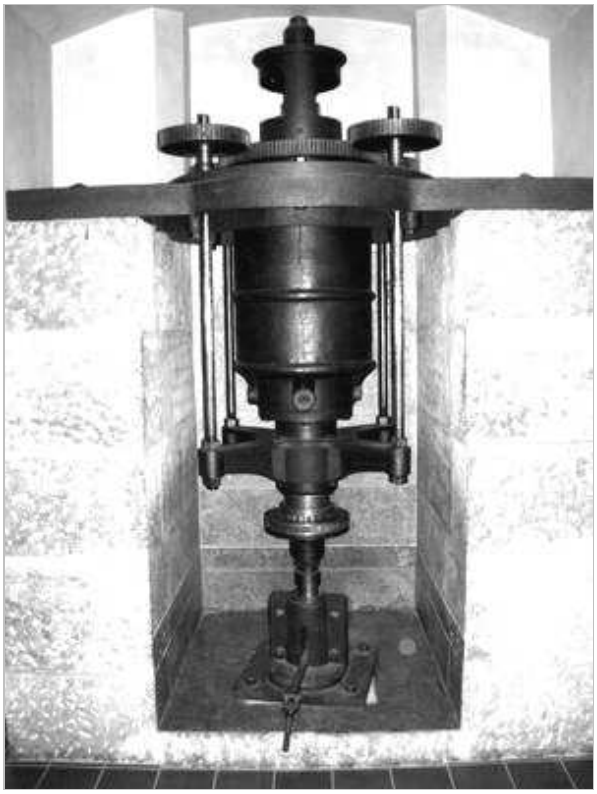
Ponselota turbīnas efektivitāte (60...70 %) un vienkāršā konstrukcija nodrošināja plašu tās pielietojumu 19. gadsimtā. Arī šobrīd vietās ar nelielu ūdens līmeņu starpību (līdz 2 m) un ievērojamām ūdens plūsmas svārstībām (pat četrkārša ūdens plūsmas izmaiņa) tā ir labs risinājums.

Citu risinājumu 1827. gadā piedāvāja franču inženieris Benuā Furneirons (Benoit Fourneyron). Viņš izpētīja gan Ponselota turbīnu, kā arī citus ūdensratu risinājumus, un ievēroja, ka visiem tiem ir viens būtisks trūkums – to jaudu nosaka ūdensrata diametrs un platums, kas būtiski sarežģī gan pašas iekārtas konstrukciju, gan arī būvdarbus. Lai novērstu šos trūkumus, B.Furneirons piedāvāja vertikālas ūdens padeves reakcijas turbīnu (skat. 3.52. un 3.53. att.)



3.52. att. **B.Furneirona turbīna – turbīnas virsskats un sistēmas sānskats**
(resurss: http://mve.energetika.cz/historicketurbiny/fourneyron.htm)

Furneirona izveidotā turbīna ir ar vertikālu rotācijas asi, un par savu izgudrojumu viņš saņēma 6000 franku naudas prēmiju no Francijas Industrijas Veicināšanas asociācijas kā pirmā komerciālā ūdens turbīna. Asociācijai tika prezentēta turbīna ar 4,5 kW jaudu.



3.53. att. **Furneirona turbīna**
(resurss: http://www.deutsches-museum.de/en/collections/machines/power-engines/water-turbines/fourneyron-turbine-1834/).

Galvenā turbīnas iezīme bija vertikālā ūdens plūsma, kura pa īpašas formas liektām vadotnēm tika padota uz turbīnu, pirms saskares ar turbīnas rotoru pagriezta tā, lai plūsma perpendikulāri triecas pret rotora lāpstiņam, pēc tam, līdzīgi kā Ponselota turbīnas risinājumā, bremzējoties lāpstiņu izliekumā un tā atdodot visu enerģiju turbīnas rotoram.

Regulēšanai tika izmantots īpašs iebūvēts aizvars, kuru paceļot vai nolaižot, tika mainīta turbīnas jauda un rotācijas frekvence.

Jāievēro, ka atšķirībā no visiem iepriekšējiem risinājumiem Furneirona turbīna darba laikā izmanto visas lāpstiņas, nevis pusi, kā ūdensratos ar augšējo ūdens padevi, vai pat tikai ceturto daļu, kā ūdensratos ar ūdens padevi ūdensrata ass augstumā. Arī Ponselota turbīna izmantoja mazāk kā 50 % lāpstiņu.

Turpinot savas turbīnas uzlabošanu, jau 1837. gadā Funeirons prezentēja sabiedrībai turbīnu ar 45 kW jaudu, un tiem laikiem fantastiski augstu rotācijas frekvenci – 2300 apgr./min. Pie tam turbīnas rotora diametrs bija tikai viena pēda (ap 30,5 cm), un tas svēra tikai 16 kg. Tā darbojās pie ūdens staba augstuma 108 m, un ūdens plūsma bija 0,035 m^3/s. Turbīnas efektivitāte sasniedza 80 % (skat. 3.53. att.). Kā būtisku Furneirona turbīnas pielietojuma piemēru var atzīmēt turbīnas uzstādīšanu uz Niagāras ūdenskrituma 1895. gadā, izveidojot pasaulē pirmo hidroelektrostaciju.

Tika izveidoti arī Furneirona turbīnas risinājumi ar horizontālu rotācijas asi, lai atvieglotu darba mašīnu piedziņu.

JONVĀLA TURBĪNA

Citu risinājumu piedāvāja Feu Jonvāls (Feu Jonval), 1843. gadā izgudrojot modificētu vertikālās ass turbīnu (3.54. att.).

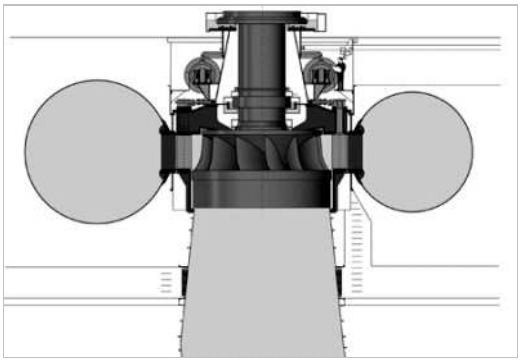
3.54. att. **Jonvāla (Feu Jonval) turbīna** (izgatavota 1885. gadā, izmantota gandrīz 100 gadus Ženēvā) (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Schiffbau_jonval2.jpg)

To piedzina pa īpašām vadotnēm slīpā leņķī pret turbīnas diska rotācijas plakni virzīta ūdens plūsma, jo Jonvāls pamanīja, ka efektīvai ūdens enerģijas izmantošanai nepieciešams ūdens plūsmu padot īpašā leņķī. Jonvāla turbīnas un to uzlabotā versija – N.Bērnhema (N.Burnham) 1859. gadā izgudrotās turbīnas (vienkāršāk izgatavojamas, labāks blīvējums, u.c.) daudzus gadus tika plaši pielietotas gan Eiropā, gan ASV.

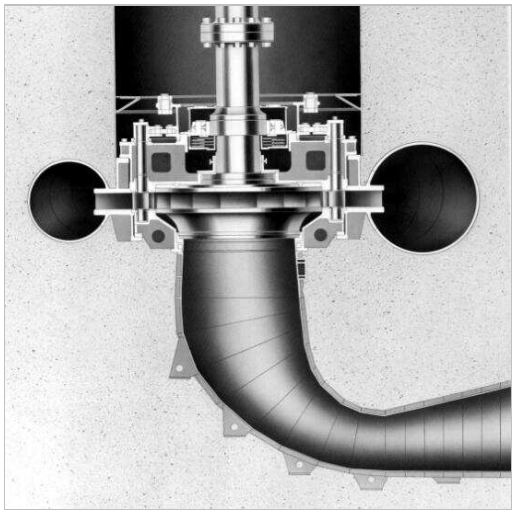
FRENSISA TURBĪNA

Izpētot Ž.V.Ponselota turbīnu ar uz turbīnas centru virzītu ūdens plūsmu un B.Furneirona turbīnu ar no turbīnas centra uz ārpusi vērstu ūdens plūsmu, Džeimss B.Frensiss (James B. Francis) 1849. gadā piedāvāja savu reakcijas turbīnas risinājumu (skat. 3.55. att.).

a)



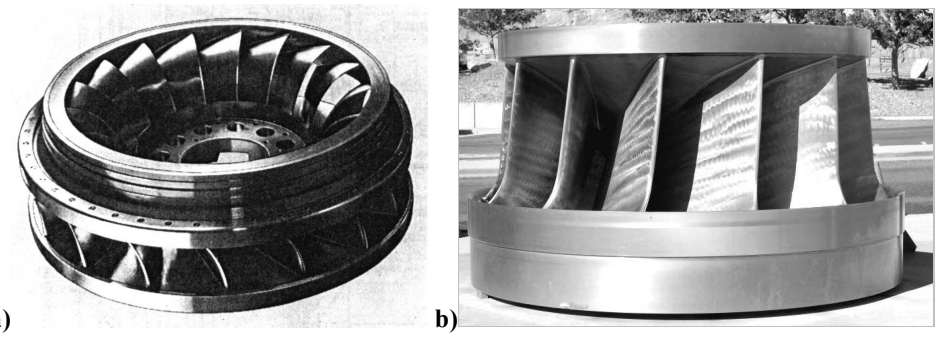
b)



3.55. att. **Frensisa turbīna – sānskats kopā ar ieplūstošā ūdens vadotni un izplūdes kolektoru:** a) pirmie projekti ar zema profila turbīnu, b) moderns risinājums, (resurss: http://www.energymanagertraining.com/power_plants/Hydraulic_Turbine.htm)

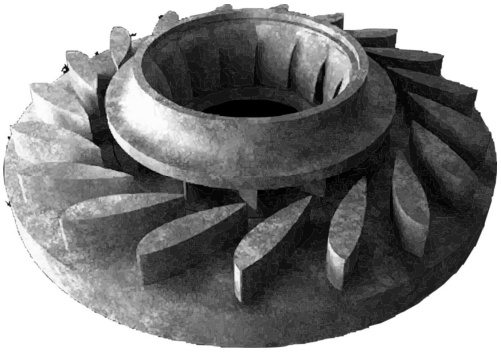
Frensisa turbīna apvieno sevī gan radiālo, gan aksiālo plūsmu, kaut gan tā tiek saukta par radiālās plūsmas turbīnu, kurā ūdens plūst visapkārt turbīnai, triecas pret turbīnas lāpstiņām, gar liektajām lāpstiņām izejot cauri turbīnai, bremzējoties, un turpinot kustību aksiālā virzienā, nonākot izplūdes pusē (skat. 3.56. un 3.57. att.).

Šādas turbīnas efektivitāte saniedza 90 %. Turbīnas lāpstiņas, kopskaitā no 9 līdz 19, ir ar nemainīgu profilu un īpašu liekumu.



3.56. att. **Frensisa turbīnu rotori:**
a) pirmie dizainiskie risinājumi, b) modernais rotora dizains.

3.57. att. **Frensisa turbīna – skats no apakšas**

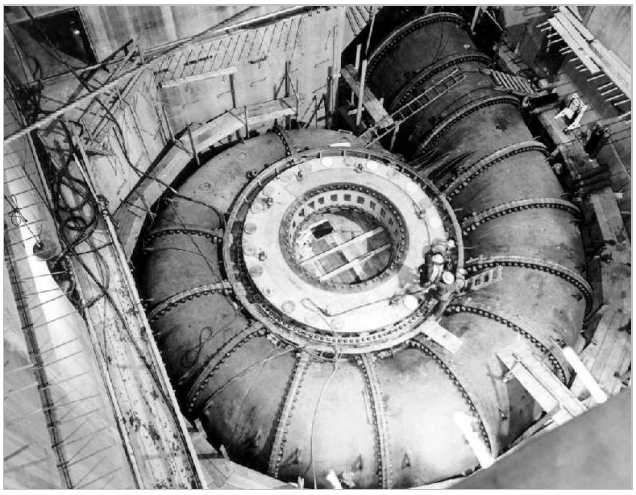


3.58. att. **Frensisa turbīna – rotors un vadotnes**

Dž.Frensisa ieguldījums turbīnu attīstībā saistīts arī ar sistēmiskās pieejas un zinātnisko pētījumu metožu izmantošanu turbīnu pētīšanā. Viņa pielietotās

matemātiskās un grafiskās metodes ļāva industrializēt turbīnu izstrādi, ļaujot izveidot augsti efektīvas turbīnas projektus atbilstoši katras konkrētas vietas prasībām.

Frensisa turbīnas vadotņu un turbīnas kopskats dots 3.58. att. Vadotnes var būt gan nekustīgi piestiprinātas, gan arī ar iespēju mainīt to leņķi attiecībā pret rotora lāpstiņām.



3.59. att. **Frensisa turbīna ar ūdens plūsmas vadotni**
(Grand Coule dambis ASV, resurss:
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Francis_Turbine_inlet_scroll_Grand_Coulee_Dam.jpg)

Būtisks Dž.Frensisa atklājums bija gliemežnīcas tipa ūdens plūsmas vadotnes izveide turbīnas apgādei ar ūdeni. Kā var redzēt no 3.59. attēlā, vadotnes liekuma rādiuss un diametrs samazinās. Samazinot liekuma rādiusu, tiek iegūts pieaugošs ūdens plūsmas kustības ātrums, un samazinot cauruļvada diametru, tiek nodrošināta vienmērīga ūdens padeve pa visu turbīnas aploci. Vienlaicīgi izveidojas ūdens virpulis, kurš, iedarbojoties uz turbīnu, atdod enerģiju turbīnai. Turbīnas izejā ūdens plūst ārā ar nelielu kinētisko enerģiju. Ūdens spiediens samazinās līdz atmosfēras spiedienam.

Būtisku attīstību un ilgtspējīgas bezatteikuma darba laika pieaugumu turbīnu ražošanā un ieviešanā nodrošināja 1890. gadā izgudrotie šķidruma gultņi, kas ļāva izveidot lielizmēra rotējošas sistēmas.

Frensisa turbīnas ir visplašāk lietotās turbīnas mūsdienās, un darbojas ļoti plašā ūdens staba augstuma diapazonā – no dažiem metriem līdz pat vairākiem simtiem

metru (8-700 m), un plašā jaudu diapazonā – no dažiem kilovatiem līdz pat 1000 megavatiem.

Vēl viena būtiska Frensisa turbīnu īpatnība – tās var darboties arī sūkņa režīmā, nepieciešamības gadījumā sūknējot ūdeni augšā uz rezervuāru, un brīdī, kad nepieciešama enerģija, pārslēgties enerģijas savākšanas režīmā.

3.60. att. **Frensisa turbīnas rotors**
Trīs Aizu dambis (The Three Gorges Dam), Ķīna (resurss:
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sanxia_Runner04_300.jpg)

3.61. att. **Frensisa turbīnas rotora ievietošana (750 MW)**
Grand Coulee dambis, ASV, (resurss: www.usbr.gov)

PROPELLERA TURBĪNA

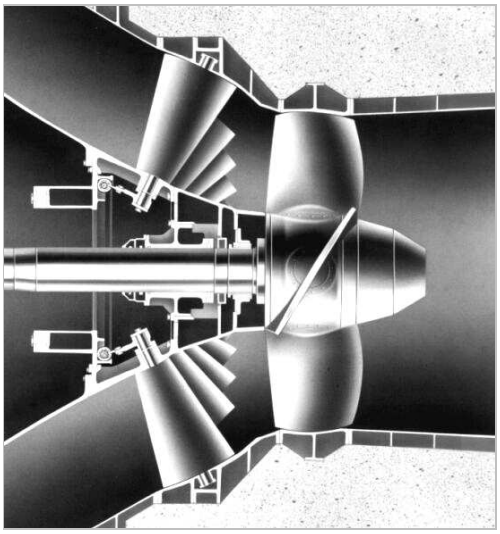
Propellera turbīnas piedzen propelleri ar nemainīgu lāpstiņas slīpuma leņķi. Tās tiek lietotas vietās ar mazu ūdens staba spiedienu – sākot ar 0,5 m, un to jaudas diapazons ir no dažiem simtiem vatu līdz 100 MW. Šādu turbīnu priekšrocība – mazs izmērs, iespēja ievietot tieši cauruļvadā.

Populārākās ir tubulārās turbīnas (skat. 3.62. att). To vārpstas tiešā veidā savieno turbīnas rotoru ar elektroģeneratoru.

Tiek izmantotas arī tubulārās turbīnas ar pārnesumkārbu, lai iegūtu augstākus apgriezienus turbīnas izejā, tādējādi samazinot elektroģeneratora izmērus.

Gadījumos, kad ir jāpasargā ģenerators no ūdens iedarbības (agresīva vide, u.c.), izmanto arī atdalītas sistēmas, kurās turbīna atrodas zem ūdens, bet ģenerators – virs ūdens. Piedziņai tiek izmantots siksnas pārvads.

Neparasts risinājums izmantots Straflo turbīnās – tajās turbīnas rotors apvienots ar ģeneratora rotoru (skat. 3.63. att.)

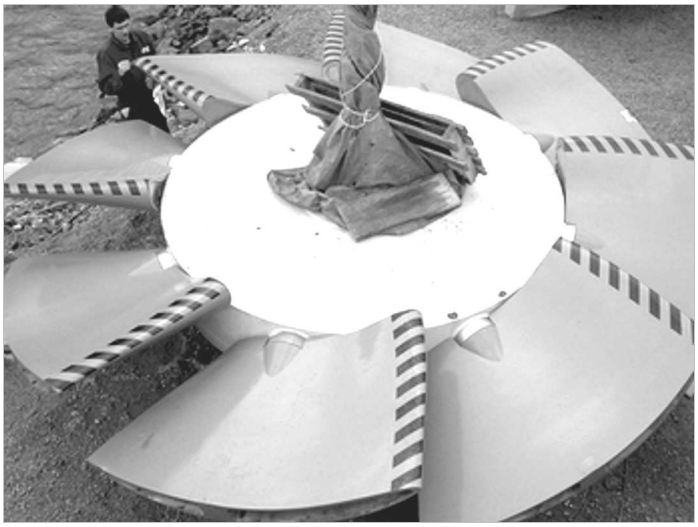


3.62. att. **Tubulāras turbīnas dizains** (resurss: http://www.energymanagertraining.com/power_plants/Hydraulic_Turbine.htm)

3.63. att. **Straflo turbīna ar iebūvētu ģenratora rotoru** (resurss: http://www.andritz.com/dk/hydro/oohm-hydro-products-service-2/hydro-products-and-services-large-hydro/hydro-products-and-services-large-hydro-turbines/hydro-products-and-services-large-hydro-turbines-straflo-turbines.htm)

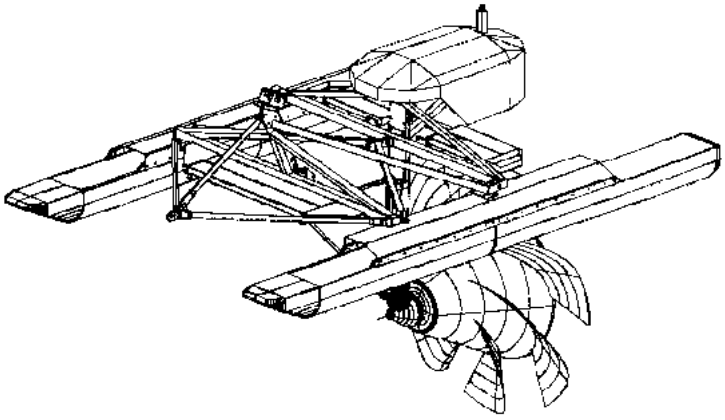
Ļoti zema ūdens staba augstuma gadījumos lieto VLH (Very Low Head) turbīnas (skat. 3.64. un 3.65. att.). Tās ir videi draudzīgas (zivju bojāejas rādītājs mazāks kā 5 %).

3.64. att. **VLH turbīna, installēta Millau, Francijā** (resurss: http://www.waterpowermagazine.com/graphic.asp?sc=2049758&seq=3)



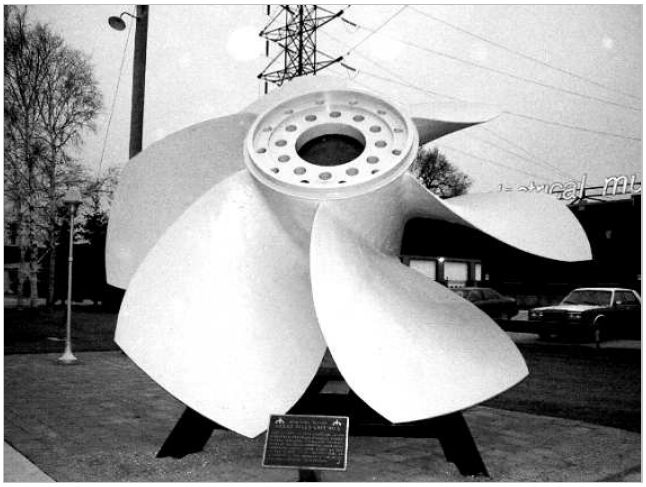
3.65. att. **VLH turbīnas rotors, Millau, Francijā** (resurss: http://www.waterpowermagazine.com/graphic.asp?sc=2049758&seq=2)

Taisona (Tyson) turbīnas ir paredzētas iegremdēšanai straujās upēs, vai nu nostiprinot tās upes gultnē, vai arī pie peldlīdzekļa – laivas vai baržas. Tās lieto arī jūrās – enerģijas ieguvei no jūras straumes (skat. 3.66. att.).



3.66. att. **Taisona turbīnas skice – stiprinājums pie pontoniem** (resurss: http://permaculturewest.org.au/ipc6/ch08/shannon/index.html)

Piemērs ilglaicīgai jaudīgas propellertipa turbīnas pielietojumam - 4826 mm diametrā, 20880 kW jaudas turbīna, Manitobas Great Falls hidroelektrostacijas propellerturbīna (skat. 3.67. att.).



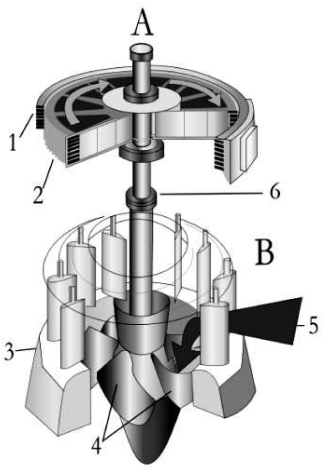
3.67. att. **Propellerturbīna, Manitobas Enerģētikas muzejs**

KAPLĀNA TURBĪNA

Kaplāna turbīna ir reakcijas turbīna – propellera tipa rotors ar lāpstiņām, kurām ir maināms leņķis (skat. 3.68. att.). To 1913. gadā izgudroja austriešu profesors Viktors Kaplāns (Viktor Kaplan).

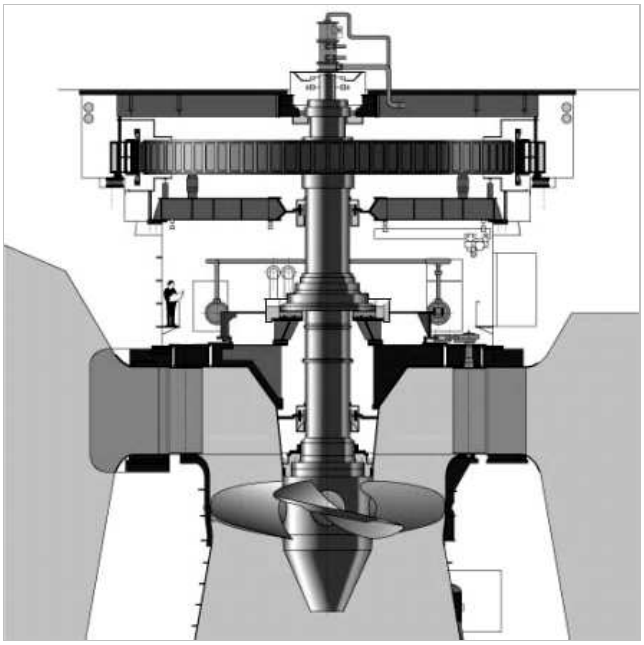
Šī tipa turbīna aizpildīja ūdens energoiekārtu segmentu, kurš ilgu laiku bija tukšs – ļoti zems ūdens staba augstums un liela plūsma – segments, kurā Frensisa turbīnas darbojās ļoti neefektīvi.

Viktora Kaplāna izgudrojumam pirmais patents tika pieteikts jau 1912. gadā, tomēr kavitācijas problēmu dēļ tam nebija reāla pielietojuma. Pirmā turbīna demonstrācijas



3.68. att. **Kaplāna turbīnas uzbūves shēma:**
A – ģenerators, B – turbīna,
1 – ģeneratora stators, 2 – ģeneratora rotors, 3 – ūdens ieplūdes vadotnes, 4 – rotors ar regulējamām lāpstiņām, 5 – ūdens plūsma, 6 – savienojošā vārpsta ar gultņiem.

nolūkā tika uzstādīta Podebratijā, Čehoslovākijā. Sākot ar 1922. gadu firma Voith Kaplāna turbīnas ar 800 kW jaudu sāka plaši ieviest upju spēkstacijās (skat. 3.69. att.), bet 1924. gadā Zviedrijās pilsētā Lilla Edet tika uzstādīta pirmā 8 MW turbīna (skat. 3.70. att.), kas kļuva par apliecinājumu Kaplāna turbīnu komercializācijas veiksmei.



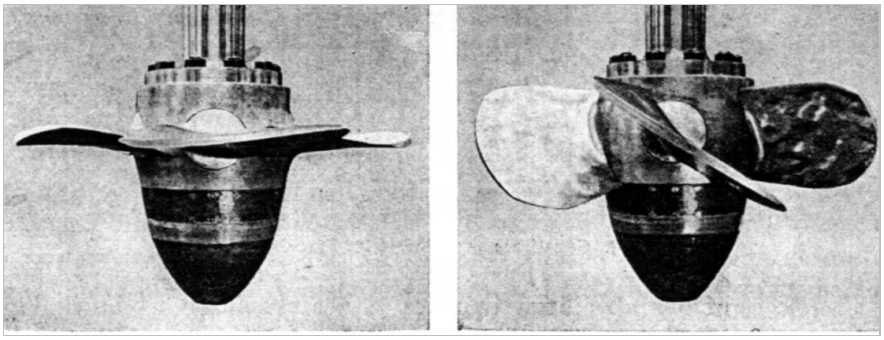
3.69. att. **Vertikālā Kaplāna turbīna – kopskats (Voith-Siemens)**

3.70. att. **Kaplāna turbīnas darba rats** (resurss: http://www.andritz.com/ANONIDZ5F43B5FF11C51613/hydro-media-picture-gallery-large-hydro-kaplan-turbines)

Kaplāna turbīna ir iekšplūsmas (plūsma no ārpuses uz iekšpusi) reakcijas turbīna, kurā veiksmīgi kombinētas radiālā un aksiālā ūdens plūsma. Līdzīgi kā Frensisa turbīnai, arī Kaplāna turbīnai ir spirālveida ieplūdes kanāls, kas aptver turbīnu no visām pusēm, un nodrošina gan tangenciālu ūdens plūsmu, gan arī vienmērīgu ūdens padevi uz visām turbīnas lāpstiņām, liekot tai griezties. Izplūdes kanāls ir ar īpašu profilu, kas veicina nobremzētā ūdens ātrāku aizvadīšanu no turbīnas telpas.

Lai būtu darba režīmā, turbīnai nav jāatrodas apakšējā līmenī, ja vien turbīnas pieplūdes un izplūdes puses ir piepildītas ar ūdeni. Vienīgi jāņem vērā tas, ka augstāks turbīnas novietojums radīs sūkšanas efektu ieplūdes pusē, kas var radīt kavitācijas efektu, kas savukārt var radīt nopietnus bojājumus gan turbīnai, gan iesūkšanas kanālam. Jāņem vērā arī tas, ka iesūkšanas kanālam jāiztur gan pārspiedieni, gan spiediens zem atmosfēriskā.

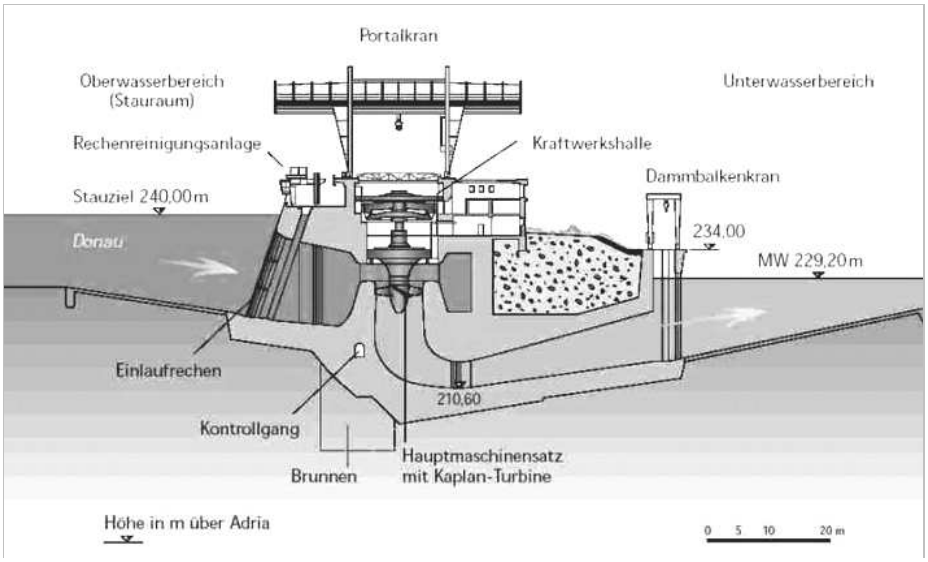
Maināms turbīnas lāpstiņu leņķis (skat. 3.71. att.) ļauj turbīnai strādāt ar augstu efektivitāti – ap 90 %, plašā spiedienu un plūsmu diapazonā (ļoti zemu ūdens staba spiedienu zonā efektivitāte samazinās).



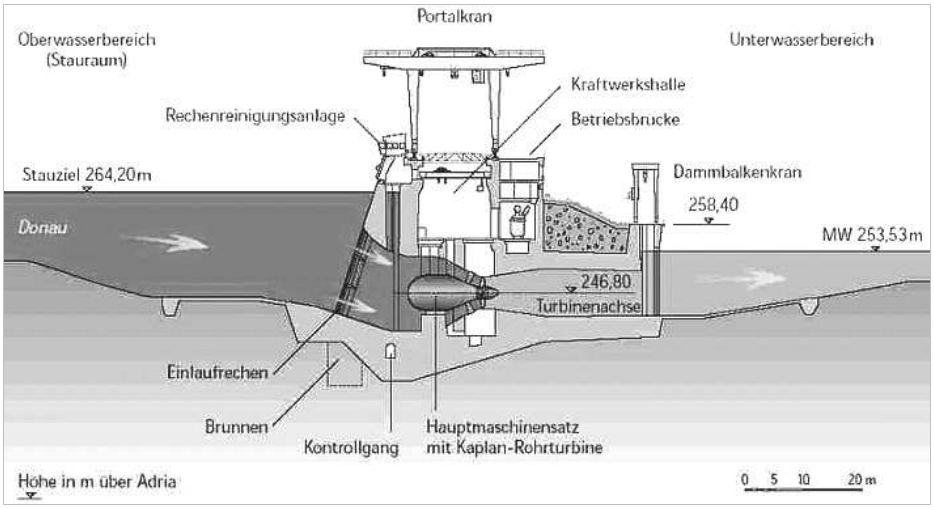
3.71. att. **Kaplāna turbīnas lāpstiņu regulēšanas iespējas**

Būtiska Kaplāna turbīnas iezīme ir zemais zivju traumēšanas rādītājs, kura dēļ daudzos gadījumos moderno spēkstaciju projektos Kaplāna turbīnas aizstāj Frensisa turbīnas. Jāatzīmē, ka kritisks elements Kaplāna turbīnu izmantošanā ir lāpstiņu pagriešanas mehānisma hidropiedziņas sistēmas uzraudzība un regulāras apkopes un remonti, jo nav pieļaujama pat visniecīgākā hidrosistēmas eļļas noplūde upē.

Kaplāna turbīnu uzstādīšanai nepieciešamas īpašas būvkonstrukcijas, un tās var uzstādīt gan vertikāli, gan horizontāli – paralēli ūdens plūsmai (skat.3.72. un 3.73. att.).



3.72. att. **Vertikāli novietota Kaplāna turbīna**



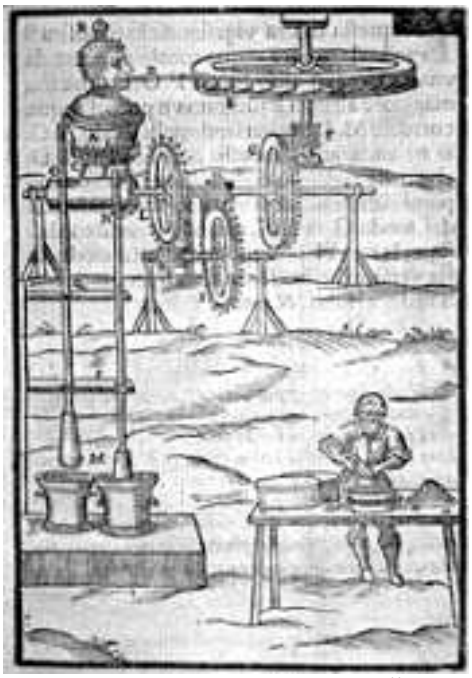
3.73. att. **Horizontāli novietota Kaplāna turbīna**
(VERBUND-Austrian Hydro Power projekts, resurss: www.verbund.at ,
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kraftwerk_Ybbs-Persenbeug_Maschinenhaus1.jpg).

Kaplāna turbīnu projektēšana, izgatavošana un uzstādīšana ir ļoti dārgs un sarežģīts process, tomēr tām ir ļoti ilgs darbamūžs – vairāki desmiti gadu.

IMPULSA TURBĪNAS

Impulsa turbīnas samazina pieplūstošā ūdens ātrumu – darbojas, izmantojot impulsa nezūdamības likumu. Uz šādas turbīnas lāpstiņām tiek virzīta ūdens strūkla ar ievērojamu ātrumu. Lāpstiņu izliekums maina ūdens kustības virzienu, vienlaicīgi bremzējot ūdens plūsmu, un saņemot spēka impulsu. Tā rezultātā sāk griezties impulsa turbīnas rotors, kas tālāk piedzen darba mašīnas. Ūdens no turbīnas izplūst ar minimālu ātrumu, jo ir atdevis savu enerģiju turbīnai.

Kaut arī impulsa turbīnu apraksti atrodami ļoti senos rakstos (piemēram, Aleksandrijas Hēra aprakstītā rotaļlieta, kas rotācijas nodrošināšanai izmanto sakarsētu tvaiku), pirmais apraksts par reālu impulsa turbīnu izmantošanu atrodams tikai 17. gs. Džovanni Brankas (Giovanni Branca) 1629. gadā aprakstā ar tvaiku piedzītās turbīnas izmantošanu graudu smalcināšanai (skat. 3.74. att.)



3.74. att**. Tvaika turbīnas izmantošana graudu smalcināšanai**
(Giovanni Branca, Le machine, Rome 1629, fig. XXV)

Lai iegūtu pietiekoši lielu ūdens strūklas kustības ātrumu, ūdens staba spiediens, kas ir vienlaicīgi arī paceltā ūdens potenciālā enerģija, jāpārvērš kinētiskajā enerģijā, tiek izmantota īpaša sprausla, ar kuras palīdzību ūdens strūkla tiek novirzīta uz turbīnas lāpstiņām.

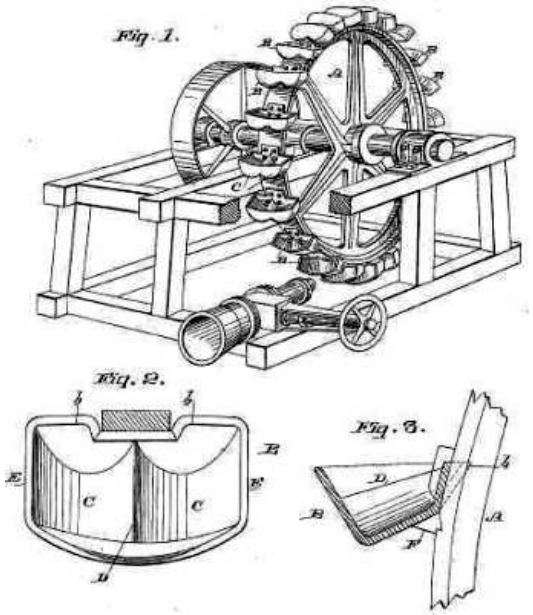
Ūdens staba spiediens tiešā veidā neiedarbojas uz impulsa turbīnas lāpstiņām, un turbīnai nav jābūt iegremdētai ūdenī.

Tā kā impulsa turbīnas darbināšanai nepieciešams augsts spiediens, tās tiek lietotas vietās ar iespējami augstu ūdens staba spiedienu (lielu augšējā un apakšējā līmeņa augstumu starpību).

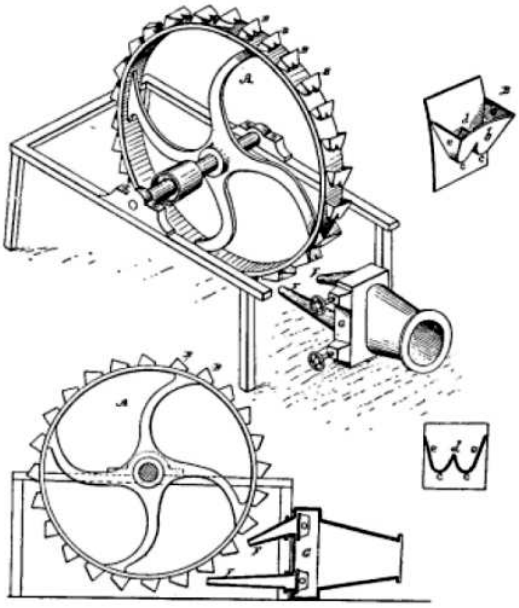
KNIGHT-PELTON TURBĪNA

Impulsa turbīnu vēstures aizsākumi meklējami 1866. gadā, kad Kalifornijas dzirnavnieks Samules Naits (Samuel Knight) izgatavoja ūdens turbīnu, kas darbojās atšķirīgi no tolaik zināmajām – augstspiediena strūklas zelta skalojamo ierīču darbības principa iespaidots, viņš izveidoja turbīnu, kura uztvēra brīvi kustošas augstspiediena ūdens strūklas enerģiju ar kausiņiem, bremzējot, un tā parveidojot ūdens kinētisko enerģiju turbīnas rotācijas kinētiskajā enerģijā.

Tālāku virzību impulsa turbīnu segmentā nodrošināja Lestera Peltona (Lester Pelton) izgudrojums. Viņa izgudrojums – impulsa turbīna ūdens enerģijas izmantošanai, tika patentēts 1880. gadā. Vēsturnieku pētījumi (W. F. Durand of Stanford University in Mechanical Engineering, 1939. g.) liecina, ka, līdzīgi kā daudzi citi ģeniāli izgudrojumi, arī šis ir izgudrots it kā nejauši – L.Peltons vērojis rotējošu turbīnu, kurai tajā brīdī novirzījies plūsmas novirzītājs – tā vietā, lai ieplūstu starplāpstiņu telpā un pildītu to ar ūdeni, ūdens strūkla triekusies pret lāpstiņām slīpā leņķī, un daļa no ūdens šļākusies ārā no starplāpstiņu telpas. Tā vietā, lai grieztos lēnāk, turbīna sākusi griezties ātrāk. Balstoties uz redzēto, L.Peltons izveidoja gan īpašu turbīnas ratu, gan arī īpašu regulējamu sprauslu, izveidojot pirmo impulsa turbīnas prototipu (skat. 3.75. un 3.76. att.).

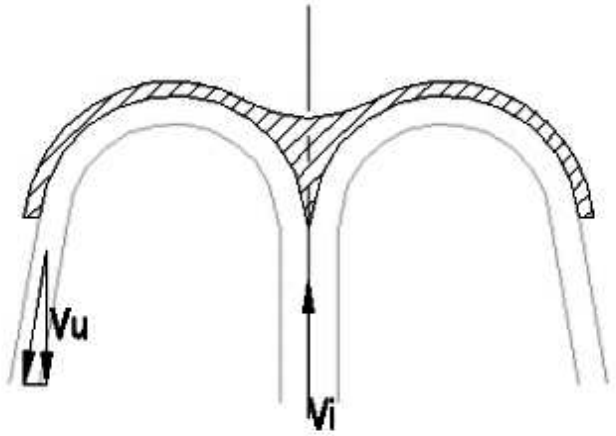


3.75. att. **L.Peltona oriģiālajā patentā iekļauto attēlu kopijas** – 1. daļa
(resurss: www.freebase.com/view/wikipedia/images/commons_id/1738831)



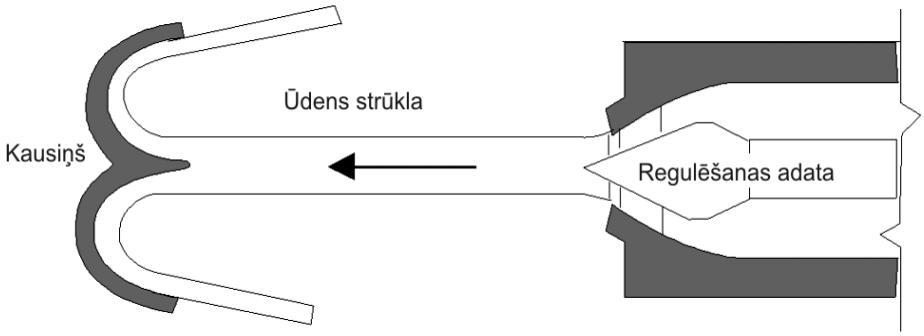
3.76. att. **L.Peltona oriģinālajā patentā iekļauto attēlu kopijas** – 2. daļa
(resurss: www.freebase.com/view/wikipedia/images/commons_id/1738831)

Galvenais elements L.Peltona izgudrojumā bija lāpstiņa – kausiņš ar dubultliektu virsmu (skat. 3.77. att.). Virsmām bija cilindriska forma. Ūdens strūkla tika virzīta uz virsmu savienojuma vietu, tur tā sašķēlās divās daļās, mainot kustības virzienu, bremzējoties un ar nelielu ātrumu atstājot kausiņu.

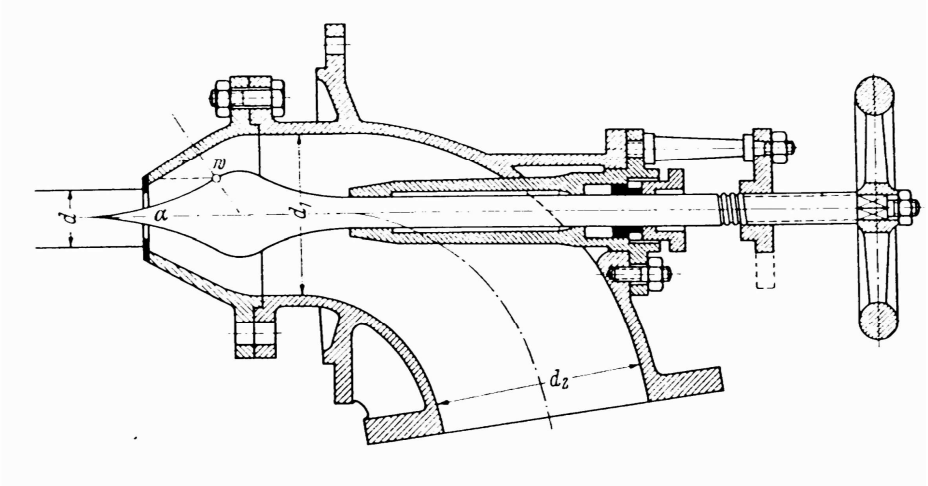


3.77. att. **Ūdens plūsmas virzieni Peltona turbīnas lāpstiņas kausā**

Tik pat būtisks izgudrojuma sastāvdaļa bija arī regulējama sprausla, ar kuras palīdzību tika veidota ūdens strūkla, un bija iespējams regulēt tās parametrus (skat. 3.78. att.).

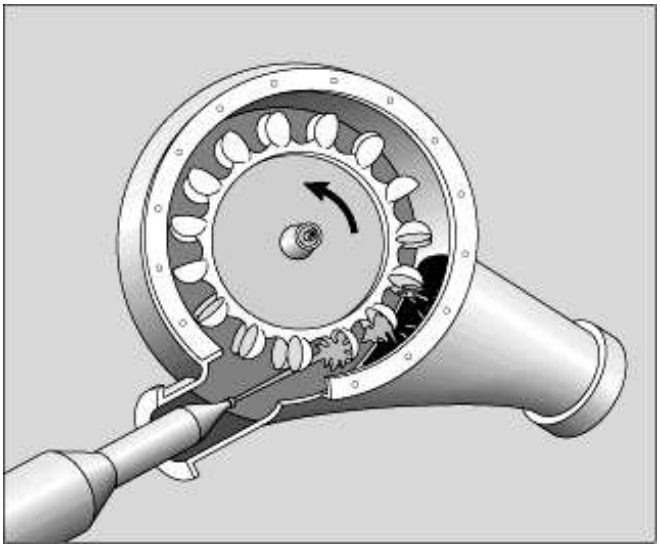


3.78a. att. **Peltona turbīnas regulējamā sprausla**



3.78b. att. **Peltona turbīnas regulējamās sprauslas izpildījums**

Peltona turbīnas kopskats un darbības princips dots 3.79. attēlā.



3.79. att. **Peltona turbīna darbībā** (resurss: http://apps1.eere.energy.gov/consumer/your_home/electricity/index.cfm/mytopic=11120)

Peltona turbīnas darbarata izpildījums redzams 3.80. attēlā.

3.80. att. **Peltona turbīnas rats**

Peltona turbīnas darbības princips balstās uz hidrauliskās potenciālās enerģijas pārvēršanu kinētiskajā enerģijā. Izsakot no enerģijas vienādojumiem ātruma komponenti *v*, iegūstam ūdens strūklas ātruma un ūdens staba spiediena sakarību:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \ , \qquad (3.12)$$

kur v – ūdens strūklas kustības ātrums, m/s;

h – ūdens staba spiediena augstums, m;

g – smaguma spēka paātrinājums, m/s^2.

Pieņemot turbīnas kausiņa sākuma ātruma apzīmējumu *u*, un pieņemot, ka gan ūdens strūklas, gan turbīnas kausiņa kustības vektori ir vienā virzienā, kā arī iegūstam strūklas relatīvā sākuma ātruma izteiksmi v_i attiecībā pret turbīnas kausiņu:

$$v_i = v - u \qquad (3.13)$$

Pieņemot, ka ūdens strūklas ātrums ir lielāks nekā turbīnas kausiņa ātrums, un to, ka ūdens netiek uzkrāts, bet gan iztek no kausiņa ārā, ūdens masai, kas ieplūst kausiņā, jābūt vienādai ar izplūstošā ūdens masu. Pieņemot, ka ūdens strūklas diametrs ir nemainīgs un to, ka ūdens strūklas relatīvais ātrums pret turbīnas kausiņu ir nemainīgs, iegūstam izplūstošā ūdens strūklas beigu ātruma v_f aprēķina formulu:

$$v_f = -v_i + 2 \cdot u \qquad (3.14)$$

Optimālas turbīnas rotācijas frekvences noteikšanai jāpieņem, ka izplūstošā ūdens ātrums ir vienāds ar nulli – ūdens ir zaudējis visu savu kinētisko enerģiju. Tad, izmantojot (3.13) formulu, iegūstam optimālo turbīnas kausiņa kutības ātrumu:

$$-v_i + 2 \cdot u = 0 \ , \qquad u = \frac{v_i}{2} \qquad (3.15)$$

Ūdens strūklas radīto spēku F uz turbīnas kausiņu var aprēķināt, izmantojot spēka impulsa nezūdamības likumu:

$$F = -m \cdot (V_f - V_i) = -\rho \cdot Q \cdot (-2 \cdot V_i + 2 \cdot u) = 2 \cdot \rho \cdot Q \cdot (V_i - u) \qquad (3.16)$$

kur ρ – ūdens blīvums, kg/m^3;

Q – ūdens plūsmas intensitāte, m^3/s;

V_i – ūdens strūklas kustības sākuma ātrums, m/s;

u – rotora kausiņa kustības ātrums, m/s.

Pieņemot rotora diametru D, var aprēķināt griezes momentu uz turbīnas ass:

$$M = F \cdot \frac{D}{2} = \rho \cdot Q \cdot D \cdot (V_i - u)\,, \qquad (3.17)$$

Kā redzams no formulas, maksimālais griezes moments ir tad, kad rotors ir nobremzēts (u=0).

Turbīnas jaudu P aprēkina pēc formulas:

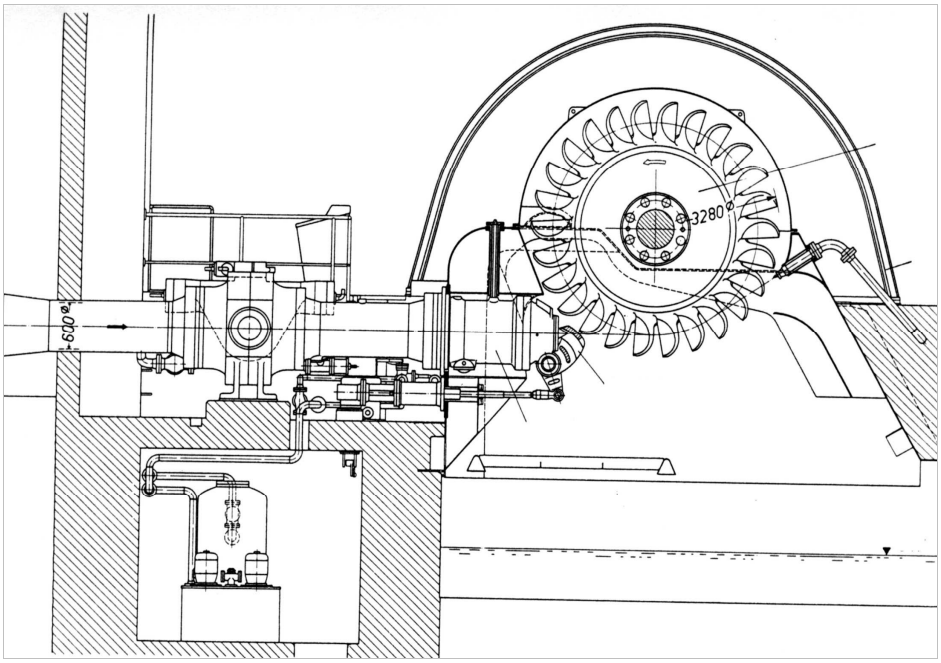
$$P = F \cdot u = M \cdot \omega = 2 \cdot \rho \cdot Q \cdot u \cdot (V_i - u)\ , \qquad (3.18)$$

Lai atrastu jaudas maksimumu, veicot (18) formulas atvasinājuma sakņu meklēšanu, iegūstam:

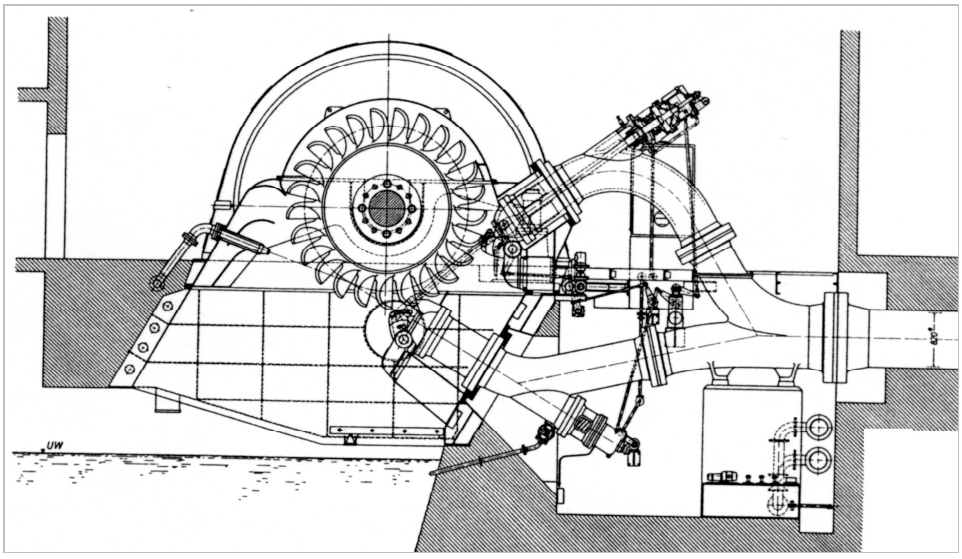
$$P_{\max} = h \cdot \rho \cdot g \cdot Q\ , \qquad (3.19)$$

Darbojoties maksimālās jaudas zonā, Peltona turbīna darbojas ar efektivitāti virs 90 %, jo ūdens atstāj kausiņus ar ātrumu, kas tuvs nullei.

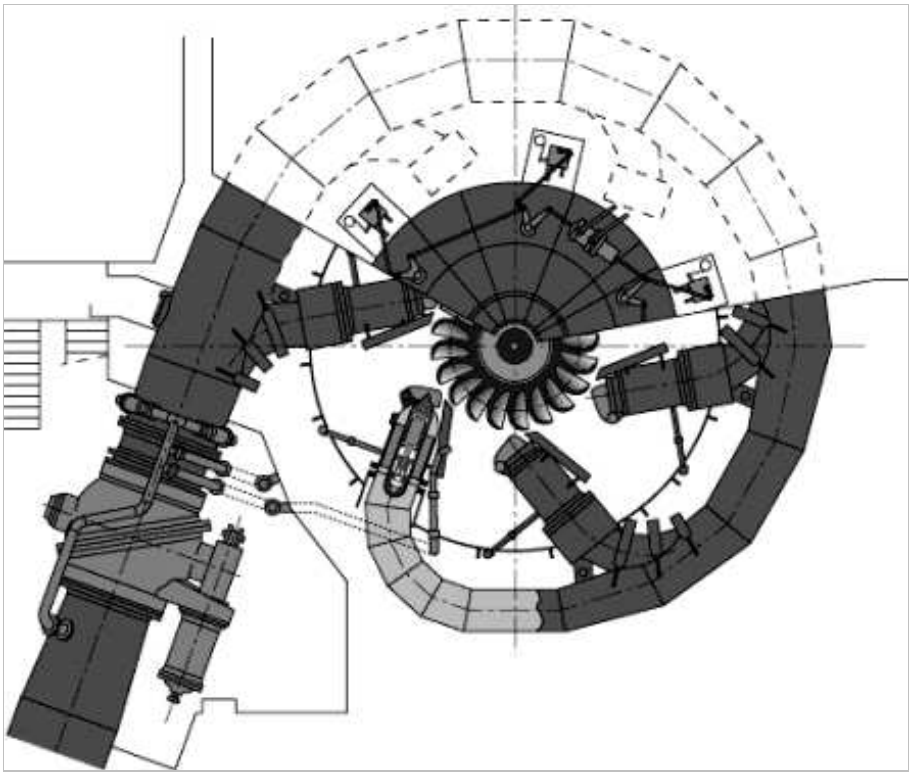
Konstuktīvi Peltona turbīnai var būt no 1 līdz 6 sprauslām, tā palielinot turbīnas jaudu (skat. 3.81. – 3.83. att.)



3.81. att. **Viensprauslas Peltona turbīna**



3.82. att. **Divsprauslu Peltona turbīna**



3.83. att. **Sešsprauslu Peltona turbīna**

Peltona turbīnas komercializācija sākās 1883. gadā, kad atklātā sacensībā tā uzvarēja Aidaho Kalnrūpniecības Kompānijas (Idaho Mining Company of Grass Valley, California, USA) konkursā par efektīvāko ūdens turbīnu (tās efektivitāte sasniedza 90,2 % – tuvākie konkurenti sasniedza tikai 76,5 %). 1888. gadā Lesters Peltons izveidoja savu uzņēmumu – Pelton Water Wheel Company, un uzsāka impulsa turbīnu masveida ražošanu.

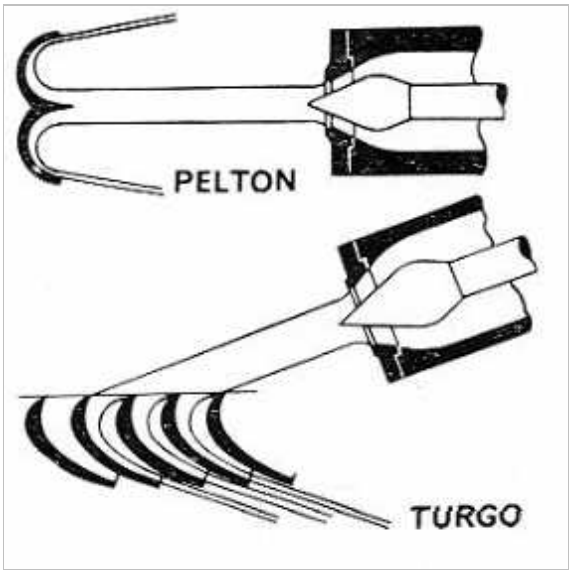
Peltona turbīnas efektivitātes paaugstināšanai izgudrotājs Viljams Dobls (William Doble) 1895. gadā ieteica izveidot eliptiskas formas kausiņus un izgriezumu kausiņā, kas atviegloja ūdens izplūdi no kausiņa. Tas ļāva paaugstināt lietderības koeficientu uz 92 % – tāds tas ir arī mūsdienās plaši lietotajām Peltona turbīnām. V.Dobls neilgi pēc tam pārņēma Peltona uzņēmumu, tomēr, ievērojot Peltona zīmola atpazīstamību, saglabāja uzņēmuma nosaukumā turbīnas autora uzvārdu.

TURGO TURBĪNA

Peltona turbīnas bija plaši izplatītas un vienīgās impulsa turbīnas līdz brīdim, kad 1920. gadā Ēriks Kraudsons (Eric Crewdson) izgudroja Turgo turbīnu. Šī turbīna bija uzlabota Peltona turbīnas versija, tomēr tā sāka iekarot tirgu, jo bija ar mazākiem izmēriem un vienkāršāku izgatavošanas tehnoloģiju.

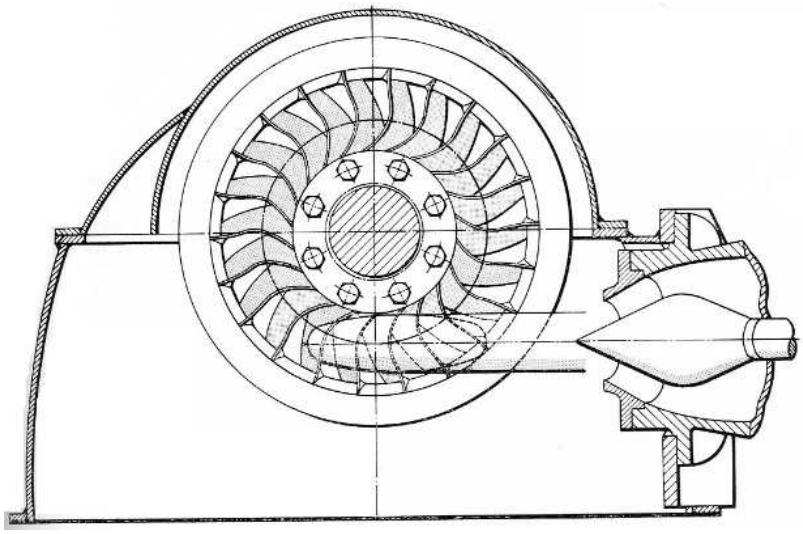
Turgo turbīna tiek izmantota vidējiem ūdens staba augstumiem, tās lietderības koeficients ir tuvu 90 %.

Galvenā Turgo turbīnas iezīme – plūsmas un kausiņa novietojums (skat. 3.84. att.).



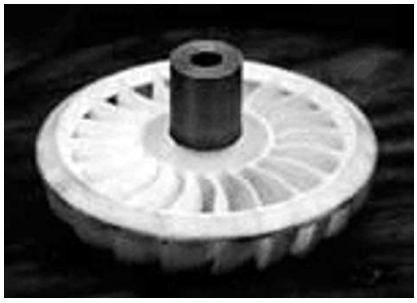
3.84. att. **Peltona un Turgo turbīnu ūdens strūklas un turbīnas kausiņa novietojums** (resurss: http://www.frenchriverland.com/impulse_turbines_ely_hutchinson.htm)

Turgo turbīnā ūdens strūkla tiek virzīta pret turbīnu no sāniem, nevis tangenciāli, kā tas ir Peltona turbīnai (skat. 3.85. att.). Turbīna izskatās kā uz pusēm pāršķelta Peltona turbīna.



3.85. att. **Turgo turbīnas šķērsgriezums** (resurss:
http://www.frenchriverland.com/turgo,_a_high_speed_impulse_turbine-_paul_wilson.htm)

Turgo turbīnas rotors parādīts 3.86. attēlā.

a) **b)** 

3.86. att. **Turgo turbīnas rotors:**
a) skats no apakša, b) skats no augšas
(resurss: http://members.tripod.com/hydrodocs_1/turbines.html)

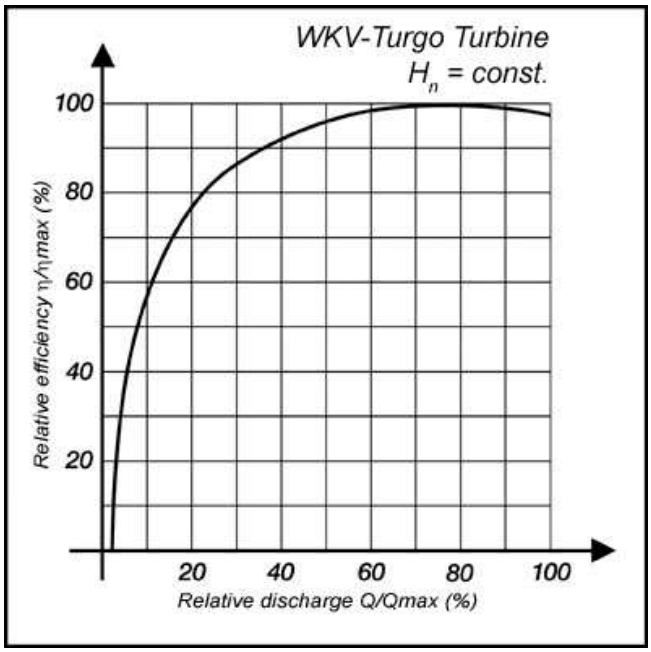
Galvenās Turgo turbīnas priekšrocības:

- Rotors lētāks un vienkāršāk izgatavojams, kā Peltona turbīnai;
- Nav nepieciešams ievietot turbīnu slēgtā telpā bez gaisa piekļuves;

- Augstāks rotācijas ātrums un spēja izturēt lielākas ūdens plūsmas (jo ūdens izplūdei netraucē kausiņa sienas), līdz ar to iegūstot lielāku jaudu salīdzinājumā ar tāda apaša izmēra Peltona turbīnu.

Turgo turbīnas darbības zona ir vietā, kur pārklājas Frensisa un Peltona turbīnu darbības zona.

Līdzīgi kā Peltona turbīnai, arī Turgo turbīnai var izmantot vairākas sprauslas (jaudas pieaugums ir vienāds ar kvadrātsakni no srauslu skaita). Daudzi uzņēmumi piedāvā Turgo turbīnas, reklamējot to augsto efektivitāti (skat. 3.87. att.)



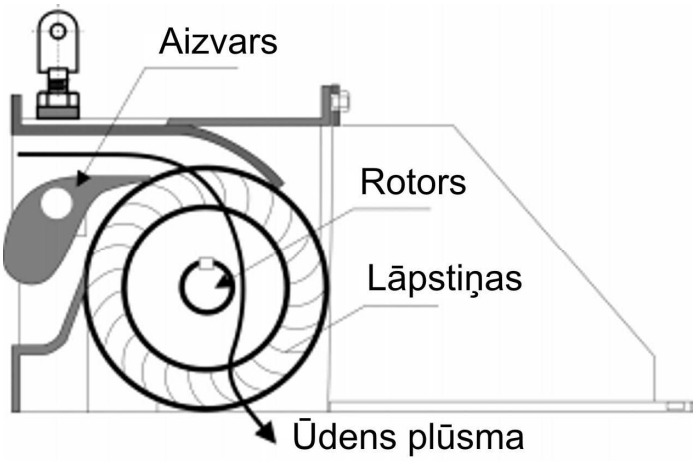
3.87. att. **Uzņēmuma WKG pedāvāto Turgo turbīnu efektivitātes grafiks atkarībā no pieplūdes** (resurss: http://www.wkv-ag.com/englisch/tech/tk_2_3.html)

ŠĶĒRSPLŪSMAS (BANKI/MICHELL/OSSBERGER) TURBĪNA

Šķērsplūsmas turbīnas autori ir austrālietis Entonijs Mičels (Anthony Michel), ungārs Donāts Banki (Donat Banki) un vācietis Frics Osbergers (Fritz Ossberger). E.Mičels iesniedza savu pirmo patentu 1903. gadā, un kompānija Weymouth ražoja šķērsplūsmas turbīnas ilgu laiku. Osbergers pieteica savu patentu 1922. gadā,

nodibināja savu uzņēmumu un uzsāka šo turbīnu ražošanu. Arī šobrīd kompānija Ossbergers ir vadošā šķērsplūsmas turbīnu ražotāja pasaulē.

Šķērsplūsmas turbīnas darbības princips parādīts 3.88. attēlā.



3.88. att. **Šķērsplūsmas turbīnas darbības princips** (resurss: „Layman's Guidebook on how to develop a small hydro site", European Small Hydropower Association)

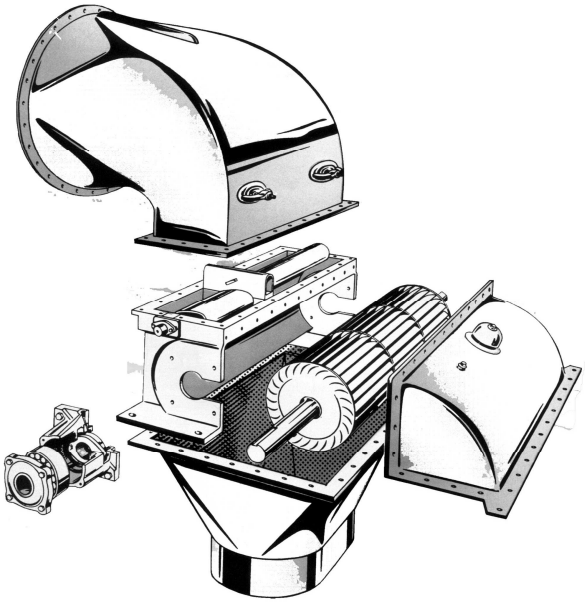
Turbīna ir līdzīga Ponselota ūdensratam, tikai atšķirībā no tā izmanto ne tikai smaguma spēka darbu, bet arī ūdens plūsmas kinētisko enerģiju, ūdenim izplūstot caur turbīnas tukšo centrālo daļu un turbīnas lejasdaļā atkal iedarbojoties uz turbīnas lāpstiņām. Arī griešanās virziens šai turbīnai ir pretējs Ponselota ūdensrata griešanās virzienam.

Būtiski atzīmēt, ka turbīna novietota šķērsām visai ūdens plūsmai, un tiek veidota pēc iespējas platāka, lai nodrošinātu pietiekamu jaudu.

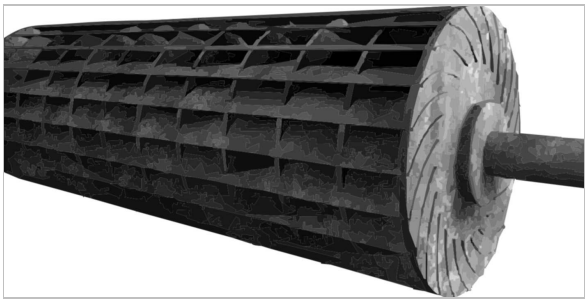
Kā būtisks faktors jāatzīmē šīs turbīnas pašattīrīšanās spēja – ejot caur turbīnai un nonākot tās apakšējā daļā, ūdens kustas pretēji ieplūdes virzienam, tādējādi iztīrot starplāpstiņu telpu un lāpstiņu virsmas.

Tā kā tiek izmantots ūdens caurplūdes princips caur turbīnai, tā ir lēngaitas turbīna, jo lielu apgriezienu ietekmē strauji pieaug hidrauliskie zudumi – turbīna pašbremzējas.

Šķērsplūsmas turbīnas kopskats un rotora konstrukcija doti 3.89. un 3.90. attēlos.



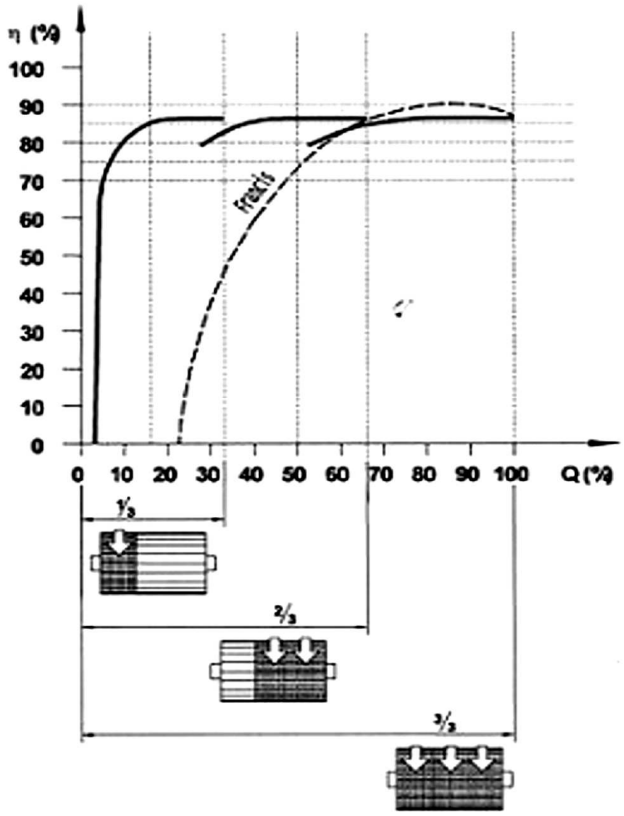
3.89. att. **Šķērsplūsmas turbīnas kopskats**
(resurss: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/5/54/Ossberger_turbine.jpg)



3.90. att. **Šķērsplūsmas turbīnas rotora konstrukcija**

Turbīnas rotorā ievietotas liektas lāpstiņas (skaitā līdz 37). Lāpstiņu malas ir noasinātas, lai minimizētu berzi pret ūdeni. Ūdens ieplūst rotorā 45^{o} leņķī, atdodot daļu kinētiskās enerģijas lāpstiņām. Regulējošais aizvars izmaina plūsmas šķērsgriezuma laukumu, regulējot ūdens plūsmu caur rotoru.

Lielākā daļa ūdens enerģijas tiek uztverta, ūdens plūsmai pirmo reizi iedarbojoties uz lāpstiņām. Plūstot ārā no rotora vidus, tiek iegūti vēl ap 30 % enerģijas.



3.91. att**. Šķērsplūsmas turbīnas efektivitātes līkne daļējas slodzes gadījumā, un salīdzinājums ar Frensisa turbīnu** (resurss: www.ossberger.de)

Galvenās priekšrocības:

- Lietderības koeficients robežās no 80 līdz 82 %;
- Kaut arī šķērsplūsmas lietderības koeficients ir mazāks kā Kaplāna, Frensisa vai Peltona turbīnām, tas ir nemainīgs dažādu slodžu un dažādu ūdens plūsmas režīmu gadījumā (nemainīga efektivitāte pie slodzes 15...100 %);
- Vienkārša konstrukcija, lēta izgatavošana un uzturēšana;
- Efektīvākais risinājums mazu upju energoiekārtās;

- Pašattīrīšanās, ūdens plūsmai kustoties divos virzienos – rotorā iekšā, un no rotora ārā. No rotora tiek iztīrītas jebkuras sanesas – lapas, zari, dūņas, u.c.;
- Darbojas pie ūdens staba spiediena augstuma no 2 līdz 200 m, ūdens plūsmas no 0,04 līdz 12 m^2/s, un jaudu diapazonā no 1 līdz 2 000 kW;

3.6.4. Turbīnu izvēle

Kā redzams no iepriekšējām nodaļām, visām modernajām turbīnām lietderības koeficients ir 80...90 %, līdz ar to par galveno tubīnas atlases kritēriju kļūst ūdens spiediens – ūdens staba augstums – augstumu starpība starp augstšējo ūdens līmeni un apakšējo ūdens līmeni, kā arī pieejamā ūdens plūsma.

Impulsa turbīnas to konstruktīvo īpašību dēļ lietderīgāk lietot vietās ar lielu ūdens staba augstumu, reakcijas turbīnas – vietās ar palielinātu ūdens plūsmu un nelielu ūdens staba augstumu.

Kaplāna turbīnas ar maināmu rotora lāpstiņu leņķi lieto plašā ūdens staba augstuma diapazonā, jo saglabā augstu efektivitāti plašā plūsmas izmaiņas diapazonā.

Būtiska nozīme ir arī konstuktīvajam izveidojumam. Mazās turbīnas (līdz 10 MW jauda) parasti tiek uzstādītas, izmantojot horizontālu vārpstas novietojumu. Arī propellertipa turbīnas ar jaudu līdz 100 MW bieži tiek novietotas horizontāli.

Lielas jaudas Frensisa un Kaplāna turbīnas parasti tiek novietotas uz vertikālas vārpstas, atvieglojot plūsmas vertikālās kustības izmantošanu, kā arī lielu masu iegultņošanu un mazākas prasības vārpstai.

Peltona turbīnas novieto gan horizontāli, gan vertikāli, jo to izmēri un masa pie līdzīgas jaudas ir daudz mazāki. Tām raksturīga arī daudzsprauslu konstrukciju pielietošana, lai iegūtu lielāku jaudu (ierobežojošais faktors – pieteikama ūdens plūsma), un samazinātu izlieci uz rotora vārpstu.

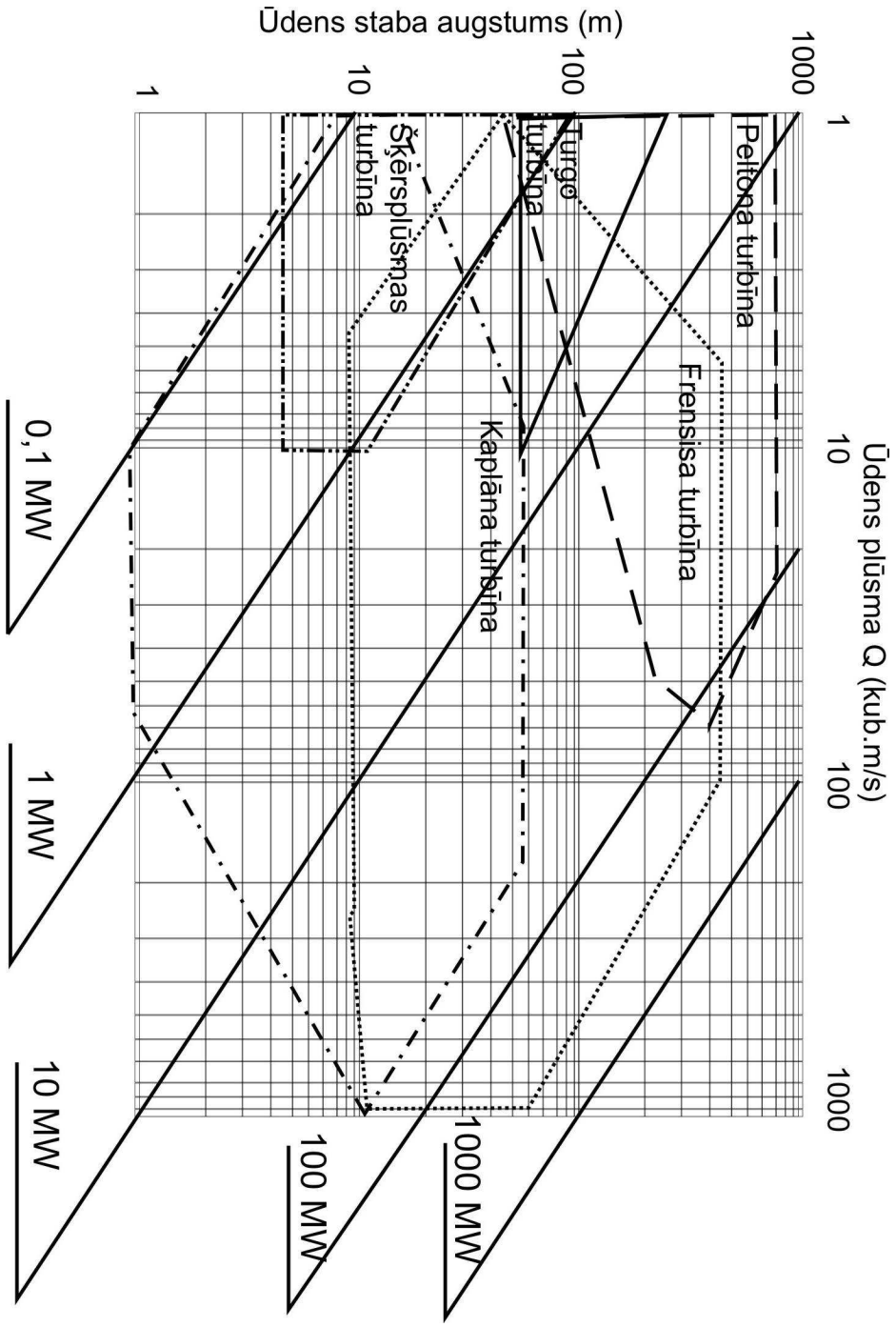
Ūdens staba spiediena augstumi, pie kuriem strādā dažāda tipa ūdensturbīnas, apkopoti 3.4. tabulā.

3.4. tabula

Turbīnu tipi un tām raksturīgie ūdens staba augstumi

Turbīnas tips	Ūdens staba augstums H, m
Ūdensrats	$0.2 < H < 4$
Kaplāna turbīna	$2 < H < 40$
Frensisa turbīna	$10 < H < 350$
Peltona turbīna	$50 < H < 1300$
Turgo turbīna	$50 < H < 250$

Grafiski turbīnu izvēlei var izmantot 3.92. attēlā doto grafiku.



3.92. att. **Turbīnu izvēle atkarībā no ūdens staba augstuma H un ūdens plūsmas Q**

Turbīnu ražotāji piedāvā ļoti plašu turbīnu diapazonu, pie tam piedāvājot izstrādāt individuālu risinājumu katram konkrētam gadījumam (piemērs 3.5. tab.).

3.5. tabula

Firmas Wanhigh Tech.inc. piedāvātie turbīnu tipi (www.hydropower.com.cn)

Tips	Frensisa turbīna	Kaplāna turbīna	Peltona, Turgo turbīnas	Tubulārā turbīna
Ūdens staba augstums (m)	10 – 300	2 – 70	80 – 1600	2 – 20
Ūdens plūsma (m^3/s)	0.3 – 100	1.0 – 200	0.1 – 20	1.0 – 250
Rotora maksimālā rotācijas frekvence (min^{-1})	68.2 – 1500	68.2 – 750	150 – 1500	75 – 500
Jauda	100 kW – 100 MW	100 kW – 100 MW	100 kW – 80 MW	200 kW – 60 MW
Rotora diametrs (m)	0.4 – 6.0	0.8 - 8.0	0.8 - 6.0	0.8 – 6.0
Sprieguma diapazons (kV)	0.4, 6.3, 6.6, 10.5	0.4, 6.3, 6.6,10.5	0.4, 6.3, 6.6, 10.5	0.4, 6.3, 6.6, 10.5

Svarīgs parametrs turbīnas izvēlē ir arī tās uzturēšanas un remonta iespējas un izmaksas.

Kaut arī modernās turbīnas konstruktīvi izveidotas ilgstošai darbībai vairāku desmitu gadu garumā, jāņem vērā kavitācijas ietekme uz rotora un vadotņu virsmām (kavitācija rodas pārāk lielu ūdens kustības ātrumu dēļ noteiktās vietās), un tās radītās materiāla erozijas radītie bojājumi, kas savukārt rada nelīdzenumus, kuros uzkrājas abrazīvas vielas, kas palielina detaļu nodilumu, rada rotējošo masu nebalansu un nevienmērīgu gultņu noslodzi, asimetrisku vārpstu noslodzi un lāpstiņu bojājumus. Tādēļ turbīnu izgatavošanai plaši izmanto materiālus ar augstu korozojizturību, galvenokārt dažādas nerūsējošā tērauda markas, kas gan būtiski sadārdzina to izmaksas.

Darba procesā jākontrolē gan turbīnu stāvoklis, gan blīvējumu un gultņu stāvoklis, vārpstu un citu rotējošo masu vibrācijas līmenis, gultņu un ģeneratoru

dzesēšanas un eļļošanas sistēmas darbība, kā arī automātiskās vadības sistēmu darbība, kas nodošina drošu bezatteices darbu.

Ļoti svarīgs process turbīnu ekspluatācjā ir regulāra turbīnu apkope un kvalitatīvs bojāto elementu un detaļu remonts un nomaiņa. Šo procesu veikšanas ērtums un ražotāju garantijas ir viens no būtiskiem turbīnu izvēles faktoriem.

3.6.4. Multiplikatori

Labākais konstruktīvais risinājums turbīnas savienošanai ar darba mašīnu ir tiešais savienojums – turbīna vai nu atrodas uz elektroģeneratora (vai citas darba mašīnas) vārpstas, vai to savienošanai tiek izmantota pagarināta vārpsta. Šādā gadījumā turbīnas un darba mašīnas rotācijas frekvences ir vienādas. Tiek iegūts risinājums, kurā pārvadā nav zudumu, kā arī šāda pārvada uzturēšana un remonts prasa minimālas investīcijas. Turbīnu ražotāji iesaka tieši šādu pārvada risinājumu, kaut gan no konstruktīvā risinājuma viedokļa vieglākai un vienkāršākai visu ierīču saslēgšanai tiek ieteikts lietot vai nu lokanās vārpstas vai īpašus sajūgus un savienotājus (kardānpārvadus u.c.).

Tomēr daudzos gadījumos (īpaši lēngaitas turbīnu izmantošanas gadījumos) darba mašīnas piedziņai nepieciešama augstāka rotācijas frekvence, nekā to piedāvā turbīna. Tad starp turbīnu un darba mašīnu tiek ievietots apgriezienus paaugstinošs pārvads – multiplikators. Tā konstruktīvie risinājumi var būt ļoti dažādi:

- ar paralēlām asīm – izmantojot cilindriskos taisnzobu un slīpzobu zobratu pārvadus;
- ar uz vienas taisnes novietotu ieejošo un izejošo vārpstu – izmantojot planetāros pārvadus;
- izejošā un ieejošā vārpstas novietotas vienā plaknē, bet to asis novietotas leņķī – izmantojot koniskos pārvadus;
- izejošā un ieejošā vārpstas nobīdītas gan leņķī, gan atrodas dažādās plaknēs – izmantojot hipoidālos un gliemežpārvadus.

Multiplikatoru izmantošana dod iespēju iegūt darbamašīnai nepieciešamo rotācijas frekvenci, kā arī veidot kompaktas energosistēmas.

3.6.5. Ģeneratori

Galvenais enerģijas veids, kurā tiek pārveidota ūdens enerģija, ir elektroenerģija, jo tai piemīt vairākas unikālas īpašības:

- iegūto elektroenerģiju vienkārši transportēt uz tās izmantošanas vietām;
- to viegli transformēt citos enerģijas veidos (siltumā, apgaismojumā, mehāniskajā enerģijā, u.c.);
- iespējams vienkārši mainīt tās parametrus (strāvu, spriegumu), tā mainot patērējamās jaudas parametrus;
- to viegli vadīt no attāluma un viegli automatizēt tās izmantošanu.

Tāpēc ūdens turbīnas mūsdienu energosistēmās piedzen elektroģeneratorus.

Pirmo reizi pasaules vēsturē ūdens turbīnas izmantošana elektroenerģijas ražošanai tika uzsākta 1880. gadā, kad Wolverine krēslu rūpnīcā, Grand Rapids, Mičiganas štatā ASV, tika izmantots ūdens turbīnas piedzīts ģenerators 16 loka spuldžu barošanai. Pirmā hidroelektrostacija tika uzbūvēta divus gadus vēlāk – 1882. gadā, uz Foksas (Fox) upes pie Epltonas (Appletone), Viskonsinas štatā, ASV. Tā (un arī lielākais vairums spēkstaciju līdz 1895. gadam) piedzina līdzstrāvas ģeneratoru, un iegūtā enerģija tika lietota apgaismošanai – sākumā loka spuldžu, vēlāk arī kvēlspuldžu barošanai. Mazjaudas sistēmās lieto gan līdzstrāvas, gan maiņstrāvas ģeneratorus, tomēr lielākoties tiek izmantoti trīsfāžu maiņstrāvas ģeneratori.

Kā svarīgs pavērsiens jāatzīmē arī hidroelektrostacijas uzbūvēšana pie Niagāras ūdenskrituma ASV, kurā tika izmēģināts arī Nikolā Teslas divfāžu ģenerators (vēlāk arī trīsfāžu ģenerators), aizsākot plašu maiņstrāvas izmantošanas ēru.

Trīsfāžu maiņstrāvas ģenerēšanai tiek izmantoti divu veidu ģeneratori:

- sinhronie ģeneratori kopā ar līdzstrāvas ierosmes sistēmām (tās var būt gan mazjaudas līdzstrāvas ģeneratori (jauda 0,5..1 % no kopējās sistēmas jaudas), gan statiskās līdzstrāvas ierosmes sistēmas (akumulatori, kondensatoru sistēmas);
- asinhronie ģeneratori.

Sinhronie ģeneratori ir konstruktīvi sarežģītāki, tiem ir sarežģītāka vadības automātika, tomēr tie plašākā diapazonā izmanto turbīnu jaudu mainīgas ūdens padeves gadījumā. Tos lieto, ja turbīnas jauda pārsniedz 5 MW.

Asinhronie ģeneratori ir ar vienkāršu konstrukciju, ievērojami lētāki, tiem nav dilstošu detaļu, tomēr tie strādā šaurā apgriezienu un jaudas diapazonā, ko nosaka asinhronās mašīnas darbā zona ģeneratora režīmā (kad tiek pārsniegti sinhronie apgriezieni). Pētījumi rāda, ka ilgstošā periodā to efektivitāte ir tikai par 2...4 % mazāka nekā sinhronajiem ģeneratoriem.

Asinhrono ģeneratoru palaišana ģeneratora režīmā notiek, tos vispirms tukšgaitā iegriežot gandrīz līdz sinhronajiem apgriezieniem, un tad pieslēdzot tos tīklam. Pieslēgšanas brīdī asinhronais ģenerators sasinhronizējas ar tīklu, un tālāk turbīna sāk griezt to ārāk par sinhronajiem apgriezieniem – asinhronais ģenerators sāk darboties ģenerācijas zonā, un spriegumu nosaka tīkls.

Modernajās spēkstacijās tiek izmantoti vadāmie invertori, kuru izmantošana pieļauj turbīnas un ģeneratora apgriezienu svārstības plašā diapazonā, bet izejā tiek iegūti nemainīgi un stabili elektroenerģijas parametri – spriegums un frekvence.

Lieljaudas spēkstacijās turbīnas tiek tieši savienotas ar elektroģeneratoriem. Lai iegūtu elektroenerģiju ar atbilstošu frekvenci, tiek izmantoti ģeneratori ar lielu polu skaitu – piemēram, spriegumu ar 50 Hz frekvenci iegūst, izmantojot 28 polu ģeneratoru, kuru piedzen turbīna, kas griežas ar rotācijas frekvenci 214 apgr/min.

3.6.6. Spēkstacijas vadības sistēmas

Modernās spēkstacijas – gan lieljaudas, gan arī mazās, darbojas automātiskā režīmā. Galvenās prasības spēkstaciju automātiskās vadības sistēmām ir sekojošas:

- sistēmai jānodrošina gan automātiskās, gan pilna apjoma rokas vadības iespējas – gan testēšanai, gan pieregulēšanai, gan remontu un apkopju nodrošināšanai;
- sistēmā jābūt kontroles ierīcēm, kas ziņo par novirzēm no nomināla darba režīma gan elektriskajā, gan mehāniskajā, gan hidrauliskajā kontūrā;
- sistēmai jānodrošina informācijas uzkrāšanu par svarīgiem spēkstacijas darba režīmiem – saražoto elektroenerģiju, ūdens plūsmu, spiedieniem cauruļvados, u.c., lai būtu iespējams uz to bāzes veidot lēmumu pieņemšanas stratēģiju;

- sistēmai jāspēj strādāt autonomā režīmā bez cilvēka klātbūtnes;
- modernās vadības sistēmas nodrošina attālinātu piekļuvi uzkrātajai informācijai un nodrošina attālinātas procesu vadības un kontroles iespējas.

Spēkstaciju automātiskās vadības sistēmas ietver sevī gan analogos elementus, gan arī ciparu vadības ierīces, un to pareiza un pamatota izmantošana ļauj būtiski samazināt uzturēšanas izmaksas, paaugstinot iegūtās elektroenerģijas kvalitāti un ražošanas apjomus, būtiski paaugstinot kopējo spēkstaciju darba efektivitāti.

3.7. Spēkstacijas projekta struktūra

Spēkstacijas būve ūdens energoiekārtu izmantošanai elektroenerģijas ražošanai ir nopietns investīciju projekts ar ilgstošu atmaksāšanās periodu, tāpēc lēmuma pieņemšanai šāda projekta realizācijai jāveic virkne būtisku pētījumu:

- Izvēlētās vietas vispārējā topogrāfiskā un ģeomorfoloģiskā izpēte (augstumu līmeņi, ūdenskrātuves forma, augsnes paraugi, testa urbumi, laboratorijas pētījumi);
- Ūdens resursu apjomu un raksturojošos parametrus (ūdens staba augstums, plūsma, reģenerācijas ātrums) – statistikas dati vairāku gadu garumā gan par ūdens līmeņiem, gan nokrišņiem;
- Konkrētās vietas (būvei, dambim, u.c.) izvēle, konstruktīvā kompozīcija;
- Spēkstacijas jaudas noteikšana;
- Hidroturbīnu izvēle;
- Elektroģeneratoru un savienojošo elementu izvēle;
- Automātiskās vadības izvēle un pielāgošana;
- Ietekmes uz vidi izvērtējums un vides kontrolējamo faktoru noteikšana;
- Projekta ekonomiskā un finanšu plūsmas izvērtēšana;
- Administratīvo procedūru un iesaistīto institūciju prasību apkopojums.

Tikai pēc skaidru un pozitīvu atbilžu saņemšanas uz visiem augstākminētajiem jautājumiem un izpētes darbiem iespējams pieņemt lēmumu par spēkstacijas projekta realizēšanu.

3.8. Ūdens energoiekārtu ietekme uz vidi

Ūdens enerģētikas iekārtas vispārējā gadījumā tiek uzskatītas par videi nekaitīgām sistēmām, jo ūdens turbīnas pašas par sevi nerada nekādas izmaiņas ūdenī. Turbīnas izmanto ūdens kustību dabā kā atjaunojamu energoresursu un konstruktīvo īpatnību un izmantoto materiālu dēļ darbojas ilgstoši – daudzus desmitus gadu.

Tomēr ūdens izmantošanas vēsture rāda arī piemērus negatīvajai ietekmei, ko uz vidi atstāj šo energoierīču uzstādīšana, it īpaši appludināto teritoriju un aizsprostu un dambju dēļ – mainās vides ekoloģiskie parametri, izmainās zivju resursi (mainās sugu struktūra, tiek traucēti to migrācijas ceļi), tiek izjauktas cilvēku ierastās dzīves vietas. Kā piemēru var minēt ar mitoloģiju un leģendām apvīto Staburagu, kurš tika iznīcināts un pazuda Pļaviņu ūdenskrātuves dzelmē, vai Amerikas pamatiedzīvotāju -indiāņu dzīves vietu iznīcināšanu un dzīves stila piespiedu izmaiņu, kad tika būvētas lielās spēkstacijas uz Amerikas upēm – indiāņi organizēja savu dzīvi upju ielejās, kas bagātas ar lašveidīgajām zivīm, kuru apjomi samazinājās līdz ar spēkstaciju būvi.

Appudinātās teritorijas izmaina arī gaisa mitruma un iztvaikošanas režīmus to tuvumā, kas savukārt izmanina arī temperatūras režīmus apkārtējā vidē.

Kā galveno ieguvumu hidoelektrospēkstaciju būvei mūsdienās uzsver siltumnīcas efekta gāzu emisijas samazinājumu, tomēr pētījumi rāda, ka lieljaudas HES būve, ietverot netiešos faktorus, nesamazina siltumnīcas gāzu emisiju, jo aizsprosta un uzpludinājuma izveidei parasti tiek izmantoti blīvi apdzīvoti reģioni (cilvēkiem raksturīgi apdzīvot upju ielejas), un tas savukārt nozīmē liela skaita cilvēku pārvietošanu, kas saistīta ar ievērojamām investīcijām. Šādas sociālās ietekmes ekonomisko faktoru iekļaušana spēkstacijas projekta izmaksās to būtiski sadārdzina.

Ekoloģiskie faktori, kas būtiski ietekmē spēkstaciju darba ilgtspējību, ir gan upju biodiveritātes samazināšnās, sedimentācijas radītās problēmas gan uzpludinājumos, gan upēs kopumā, kā arī ūdens kvalitātes samazināšanās (bioloģiskais piesārņojums, izšķīdušā skābekļa daudzuma samazināšanās, kaitīgo un slimības izraisošu mikroorganismu savairošanās, rūgšanas procesi, kas rada metāna un ogļskābās gāzes izplūšanu atmosfērā, u.c.). Brazīlijas Nacionālā pētniecības institūta pētnieks Filips Fernsaids (Philip Fearnside) aprēķinājis, ka dažos gadījumos appludinātās teritorijas

var radīt vairāk siltumnīcas gāzu, nekā tradicionālās līdzīgas jaudas spēkstacijas, kas izmanto fosilo kurināmo. Pētot appludinājumu Brazīlijā (Curuá-Una dam in Pará, Brazil), viņš izpētīja, ka siltumnīcas gāzu izplūde atmosfērā bija 3,5 reizes lielāka, nekā no tādas pašas jaudas termoelektrostacijas, kas kā kurināmo izmanto naftas produktus. Vispirms viņš aprēķināja to ogļskābās gāzes daudzumu, kas tika emitēts atmosfērā appludināmās teritorijas sagatavošanas periodā – koku izciršana un utilizācija. Pēc appludināšanas rezervuāra gultnē palika biomasa, kas atradās bezskābekļa vidē, un sadalījās, veidojot metāna gāzi. Ūdenim plūstot caur appludinājumu, metāna gāze tika aiznesta ārpus appludinājuma, un izplūda atmosfērā. Sezonālās gadalaiku maiņas regulāri papildina rezervuāra gultni ar biomasu, kas turpina bezskābekļa rūgšanu, nodrošinot nepārtrauktu metāna izplūdi atmosfērā. Papildus biomasu rūgšanai nodrošina arī rezervuāra krastos augošie augi, kuri mainīga ūdens līmeņa dēļ ik pa brīdim nonāk zem ūdens, kur sākas to sadalīšanās bezskābekļa vidē.

Galvenais secinājums no pētījuma – ar cilvēku rokām veidotie rezervuāri, kas it kā samazina siltumnīcas efektu, ir kļuvuši par metāna ražotājiem no ogļhidrātiem un ogļskābās gāzes. Jāatzīmē, ka metāna ietekme uz siltumnīcas efektu ir 21 reizi lielāka nekā ogļskābajai gāzei.

Ņemot vērā izpētīto, ir doma katras valsts siltumnīcas efekta ietekmes izvērtēšanā iekļaut arī mākslīgi appludināto reģionu emitēto siltumnīcas efekta gāzu ietekmi. Ja šāda metodika tiks pielietota, tropisko reģionu valstīm, kuras lielā mērā izmanto hidroenerģētiku, siltumnīcas gāzu emisijas skaitļi pieaugtu par 5...7 %. Mēreno reģionu valstu siltumnīcas gāzu emisijas pieaugums būtu ievērojami mazāks, jo temperatūras apstākļi nav tik labvēlīgi metāna ražošanai brīvā dabā.

Pētījumi, kas veikti Latvijā, parāda, ka hidroenerģētikai ir gan negatīva, gan pozitīva ietekme uz vidi.

Hidroenerģētikas negatīvā ietekme uz vidi:

- veidojot jaunas HES, tiek izmainīts ūdensteces dabiskais hidroloģiskais cikls, kas savukārt izmaina piekrastes un ūdens ekosistēmu daudzu gadu laikā izveidojušos līdzsvaru. (Spēkstacijas maina upēs laika gaitā izveidojušos

hidroloģisko režīmu un bioloģisko daudzveidību, mainot ūdenskrātuves līmeņu regulēšanas režīmu, caurplūduma neritmiskumu lejas bjefā);

- ūdens līmeņa svārstībām ir negatīva ietekme gan uz pašas ūdenskrātuves, gan uz ūdensteces, kur ūdens tiek aizvadīts, ekosistēmām. Ir apgrūtināta piekrastes zonas dabiskā augu kopuma atjaunošanās, līdzenās teritorijās rodas pārpurvotas zemes ar nepastāvīgu augu eksistenci. Ūdens līmeņu svārstību rezultātā krasta līnijas ir nepastāvīgas, ūdensaugi tajās atmirst, arī zivis un mikroorganismi nespēj piemēroties šīm svārstībām;
- gruntsūdens līmeņu celšanās apkārtējās ūdenskrātuves ietekmētajās teritorijās augšējā bjefā var izraisīt koku bojāeju krastos. Gruntsūdens līmeņa paaugstināšanās var negatīvi ietekmēt būvju pamatus, izsaukt pagrabtelpu applūšanu, kā arī izraisīt ūdens kvalitātes izmaiņas akās. Ietekmētās teritorijas platība atkarīga no uzpludinājuma augstuma, ūdenslīmeņu svārstībām, teritorijas ģeoloģiskās uzbūves un hidroģeoloģiskajiem apstākļiem. Īpatnība, ka tas nenotiek uzreiz, bet pakāpeniski vairāku gadu laikā;
- mainās periodiski appludināmā zona, kur, palielinoties ūdens pieplūdumam ūdenstecē, ir iespējama appludināšana uz neilgu laiku. Daļa HES ir atjaunotas, neņemot vērā, ka tajā laikā, kad bija pazemināts ūdens līmenis, piekrastes teritorijas tika apbūvētas un vairs nedrīkstēja atjaunot iepriekšējo ūdens līmeni ūdenskrātuvē;
- ūdenskrātuvju krastos gan viļņu, gan līmeņu regulēšanas režīma izraisīta veidojas krastu pārstrāde. Ūdenslīmeņu svārstības var izsaukt krastu pārstrādi un nogruvumus gan augšpus, gan lejpus aizsprostam. Nozīmīga var būt ūdens līmeņa svārstību ietekme krasta un sufozijas procesu bīstamajās teritorijās;
- HES, kuras darbojas uzkrāšanas režīmā, neritmiskas darbības rezultātā lejas bjefā ūdens tiek novadīts neregulāri, minimālā caurplūduma daudzumi ūdens uzkrāšanas laikā mijas ar turbīnu darbības laikā strauji palielinātiem caurplūdumiem, kad ūdens līmenis lejas bjefā paaugstinās pat vairāk par metru. Tas izskalo upes krastus lejpus HES ne tikai atvadkanālā, bet arī tālāk upē, un neļauj attiecīgā upes posmā veidoties upes dabiskajai bioloģiskajai daudzveidībai;

- lielākās upēs plūsmas ātruma samazināšanās rezultātā augšpus ūdenskrātuvēm var veidoties sastrēgumi ledus iešanas laikā, ko izraisa vižņu veidošanās. Tas izraisa iespējamību teritoriju applūšanai augšpus ūdenskrātuvei;
- lejpus aizsprostam upes caurplūdumu HES turbīnu darbības pārtraukumos regulāri samazina līdz vasaras 30 dienu minimālajam caurplūdumam ar 95 % nodrošinājumu. Šis minimālā caurplūduma daudzuma nodrošināšanas periods, izmainot ilgstošā laika periodā izveidojušos noteces sistēmu kopumā, veidojas garāks nekā dabīgas noteces apstākļos, tāpēc iespējama gruntsūdens līmeņa pazemināšanās piegulošajās (lejas bjefs) platībās. Tas var izraisīt izmaiņas ūdens kvalitātē un kvantitātē akās.

Īpaši krasi HES negatīvā ietekme jūtama attiecībā uz ūdens bioloģiskajiem resursiem.

- tiek nosprostotas upes, kur līdz tam iepeldēja caurceļotājas zivis. Aizsprosts pārtrauc zivju migrācijas ceļus. Ūdenskrātuvēs ieviešas mazvērtīgākas zivju sugas, piemēram, karūsas, raudas, asari u.c., kuras no dzīves vietām izkonkurē vērtīgas un konkrētajai ūdenstecei raksturīgās zivju sugas, piemēram, lašveidīgās zivis, sapalus u.c., kā arī vēžus.
- zivju traumēšana un bojāeja turbīnās, kā arī to traumēšana krītot pāri novadbūvei, vai pa nelielu atveri, kas izbūvēti garantētā caurplūduma nodrošināšanai. Sevišķi ietekmējoši ir apmēram 0,5-1 m zem minimālā ūdens līmeņa ierīkotas viena vai vairākas atveres novadbūves aizvaros, pa kurām ar hidraulisku triecienu tiek triekts ūdens, pēc tam krītot 2-5 m uz betona vai koka sliekšņa grīdas vai akmeņiem. Straumē iekļuvušās zivis un citi organismi ar triecienu tiek izsviesti lejas bjefā un krītot traumēti apdullinot;
- ūdenskrātuvēs veidojas akvatoriji ar lēnu ūdensapmaiņu, kas pasliktina ūdens kvalitāti. Sevišķi ūdens kvalitātes izmaiņas jūtamas ūdenskrātuvēs ar lielu seklūdens zonu, kur noris paātrināta eitrofikācija. Jau tagad aizaugšana ir novērojama tajās ūdenskrātuvēs, kur HES darbība uzsākta pirms 2000. gada.
- HES ar gariem derivācijas un/vai atvadkanāliem upes „tukšajā" posmā lielāko laiku ir minimāls nodrošinājums ar ūdeni, kas veicina zivju mazuļu bojāeju gan no ūdens svārstībām, gan krītot par upuri putniem. Upēm ar platu gultnes daļu

arī noteiktais ekoloģiskais caurplūdums nespēj aizņemt gultni „tukšajā posmā". Katrā gadījumā vides ekspertam, vērtējot upes posmu no derivācijas kanāla līdz atvadkanāla savienošanas vietai ar upi, ir dabā jāizvērtē aizsargājamie augi un biotopi šajā posmā, slēdzienā dodot ietekmes vērtējumu. Tāpat caurplūduma izmaiņas upē var radikāli mainīt barības un nārsta apstākļus lejpus aizsprostam;

- uzpludinājumos iet bojā zivju nārsta vietas – applūst sēkļi un pazūd ūdensteču biotopu dažādība.

3.9. Hidoenerģētikas normatīvā regulēšana

Hidroenerģētikas darbību Latvijā nosaka vairāki normatīvie dokumenti. Svarīgākais ir „Ministru kabineta noteikumi Nr. 198", pieņemti Rīgā 2009. gada 24. februārī (prot. Nr. 14, 58. §) „Noteikumi par elektroenerģijas ražošanu, izmantojot atjaunojamos energoresursus, un cenu noteikšanas kārtību", izdoti saskaņā ar Elektroenerģijas tirgus likuma 29. panta otro, ceturto un piekto daļu, 29.[1] panta otro un piekto daļu.

Noteikumi nosaka:

1. nosacījumus elektroenerģijas ražošanai, izmantojot atjaunojamos energoresursus;
2. kritērijus, saskaņā ar kuriem ražotājs, kas elektroenerģiju ražo, izmantojot atjaunojamos energoresursus, var iegūt tiesības pārdot saražoto elektroenerģiju obligāti iepērkamā elektroenerģijas apjoma veidā;
3. kritērijus, saskaņā ar kuriem ražotājs, kas elektroenerģiju ražo elektrostacijās ar uzstādīto elektrisko jaudu virs 1 MW, izmantojot biomasu vai biogāzi, var iegūt tiesības saņemt garantētu maksu par elektrostacijā uzstādīto elektrisko jaudu; 4. no atjaunojamiem energoresursiem saražotās elektroenerģijas obligāti iepērkamā apjoma noteikšanas, īstenošanas un uzraudzības kārtību;
5. kāda Latvijas elektroenerģijas galalietotāju kopējā patēriņa daļa, nosakot to katram atjaunojamo energoresursu veidam, ir obligāti nosedzama ar elektroenerģiju, kas ražota, izmantojot atjaunojamos energoresursus;
6. no atjaunojamiem energoresursiem saražotās elektroenerģijas cenas noteikšanas kārtību atkarībā no energoresursu veida;

7. kārtību, kādā var atteikties no tiesībām pārdot saražoto elektroenerģiju obligātā iepirkuma ietvaros;
8. no atjaunojamiem energoresursiem saražotās elektroenerģijas izcelsmes apliecinājuma saņemšanas kārtību;
9. pasākumus, lai veicinātu elektroenerģijas ražošanu no biomasas;
10. pilnvaroto institūciju, kas izsniedz no atjaunojamiem energoresursiem saražotās elektroenerģijas izcelsmes apliecinājumu;
11. kārtību, kādā nosakāma garantētā maksa par elektrostacijā uzstādīto elektrisko jaudu, kā arī tās uzraudzības un samaksas kārtību;
12. kārtību, kādā komersants var atteikties no tiesībām saņemt garantētu maksu par elektrostacijā uzstādīto elektrisko jaudu.

Jaunākie normatīvie akti, kas saistīti ar HES ekspluatāciju vides aizsardzības jomā, ir:

- Likums "Par vides aizsardzību" (2002) (V, VI nodaļa);
- „Ūdens apsaimniekošanas likums" (2007) (6., 7., 17., 21., 25. pants);
- „Civilās aizsardzības likums" (2006) un uz tā 17. panta pamata pieņemtie MK 18.09.2007. noteikumi Nr. 626 „Noteikumi par paaugstinātas bīstamības objektu noteikšanas kritērijiem un šo objektu īpašnieku (valdītāju, apsaimniekotāju) pienākumiem riska samazināšanas pasākumu nodrošināšanai", kur noteikts, ka paaugstinātas bīstamības objekti ir:
    - Valsts nozīmes paaugstinātas bīstamības objekti ir A drošuma klases hidroelektrostaciju hidrotehniskās būves;
    - Reģionālas nozīmes paaugstinātas bīstamības objekti ir B drošuma klases hidroelektrostaciju hidrotehniskās būves;
    - Vietējas nozīmes paaugstinātas bīstamības objekti C drošuma klases hidroelektrostaciju hidrotehniskās būves.
    - Savukārt noteikumu IV sadaļā „Paaugstinātas bīstamības objektu īpašnieku (valdītāju, apsaimniekotāju) pienākumi bīstamības samazināšanai" ir noteikti galvenie veicamie pasākumi.
- „Aizsargjoslu likums" (1997) (5., 7., 32., 35., 37., 58., 61., 64., 65. pants);
    - Pamatojoties uz Aizsargjoslu likuma 7. pantu, izdoti MK 06.03.2008. g. noteikumi Nr. 406 "Virszemes ūdensobjektu

aizsargjoslu noteikšanas kārtība", kur ir noteikta dabas resursu aizsargjoslu noteikšana, ja ir hidrotehniskās būves.

- 4. punkts. Nosakot aizsargjoslu, neņem vērā ūdenī izvirzītas hidrotehniskās būves.
- 9. punkts. Nosakot teritorijas plānojumā applūstošo teritoriju, ņem vērā:
  - 9.3. esošo hidrotehnisko būvju radīto ietekmi uz palienes mitruma režīmu teritorijās, kur mainījies mitruma režīms.

- Pamatojoties uz Aizsargjoslu likuma 32. pantu, kur ir noteikta drošības aizsargjosla ap aizsprostiem, ir izstrādāti MK 21.02.2007. noteikumi Nr. 131 „Aizsargjoslu noteikšanas metodika ap aizsprostiem". Šajos noteikumos ir saistošs: 12. punkts. Aizsprosta īpašniekam vai valdītājam ir pienākums uzturēt šajos noteikumos noteikto kārtību aizsargjoslā.
- MK 19.2006. noteikumi Nr. 1018 „Meliorācijas sistēmu un hidrotehnisko būvju būvniecības kārtība";
- MK 27.12.2005. noteikumi Nr. 1014 „Ūdens objektu ekspluatācijas (apsaimniekošanas) noteikumu izstrādāšanas kārtība";
- MK 23.12.2003. noteikumi Nr. 736 „Noteikumi par ūdens resursu lietošanas atļauju". Sarīgākie punkti ir sekojoši:
  - 4. Iesniegumu iesniedz ne vēlāk kā 60 dienas pirms paredzētās darbības uzsākšanas vai ne vēlāk kā 60 dienas pirms spēkā esošas atļaujas vai ūdens lietošanas atļaujas derīguma termiņa beigām.;
  - 8. Ja iesniegumā norādītā informācija ir nepilnīga vai tam nav pievienoti visi nepieciešamie dokumenti, pārvalde 14 darbdienu laikā pēc iesnieguma saņemšanas par to rakstiski informē iesnieguma iesniedzēju un norāda, kāda informācija papildus iesniedzama. Par iesnieguma pieņemšanas dienu uzskata dienu, kad pārvalde ir saņēmusi visu nepieciešamo informāciju.
- Esošajās Ūdens resursu lietošanas atļaujās atsevišķām HES iestrādāti veicamie pasākumi, kas bija jāveic izsniegtās Ūdens resursu lietošanas atļaujas laikā, kā noteikts 54. punktā.

- 54. Attiecībā uz šo noteikumu 2.2. apakšpunktā minētajām darbībām, kuras uzsāktas līdz šo noteikumu spēkā stāšanas dienai un kurām, saņemot ūdens resursu lietošanas atļauju, tiek mainīti iepriekš tehniskajos noteikumos vai būvprojektā noteiktie ūdens resursu lietošanas vai darbības nosacījumi, atļaujā norāda termiņu, kas nepārsniedz 2006.gada 1.maiju, līdz kuram darbības veicējs iesniedz pārvaldē rīcības plānu atļaujā izvirzīto nosacījumu ieviešanai. Nosacījumu ieviešanas termiņš nedrīkst pārsniegt atļaujas derīguma termiņu. Tas savukārt ir saistīts ar maināmo nosacījumu iestrādi ūdenskrātuves ekspluatācijas noteikumos
  - 22.1. Ja, pamatojoties uz eksperta atzinumu un nepieciešamību sasniegt šo noteikumu 22. punktā minētos vides kvalitātes mērķus, atļaujā tiek noteiktas stingrākas prasības nekā jau esošajos ūdenskrātuves ekspluatācijas noteikumos, pārvalde atļaujā ietver nosacījumu, ka ūdenskrātuves ekspluatācijas noteikumos un hidrotehnisko būvju drošuma programmā nepieciešami grozījumi, lai nodrošinātu to atbilstību izdotās atļaujas prasībām.

Svarīgi ir arī MK noteikumi no 15.01.2002. Nr. 27 „Noteikumi par upēm (upju posmiem), uz kurām zivju resursu aizsardzības nolūkā aizliegts būvēt un atjaunot hidroelektrostaciju aizsprostus un veidot jebkādus mehāniskus šķēršļus" („LV", 22 (2597), 08.02.2002.) [spēkā ar 09.02.2002.] ar grozījumiem 21.02.2006. [spēkā ar 25.02.2006.], kā arī Ministru kabineta noteikumi Nr. 503 – Noteikumi par elektroenerģijas ražošanu, izmantojot atjaunojamos energoresursus.

3.10. Hidroenerģētika Latvijā

Hidroenerģija nodrošina 98 % visas no Latvijas atjaunojamajiem energoresursiem saražotās elektroenerģijas. Hidroelektrostaciju (HES) un ūdensdzirnavu izmantošanai Latvijā ir senas tradīcijas, jo tā uzsākta jau 20 gadsimta pirmajā pusē.

3.6. tabula

Hidroelektrostaciju uzstādītās jaudas

Hidroelektrostacijas	Uzstādītā jauda, MW
Pļaviņu HES	870
Rīgas HES	263
Ķeguma HES	401
Mazās HES	26.2

Avots: VAS Latvenergo

Hidroenerģija tiek izmantota 3 lielajās Latvenergo Daugavas kaskādes hidroelektrostacijās (Ķeguma HES, Pļaviņu HES un Rīgas HES) un 149 mazās hidroelektrostacijās. Latvijā uzstādīto HES jauda un to izstrāde redzama 3.6. un 3.7. tabulā.

3.7. tabula

Hidroelektrostacijās saražotā elektroenerģija, GWh

	2000	2001	2002	2003	2004
Lielās HES	2794	2796	2431	2212	3039
Mazās HES	25.3	37.1	32.6	50.85	65.52

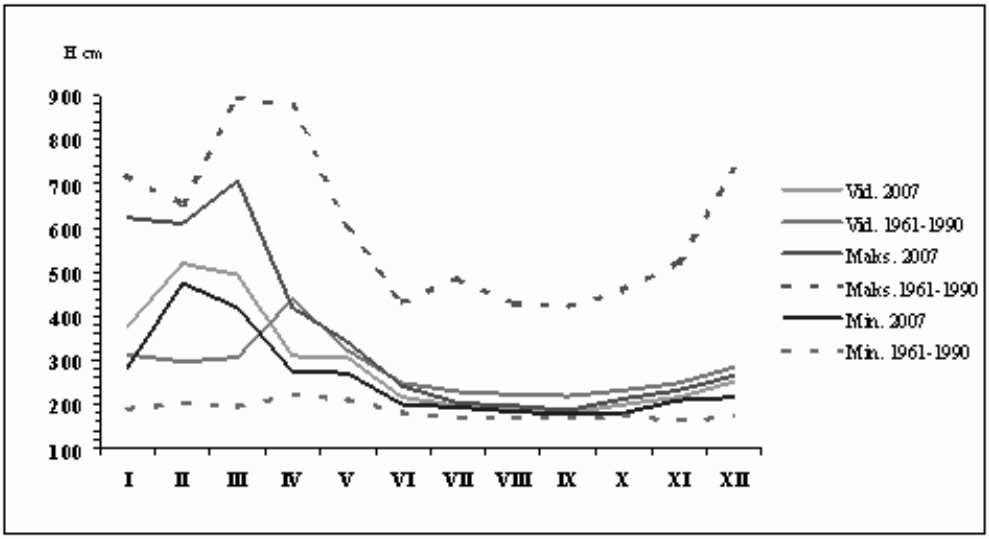
Avots: AS Latvenergo

Elektroenerģijas izstrādes pieauguma cēlonis mazajās stacijās 2003. gadā, ir straujš HES skaita pieaugums. 2001. un 2002. gadā tika nodotas vairāk kā 40 HES ar kopējo jaudu vairāk nekā 10 MW, jo valsts bija noteikusi atbalstu divkāršā tarifa veidā. Pastāv iespēja attīstīt arī lielas jaudas hidroelektrostaciju celtniecību, dažos gadījumos to apvienojot ar pretplūdu aizsargbūvju celtniecību teritorijās pie Daugavas upes (Jēkabpils un Daugavpils). Potenciālās jaunu hidrostaciju izveides jaudas uz Daugavas pēc Latvenergo novērtējuma ir 30 MW un 100 MW attiecīgi Jēkabpilī un Daugavpilī. Tomēr jāņem vērā, ka lielo hidroelektrostaciju projektu īstenošanu ietekmē gan sabiedrības izteikti negatīvā attieksme, gan potenciālā ietekme uz Eiropas Savienības īpaši aizsargājamo dabas teritoriju tīklu (NATURA 2000), kuru saraksts apstiprināts ar likumu „Par īpaši aizsargājamām dabas teritorijām".

3.10.1. Daugavas kaskāde

Daugava ir lielākā upe Latvijā, un tā ir arī lielākais hidroenerģijas avots Latvijā. Daugava iztek no Valdaja augstienes Krievijā, sākoties Latvijas teritorijai, tās platums jau ir ap 200 m. Lejpus Aiviekstes ietekai atrodas trīs ūdenskrātuves, kas lielā mērā nosaka hidroloģisko režīmu Daugavā. Raksturīgas ūdens līmeņa svārstības HES darbības rezultātā, kas ietekmē arī ūdens līmeni pieteku lejtecē.

Daugavas garums ir 1005 km (Latvijā – 352 km, jeb 35 % no kopējā), baseins platība 87 900 km (Latvijā 24 700 km, jeb 29 %). Daugavas baseina notece ir 20.45 km^3, kas 6–20 reizes pārsniedz citu lielbaseinu noteci. Daugavas kritums Latvijā ir 99 m (kopējais – 221 m), relatīvais kritums – 0.3 m. Daugavai pavasarī raksturīga strauja ūdenslīmeņa celšanās, kas palos Latvijas austrumu pierobežā var sasniegt 13 m. Novērojami arī ievērojami uzplūdi lietavu laikā, kad ūdens līmenis var paaugstināties par 2.5 m, kā arī vēju uzplūdi Daugavas grīvā. Jāņem vērā arī ūdens līmeņa izmaiņas Daugavā visa gada garumā (piemērs 3.93. att.).



3.93. att. **2007. gada mēnešu maksimālie, vidējie un minimālie ūdens līmeņi Daugavā pie Jēkabpils salīdzinājumā ar 1961.-1990. gada periodu**.

Hidroelektrostacijas uz Daugavas apsaimnieko akciju sabiedrības „Latvenergo" filiāle „Daugavas hidroelektrostacijas" (turpmāk tekstā Daugavas HES), ietver trīs hidroelektrostacijas: Pļaviņu HES, Ķeguma HES un Rīgas HES, kuras ir uzceltas

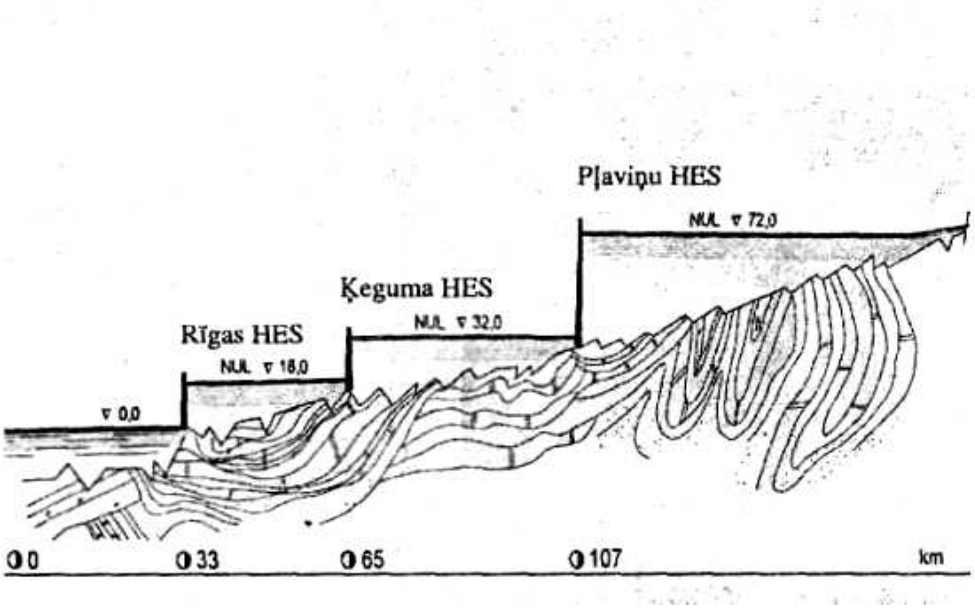
Daugavas upes lejtecē (skat. 3.94. att.) To kopējā jauda ir 1534 MW. „Daugavas hidroelektrostacijas" var saražot apmēram 70 % no visas Latvenergo saražotās elektroenerģijas apjoma (atkarība no gada klimatiskajiem apstākļiem). Hidroelektrostaciju kaskāde projektēta un izveidota, lai racionāli izmantotu Daugavas ūdens resursu enerģiju.

Pļaviņu ūdenskrātuve ir lielākā pēc tilpuma Latvijā (509.9 milj. m^3), kā arī dziļākā (līdz 47 m, vidēji 14.6 m) un garākā (45 km) no Daugavas ūdenskrātuvēm. Pēc platības tikai nedaudz atpaliek no Rīgas ūdenskrātuves (35 km^2, Rīgas ūdenskrātuve - 35.8 km^2).

Lejpus atrodas Ķeguma ūdenskrātuve, kas ir mazākā no Daugavas ūdenskrātuvēm (157 milj. m^3). Platība 24.9 km^2, garums 22 km, vidējais dziļums 6.3 m (lielākais – 16.5 m). Krasti pārsvarā stāvi vai slīpi.

Rīgas ūdenskrātuve atrodas Daugavas lejtecē, lielākā pēc platības un otra lielākā pēc tilpuma Latvijā (256 milj. m^3). Ūdenskrātuves garums ir 35.0 km, vidējais dziļums 7.1 m (lielākais – 17.4 m).

Lejpus Rīgas ūdenskrātuves Daugavas platums sasniedz 700 m, dziļums 15 m.



3.94. att. **Daugavas hidroelektrostaciju izvietojums**

Pļaviņu HES pavisam ir uzstādīti 10 hidroagregāti ar Frensis tipa turbīnām. To kopējā uzstādītā jauda 870 MW (pēc agregātu A2, A8 rekonstrukcijas 2001. gadā). Ūdens caurplūde caur turbīnu pie aprēķināta krituma ir robežās 279–290 m^3/s. Ūdens staba spiediena augstuma vērtība var mainīties no 35 līdz 41 metriem. Ģeneratori slēgti blokos ar 330 kV transformatoriem.

Ķeguma HES–1 ir četri hidroagregāti ar kopējo jaudu 74 MW. Aprēķinātais ūdens staba spiediena augstums – 13,5 metri. Ģeneratori slēgti blokā ar 110 kV transformatoru. 2001. gadā veikta HES rekonstrukcija (rekonstruēti 4 hidroagregāti) pārejot uz jaunām 5 lāpstiņu Kaplāna tipa turbīnām. Ūdens caurplūde caur turbīnu Ķeguma HES-1 pie aprēķināta krituma ir robežās 138–145 m^3/s.

Ķeguma HES–2 ir trīs hidroagregāti ar kopējo jaudu 192 MW (katrs 64 MW). Ūdens caurplūde caur turbīnu Ķeguma HES–2 pie aprēķināta krituma ir 540 m^3/s. Aprēķinātais ūdens staba spiediena augstums – 14 metri. Hidroagregāti slēgti blokā ar 110 kV transformatoru.

Rīgas HES uzstādīti seši hidroagregāti ar kopējo jaudu 402 MW. Tiek izmantotas Kaplāna tipa turbīnas. Ūdens caurplūde caur turbīnu pie aprēķinātā krituma 607 m^3/s. Aprēķinātais ūdens staba spiediena augstums – 12,9 metri.

Pļaviņu HES hidroagregātu optimālais darba režīms ir pie viena aprēķinātā (pases) ūdens spiedienaugstuma. Hidroagregāta ekspluatācijas gaitā ūdens spiedienaugstuma vērtība mainās diapazonā no 35 m līdz 41 m. Mainoties spiedienaugstuma vērtībai, ir jāmaina hidroagregāta jaudas vērtība, lai tiktu sasniegts maksimālais hidroagregāta lietderības koeficients. Patreiz agregāta izstrādājamās jaudas vērtība netiek mainīta atbilstoši reālai spiedienaugstuma vērtībai, jo agregāti visu laiku strādā ar nominālo jaudu, kas palielina izstrādei nepieciešamo ūdens daudzumu.

3.10.2. Mazās hidrospēkstacijas

Lielo interesi par mazo hidrospēkstaciju attīstību ir izraisījis pieaugošais elektrības pieprasījums, starptautiskās vienošanās par siltumnīcas efekta un tieši ogļskābās gāzes izplūdes samazināšanu (Kioto protokols), kustība pret vides degradāciju fosilo kurināmo iegūšanas un izmantošanas vietās.

Šo tendenci vēl palielināja Eiropas Komisijas Stratēģiskais un darbības plāns (White Paper) atjaunojamās enerģijas izmantošanai un ES Atjaunojamās enerģijas direktīva (RES–e direktīva), kas skaidri norāda, ka atjaunojamie energoresursi ir jāizmanto, lai samazinātu negatīvo ietekmi uz vidi un izveidotu ilgtspējīgu enerģijas iegūšanas sistēmu.

Nosacīti HES var iedalīt pēc uzstādītās jaudas. Par mazām līdz šim tikušas uzskatītas HES ar jaudu līdz 2 MW, bet pašlaik par mazajām HES būtu uzskatāmas stacijas, kuru jauda nav lielāka par 5 MW. Šāds dalījums izriet no Elektroenerģijas tirgus likuma, jo HES ar jaudu, kas ir lielāka par 5 MW, nevar pretendēt uz īpašiem enerģijas iepirkšanas nosacījumiem, ko piemēro atjaunojamo energoresursu sistēmām.

Aplūkojot Latvijas hidroenerģijas potenciālu, iespējami šādi mazo HES attīstības virzieni:

- mazas jaudas HES vietās, kur tās darbojās jau agrāk vai kur bija ūdensdzirnavas;
- mazas jaudas HES izveide „jaunās" vietās;
- esošo mazo HES tehnoloģiska pilnveidošana, palielinot to efektivitāti un samazinot ietekmi uz vidi.

1999. gadā Latvijas Lauksaimniecības universitātes speciālisti sagatavoja Latvijas mazo upju hidrotehniskā potenciāla vērtējumu[1]. Hidrotehniskā potenciāla aprēķini balstās uz upju hidroloģiju. Darbā tika aplūkoti 293 objekti, kuru prognozētā izstrāde pārsniegtu 100 000 kWh/gadā. Kopējā šo objektu gada izstrāde tika novērtēta uz 150 miljoni kWh. No sarakstā ietvertajiem objektiem šobrīd ir atjaunoti 105 objekti, tādējādi šobrīd neizmantoti ir 188 objekti. Praktiski mazo upju hidroenerģijas resursu vērtējums ir robežās no 150–300 miljoni kWh elektroenerģijas gadā. 2004. gadā kopējā mazo HES izstrāde bija 65 miljoni kWh, tātad kopumā tiek izmantoti 20–40 % no praktiski pieejamajiem mazo upju resursiem.

Pēc Latvijas Mazās hidroenerģijas asociācijas sniegtajām ziņām, pašlaik uz septiņām Latvijas upēm iespējams uzstādīt jaunas jaudas 15,4 MW, kas gadā varētu saražot ap 51 milj. kWh elektroenerģijas. Izstrādi var palielināt arī jau esošajās

[1] Strūbergs J., Siļķe K. Latvijas mazo upju hidroenerģētiskā potenciāla novērtējums. Jelgava, 1999.

mazajās HES, tās atbilstoši modernizējot. Ņemot vērā esošo HES finansiālās un tehniskās iespējas ieviest jaunas tehnoloģijas, elektroenerģijas izstrādi varētu palielināt par 10–20 %.

Par mazo HES ietekmi uz vidi Latvijas sabiedrībā pastāv atšķirīgi viedokļi. Lai to izvērtētu, 2004.–2005. gadā SIA „Vides projekti" veica pētījumu[2]. Tajā analizēta esošo mazo HES ietekme uz vidi, kā arī izveidots saraksts ar mazajām HES, kas degradē apkārtējo vidi. Galvenais piedāvātais risinājums ir jaunu videi draudzīgu tehnoloģiju ieviešana, ūdens līmeņa pieļaujamo svārstību normu pārskatīšana un HES darbību regulējošo normatīvo aktu izpildes pastiprināta kontrole.

Mazo hidroelektrostaciju galvenais uzdevums ir ekoloģiski tīras enerģijas ražošana mazos apjomos, nosedzot nelielu momentānu pieprasījumu. Tās var konkurēt ar fosilā kurināmā spēkstacijām to ģeogrāfiskā novietojuma un transporta ierobežojumu dēļ. Tās var uzskatīt par drošām, uz pārbaudītas tehnoloģiskās bāzes izveidotām sistēmām, kas ražo elektroenerģiju, un kuru izveidei nav nepieciešami milzīgi finansu resursi.

3.10.3. Mazo hidrospēkstaciju regulēšana Latvijā

PRASĪBAS IETEKMES UZ VIDI MAZINĀŠANAI ESOŠAJĀM HES

Nosakot HES darbības grafiku, lai mazinātu negatīvo ietekmi uz ekoloģiju un vidi kopumā, ir jāņem vērā sekojošas prasības.

- Sakarā ar to, ka ir vairākas upes, kur HES ir uzbūvētas kaskādes (vai gandrīz kaskādes) principā (Gauja, Dubna, Jaša, Losis, Šķēde, Svētupe), saistīto HES valdītājiem ir jāsaskaņo darbība savā starpā. Sevišķi būtiski tas ir galējos variantos – pavasara palu vai ilgstošu lietus periodu izraisītu plūdu laikā, kā arī mazūdens periodā.
- Nodrošināt ūdenskrātuves ūdens līmeņu regulēšanas režīmu starp normālo un minimālo uzstādinājuma līmeni, iespēju robežās nodrošinot darbību dabiskās

[2] Mazo hidroelektrostaciju darbības izvērtējums. Valsts SIA „Vides projekti". Rīga, 2004. gada decembris - 2005. gada janvāris.

pieteces režīmā vai nodrošinot lēnu, izlīdzinātu ūdens līmeņu regulēšanu ne vairāk kā 20 cm svārstību robežās.

Sakarā ar WWF 2004. gadā sagatavoto materiālu un kopš ir izstrādāti MK 23.12.2003. noteikumi Nr. 736 „Noteikumi par ūdens resursu lietošanas atļaujām", daļa HES valdītāju paši meklē iespējas samazināt ūdenskrātuvju ūdens līmeņu svārstības, optimizējot HES darbību.

Tajās HES, kur uzstādītas vairākas turbīnas – viena liela palu un daudzūdens periodu darbībai, un otra mazāka, kas domāta mazākiem caurplūdumiem, ūdenskrātuvju ūdens līmeņu svārstības ir izlīdzinātākas, līdz darbībai pieteces režīmā. Savukārt, modernajām propellera tipa turbīnām ar dubulto regulēšanu iespējams elektroenerģijas ražošanai izmantot jebkuru pieteci, līdz ar to izlīdzinot ūdenskrātuves ūdens līmeņu svārstības. Tāpēc, izdodot Ūdens resursu lietošanas atļauju, jāizvērtē katras HES iespējas sakārtot ūdenskrātuvju ūdens līmeņu svārstību režīmu, par to vienojoties ar HES valdītāju.

Tām HES, kuras darbojas uzkrāšanas režīmā ar svārstību režīmu vairāk kā 20 cm, un no kuru darbības ir konstatēta nelabvēlīga ietekme uz vidi, (ekspertiem konstatējot videi nodarīto kaitējumu), jānosaka ūdenskrātuves ūdens līmeņu režīma regulēšanas ierobežojumi, norādot termiņu nosacījumu ieviešanai.

- Izdodot ūdens resursu lietošanas atļauju:
  - ir jāpieprasa nepārtrauktas uzskaites ūdens līmeņa mērītāju uzstādīšana augšbjefā (dodot pārejas laiku to ieviešanai). Strīdus gadījumos par nepārtrauktā caurplūduma nodrošināšanu ir jāpiesaista valsts aģentūras „Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas aģentūra" hidrometeoroloģijas daļa, lai veiktu HES hidrotehnisko būvju tarēšanu, rezultātā izstrādājot ūdenskrātuves ūdens līmeņu un caurplūduma sakarību tabulas, pēc kurām nolasot ūdenskrātuves ūdens līmeni augšbjefā, jebkurā laikā var noteikt caur hidromezglu izvadītā caurplūduma daudzumu;
  - ir jāprecizē nepārtrauktā caurplūduma caur novadbūvi nodrošinājuma tehniskais risinājums. Iespēju robežās jāpārskata nepārtrauktā caurplūduma nodrošinājums pa hidrauliski aprēķinātām atverēm, meklējot iespējas to nodrošināt videi draudzīgākā veidā.

Ūdens resursu lietošanas atļauju izdošanas laikā Valsts vides dienesta ekspertiem lietderīgi sadarboties ar Reģionālās vides pārvaldes vides inspektoriem, dodot informāciju par problēmām, kas konstatētas HES ekspluatācijas laikā, kontrolējot HES ekspluatācijas atbilstību patreizējiem normatīvajiem aktiem.

- Ūdenskrātuvju ūdens līmeņu svārstību režīms ir saistīts ar ūdenskrātuves lielumu un seklūdens zonas lielumu. Ja ūdenskrātuvei ir stāvi krasti, neliela seklūdens zona, tad pie lielākām ūdens līmeņa svārstībām veidojas mazāka pārmitrinājuma zona. Sevišķi aizaugšanai ir pakļautas ūdenskrātuves, kuras atjaunotas vai veidotas jaunā vietā, vienkārši uzpludinot upes palieni (bieži pat neiztīrot kārtīgi apaugumu, nenovācot veģetāciju).
- Jāizvērtē ūdenskrātuves uzstādinājumu līmeņi, kuri noteikti uzsākot vai atjaunojot HES darbību.

Katrai ūdenskrātuvei ir pastāvīga un īslaicīga applūduma, seklūdens un pārmitrinājuma zonas. Pārmitrinājuma zona ir atkarīga no hidroģeoloģiskajiem apstākļiem, orientējoši tā ir ap 1,5–2m virs normālā ūdens līmeņa. Lietderīgi visām jaunbūvētajām HES un tām, kurām ir atjaunoti līmeņi ūdenskrātuvē pēc ilgāka pārtraukuma, noteikt vai precizēt applūšanas zonu pie aplēses caurplūduma ar 1 % pārsniegšanas varbūtību, kā arī veikt hidroloģiskā un hidroģeoloģiskā režīma izmaiņu novērtējumu par ekspluatācijas laiku. Eksperta atzinumu par pieļaujamām hidroloģiskā vai hidroģeoloģiskā režīma izmaiņām nepieciešams iesniegt, lai saņemtu ūdens resursu lietošanas atļauju (MK noteikumu Nr. 736 no 23.12.2003., 5.5. punkts). Ja HES darbības vajadzībām ūdenskrātuve ir uzpludināta teritorijā, kas pakļauta varbūtējai applūšanai, nepieciešams iekļaut prasības realizēt nepieciešamos pasākumus ēku (arī pagrabu) konstrukciju, kā arī teritorijas nodrošinājumam no applūšanas. Ja ietekme ir lielāka nekā bijusi paredzēta projektā un kļūst bīstama apkārtējām apdzīvotām vietām, ar speciālistu dotajiem ekspertu slēdzieniem jāpierāda, ka HES ekspluatācija ir apkārtējo iedzīvotāju īpašumiem un videi nepieļaujama un jāpieprasa HES valdītājam pazemināt ūdenskrātuves ekspluatācijas līmeņus. Ir jāizvērtē, piemēram, Straumes HES (Līvānos) noteiktā uzpludinājuma ietekme uz apkārtējām platībām, tāpat izvērtējama ir Ilzēnu HES, Augstāres HES, Prūšu HES, Grīvnieku HES, Līču HES u.c.

ūdenskrātuvju ietekme, kā arī visām citām no jauna uzpludinātajām HES ūdenskrātuvēm.

- Tām HES, kurām pēc LZPI ieteikuma nodrošināts ekoloģiskais caurplūdums (50 % no divu vasaras mēnešu vidējā caurplūduma), to otrreiz mainīt, pieprasot palielināt var tikai ar vides speciālistu ekspertīzes slēdzienu pamatojot nepieciešamību.
- Vēl nav veikta HES saimnieciskās darbības rezultātā zivju resursiem nodarītā zaudējuma noteikšana apmēram 70 HES. Latvijas zivju resursu aģentūras speciālistiem jāizvērtē ūdenskrātuves ekspluatācijas noteikumos noteiktā caurplūduma nodrošinājuma atbilstība zivju resursu eksistencei un nepieciešamības gadījumā jānosaka nepārtrauktais ekoloģiskais caurplūdums.
- HES ar derivācijas un/vai atvadkanāliem gadījumos jānosaka bioloģisko resursu eksistencei nepieciešamā ekoloģiskā caurplūduma daudzums, kas jānodrošina upes „tukšajā" posmā. Pamatojoties uz attiecīgās nozares eksperta slēdzienu par to, ka upes „tukšais" posms tiek neatgriezeniski ietekmēts no ūdens trūkuma, ir jānosaka nepārtraukti nodrošināmā caurplūduma lielums ūdenstecē, norādot termiņu nosacījumu ieviešanai. Savukārt HES ar īsiem atvadkanāliem, izdodot ūdens resursu lietošanas atļauju**,** ir individuāli jāizvērtē, vai ir nepieciešams (vecupes) bioloģisko resursu eksistences nodrošināšanai prasīt nepārtraukto caurplūdumu upē līdz atvadkanāla izplūdei caur novadbūvi, vai arī upes tukšais posms ir nebūtisks un ir pieļaujams caurplūdumu nodrošināt caur turbīnām pa atvadkanālu. To var konstatēt tikai dabā apsekojot HES (vislabāk mazūdens periodā) un nosakot upes tukšā posma ekoloģisko nozīmi.
- Kā viens no videi draudzīgiem HES darbības nosacījumiem tiek izvirzīts **veco** Frensisa tipa hidroturbīnu nomaiņa uz Kaplāna tipa propellera hidroturbīnām. HES turbīnās galvenokārt tiek traumētas zivis, kas pēc nārsta dodas atpakaļ uz jūru un šo zivju mazuļi, kas izauguši un attīstījušies līdz jūras dzīves stadijai. Zivju mirstība ir novērota, zivsaimniecības speciālisti to saista ar hidroturbīnu tipu. Vides un zivsaimniecības speciālisti uzskata, ka Frensisa tipa hidroturbīnas ir videi nedraudzīgākas nekā Kaplāna tipa hidroturbīnas, jo tām ir

vairāk lāpstiņu, uz kurām ūdens tiek padots radiāli, bet, atsitoties pret tām, izplūst vārpstas virzienā.

- Mehāniskie un hidrauliskie triecieni šaurajos starplāpstiņu kanālos ir galvenais zivju bojāejas cēlonis. Protams, ir jāskatās no sateces baseina lieluma, un ar to saistītā caurplūduma lieluma, upes nozīmīguma. Ja ir mazs sateces baseins, relatīvi neliels caurplūdums un mazāks straumes ātrums, ūdenim ejot uz turbīnām, zivīm ir mazāka iespēja tikt ierautām turbīnu pievadkanālā un, ja tiek ierautas, tiek tikai apdullinātas. It sevišķi, ja ir liels caurplūdums, kā arī augsts ūdens uzstādinājums, teorētiski var paredzēt, ka ir iespēja vairāk zivis traumēt Frensisa turbīnās. (nav Latvijā regulāru pētījumu par šo tēmu, vairāk minējumi).
- Ir nepieciešams izvērtēt jauno tehnoloģiju piemērotību Latvijas apstākļiem. Piemēram, Austrijas zivsaimniecības apvienība un Makšķernieku asociācija ir pozitīvi novērtējusi nesen patentēto „ūdensratu-dambi", kurš likvidē gandrīz visus faktorus pret kuriem iebilst zivsaimniecības nozares speciālisti: no dabīgās ūdensteces netiek novadīts ūdens, nenotiek straujas ūdens līmeņa svārstības, kā arī nav nepieciešami ne derivācijas kanāli, ne arī liels kritums. Iekārtas rotējošām daļām ir tāds pats ātrums kā dabīgai upes straumei un tādejādi cauri peldošām zivīm netiek radīts ne risks, ne nepārvarams šķērslis.
- Atbilstoši *Aizsargjoslu likumam* un MK 25.02.2003. noteikumiem Nr. 94 „Aizsargjoslu noteikšanas metodika ūdens akvatorijos augšpus un lejpus aizsprostiem" ir jāuztur prasības hidrobūvju drošības aizsargjoslu akvatorijā un lejas bjefā noteikšanai, vides aizsargjoslu un tauvas joslu nodrošināšanai un iekārtošanai, kā arī HES, hidrotehnisko būvju vai ūdenskrātuves valdītāja atbildībai par to uzturēšanu kārtībā.
- Sakarā ar to, ka daudzām HES beidzas vai tuvākajos gados beigsies dubultā tarifa laiks (2005. gada beigās 15 HES), jau tagad ir pirmie HES valdītāji, kuri pārtrauc vai domā pārtraukt tuvākajā laikā saimniecisko darbību. Tāpēc steidzīgi ir jāizvērtē optimālā kārtība, kā tiek pārtraukta ar HES ekspluatāciju saistītā saimnieciskā darbība (tajā skaitā hidrotehnisko būvju ekspluatācija), kā

arī jānosaka atbildība par nelikumīgu hidromezgla ekspluatācijas pārtraukšanu, izraisot potenciālu avārijas situāciju.

PRASĪBAS JAUNU HES BŪVNIECĪBAI VAI ATJAUNOŠANAI

Turpmāk būvējot jaunas vai atjaunojot mazās HES (ja tādas vēl būs), kā arī veicot rekonstrukciju esošajās mazajās HES, tehniskajos nosacījumos, kas saistīti ar HES celtniecību, atjaunošanu un ekspluatāciju ietveramas attiecīgas prasības:

- Saskaņā ar likumu „Par ietekmes uz vidi novērtējumu" (29.10.1998.) un grozījumiem tajā 16.02.2004., pie darbībām, kam nepieciešams veikt sākotnējo ietekmes uz vidi novērtējumu, ir minētas hidroelektrostacijas, kas nozīmē, ka jaunbūvējamām HES ir jāveic sākotnējās ietekmes uz vidi novērtējums;
- Pirms HES atjaunošanas jāpieprasa ūdenskrātuvi iztīrīt, paplašināt vai padziļināt, samazinot seklūdens zonu, iztīrīt aizaugumu un veģetāciju, lai palielinātu to ekspluatācijas laiku. Uzpludinot jaunu ūdenskrātuvi, ir jāiztīra tās gultne, apaugumu novācot vismaz 1m virs normālā uzstādinājuma ūdens līmeņa;
- Pieļaujot veikt regulēšanas un vai padziļināšanas darbus ūdenstecē lejas bjefā, ir jāveic upes pārrokamā posma un no rakšanas darbiem ietekmētā posma izvērtēšana, nosakot ierobežojumus, cik lielā apjomā drīkst padziļināt, cik garā posmā, kādi zaudējumi pieļaujami bioloģiskajiem resursiem u.c., vai aizliegumu, ja būtiski tiek ietekmēta ūdensteces bioloģija vai tiek konstatētas nozīmīgas īpaši aizsargājamas sugas vai biotopi;
- Ūdenskrātuves un upes lejas bjefa ietekmēto zonu hidroloģiskā un hidroģeoloģiskā apsekošana jāveic piesaistītiem speciālistiem – ekspertiem, kā arī jānosaka monitorings būvniecības laikā un vismaz pirmajos ekspluatācijas gados, novērojot ietekmes zonā esošās dzeramā ūdens akas, lai novērstu ūdens kvalitātes pasliktināšanos vai līmeņa pazemināšanos ietekmes zonā esošajās akās;
- Turpmāk pirms ūdenskrātuves uzpludināšanas vai saimnieciskās darbības atjaunošanas HES un ar to saistītās ūdenskrātuves ierīkošana jāiestrādā pagasta vai novada teritoriālplānojumā, sasaistot to ar aizsargjoslām, applūšanas zonām, apdzīvoto vietu sociālo attīstību, ar notekūdeņu izplūdes vietu esamību un

prognozēm to novietojumam;

- Jāapseko esošie biotopi, retās un aizsargājamās sugas, jānosaka to aizsardzībai nepieciešamās teritorijas, jāizveido mikroliegumi un jānosaka to aizsardzības un apsaimniekošanas noteikumi, kā arī monitorings, attiecīgi sekojot izmaiņām. Tikai tad, pamatojoties uz eksperta slēdzienu, kurš izdarīts pirms darbības uzsākšanas, varēs pierādīt, ka izmaiņas ir saistītas ar HES darbību;
- Jāpievērš lielāka uzmanība plūdu novēršanas un applūšanas riska samazināšanai. Paaugstinot vai atjaunojot līmeni ūdenskrātuvē, jāprecizē applūšanas zonu pie aplēses caurplūduma ar 1 % pārsniegšanas varbūtību un, ja šajā laikā, kamēr ūdenskrātuve bija nolaista, ir veikta apbūve, nedrīkst pieļaut atjaunot ūdenskrātuves līmeni iepriekšējā līmenī;
- Ietveramas prasības vižņu un ledus iešanas laikā veicamajiem pasākumiem tām HES, kuras atrodas uz upēm ar lieliem sateces baseiniem un ir augšējās;
- Vietās, kur uz vienas upes nelielā posmā (savstarpējas ietekmes zonā) tiek būvētas vairākas HES, jāpieprasa izstrādāt to darbības režīmu kaskādes principā, gan mazūdens periodos, bet sevišķi pavasara plūdos;
- Vietās, kur ir attiecīgs zivsaimnieciskais pamatojums, HES tehniskajos noteikumos iekļaujamas prasības projektēt un ierīkot zivju ceļu (vai atstāt perspektīvā vietu), tā konstruktīvos risinājumus un zivju ceļa darbības režīmu pamatojot ar vērtīgo zivju sugu migrācijas un dabīgās atražošanas augšpus uzstādinājumam nodrošināšanu, ar zivju dabīgās atražošanas augšpus uzstādinājuma lietderīgumu un nepieciešamību, ar ūdens līmeņu starpībām bjefos un noteiktiem straumes ātrumiem, kuri šo sugu zivīm ir pārvarami, kā arī nosakot prasības lejup migrējošo iznārstojušo zivju un to mazuļu novadīšanai lejas bjefā un to aizsardzībai pret iekļūšanu turbīnās. Latvijas būvnormatīva projektā „Meliorācijas sistēmas un hidrotehniskās būves" ir paredzēts iestrādāt nodaļu „Zivju migrācijas būves", nosakot raksturīgos straumes ātrumus, kuri jāievēro projektējot zivju migrācijas būves dažādām zivju sugām;
- Nepieciešams jau tehniskajos noteikumos ietvert prasību aprēķināt saimnieciskās darbības rezultātā zivju resursiem nodarītos zaudējumus atbilstoši MK 08.05.2001. noteikumiem Nr. 188 „Saimnieciskās darbības

rezultātā zivju resursiem nodarītā zaudējuma noteikšanas un kompensācijas kārtība" gan būvniecības, gan ekspluatācijas laikā.

Tāpat arī noteikt un kompensēt paredzētās darbības rezultātā dabai nodarītos zaudējumus atbilstoši spēkā esošo normatīvo aktu (MK 13.03.2001. noteikumi Nr. 117 „Noteikumi par zaudējumu atlīdzību par īpaši aizsargājamo sugu indivīdu un biotopu iznīcināšanu vai bojāšanu") prasībām;

- Jāuzlabo sadarbība ar VAS „Latvenergo". Nedrīkst pieļaut, ka tiek iepirkta elektroenerģija no HES valdītājiem, kamēr hidromezgls nav nodots ekspluatācijā. Lietderīgi papildināt „Enerģētikas likuma" 40. (1) pantu sekojošā redakcijā: „Gadījumos, ja tiek pārkāptas spēkā esošo normatīvo aktu prasības mazo hidroelektrostaciju ekspluatācijā, uzņēmums pārtrauc elektroenerģijas iepirkšanu līdz brīdim, kamēr tiek sakārtota ekspluatācija atbilstoši normatīvo aktu prasībām."

HIDROENERĢĒTIKAS POZITĪVĀ IETEKME UZ VIDI LATVIJĀ

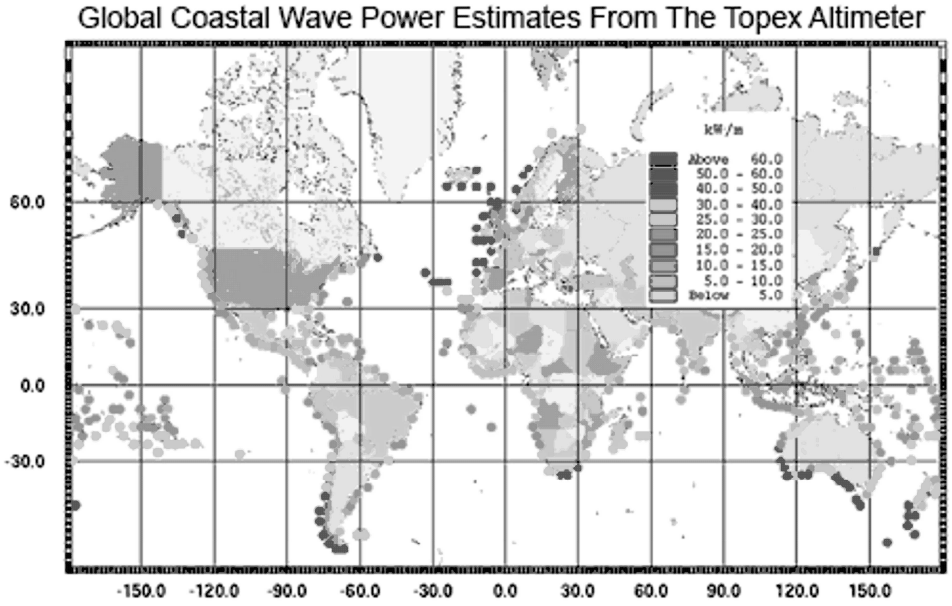
- Tiek sakārtoti bijušie dzirnavu ezeri un ūdenskrātuves, kas bija aizauguši, nekoptiem krastiem, sabrukušām dzirnavām, hidrobūvēm avārijas stāvoklī, bez saimnieka, plūdos apdraudot to ietekmes zonā esošos objektus (dzīvojamās mājas, vēsturiskos un kultūras pieminekļus, u.c.). Kā paraugu var minēt Ainavas HES, Sendzirnavu HES, Brenguļu HES, Spruktu HES, Rideļu HES, Zāģeru HES, u.c.;
- Sakārtotā vidē un labturīgi apsaimniekotā ūdenskrātuvē ir iespējama rekreācijas, lauku tūrisma, makšķerēšanas un ūdensapgādes attīstība, ar laiku atjaunojoties lauksaimniecībai – arī zemju laistīšana;
- Tiek nodrošinātas kaut nedaudzas darba vietas. Tas laukos ir nozīmīgi (piem., ja uz pagasta 2000 iedzīvotājiem 5–6 cilvēki strādā HES-os, tas ir tikpat, cik Rīgā būtu nodarbināti 2 700 cilvēki);
- Ražojot elektroenerģiju ar ūdens palīdzību, netiek sagrauts ozona stāvoklis, neveidojas skābā lietus mākoņi, netiek piesārņots gaiss;

- Mazūdens gados (kādi bija, piem., 2002. un 2003. gadi) ūdenskrātuves zivīm ir savā ziņā glābiņš, jo upēs dabiskā pietece ir tik maza, ka zivīm trūkst barības bāzes, kā arī nav kur paslēpties no malu zvejniekiem un putniem.

3.11. Netradicionāli ūdens enerģijas izmantošanas piemēri

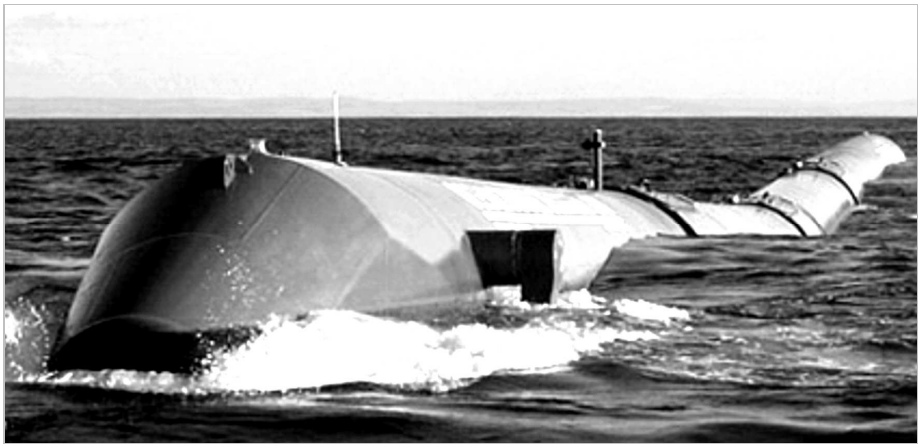
3.11.1. Viļņu enerģija

Esot pie jūras vai okeāna, mēs priecājamies par skaisto skatu – majestātiskiem viļņiem ar baltām putu cepurēm. Tajā pašā laikā viļņi var būt arī bīstami – gan vētrās, gan zemūdens zemestrīču radītie cunami, kas iznīcina visu savā ceļā. Daudzu valstu zinātnieki un inženieri piedāvā risinājumus, kā izmantot šo enerģiju. Izveidotas pat īpašas viļņu enerģijas kartes (skat. 3.95. att.)



3.95. att. **Globālā viļņu enerģijas karte**
(resurss: http://www.checkmateuk.com/seaenergy/potential.html)

Viens no lielākajiem projektiem realizēts Portugālē. Tās ziemeļu piekrastē apmēram 5 kilometrus no krasta izvietota viļņu enerģijas iekārta, kura tiek saukta arī par „Jūras čūsku" (skat. 3.96. un 3.97. att.).



3.96. att. **Viļņu enerģijas iekārtas Pelamis -750 pontons**
(resurss: www.hydro.com un www.oceanpd.com)

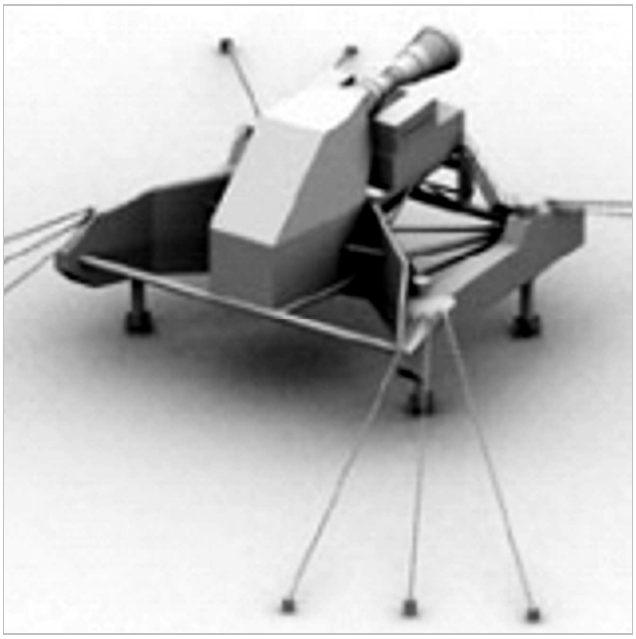
3.97. att. **Viļņu enerģijas iekārtas Pelamis -750 kopskats**
(resurss: www.hydro.com un www.oceanpd.com)

Oficiālais tās nosaukums ir Pelamis P–750. Tā sastāv no savā starpā savienotu pontonu rindas. Katrs sistēmas pontons ir neliela dzelzceļa vilciena vagona lielumā – 120 metrus garš, 3,5 metrus diametrā, svars noslogotā režīmā ap 750 tonnas. Katrā pontonā ir 3 energobloki, katrs ar 250 kW jaudu, tātad kopsummā 750 kW jaudu. Trīs

pontonu sistēma nodrošinās 2,25 MW jaudu. Tās darbības princips – atsevišķi pontoni savā starpā savienoti ar kustīgu šarnīru sistēmu, kurai klāt pievienotas kustības enerģiju pārveidojoša hidraulisko cilindru sistēma. Pontoniem kustoties viļnos un attiecībā vienam pret otru, tiek ražota elektroenerģija, kuru pa kabeļiem nogādā krastā.

Konstrukcijas autori ir skotu uzņēmuma Ocean Power Delivery – OPD inženieri, kuri uzsāka idejas realizāciju jau 1998. gadā. 2002. gadā un 2004. gadā uzņēmums saņēma finansējumu attiecīgi 9,8 milj.EUR un 10 milj.EUR apjomā, kurus tai piešķīra starptautisks konsorcijs, kurā līdzdarbojās norvēģu firma Hydro un šveices firma SAM. Ražošana tika uzsākta 2006. gadā, un uzstādīta 2008.–2009. g. Uzstādīšanas vieta – jūrā netālu no Portugāles pilsētas Póvoa de Varzim. Jūras dziļums uzstādīšanas vietā ir ap 50–60 m, jo šādā dziļumā pieaug viļņu augstums. Paredzēts, ka tiks uzstādītas 30 šādas sistēmas.

Savukārt Austrālijas uzņēmums Energetech piedāvā citu risinājumu (skat. 3.98.att.)



3.98. att. **Energetech viļņu energoturbīna** (resurss: www.wired.com)

Tās darbības princips būtiski atšķiras – gandrīz 500 tonnas smagie moduļi, kas noenkuroti okeāna šelfa zonā 240 km no Sidnejas, saņems viļņu enerģiju, pa īpaši

izveidotiem kanāliem liekot ūdens plūsmai paātrināties un ar lielu ātrumu triekties īpaši izveidotos gaisa rezervuāros, saspiežot gaisu, kas savukārt darbina turbīnas. Idejas autori uzsver, ka viņu aprēķini rāda būtisku un pozitīvu projekta komercializācijas potenciālu.

Visā pasaulē turpinās viļņu enerģijas energoprojektu izstrāde, it sevišķi vietām, kur nav atļauts izmantot fosilo kurināmo vai tā izmantošana ir pārāk dārga, bet viļņu enerģija ir pieejama (atsevišķas salas, u.c.).

3.11.2. Paisuma – bēguma enerģija

Ūdens kustību nodrošina ne tikai tā aprite dabā iztvaikošanas un nokrišņu dēļ, bet arī Mēness un Zemes gravitācijas lauku mijiedarbība, kuras rezultātā rodas paisums un bēgums. Paisuma un bēguma viļņu periodiskums ir 12 stundas un 25 minūtes, un minimālā un maksimālā viļņu augstuma periodiskums ir 14 diennaktis. Šīs enerģijas izmantošanai ir gara vēsture, jo tā nav atkarīga ne no laika apstākļiem, ne cilvēka darbības vai bezdarbības, tomēr būtisku un sistemātisku paisuma – bēguma enerģijas izmantošanu cilvēce uzsāka 20. gs. beigās un 21. gs. sākumā.

Aktīvākās šajā segmentā ir Norvēģija un Francija. 2003. gadā Norvēģijas piekrastē tika nodota ekspluatācijā pirmā modernā paisuma – bēguma elektrostacija (skat. 3.99. att.). Katras turbīnas jauda ir 300 kW, un tā darbojas abos virzienos – gan paisuma, gan bēguma gadījumā. Lànstrøm turbīnu izstrādāja Norvēģijas uzņēmums Hammerfest Stroem (skat. 3.100. att.). Tiek plānots uzstādīt līdz 20 šādas turbīnas.

3.99. att. **Norvēģijas piekrastē uzstādītās paisuma- bēguma elektrostacija** skice (resurss: http://www.hammerfeststrom.com/content/view/62/99/lang,en/)

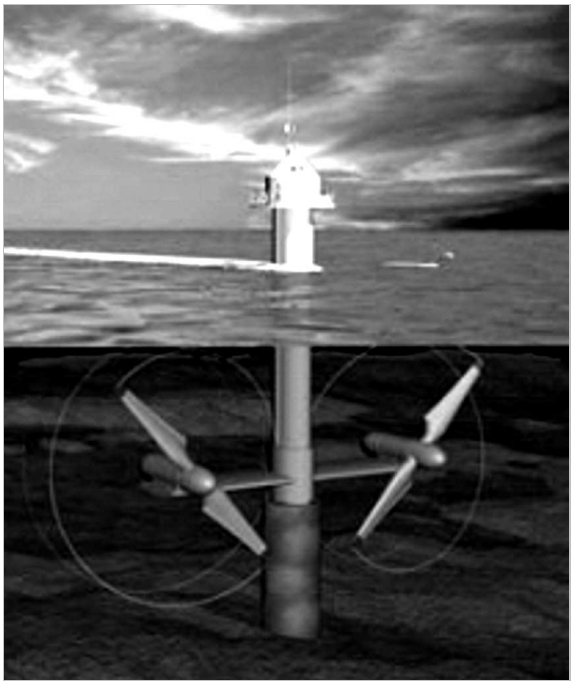
3.100. att. **Norvēģijas piekrastē uzstādītās paisuma- bēguma elektrostacijas Lànstrøm turbīnas zemūdens fotoattēls** (resurss: http://www.hammerfeststrom.com/content/view/62/99/lang,en/)

3.101. att. **Paisuma bēguma elektrostacija Kanādā**

Francijā paisuma – bēguma enerģijas izmantošanai izveidojusi īpašu dambi ar energoietaisēm La Rance līcī. Novērojumi gan liecina par to, ka šādu lielu energobūvju izveide jūrā rada būtiskas izmaiņas arī jūras ekovidē – mainās gan straumju virzieni, gan jūras iedzīvotāju struktūra. Tomēr arī šajā virzienā turpinās pētījumi un tiek piedāvātas arvien jaunas paisuma – bēguma energoietaises (piemēram, ScottishPower Renewables ar 60 MW projektu, Kanādas uzņēmums – 3.101. att., u.c.).

3.11.2. Jūras straumju enerģija

Kaut arī liekas, ka vienīgās straumes, ko mēs redzam, ir upēs, un jūras un okeāni tikai viļņojas, tomēr pētījumi rāda, ka tajos plūst milzīgas straumes. Kā pazīstamāko katrs eiropietis noteikti var nosaukt silto Golfa straumi, pateicoties kurai Eiropas ziemeļos ir tik maigs un mērens klimats (interesenti var apskatīties, kādi klimatiskie apstākļi šajos pašos platuma grādos ir gan Eirāzijas kontinenta vidienē, gan Ziemeļamerikā).



3.102. att. **Jūras straumes turbīnas projekts**
Marine Current Turbines projekts (2 milj. EUR EC grants izpētei)

Pozitīvie faktori jūras/okeāna straumju izmantošanā:

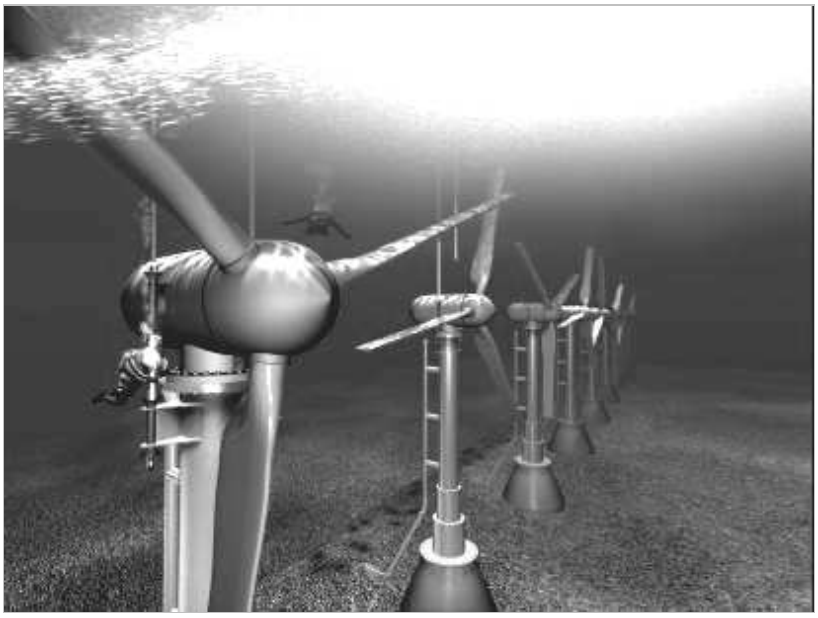
- milzīgas plūsmas – 1000 reizes lielākas nekā Misisipi (ASV) ūdens plūsma;
- Plūsmas stabilitāte un nemainīgums daudzu gadu garumā;
- Nemainīgs plūsmas ātrums – iespēja pielāgot turbīnas parametrus optimālai darbībai;
- Praktiski neierobežota turbīnu skaita izvietošanas iespēja.

Šī enerģijas veida izmantošanas problemātiskie aspekti ir sekojoši:

- Sarežģīta uzstādīšana, būvdarbi un apkopes jāveic zem ūdens (papildus izmaksas, jaunas tehnoloģijas, īpašas ierīces un speciālisti);
- Izmaksas enerģijas nogādāšanai uz cietzemi;
- Neskaidra ietekme uz vidi (zinātnieku prognozes par to, ka tuvākajās desmitgadēs Golfa straume varētu mainīt virzienu – atvirzīties no Eiropas rietumu krastiem, kas var radīt temperatūru pazemināšanos Eiropas ziemeļu un

ziemeļrietumu reģionos. Nav zināms, kā izmainīsies straumes, ja tās tiks bremzētas.)

Daži straumes turbīnu piemēri parādīti 3.102. – 3.103. attēlos.



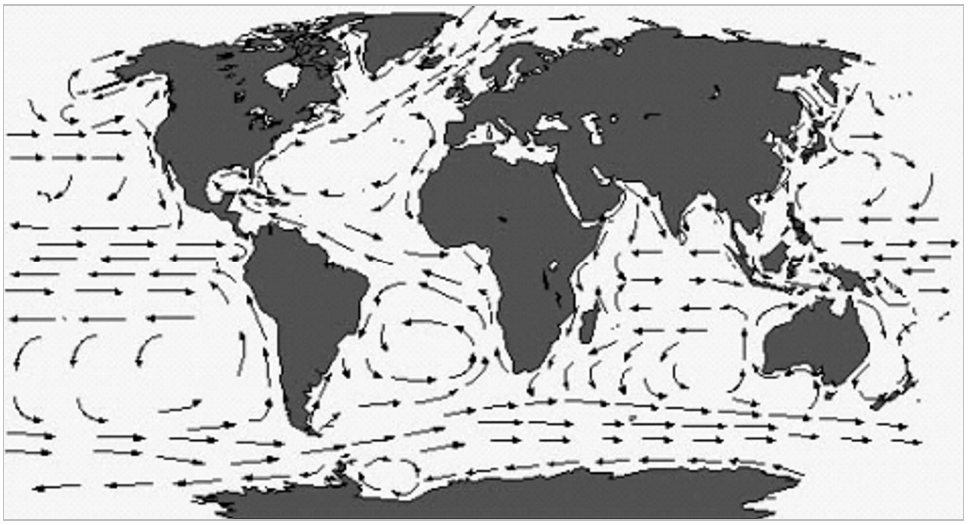
3.103. att. **Uz jūras/ okeāna grunts noenkurota energosistēma** (resurss: http://ocsenergy.anl.gov/includes/dsp_photozoom.cfm?imgname=currentturbine.jpg)

3.11.4. Ūdens termālo īpašību izmantošana

Kā jau tika atzīmēts ievadā, ūdens ir milzīgs termiskās enerģijas akumulators. Okeāns klāj vairāk kā 70 % no zemeslodes virsmas. Ik dienas 60 miljoni kvadrātkilometru tropisko jūru virsmu saņem saules radiācijas siltumu, kas enerģijas ziņā vienāds ar 250 miljardiem barelu naftas. Ja tikai viena desmitdaļa procenta no šīs enerģijas tiktu izmantota elektroenerģijas ieguvei, tās apjomi 20 reizes pārsniegtu ASV enerģijas patēriņu.

Vidējā ūdens temperatūra okeānu virsējos slāņos ir +17,8 ^{o}C. Vissiltākais ir Klusais okeāns ar +19,4 ^{o}C, visaukstākais – Ziemeļu ledus okeāns zem ledus klājumiem –0,75 ^{o}C. Okeāna virskāta ir ar diezgan homogēnu temperatūru un sāļu koncentrāciju. Sajaukšanos tajā nodrošina gan gaisa kustība (vētras, vējš,), gan straumes, gan arī ūdens vertikālā kustība tā temperatūras un blīvuma sakarību dēļ. Tajā pašā laikā 100–200 metru dziļumā ūdens temperatūra lēcienveidā samazinās par 1–2

^{o}C. Tālāk atkal līdz pat 1500 m dziļumam ūdens temperatūra lēni samazinās. Dziļumā virs 1500 m ūdens temperatūra ir gandrīz pastāvīga – robežās no +3^{o}C līdz +1 ^{o}C.



3.104. att. **Okeāna straumju karte**
(resurss: http://henry.pha.jhu.edu/ssip/asat_int/ocean.html)

Pasaulē arvien plašāk tiek izmantotas okeāna termiskās enerģijas konversijas (OTEC – ocean thermal energy conversion – angl.) sistēmas, kuras izmanto okeāna dabisko temperatūras gradientu – fizikālu faktu, ka okeāna ūdens slāņiem dažādos dziļumos ir dažādas temperatūras. Temperatūru starpības un vēju ietekmē notiek arī ūdens straumju rašanās (skat. 3.104. att.).

Pētījumi rāda, ka siltās straumes parasti kustās projām no ekvatora, bet aukstās – uz ekvatoru. Atlantijas okeānā un Klusā okeāna daļā, kas atrodas Ziemeļu puslodē, staruju kustība ir pulksteņa rādītāja virzienā,

Žils Gabriels Verns (Jules Gabriel Verne, 1828.–1905. g.) viens no zinātniskās fantastikas literatūras aizsācējiem, jau 1869. gadā uzrakstītajā grāmatā „20 000 ljē pa jūras dzelmi" kapteinim Nemo liek izmantot okeāna temperatūras gradientu, lai ar termopāru sistēmu iegūtu elektroenerģiju. Tas, protams, bija fantastisks un nereāls projekts (bet šobrīd?).

Tomēr teorētisko modeli reālai okeāna temperatūras gradienta izmantošanai tikai 1881. gadā izveidoja franču zinātnieks Arsēns D`Arsonvāls (Arsene D`Arsonval,

1851.–1940. g.), ievērojot, ka tropiskajos un ekvatoriālajos ūdeņos ir būtiska ūdens temperatūru starpība dažādos dziļumos. D`Arsonvāla koncepcijā tika izmantots darba šķidrums ar ļoti zemu vārīšanās temperatūru, piemēram, amonjaks, kas tiek iztvaicēts, izmantojot silto okeāna virsmas ūdeni. Iztvaicētais amonjaks tiek izmantots, lai grieztu turbīnu, kas savienota ar elektroģeneratoru. Aukstais okeāna ūdens dziļākajos slāņos tiek izmantots darba šķidruma kondensēšanai un siltuma aizvadīšanai. D`Arsonvāla aprēķinos tika pieņemts, ka siltā ūdens temperatūra ir ap 30 °C, bet kondensāta temperatūra ir ap 15 °C. Lielākais izaicinājums, ar kuru sastapās D`Arsonvāls, bija ievērojamie amonjaka tvaiku spiedieni sistēmā. Principā D`Arsonvāls izmantoja Renkina (Rankin) ciklu, izmantojot ārējo siltuma aģentu – okeāna ūdeni. To nosauca par slēgtā cikla OTEC.

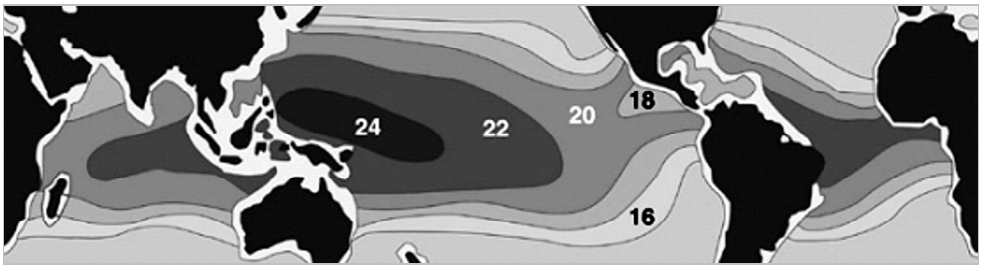
D`Arsonvālam pašam neizdevās realizēt savu ideju reālā spēkstacijā. To paveica viņa students Džoržs Klods (George Claude), kurš nedaudz modificēja sistēmu – lai izvairītos no sistēmas bioloģiskās piesārņošanās un minimizētu korozijas ietekmi uz siltummaiņiem, tika ieteikts par darba šķidrumu izmantot pašu silto okeāna ūdeni. Šī sistēma tika nosaukta par atvērtā cikla OTEC.

Pirmais darbojošais modelis tika izveidots 1928. gadā Ogre–Marhajā (Ougree–Marhaye), Beļģijā, izmantojot tēraudlietuves silto ūdeni (30 °C), un tuvējās Meusas upes ūdeni (10 °C) kā dzesējošo ūdeni. Turbīnā ar diametru 1 m ieplūda ūdens tvaiks ar 0,04 atm spiedienu, un izplūda no tās ar 0,02 atm spiedienu. Testa režīmā turbīna attīstīja 5000 apgr/min, un jaudu ap 50 kW. Rūpnieciski izmantojamu turbīnu Dž.Klods uzbūvēja 1930. gadā Mantanzas līcī (Mantanza Bay) Ziemeļkubā. Tās jauda bija 22 kW. Lielākais Kloda uzsāktais projekts bija peldošas spēkstacijas būve pie Brazīlijas krastiem, tomēr pirms palaišanas aukstā ūdens caurules tika sašķaidītas okeāna viļņos.

OTEC projekti un to izpēta uz laiku tika aizmirsti, līdz atkal franču inženieru grupa 1956. gadā izveidoja šādas spēkstacijas projektu ar 3 MW jaudu. Tomēr finansiālu apsvērumu dēļ projekts netika realizēts.

Spēcīgu grūdienu ūdens termālās enerģijas izmantošanai deva 20. gadsimta 70-gadu beigās uzsākusies enerģētiskā krīze. Gan ASV, gan Japāna uzsāka ļoti aktīvus jaunu enerģijas avotu meklējumus. Pirmā Japānas izveidotā mikro spēkstacija

Shiranui, kas darbojās no ūdens slāņu temperatūru starpības, bija ar jaudu 1 kW, un tika izmantota dažādu siltumnesēju un darba šķidrumu izpētei.



3.105. att. **Okeāna ūdens temperatūras gradients – temperatūru starpība starp ūdens virskārtu un 1000 m dziļumā esošo ūdens slāni**
(resurss: http://www.xenesys.com/english/otec/area.html)

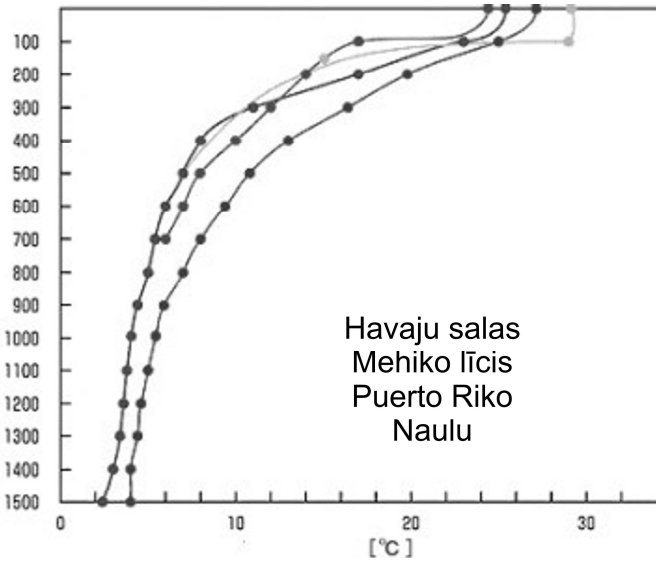
Uzlabojumus zemas temperatūras ūdens enerģijas izmantošanā sniedza gan krievu zinātnieka Aleksandra Kaļinas, gan japāņa Ueharas cikli, kuros tiek izmantots nevis viens darba šķidrums, bet gan to maisījums (piemēram, amonjaka un ūdens maisījums). Uehars izgudrotais kombinētais cikls (1994) ļāva vienlaicīgi ar efektīvāku (par 1–2 %) enerģijas iegūšanu iegūt arī atsāļotu jūras ūdeni. To var saukt arī par hibrīdā cikla OTEC.

Japānas zinātnieki ir izveidojuši īpašu karti, kurā parādīti apgabali ar lielāko temperatūras gradientu. Kā redzams no 3.105. attēla, lielākais temperatūras gradients ir ap ekvatoru, un tas sasniedz pat 24°.

Citā pētījumā ekvatoriālajā un tropu reģionā tika konstatēts, kā mainās ūdens temperatūra no virskārtas līdz pat 1000 m dziļumam (skat. 3.106. att.).

Zinātniskie pētījumi rāda, ka OTEC sistēmas kļūst ekonomiski izdevīgas, ja temperatūru starpība pārsniedz 15°. Aptuvenie aprēķini liecina, ka, kaut arī OTEC lietderības koeficients ir mazs (ap 2 %), ir lietderīga to būve, jo pieejamās enerģijas apjomi ir milzīgi – 10^7 W. Aprēķini rāda, ka Indijas OTEC potenciāls ir ap 80 GW.

Līdz mūsdienām jau realizēti vai uzsākti daudzi OTEC projekti. Saraksts ar dažiem no tiem dots 3.8. tabulā.



3.106.att. **Tropisko reģionu okeāna ūdens temperatūras atkarība no dziļuma** (resurss: http://www.xenesys.com/english/otec/area.html)

3.8. tabula

OTEC spēkstaciju saraksts

N.p.k.	Spēkstacijas atrašanās vieta	Jauda (kW)	Uzstādīšanas gads
1.	Abidžna, Ziloņkaula krasts	7000	1956
2.	Havaju salas, ASV	50	1979
3.	Havaju salas, ASV	1000	1981
4.	Nauru Republika, Klusais okeāns	100	1981
5.	Tokunošima, Japāna	52	1982
6.	Nauru Republika, Klusais okeāns	2500	Paziņots, ka būvēs
7.	Havaju salas, ASV	49000	Paziņots, ka būvēs
8.	Kalashakharapattnam, Tamil Nadu	100000	Paziņots, ka būvēs
9.	Andhra Pradesh, Indija	100000	Paziņots, ka būvēs

OTEC izmantošanas pozitīvie aspekti:

- ražo salīdzinoši lētu elektroenerģiju saulainos apgabalos;

- ražo atsāļotu ūdeni industriālām, lauksaimniecības un tautsaimniecības vajadzībām;
- mazina siltumnīcas efekta pastiprināšanos no elektroenerģijas ražošanas.

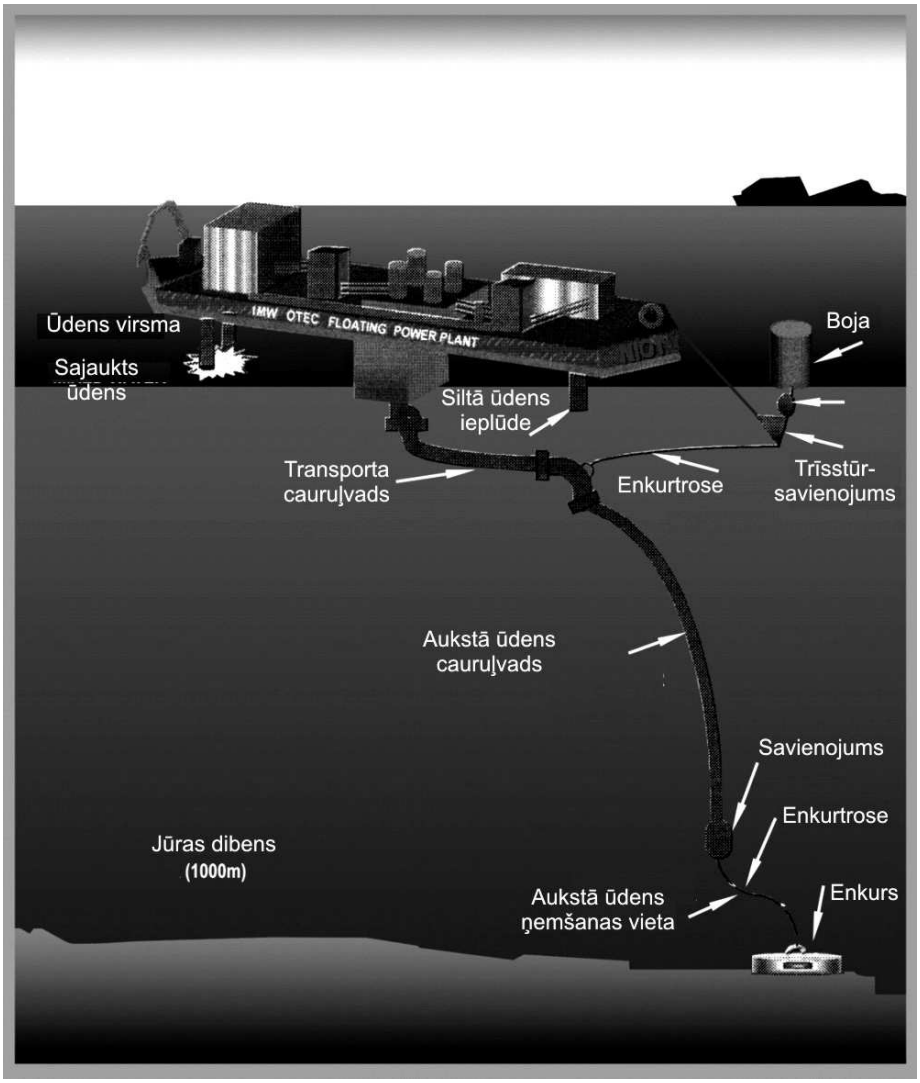
OTEC izmantošanas galvenie trūkumi:

- zema efektivitāte – pie 22 °C temperatūru starpības Karno cikla efektivitāte ir tikai 7 %. Ja tā samazinās līdz 10 °C, tā samazinās līdz 3,4 %;
- ierēķinot ūdens sūknēšanas nepieciešamību no lieliem dziļumiem (1000 m), kopējā efektivitāte samazinās zem 2,5 %
- augsti efektīvai zemas temperatūras enerģijas pārnesei nepieciešami sarežģīti siltummaiņi;
- bioloģiskais piesārņojums – mikroorganismu augšana un noslāņošanās uz siltummaiņu un to cauruļvadu sienam būtiski pasliktina OTEC efektivitāti, pat apdraudot to darbību (25…50 μm biezs mikroorganismu slānis pasliktina siltumapmaiņu par 50 %). Nepieciešama regulāra to apstrāde ar hloru vai mehāniska uzklātā slāņa tīrīšana, kaut gan pētījumi rāda, ka pat regulāra mehāniskā tīrīšana nespēj aizvākt cieto slāni, kas izveidojas uz siltummaiņu virsmām.

3.107. att. **OTEC konstruktīvā risinājuma skice** (resurss: http://www.seao2.com/otec/ North Queensland OTEC plant. By Dean Willey, Townsville.)

- Sarežģīta iegūtās elektroenerģijas nogāde uz krastu. Nepieciešami dārgi zemūdens kabeļi, kas spēj izturēt gan okeāna straumes, gan vētras, gan arī bioloģiskos uzbrukumus (vēžveidīgie, zivis, kabeļos sapinušies vaļi, u.c.)
- Ģenerējot 10 000 000 MW elektroenerģijas no okeāna ūdens temperatūras gradienta, okeāna virskārta atdzisīs par 1°C. Nav zināms, kā tas var ietekmēt bioloģisko vidi okeānā, kā arī arktisko un antarktisko ledāju kušanas intensitāti.
- Sarežģīta sistēmas blīvēšana augsto spiedienu un korozijaktīvas vides dēļ.

Inženiertehnisko risinājumu aprēķini rāda, ka lieljaudas OTEC izveidei ir arī noteiktas problēmas. Pieņemot 3 % efektivitāti, 1 000 MW OTEC darbībai nepieciešama ūdens plūsma ap 1000 m^3/s, pieplūdes caurule ar 10 m diametru, un plūsmu 3 m/s – lielas upes plūsmu palu laikā. Nedrīkst arī aizmirst, ka izplūstošajam ūdenim jāizplūst no sistēmas ne tuvāk kā 100 m no ūdens virsmas, lai tas ar savu paaugstināto sāļainību neietekmētu okeāna virsējos slāņus un tajos esošo dzīvību.



3.108. att. **Sage Universitātes, Japāna, un Indijas kopprojekts – „Sagar – Shakhti" slēgtā cikla 1 MW OTEC spēkstacija – peldošs projekts – darbības shēma**
(resurss: http://www.ioes.saga-u.ac.jp/images/India-OTEC-picture-new-small.jpg)

3.109. att. **Sage Universitātes, Japāna, un Indijas kopprojekts – „Sagar – Shakhti" slēgtā cikla 1 MW OTEC spēkstacija – peldošs projekts – fotoattēls**

Kā interesantu risinājumu var pieminēt okeāna ūdens temperatūras izmantošanu arktiskajos apgabalos, kur okeāna temperatūrai ir par 40° augstāka, nekā āra gaisa temperatūra. Pareizi izveidota OTEC sistēma var būt efektīva.

3.12. Noslēgums

Ūdens enerģētika ir ļoti būtisks videi draudzīgs enerģijas avots, un tās izmantošana pieaug visā pasaulē. Kā būtisku tendenci var atzīmēt mazas un vidējas jaudas energosistēmu attīstības tempu pieaugumu, un lieljaudas projektu samazinājumu – kā iemeslus var minēt atbilstošu ģeogrāfisko vietu trūkumu, un investīciju risku diversifikāciju. Attīstības valstīs joprojām ir liels neizmantotās hidroenerģijas potenciāls. Arī netradicionāli risinājumi dažādu ar ūdeni saistītu energoresursu izmantošanā paliek arvien populārāki, it sevišķi līdz ar jaunu tehnoloģiju un materiālu izstrādi.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Barkāns J. Enerģijas ražošana. RTU, 2002, 54 lpp.
2. Galiņš A., Grundulis A., Leščevics P., Rozenkrons J., Šnīders A. Vēja parki – problēmas un risinājumi.// Enerģētika un Sabiedrība. 2002. Nr.21.
3. Galiņš A., Leščevics P. Pastāvīgās ierosmes sinhronās mašīnas izmantošana alternatīvās enerģijas iekārtās. Starptautiskā zinātniskā konference „Modernas tehnoloģijas enerģijas ieguvei un efektīvai izmantošanai". Rakstu krājums. Jelgava, LLU, 2004, 67.-71. lpp.
4. Grundulis A., Galiņš A. Alternatīvā enerģētika XXI gadsimtā // Elektrisko tīklu attīstība: LEB 80 gadu jubilejas konferences referāti. Rīga, LEB, 2001, 78.-85. lpp.
5. Kanceviča L., Ziemelis I. Saules starojums – ekoloģiski tīrs enerģijas avots. Proccedings of International conference „EcoBalt' 2006". Rīga, Intego Plus, 2006, 151.-152. lpp.
6. Kanceviča L. Investigation on water heating by solar radiation. Proccedings of International conference „EcoBalt' 2007". Rīga, Intego Plus, 2007, p. 26-29.
7. Kaškarova G. Saules enerģijas izmantošanas iespējas Latvijā. // Enerģētika un automatizācija, 2003, Nr. 7, 52.-55. lpp.
8. Latvijas fizikas un tehnisko zinātņu žurnāls. 1996, Nr. 4, 83 lpp.
9. Osipovs B., Auniņa B. Alternatīvie enerģijas avoti. Rīga, Avots, 1990, 142 lpp.
10. Šipkovs J., Kaškarovs D., Šipkovs P. Saules enerģijas izmantošanas iespējas Latvijā. // Alternatīvā enerģija Latvijā. Simpozija referātu krājums. Jelgava, LLU, 1999, 72.-76. lpp.
11. Timmermanis K., Rozenkrons J. Elektrisko staciju un apakšstaciju elektriskā daļa. Rīga, Zvaigzne, 1995, 421. lpp.
12. Volkova V. Ansis Grundulis un viņa saules kalte // Praktiskais latvietis, 1999, 8. janv., 8. lpp.
13. Ziemelis I., Kanceviča L. Saules starojuma izmantošana ūdens sildīšanai // Saimnieks, 2005, Nr. 9, 40.-44. lpp.
14. Ziemelis I., Kanceviča L. Ūdens sildīšana ar saules kolektoriem // Vides Vēstis, 2005, Nr. 10, 38.-39. lpp.
15. Daugherty R. L. and Franzini J. B. Fluid Mechanics. 6th ed. New York, McGraw-Hill, 1965.
16. Gies, Frances and Joseph, 1994. Cathedral, Forge, and Waterwheel: Technology and Invention in the Middle Ages, Harper Perennial, New York.
17. Gipe Paul. Wind Power // Renewable Energy for Home, Farm and Business / White River Junction, VT. Chelesa Green Pub. Co., 2004, 496 p.
18. Jenkins A. An Elementary Treatment of the Reverse Sprinkler, Am. J. Phys. 72, 1276-1282 (2004).
19. Molly Jens-Peter. Windenergie: Theorie – Anwendung - Messung. / 2., vollig überarb., u. Erw. Aufl. – Karlsruhe: Muller, 1990, 316 p.
20. Reynolds, Terry S.,1984. "Medieval Roots of the Industrial Revolution," Scientific American, July, p.122-130.
21. Reynolds J., Windmills and Watermills (New York: Praeger, 1970).
22. Strandh S., A History of the Machine (New York: A&W Publishers, 1979).

23. Vitruvius M., De Architectura (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1934. Loeb Classical Library #280). Vol II, Book X, Chapter V.
24. Weiss W., Bergmann I., Faninger G. Solar heating worldwide – markets and contribution to the energy supply 2003. Graz: Stenhuber Infodesign, 2005. p. 39.
25. Windblatt./The ENERCON Magazine 05/2003.
26. Wilson P. N., Water Turbines. London: HMSO, 1974.
27. Грундулис А.О., Галиньш А.А. Система индивидуального электрообеспечения объекта с использованием энергиисолнца и ветра // Аграрная энергетика в XX1-м веке: Материалы международной научно-технической конференции. Минск, УП «Технопринт», 2001, с. 19 – 21.
28. Грундулис А., Розенкронс Я., Галиньш А. Применение ветрогенераторов в сельском хозяйстве // Надежные и экономичные сельскохозяйственные технологии: Сборник трудов международной научной конференции. 25–26 июля 2002 года. Приекули, 2002, с. 170 –171.
29. Грундулис А.О., Галиньш А.А. Система индивидуального энергообеспечения потребителя. // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Труды 3-й Международной научно-технической конференции (14–15 мая 2003 года, Москва, ГНУ ВИЭСХ). Часть 1. Общие проблемы энергообеспечения и энергосбережения. М., ГНУ ВИЭСХ, 2003, с. 186-191.
30. Маркус Т. А., Моррио Э. Н. Здания, климат и энергия. Москва, Гидрометеоиздат, 1985, 544 с.
31. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М., Энергоиздат, 1991, 208 с.
32. Шефтер Я.И., Рождественский И.В. Изобретателю о ветродвигателях и ветроустановках. М., Издательство Министерства с/х СССР, 1957, 147с.
33. Твайделл Дж., Уэйр А.. Возобновляемые источники энергии. Перевод с английского под предакцией В.А.Коробкова. Москва, Энергоатомиздат, 1990, 392 с. [John W. Twidell and Anthony D. Weir.(1986). Renewable energy resources. London. E.& F.N. Spon, 392 pp.].
34. Interneta resurss, skatīts 07.2008: http://www.altenergyinvestor.org/
35. Interneta resurss, skatīts 06.2008: http://www.theirEarth.com/
36. Interneta resurss, skatīts 05.2008: http://www.nordex-online.com/
37. Interneta resurss, skatīts 05.2008: http://www.wea.lv /
38. Interneta resurss, skatīts 08.2008: http://www.manageddata.com/
39. Interneta resurss, skatīts 04.2008: http://www.global-windpower.com/
40. Interneta resurss, skatīts 04.2008: http://www.enviro-techs.com/
41. Interneta resurss, skatīts 04.2008: http://www.specialty-bar.com/
42. Interneta resurss, skatīts 05.2008: http://www.eng.cam.ac.uk/
43. Interneta resurss, skatīts 06.2008: http://www.w1.siemens.com/
44. Interneta resurss, skatīts 03.2008: http://www.theyeagergroup.com/
45. Interneta resurss, skatīts 07.2008: http://www.windenergy.lv/
46. Interneta resurss, skatīts 06.2008: http://www.windpower.org/
47. Interneta resurss, skatīts 07.2008: http://www.latvenergo.lv/
48. Interneta resurss skatīts 07.2008: http://www.dhmo.org/

49. Interneta resurss skatīts 05.2008: www.yangtzeriver.org
50. Interneta resurss skatīts 04.2008: http://www.qurna.org/saqiyas.html
51. Interneta resurss skatīts 06.2008: http://www.waterwheelfactory.com
52. Interneta resurss skatīts 05.2008: http://servicios.laverdad.es/murcia_agua
53. http://www.chinapage.com/science/tiangongkaiwu/tiangongkaiwu.html Resurss skatīts 2008. gada maijā.
54. http://www.treasuredstocks.com/C_1_1150520-013.html Resurss skatīts 2008. gada maijā.
55. www.answers.com/topic/ocean-thermal-energy-conversion Resurss skatīts 2008. gada maijā.
56. Interneta resurss skatīts 05.2008: www.otecnews.org/
57. Interneta resurss skatīts 05.2008: www.nrel.gov/otec/
58. www.cogeneration.net/ocean_thermal_energy_conversion.htm Resurss skatīts 2008. gada maijā.
59. www.britannica.com/EBchecked/topic/424415/ocean-thermal-energy-conversion Resurss skatīts 2008. gada maijā.
60. www.marinebuzz.com/2007/10/25/what-is-ocean-thermal-energy-conversion-otec/ Resurss skatīts 2008. gada maijā.
61. Layman's Guidebook on how to develop a small hydro site, European Small Hydropower Association, http://www.esha.be/ Resurss skatīts 2008. gada maijā.
62. Leyman F., A practical hero, Mechanical Engineering, Magazine Online http://www.memagazine.org/backissues/membersonly/feb04/features/prachero/prachero.html Resurss skatīts 2008. gada maijā.
63. Scientific American Supplement, No. 795, March 28, 1891 / Various http://www.gutenberg.org/ebooks/13443 Resurss skatīts 2008. gada maijā.
64. Гелиосистемы и тепловые насосы в системах автономного тепло- и холодоснабжения / Отопление и горячее водоснабжение – А. Л. Гликсон, А. В. Дорошенко, 2004 [online] [cyted 12-02-2007]. Avaliable: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2600