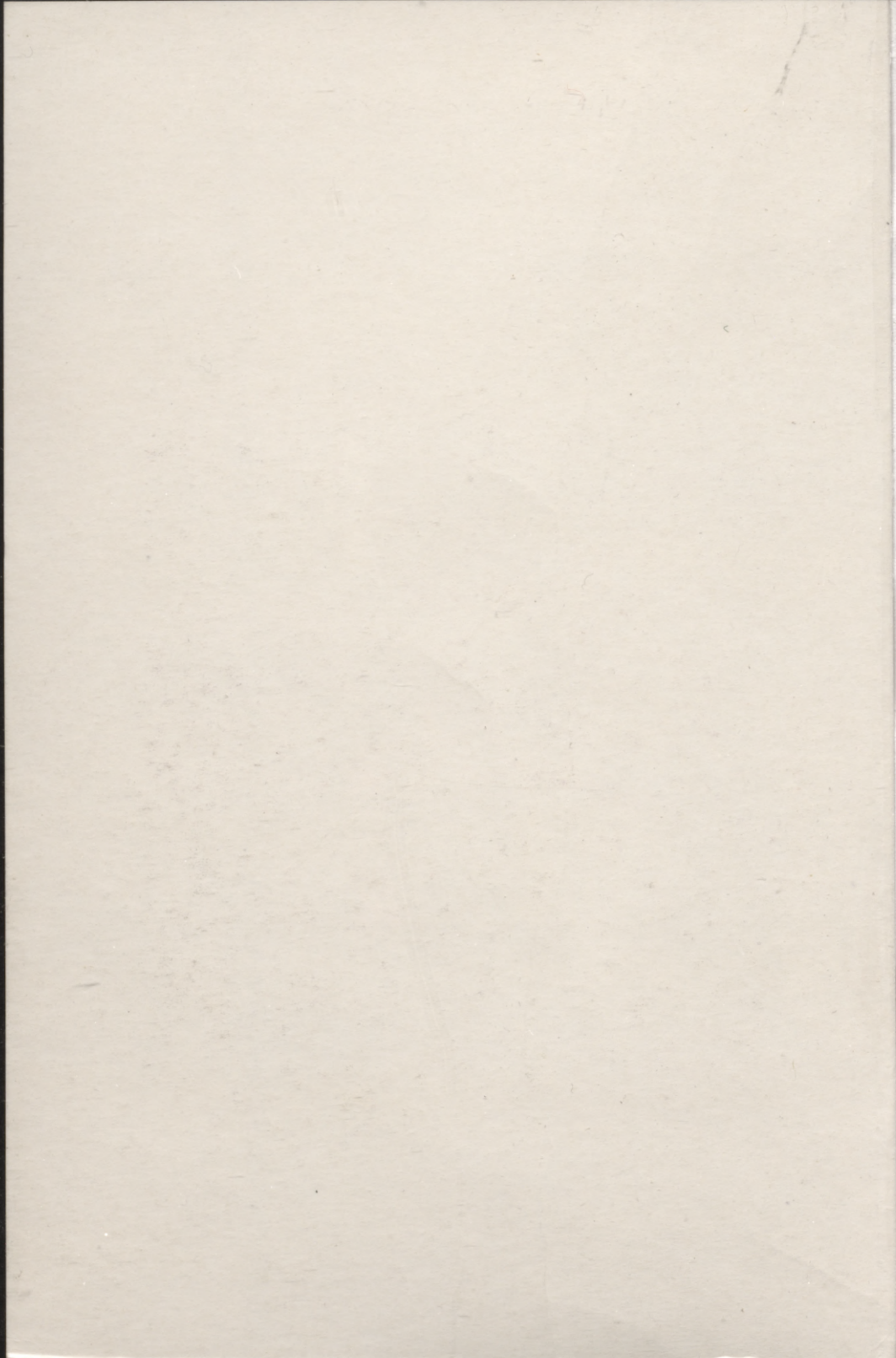


J. Barkāns

# Enerģijas ražošana



Rīga - 2002



2002-4  
119

Latvijas Nacionālā  
BIBLIOTĒKA

L  
6°

Rīgas Tehniskā universitāte

Enerģētikas institūts

J. Barkāns

# Enerģijas ražošana

Elektrisko tīklu, sistēmu un automatizācijas  
specialitāšu studentiem

Rīgas Tehniskā universitāte

Rīga - 2001

UDK 621.311.16

0302028111

Inženierzinātņu Dr.hab., profesors Jēkabs Barkāns

Grāmata var tikt izmantota kā mācību līdzeklis kursam "Energētikas pamati". To var izmantot elektrisko tīklu, sistēmu un automatizācijas specializācijas kā arī citu līdzīgu profilu studenti kam jāiepazīstas ar enerģijas ražošanas tehnoloģijām. Kā arī inženieriem, kas strādā šaurā nozarē.

Dots pārskats par enerģētikas attīstību pasaulē un tās perspektīvām. Apskatīti enerģijas ražošanas tehnoloģijas: gāzu, tvaiku, atomu, un elektroenerģētikā kā arī vides aizsardzības pasākumi. Grāmatas uzdevums dot pietiekoši plašu pārskatu specialitātē.

Recenzenti: prof. I.Veidenbergs, prof. L.Paperno

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2001.g.

ISBN 9984-32-174-6

## SATURS

Priekšvārds .....	5
1. NODAĻA. ENERĢIJA UN PASAULE .....	7
1.1. Enerģijas patēriņš pasaulē.....	7
1.2. Kurināmais.....	26
1.3. Enerģijas resursi.....	31
2. NODAĻA. GĀZU ENERĢĒTIKA.....	38
2.1. Gāzu likumi.....	38
2.2. Gāzu izplēšanās darbs.....	42
2.3. Termodinamiskie procesi gāzēs.....	44
2.4. Gāzu termodinamiskie procesi.....	50
2.5. Aizdedzes dzinēju termodinamiskais cikls.....	52
2.6. Dīzeļa dzinēja termodinamiskais cikls.....	54
2.7. Trinklera termodinamiskais cikls.....	55
2.8. Iekšdedzes dzinēji un vide.....	58
2.9. Detonācija.....	61
2.10. Automobiļu nākotne.....	64
2.11. Energosiltuma bloki.....	68
2.12. Gāzes turbīnas.....	70
2.13. Stirlinga dzinējs.....	72
3. NODAĻA. TVAIKA ENERĢĒTIKA .....	75
3.1. Entalpija.....	75
3.2. Termodinamiskie procesi h <sub>s</sub> koordinātēs.....	80
3.3. Enerģētiskie katli.....	82
3.4. Tvaika turbīnas.....	85
3.5. Renkina cikls.....	87
3.6. Elektrostaciju lietderības koeficienta palielināšanas iespējas.....	90
3.7. Kombinētais cikls.....	94
3.8. Magnetohidrodinamiskā enerģijas pārveidošana.....	95
3.9. Siltuma potenciāla transformācija.....	96
3.10. Ekoloģiski tīras elektrostacijas.....	108
3.11. Dūmgāzu attīrīšana no putekļiem.....	109
3.12. Dūmgāzu attīrīšana no sēra dioksīda.....	114

3.13.	Dūmgāzu attīrīšana no slāpekļa oksīdiem.....	117
3.14.	Vai ir cerības apvaldīt klimata izmaiņas? .....	120
4.	<b>NODAĻA. ATOMU ELEKTROSTACIJAS</b> .....	131
4.1.	Ieskats elementārlādiņu fizikā. ....	131
4.2.	Kurināmais.....	136
4.3.	Siltumneutronu reaktori. ....	139
4.4.	Ātrneutronu reaktori. ....	143
5.	<b>NODAĻA. HIDROENERĢĒTIKA</b> .....	148
6.	<b>NODAĻA. ALTERNATĪVĀ ENERĢĒTIKA</b> .....	155
6.1.	Saules enerģētika. ....	155
6.2.	Vēja enerģētika. ....	160
6.3.	Biomases enerģētika. ....	171
7.	<b>NODAĻA. ELEKTROENERĢĒTIKA</b> .....	178
7.1.	Mehāniskās enerģijas pārveidošana elektriskā enerģijā.....	178
7.2.	Transformatori. ....	187
7.3.	Komutācijas aparāti. ....	192
7.4.	Elektriskās līnijas un tīkli. ....	196
7.5.	Elektroenerģijas patēriņš.....	200
7.6.	Automātisko regulatoru statiskās raksturlīknes. ....	204
7.7.	Aktīvās jaudas bilance. ....	208
7.8.	Reaktīvās jaudas bilance.....	212
7.9.	Pārvades stabilitāte. ....	218
7.10.	Elektrisko iekārtu aizsardzība.....	220
7.11.	Energosistēmu vadīšana.....	222
8.	<b>NODAĻA. ENERĢIJAS IZMAKSAS UN TARIFI</b> .....	227
8.1.	Izdevumu struktūra enerģētikā.....	227
8.2.	Starpsistēmu enerģijas tarifi.....	231
8.3.	Elektriskās enerģijas uzskaitē. ....	233
8.4.	Siltuma uzskaitē.....	235
8.5.	Enerģijas tirgus. ....	243
8.6.	Cik maksā enerģija?.....	249
	Literatūras saraksts.....	254

## Priekšvārds

Enerģētika, būdama pašreizējā dzīves veida pamats, ir ļoti daudzpusīga un plaša nozare. Enerģētiķi parasti nodarbojas ar kādu šauru šīs nozares virzienu. Rezultātā speciālistiem nav kopējā priekšstata par enerģētikas problēmām.

Šīs grāmatas uzdevums ir dot informāciju par enerģētiku kopumā. Tā dod minimālu priekšstatu par enerģētikas attīstību pasaulē, sākot ar primāro enerģiju – kurināmo, tā izmantošanas apjomiem un potenciāliem resursiem.

Tiek apskatīti gāzes enerģētikas pamati, gāzu termodinamiskie cikli un dažādu dzinēju darbības principi, kuros siltuma enerģija tiek pārvērsta mehāniskā enerģijā. Apskatīti šo dzinēju pilnveidošanas virzieni un kurināmā izmaiņas tendences perspektīvā, ievērojot ietekmi uz vidi.

Lielā enerģētika balstās uz tvaika iekārtām. Nodaļā, kas ir veltīta tvaika enerģētikai, ir apskatīti enerģētisko katlu un tvaika ģeneratoru, kā arī turbīnu darbības principi un to lietderības koeficienti. Apskatītas lietderības koeficientu palielināšana, kā arī gāztvaika iekārta izmantošanas iespējas enerģētikas kāpināšanai ar samērā nelieliem kapitālieguldījumiem.

Kurināmā sadedzināšana ir saistīta ar kaitīgu iespaidu uz vidi. Šā iespada samazināšanai tiek izmantotas attīrīšanas iekārtas, kas tiek apskatītas šīs nodaļas ietvaros.

Kodolenerģētika ir svarīga lielās enerģētikas sastāvdaļa. Enerģētikas speciālistiem ir jāsaprot problēmas, ar kurām nākas saskarties šajā nozarē. Šiem jautājumiem ir veltīta speciāla nodaļa.

Pēdējā laikā pieaug interese pret alternatīvo enerģētiku, kam ir atjaunojošs raksturs un kas mazāk iespaido vidi. Šīs problēmas apskatītas hidroenerģētikas un citās alternatīvās

enerģētikas nodaļās. Apskatīti tehniskie aspekti un šo enerģētikas veidu resursi.

Visizplatītākais enerģijas veids ir elektroenerģētika. Tai ir veltīta 7.nodaļa. Šeit tiek apskatīti elektroenerģētisko sistēmu elementi un dots priekšstats par aktīvās un reaktīvās jaudu bilanču nodrošināšanas principiem.

Grāmatā ir minimāli doti matēmātiskie aprēķini. Bet to var apgūt arī, balstoties uz fizikālo jēgu un lielo zīmējumu skaitu, kas raksturo katru tehnisko jautājumu.

Grāmata atbilst kursam "Enerģētikas pamati" un var tikt izmantota arī citosursos, kas tiek lasīti studentiem enerģētikas speciālitātēs.

Autors izsaka dziļu pateicību E.Stabulniecei par teksta salikšanu, A.Vasiljevam un S.Ļeščenko par attēlu un materiāla kompleksa sagatavošanu, un redaktorei, L.Paeglei par darba rediģēšanu.

## 1. NODAĻA. ENERĢIJA UN PASAULE

### 1.1. Enerģijas patēriņš pasaulē.

Cilvēki tiecas uz tādu dzīves veidu, kādu var nodrošināt sasniegtais tehnoloģiskais līmenis. Tiekšanos pēc komforta nosaka daļēji mākslīgas vides radīšanu. Šādas vides radīšana neizbēgami saistīta ar enerģijas patēriņu.

Komfortabls dzīves veids izvirza prasības pret dzīves vides temperatūru. Ziemā, temperatūrai pazeminoties, tā jāuztur dzīvojamās telpās. Siltā klimata joslā grūti saglabāt darbaspēju un labsajūtu pie augstām temperatūrām. Šinī gadījumā izmanto gaisa kondicionēšanu, ko panāk ar enerģiju patērējošām tehnoloģiskām iekārtām.

Cilvēka labsajūta un veselība ir atkarīga arī no gaisa kvalitātes. Tātad nedrīkst pieļaut atmosfēras piesārņošanu ar dažāda veida izmešiem. Telpās padodamā gaisa kvalitāte atkarīga arī no tā mitruma pakāpes, kam jāatrodas noteiktās robežās. To nodrošinās ventilācijas sistēmas.

Cilvēka aktīvais diennakts cikls pilnīgi neatbilst dabīgam gaismas ciklam. Šī neatbilstība tiek kompensēta ar mākslīgu apgaismojumu, kas patērē enerģiju.

Enerģija tiek izmantota arī mājsaimniecībā ēdienu gatavošanai, ūdens apgādē un citām vajadzībām.

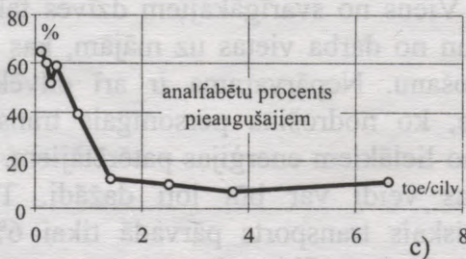
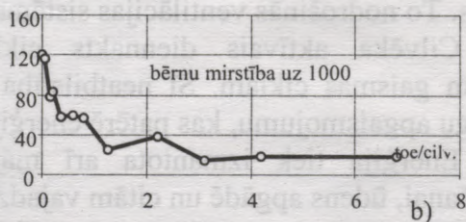
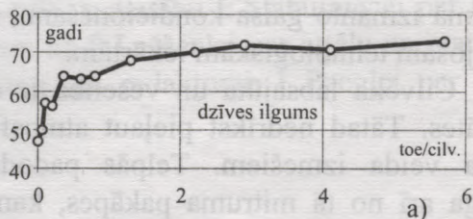
Viens no svarīgākajiem dzīves faktoriem ir nokļūšana darbā un no darba vietas uz mājām, kas saistīts ar transporta izmantošanu. Nepārvarama ir arī cilvēka kustības brīvības tieksme, ko nodrošina personīgais transports. Transports ir viens no lielākiem enerģijas patērētājiem. Pasažieru transporta attīstības veidi var būt ļoti dažādi. Tā, piemēram, ASV sabiedriskais transports pārvadā tikai 6% pasažieru, Vācijā 15%, bet Japānā 47%.

Dzīves komforta nodrošināšanā arvien lielāka loma ir informācijas teknikai. Televīzija un skaitļošanas tehnika kā tās galvenā sastāvdaļa ir augstās tehnoloģijas produkti. Arī mājsaimniecības un transporta iekārtu, tāpat kā visu pārējo ražojumu radīšanai, nepieciešama rūpniecība, kas vienlaicīgi ar tirdzniecību un pakalpojumu sfērām nodrošina darba vietas un ienākumus, kā arī nodokļus valstīm, no kurienes tiek smelti līdzekļi sociālai sfērai. Visu šo nozaru funkcionēšana nav iedomājama bez enerģijas patēriņa.

Tātad enerģijas ražošana cilvēces dzīves vajadzībām ir neizbēgama.

Primārās enerģijas (enerģētiskā kurināmā) īpatnējais patēriņš uz iedzīvotāju caurmērā raksturo dzīves līmeni. Šim līmenim atbilst cilvēku vidējais dzīves ilgums, bērnu mirstība un analfabētisms. Dabīgi, ka šo rādītāju līmenis ir atkarīgs no sociālās sfēras līmeņa, kas var tikt sasniegts attīstītas ekonomikas apstākļos.

Attiecinot šos rādītājus uz īpatnējo enerģijas patēriņu, iegūstam



1.1.att. Dzīves līmeņa rādītāji pie dažādiem īpatnējiem primārās enerģijas patēriņiem.

sakarības, kas attēlotas 1.1.attēlā. No tā izriet, ka, neskatoties uz to, ka šīs sakarības ir netiešas, dzīves līmenis sasniedz augstus rezultātus pie enerģijas patēriņa 2 toe/iedz. Toe - kurināmā daudzums, kas atbilst naftas ekvivalenta tonnai ar siltumspēju 9000 kcal/kg.

Enerģijas patēriņa ziņā tiek izskatīti trīs pasaules reģioni:

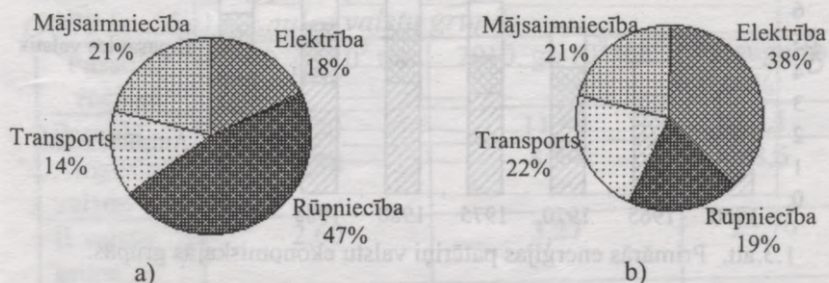
I – attīstītās valstis, kur ietilpst:

ASV, Kanāda, Japāna un Rietumeiropas attīstītās valstis;

II – Eirāzija – Austrumeiropa, bijušās PSRS teritorija un Ķīna;

III – pārējās valstis.

Enerģijas patēriņš pasaulē notiek četrās sfērās: mājāsaimniecībā (galvenokārt apkurei), transportā, rūpniecībā un elektrības ražošanā. Šo nozaru īpatsvars enerģijas patēriņā parādīts 1.2. attēlā attīstītām (a) un III pasaules valstīm. Redzam, ka mazāk attīstītās valstīs (b) lielāks īpatsvars ir industrijas patēriņam, kas izskaidrojams ar zemāku tehnoloģijas līmeni. Augstākās tehnoloģijas ir energoekonomiskākas. Mazāks ir arī transporta īpatsvars, kas izskaidrojams ar mazāk attīstītu infrastruktūru un dzīves līmeni. Zemāks arī elektroenerģijas ražošanas īpatsvars, jo tieši elektroenerģijas izmantošanas pakāpe lielā mērā raksturo



1.2.att. Nozaru īpatsvars primārās enerģijas patēriņā. a) III pasaules valstīs; b) attīstītās valstīs.

tehnoloģijas līmeni.

Enerģijas patēriņi šajos reģionos periodā no 1960. līdz 1990. gadam parādīti 1.3. attēlā.

Enerģijas daudzums tiek noteikts mērvienībās: vatstundās (Wh), džoulos (J) un kalorijās (cal). Šīm vienībām atkarībā no daudzuma pieraksta burtus:

k(kilo) -  $10^3$

M (mega) -  $10^6$

G (giga) -  $10^9$

T (tera) -  $10^{12}$

P (penta) -  $10^{15}$

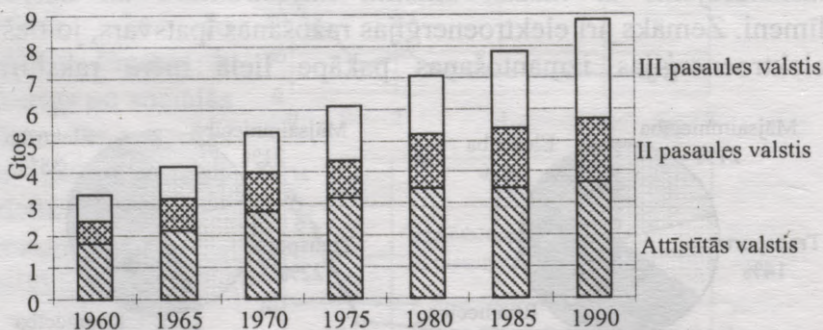
E (eksa) -  $10^{18}$

Starp vienībām ir sekojoša sakarība:

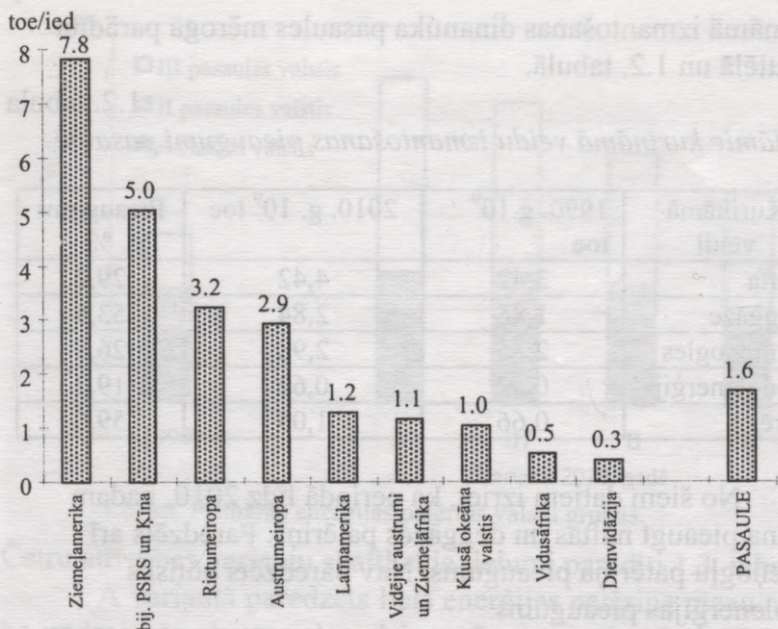
$$1kW \cdot h = 3,6MJ = 0,86Mcal$$

Bez tam primāro enerģiju bieži izsaka kurināmā tonnās, t; nosacītā kurināmā (siltumspēja 7000 kcal/kg) - t; naftas kurināmā (siltumspēja 9000 kcal/kg) - toe.

Enerģijas patēriņa prognozes laikam līdz 2010. gadam ir sastādītas trīs līmeņiem: vidējiem, minimāliem un maksimāliem. Šīs prognozes attēlotas 1.3. un 1.4.attēlā..



1.3.att. Primārās enerģijas patēriņi valstu ekonomiskajās grupās.



1.4.att. Primārās enerģijas īpatnējais patēriņš 1990.gadā ģeogrāfiskajos reģionos.

Skaitliskie lielumi vidējām prognozēm līdz 2010. gadam parādīti 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Gaidāmie enerģijas patēriņa pieaugumi toe vienībās (9000 kcal/kg) pasaules valstu grupās

Pasaules reģioni	1990. g., $10^9$ toe	2010. g., $10^9$ toe	Pieaugums %
Pasaulē	8,80	11,89	35,1
Attīstītās valstis	4,58	5,89	28,6
II valstu grupa	2,60	3,27	25,70
III valstu grupa	1,62	2,71	67,2

Kurināmā izmantošanas dinamika pasaules mērogā parādīta 1.3.attēlā un 1.2. tabulā.

1.2. tabula

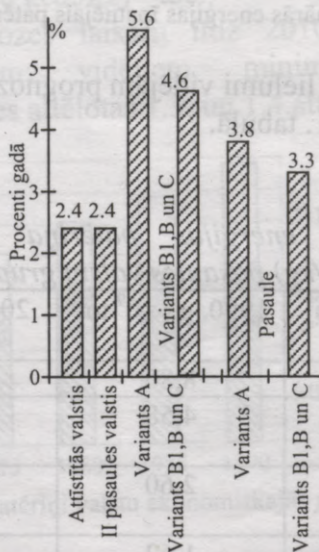
Gaidāmie kurināmā veidu izmantošanas pieaugumi pasaulē

Kurināmā veidi	1990. g. $10^9$ toe	2010. g. $10^9$ toe	Pieaugums %
Nafta	3,42	4,42	29,2
Degģāze	1,85	2,84	53,5
Akmeņogles	2,35	2,98	26,8
Kodolenerģija	0,52	0,62	19,2
Pārējie	0,66	1,05	59,0

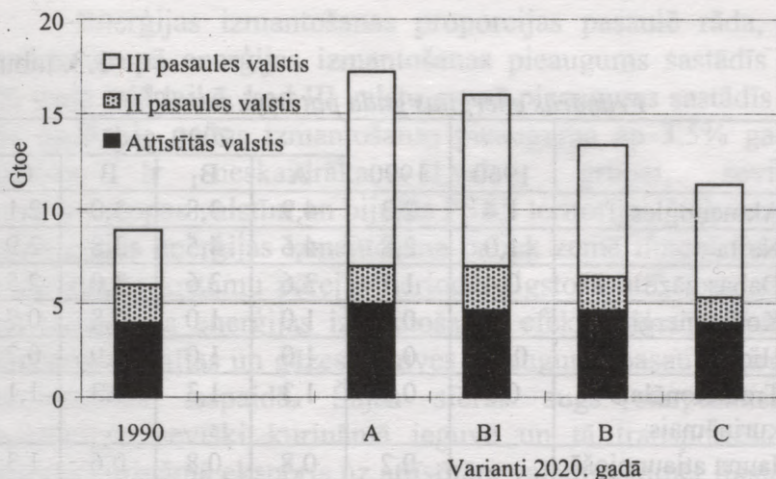
No šiem datiem izriet, ka periodā līdz 2010. gadam turpina pieaugt naftas un degģāzes patēriņš. Paredzēts arī akmeņogļu patēriņa pieaugums. Nav paredzēts būtisks kodolenerģijas pieaugums.

Tālākās perspektīvas prognoze izstrādāta saskaņā ar četriem iespējamiem scenārijiem, nosaukti par: A, B<sub>1</sub>, B un C.

Nacionālā produkta pieauguma apjomi triju valstu grupām saskaņā ar šiem variantiem parādīti 1.5.attēlā. Redzam, ka galvenie pieaugumi paredzēti III valstu grupā ar nolūku palīdzēt tām izkļūt no nabadzības.



1.5.att. Nacionālā produkta pieaugumi valstu grupās.



1.6. att. Primārās enerģijas patēriņš valstu grupās.

Četrus attīstības variantu skaitliskie lielumi parādīti 1.3. tabulā.

A variantā paredzēts liels enerģijas patēriņa pieaugums, ko nodrošinās akmeņogles, dabas gāze un nafta. Attiecībā pret 1990. gadu, pieaugums sastādīs 8,4 Gtoe, no kuriem 7,4 Gtoe - III pasaules valstīs (1.6.att.).

Liels enerģijas daudzums tiks izlietots māsaimniecībā. Gāze tiks transportēta pa cauruļvadiem lielos attālumos. Strauji attīstīsies arī naftas transportēšanas sistēmas. Šīs attīstības pasākumi prasīs lielas investīcijas.

Primārās enerģijas gada patēriņi, toe·10<sup>9</sup>.

	1960	1990	2020. gadā			
			A	B <sub>1</sub>	B	C
Akmeņogles	1,4	2,3	4,9	3,8	3,0	2,1
Nafta	1,0	2,8	4,6	4,5	3,8	2,9
Dabas gāze	0,4	1,7	3,6	3,6	3,0	2,5
Kodolenerģija	-	0,4	1,0	1,0	0,8	0,7
Hidro	0,15	0,5	1,0	1,0	0,9	0,7
Tradicionālais kurināmais	0,5	0,9	1,3	1,3	1,3	1,1
Jauna atjaunojošā enerģija	-	0,2	0,8	0,8	0,6	1,3
Pavisam	3,3	8,8	17,2	16,0	13,4	11, 3

B<sub>1</sub> variantā situācija ir līdzīga. Šinī gadījumā paredzēta zemāka attiecība enerģija/NPV (nacionālā produkta vienība). Arī šajā variantā liels naftas un dabas gāzes īpatsvars. Ķīna un Indija intensīvi attīstīs savus akmeņogļu potenciālus. Enerģijas izmantošanas apmērs no 1990. gada palielināsies par 50%, jeb par 3,9 Gtoe trīsdesmit gados. Šajā variantā tiek prognozēti lielāki energoekonomijas rezultāti.

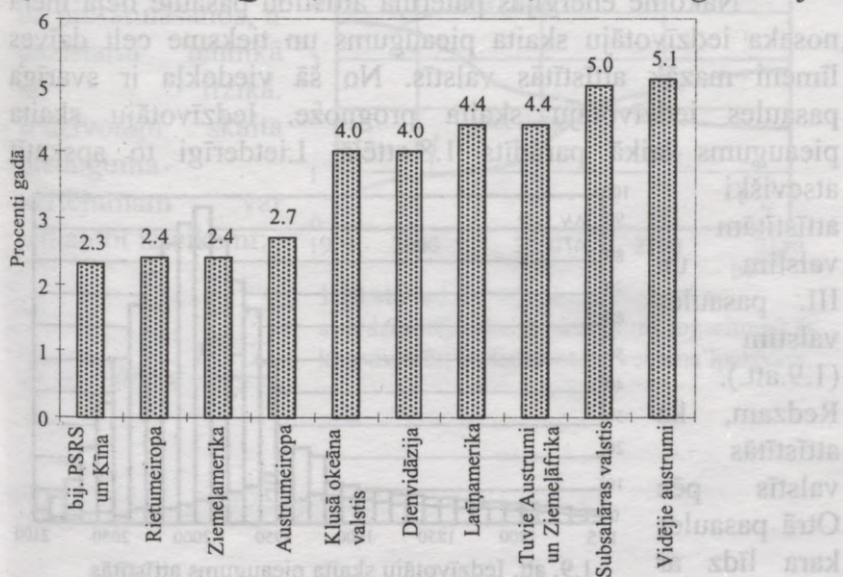
B variantā enerģijas patēriņa pieaugums 0,7 Gtoe I grupā un 6 Gtoe II, un III valstu grupā, sastādot kopā pasaulē 7,2 Gtoe.

C variantā tiek paredzēti enerģijas ekonomijas augsti rezultāti. Summārais enerģijas patēriņš aug par 28%, pieaugot par 2,5 Gtoe. Enerģijas patēriņš pieaug par 3,2 Gtoe III valstu grupā un mazinās I grupā par 0,5 Gtoe. Šajā variantā paredz atjaunojošās enerģētikas jūtamu attīstību.

Visas šīs prognozes ievēro enerģijas ekonomijas perspektīvas dažādos apmēros.

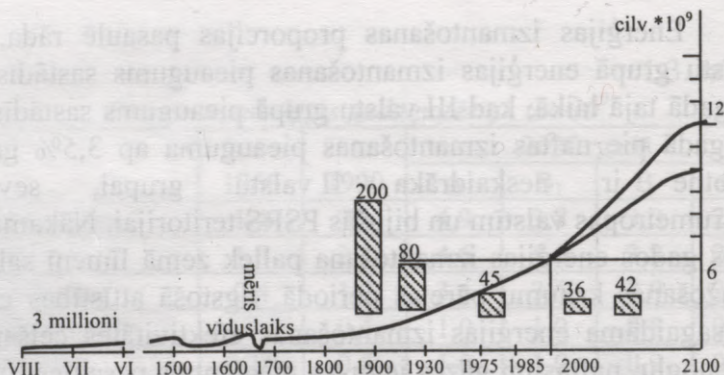
Enerģijas izmantošanas proporcijas pasaulē rāda, ka I valstu grupā enerģijas izmantošanas pieaugums sastādīs ap 1% gadā tajā laikā, kad III valstu grupā pieaugums sastādīs ap 4% gadā pie naftas izmantošanas pieauguma ap 3,5% gadā. Nākotne ir neskaidrāka II valstu grupai, sevišķi Austrumeiropas valstīm un bijušās PSRS teritorijai. Nākamajos dažos gados enerģijas izmantošana paliek zemā līmenī sakarā ar ražošanas kritumu pārejas periodā. Ilgstošā attīstības gaitā šeit sagaidāma enerģijas izmantošanas efektivitātes celšanās, akmeņogļu, naftas un gāzes ieguves pieaugums pasaules tirgus konjunktūras iespaidā. Šajās sfērās augs starptautiskās investīcijas, sevišķi kurināmā ieguvē un tā transportēšanā. Pieaugs kurināmā eksports uz attīstītām valstīm, kamēr ilgstošā perspektīvā, darbojoties pret siltumnīcas efekta izraisīšanu, sāks samazināt izrakteņu kurināmā izmantošanu.

Enerģijas patēriņa prognozēs pasaules mērogā izmanto Q vienību.  $IQ = 0,25 \cdot 10^{18} \text{ kcal} = 3,35 \cdot 10^{10} \text{ kW.gadi}$  jeb



1.7.att. Nacionālā produkta pieaugums 1990.-2020.g. (B attīstības variants).

030202811



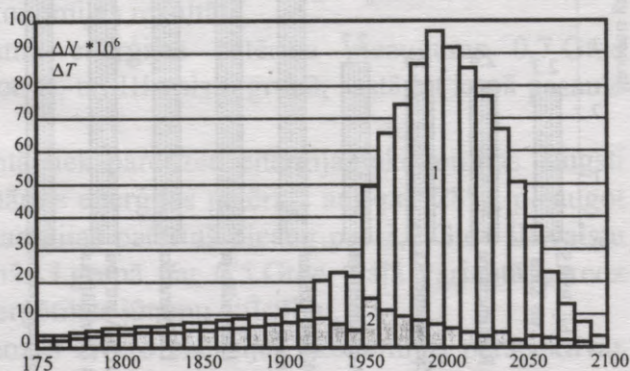
1.8.att. Iedzīvotāju skaits.

$0,3 \cdot 10^{15} \text{ kW} \cdot \text{h}$ . Piemēram I Q, ir enerģijas daudzums, kas spēj sasildīt Azovas jūras ūdeņus līdz vārīšanās temperatūrai. Šāda enerģija izdalās, sadedzinot  $36 \cdot 10^9 \text{ t}$  nosacītā kurināmā, jeb  $28 \cdot 10^9 \text{ toe}$ .

1990.g. primārās enerģijas patēriņš pasaulē bija 0,3 Q.

Nākotnē enerģijas patēriņa attīstību pasaulē lielā mērā nosaka iedzīvotāju skaita pieaugums un tieksme celt dzīves līmeni mazāk attīstītās valstīs. No šā viedokļa ir svarīga pasaules iedzīvotāju skaita prognoze. Iedzīvotāju skaita pieaugums laikā parādīts 1.8.attēlā. Lietderīgi to apskatīt atsevišķi

attīstītām valstīm un III. pasaules valstīm (1.9.att.). Redzam, ka attīstītās valstīs pēc Otrā pasaules kara līdz ar dzīves līmeņa

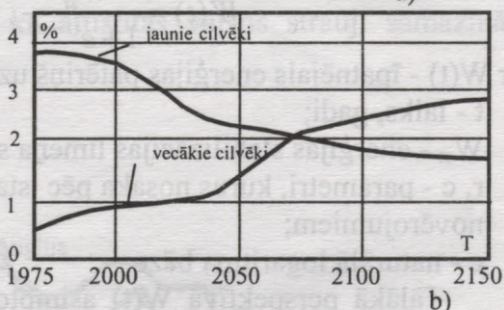
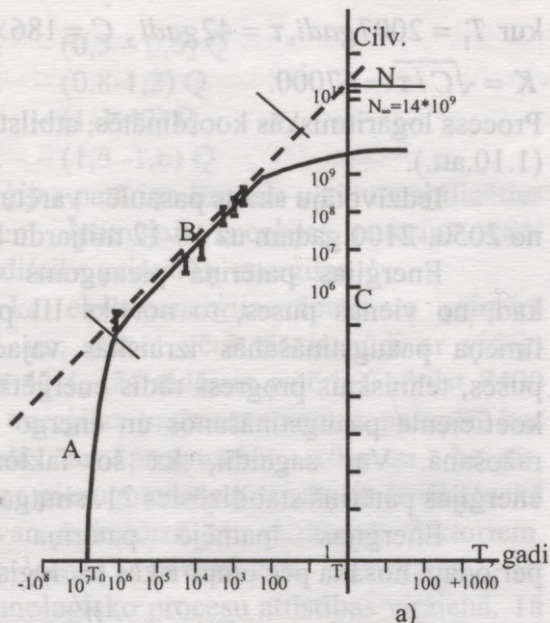


1.9. att. Iedzīvotāju skaita pieaugums attīstītās valstīs (2) un III pasaulē (1).

paugstināšanos dzimstība krīt un 21.gs. sākumā iedzīvotāju skaits stabilizējas (2). Līdzīga aina sagaidāma arī III. pasaules valstīs(1). Līdz ar dzīves apstākļu uzlabošanos arī tur ir sagaidāma dzimstības samazināšanās.

Šādi procesi, kas sāk strauji attīstīties un tiecas uz piesātināšanos, ir pazīstami tehnikā un fizikā. Iedzīvotāju skaita pieauguma vērtējumam var izmantot izteiksmi:

$$N = \frac{C}{\tau} \arctg \frac{T_1 - T}{\tau}$$



1.10.att. Iedzīvotāju skaita dinamika.  
a- iedzīvotāju skaita pieaugums logaritmiskās koordinātēs; b- iedzīvotāju vecuma īpatsvars.

kur  $T_1 = 2007 \text{ gadi}$ ,  $\tau = 42 \text{ gadi}$ ,  $C = 186 \times 10^9 \text{ gadi}$ ,

$$K = \sqrt{C/\tau} = 67000.$$

Process logaritmiskās koordinātēs, atbilst līnijai, attēlotai (1.10.att.).

Iedzīvotāju skaits pasaulē varētu stabilizēties periodā no 2050.-2100.gadam uz 10-12 miljardu līmeņa.

Enerģijas patēriņa pieaugums turpināsies apstākļos, kad, no vienas puses, to noteiks III pasaules valstu dzīves līmeņa paaugstināšanās izraisītās vajadzības, bet, no otras puses, tehniskais progress rādīs enerģētisko iekārtu lietderības koeficienta paaugstināšanos un energo efektīvas tehnoloģijas ražošanā. Var sagaidīt, ka šo faktoru darbības iespaidā enerģijas patēriņš stabilizēsies 21. simtgades vidū vai beigās.

Enerģijas īpatnējo patēriņa pieaugumu ilgākam periodam nosaka pēc empīriskās t.s. loģistiskās funkcijas:

$$W(t) = \frac{W_{st}}{1 + e^{(r-ct)}}$$

kur  $W(t)$  - īpatnējais enerģijas patēriņš uz vienu iedzīvotāju;

$t$  - laiks, gadi;

$W_{st}$  - enerģijas stabilizācijas līmeņa skaitliskais vērtējums;

$r, c$  - parametri, kurus nosaka pēc statistiskiem novērojumiem;

$e$  - naturālā logaritma bāze.

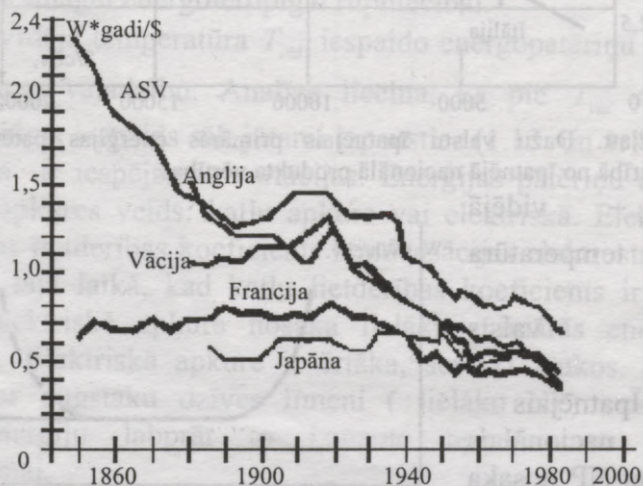
Tālākā perspektīvā  $W(t)$  asimptotiski tuvojas galīgam lielumam. Dažādos periodos tika publicētas cilvēcei nepieciešamās enerģijas daudzuma prognozes. Tā astoņdesmitajos gados tika uzskatīts, ka enerģijas daudzums turpinās pieaugt līdz simtgades vidum, kad stabilizēsies planētas iedzīvotāju skaits.

Ievērojot to, ka 2000.g. patēriņu vērtē 0,41 Q līmenī, varētu prognozēt

- 2020.g. – (0,5 – 0,6) Q
- 2050.g. – (0,8-1,2) Q
- 2075.g. – (1-1,47) Q
- 2100.g. – (1,3 -1,6) Q

Īpatnējais enerģijas patēriņa līmenis varētu stabilizēties 6 kW.gadu/cilv. līmenī. Īpatnējais enerģijas patēriņš ASV 1975.g. bija 10 kW.gadi/cilv. primārās enerģijas.

Ievērojot to, ka elektroenerģijas īpatsvars primārā enerģijā būs ap 40%, un, ņemot vērā tās izstrādi ar vidējo lietderības koeficientu 40%, tās vidējais patēriņš atbilst 8400 kW.h/cilv. Salīdzinot enerģijas patēriņa apjomus pasaulē, kas sasniegti 2000. gadā ar prognozēm 80.gadu beigās, konstatējam, ka patēriņa pieauguma tempi ir daudz lēnāki, nekā tika paredzēts. To var izskaidrot ar vairākiem faktoriem. Pieauga kurināmā cenas. Tehniskais progress iet energoekonomisko tehnoloģisko procesu attīstības virzienā. Tā 1.11. attēlā parādīts, ka attīstītās valstīs strauji samazinājās



1.11.att. Primārās enerģijas izmantošanas intensitāte attīstītās valstīs uz nacionālā produkta vienību.

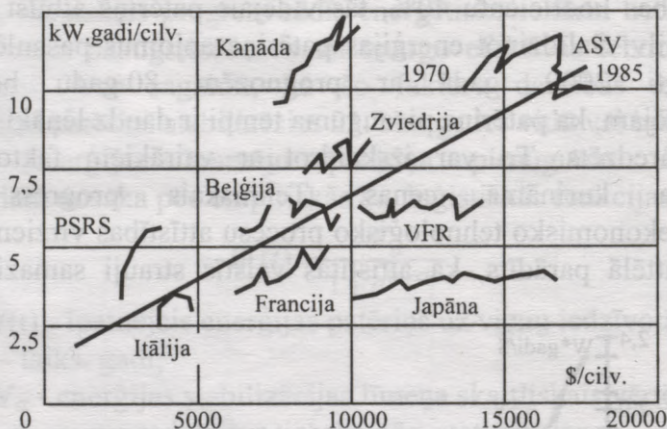
Īpatnējā primārās enerģijas izmantošanas intensitāte uz preču vienību. Bez tam tiek pieņemti standarti un likumi, kas veicina enerģijas taupīšanu visās dzīves sfērās.

Īpatnējais enerģijas patēriņš ir atkarīgs no konkrētiem tautsaimniecības attīstības apstākļiem:

$$W = a_1 NP * f_1(T_{vid}) * f_2(S),$$

kur  $a_1$  - koeficients;

$NP$  – īpatnējais gada nacionālais produkts, \$/cilv.;



1.12.att. Dažu valstu īpatnējais primārās enerģijas patēriņš atkarībā no īpatnējā nacionālā produkta vērtības.

$T_{vid}$  – vidējā

gada temperatūra

valstīs;

$S$  - valsts

platība.

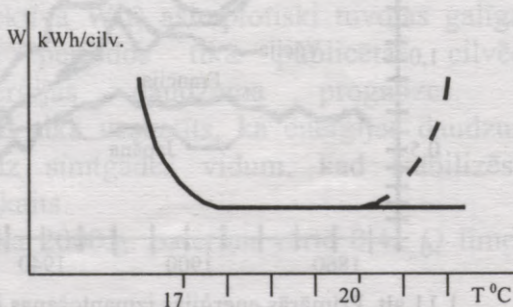
Īpatnējais

gada nacionālais

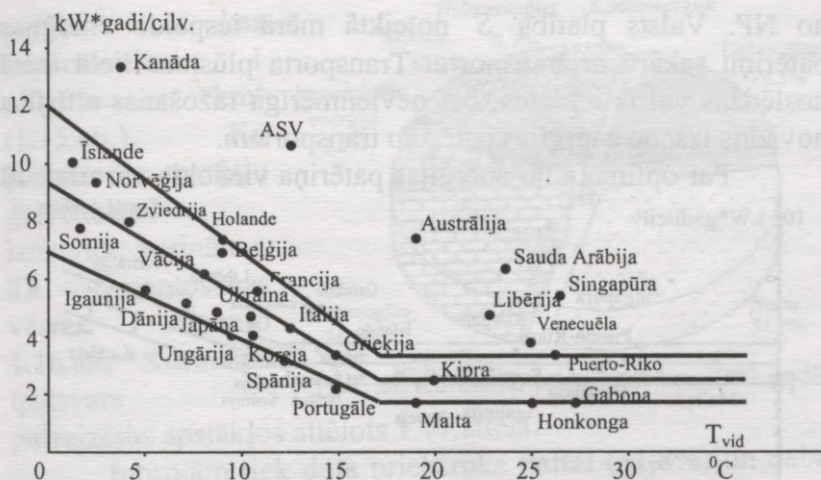
produkts  $NP$  nosaka

enerģijas patēriņu

sakarā ar ražošanas



1.13.att. Īpatnējais enerģijas patēriņš atkarībā no vidējās temperatūras valstī.



1.14.att. Dažu valstu īpatnējais enerģijas patēriņš atkarībā no vidējās temperatūras valstī.

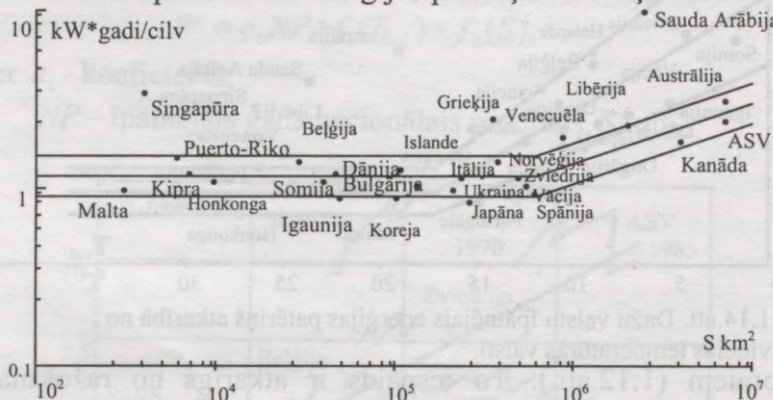
apjomiem (1.12.att.). To iespaids ir atkarīgs no ražošanas struktūras, kas sakarā ar globalizācijas tendencēm zināmā mērā izlīdzinās. Enerģijas patēriņš lielāks ir valstīs, kur lielāks īpatsvars smagai energoietilpīgai rūpniecībai.

Vidējā temperatūra  $T_{vid}$  iespaido energopatēriņu sakarā ar apkures vajadzību. Analīze liecina, ka pie  $T_{vid} < 17^{\circ}C$  temperatūras iespaids sāk jūtami izpausties (1.13. un 1.14.att.), kaut gan ir iespējamās variācijas. Enerģijas patēriņu apkurē nosaka apkures veids: katlu apkure vai elektriskā. Elektrības ražošanas lietderības koeficients kondensācijas elektrostacijām ir 40%, tajā laikā, kad katlu lietderības koeficients ir 80%. Tātad elektriskā apkure nosaka lielāku primārās enerģijas patēriņu. Elektriskā apkure ir ērtāka, sevišķi laukos. Tāpēc valstīs ar augstāku dzīves līmeni (lielāku NP) un lētu elektroenerģiju labprāt to izmanto apkurei un ūdens uzsildīšanai.

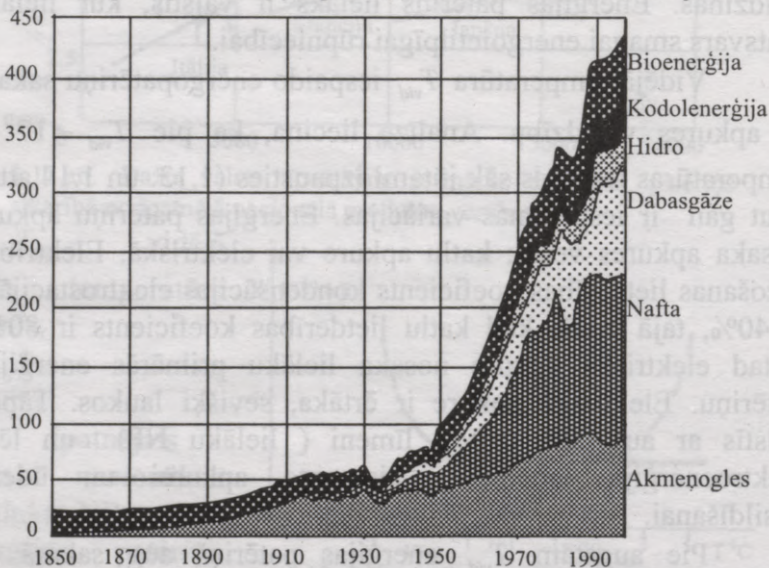
Pie augstām  $T_{vid}$  enerģijas patēriņš aug sakarā ar kondicionēšanu. Arī tas ir atkarīgs no dzīves līmeņa un, tātad,

no NP. Valsts platība  $S$  noteiktā mērā iespaido enerģijas patēriņu sakarā ar transportu. Transporta plūsmas lielā mērā noslēdzas valsts ietvaros, bet nevienmērīga ražošanas attīstība novados izsauc enerģijas patēriņu transportam.

Par optimālu no enerģijas patēriņa viedokļa var uzskatīt

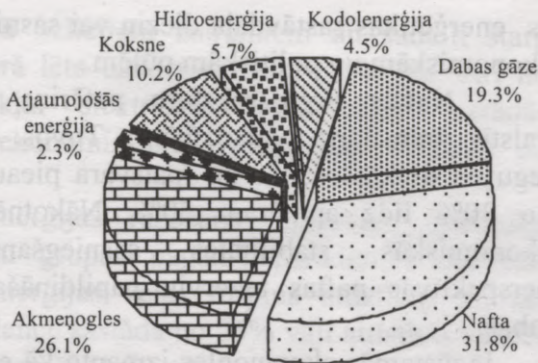


1.15.att. Īpatnējais enerģijas patēriņš atkarībā no valsts teritorijas.



1.16.att. Kurināmā izmantošanas vēsturiskā dinamika.

platību, kas nepārsniedz 1 miljonu km<sup>2</sup> (1.15.att.). Kā primāro enerģiju galvenokārt izmanto kurināmo. Tā izmantošanas vēsturi raksturo 1.16.att. Kurināmā īpatsvars

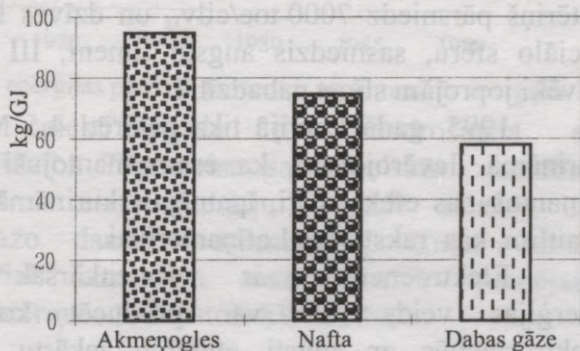


1.17. att. Kurināmā veidu īpatsvara 1990. gadā.

pašreizējos apstākļos attēlots 1.17.attēlā.

Joprojām tiek dota priekšroka naftai (31,8%) un dabas gāzei (19,3%) kā kurināmam, kas ērti izmantojams transportā un samazina ogļskābās gāzes emisiju (1.18.att.). Akmeņogles (26,1%) galvenokārt izmanto elektrostacijās un metalurģijā. Kodolkurināmā īpatsvars sastāda 4,5% un tā īpatsvara pieaugums tuvākajās desmitgadēs nav paredzams. Lielās hidroenerģētikas - vienīgās plaši izmantojamās atjaunojošamies enerģijas veida īpatsvars pasaules bilancē ir neliels (5,7%) un tā izpilda palīglomu. Tradicionālais kurināmais (koksne un atkritumi) sastāda 10,2% un citi atjaunojošamies enerģijas veidi ap 2,3%.

Nākošā simtgades sākumā enerģijas pieaugumu segs 40% ar naftu un ap 35% ar dabas gāzi. Atjaunojošami



1.18.att. Oglekļa emisija dažādiem kurināmā veidiem.

es enerģētikas sastāvdaļa diez vai sasniegs 10% ar krietnām ekonomiskām un politiskām pūlēm.

Naftas tirgu raksturo patēriņa pieaugums attīstītās valstīs transporta vajadzībām. Tuvos Austrumos gaidāma ieguves divkāršošanās un īpatsvara pieaugums pasaules tirgū no 30% līdz apmēram 50%. Nākotnē pēc politiskās un ekonomiskās stabilitātes sasniegšanas arī Krievijas perspektīvas naftas rezervju papildināšanā tiek vērtētas kā labas.

Iegūstamās akmeņogles izmanto kā enerģētisko kurināmo, kas sedz enerģijas patēriņa 1/3 daļu. Lielākās akmeņogļu rezerves atrodas Krievijā, Ukrainā, Ķīnā un ASV. Lielākā akmeņogļu ieguve bija ASV un Ķīnā (25% no pasaules ieguves). Bijušās PSRS teritorijā pašreiz tiek iegūti 13% no pasaules patēriņa.

Dabas gāzes izmantošana Eiropā nodrošina 17% enerģijas patēriņa. Daļu no šīs gāzes sedz gāzes vadi no Austrumiem. Turpmāk palielināsies gāzes padeve no Ziemeļjūras atradnēm. Izmanto arī sašķidrinātu gāzi. Gāzes tirgum raksturīgi monopoli-piegādātāji un ilgtermiņa kontrakti.

Īpatnējais enerģijas patēriņš dažādos pasaules reģionos parādīts 1.4.attēlā. No tā ir redzams, cik nevienmērīgs tas ir pasaulē. Tajā laikā, kad attīstītās valstīs primārais enerģijas patēriņš pārsniedz 7000 toe/cilv., un dzīves līmenis, ieskaitot sociālo sfēru, sasniedzis augstu līmeni, III pasaules valstīs cilvēki joprojām slīgst nabadzībā.

1995. gadā Latvijā tika patērēti 4,5 Mtoe ekvivalentā kurināmā. Ievērojot to, ka esam mantojuši zemu enerģijas izmantošanas efektivitāti, īpatnējais kurināmā patēriņš ir tuvs skaitlim, kas raksturīgs Latīņamerikai.

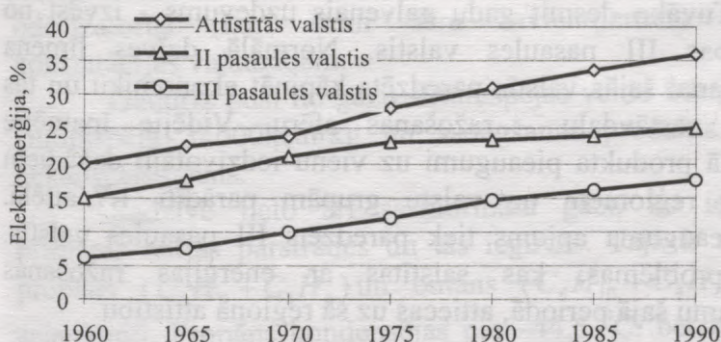
Elektroenerģija ir visvienkāršāk izmantojamais enerģijas veids. To var producēt koncentrēti lielās elektrostacijās ar augsti efektīvu iekārtu, pārraidīt lielos

attālumos pie samērā nelieliem zudumiem un sadalīt starp patērētājiem ar samērā lēta elektriskā tīkla palīdzību. Arī no tehnoloģiskā viedokļa elektriskās tehnoloģijas izrādās visvienkāršākās un ekonomiskākās (piemēram, plazmas un lāzeru tehnoloģijas).

Elektriskās enerģijas ražošanas īpatsvara dinamika trijās pasaules valstu grupās pagātnē parādīta 1.19.attēlā. Elektroenerģija kā enerģijas veids turpina attīstīties un tās īpatsvars enerģijas bilancē sastāda no 25% vāji attīstītās valstīs līdz 38% industriālās zemēs (1.2.att.).

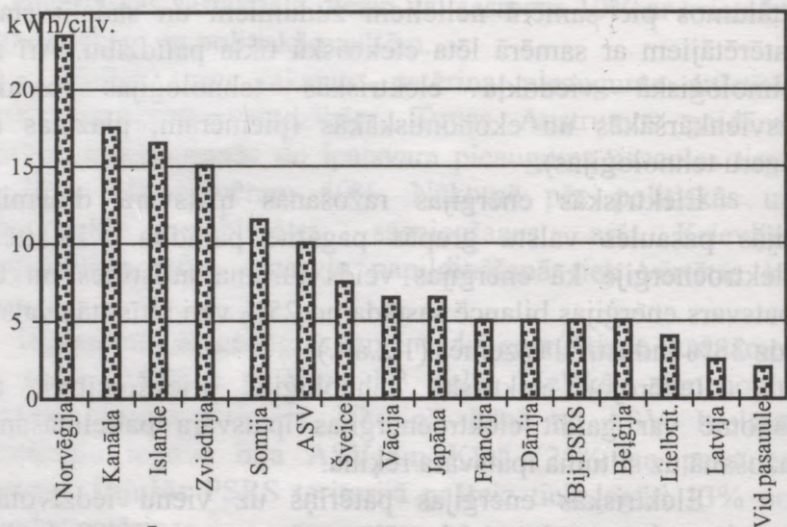
Ievērojot elektrisko tehnoloģiju priekšrocības, arī nākotnē var gaidīt elektroenerģijas īpatsvara palielināšanos ražošanā uz siltuma īpatsvara rēķina.

Elektriskās enerģijas patēriņš uz vienu iedzīvotāju dažādās valstīs attēlots 1.20.attēlā.



1.19.att. Elektriskās enerģijas patēriņš procentos no summārās enerģijas.

Norvēģijā elektroapgāde tiek nodrošināta ar hidroenerģijas palīdzību. Tāpēc visas saimnieciskās vajadzības tiek nodrošinātas ar elektroenerģiju. Kanādā, Islandē un Zviedrijā arī ražo daudz hidroenerģijas. Citās valstīs elektroenerģija tiek izmantota mazāk. ASV īpatnējais elektroenerģijas patēriņš - 10 tūkstoši kW.h/cilv.



1.20.att. Īpatnējais elektroenerģijas patēriņš dažādās valstīs.

Tuvāko desmit gadu galvenais uzdevums - izvest no nabadzības III pasaules valstis. Normālā dzīves līmeņa sasniegšanai šajās valstīs paredzēts kāpināt ekonomiku un tās galveno sastāvdaļu - ražošanas sfēru. Vidējie īpatnējie nacionālā produkta pieaugumi uz vienu iedzīvotāju dažādiem pasaules reģioniem un valstu grupām parādīti 1.7. attēlā. Pamatpieauguma apjoms tiek paredzēts III pasaules valstīs. Tātad problēmas, kas saistītas ar enerģijas ražošanas kāpinājumu šajā periodā, attiecas uz šā reģiona attīstību.

## 1.2. Kurināmais.

Kurināmais veido primāros enerģētiskos resursus. Pie šiem resursiem pieder tiešā un netiešā saules enerģija. Pie netiešiem saules enerģijas veidiem pieder vēja, viļņu, upju ūdens enerģija. Pie īslaicīgas akumulētas saules enerģijas pieder augu un atkritumu pārstrādes kurināmais.

Ilglaicīgo akumulēto saules enerģiju pārstāv izrakteņu gāzveidīgs, šķidrās un cietās kurināmais.

Gāzveidīgais un šķidrās kurināmais ir veidojies galvenokārt no senā planktona pārvērtībām iežu dziļumos. Cietās izrakteņu kurināmais ir senās koksnes pārvērtību rezultāts.

Pagaidām galvenais primārais enerģijas avots paliek izrakteņu kurināmais.

Gāzveidīgais kurināmais visbiežāk ir dabasgāze. Galvenais tā komponents ir metāns  $CH_4$ . Bez tam tajā ir augstākie ogļūdeņraži  $C_nH_m$ , slāpekļis un ogļskābā gāze. Iegūšanas procesā gāzi attīra no sēra savienojumiem.

Iegūstot naftu, izdalās noteikts gāzes daudzums, kas satur mazāk metāna, bet vairāk augstāko ogļūdeņražu. Tie, sadegot, rada lielāku siltuma daudzumu. Sadzīves gāzei piejauc odorizatorus (kuri satur sēra savienojumus) noplūdes konstatācijas vajadzībām.

Gandrīz pusi no gāzu siltumspējas veido ūdeņradis. Tā siltumspēja 34000 kcal/kg un sadegšanas produkts ir videi nekaitīgais ūdens.

Sadzīvē lieto arī sašķidrinātu gāzi, ko iegūst pie primāras naftas pārstrādes un tās ieguves. Tajā ir tehniskais propāns ( $C_3H_8 + C_3H_6$ ) un butāns ( $C_4H_{10} + C_4H_8$ ) un to sajaukumi. Propāns kondensējas pie  $-44,5^\circ C$ , bet butāns pie  $+5^\circ C$ . Pie  $20^\circ C$  propāna tvaiku spiediens 0,8 MPa, bet butāna 0,2 MPa. Šīs gāzes transportē sašķidrinātā veidā balonos zem 2 MPa spiediena.

Pēdējā laikā sāk izmantot biogāzi, ko iegūst organisko atlieku anaerobās fermentācijas ceļā (rūgšanā). Tā sastāv no ogļskābās gāzes, metāna, neliels sērūdeņraža, slāpekļa un ūdeņraža. Procesā šķidrās atliekas ir augstvērtīgs mēslojums, kas satur divreiz vairāk slāpekļa nekā izejas pamata materiāls.

Šķidros kurināmos iegūst naftas pārstrādē. Jēlo naftu uzsilda līdz  $300-370^{\circ}\text{C}$  un iegūtos tvaikus sadala frakcijās, kas kondensējas pie dažādām temperatūrām: benzīnam -  $(15\%), t_k = 30 - 180^{\circ}\text{C}$ ; petrolejai-

$(17\%), t_k = 120 - 135^{\circ}\text{C}$ ; dīzeļdegvielai-  $t_k = 180 - 350^{\circ}\text{C}$ .

Šķidrums atlikums, kam vārīšanās temperatūra  $t_v = 330 - 350^{\circ}\text{C}$ , ir mazuts. Benzīns tiek izmantots aizdedzes iekšdedzes dzinējos. Dīzeļdegviela dīzeļdzinējiem, petroleja - gāzturbīnās, mazuts kā šķidrums kurināmais tvaika katlos.

Mazutu var papildus pārveidot gaišos produktos ar krekinga palīdzību, sašķeļot smagās molekulas vieglākās, ko paātrina ar katalizatoriem. Mazuts satur 84-86% oglekļa un 10-12% ūdeņraža. Īpatnēja siltumspēja bezūdens mazutam -  $Q_{ip} = 9300 - 9898 \text{ kcal/kg}$ . Dabaszāģes vidējā īpatnējā siltumspēja līdzinās  $8752 \text{ kcal/m}^3$ .

Enerģētiskos aprēķinos kurināmais figurē nosacītā kurināmā veidā, kam siltumspēja atbilst  $7000 \text{ kcal/kg}$ . Reālā kurināmā svaru nosaka, ievērojot reālās siltumspējas attiecību pret nosacītā kurināmā siltumspēju. Tā, piemēram, lai iegūtu reāla mazuta daudzumu, īpatnējais kurināmā daudzums jādala ar 1,33, bet attiecīgas gāzes daudzums - ar 1,13 (t kurināmā atbilst  $1000 \text{ m}^3$ ).

Dažādu organisko vielu īpatnējā siltumspēja atkarībā no elementu sastāva  $\text{kcal/kg}$  dod izteiksmi:

$$Q_i = 80,07C + 2457H - 26,23(0 - S) - 5,963W.$$

Šeit  $W$  - mitruma saturs. Visas vielas izteiksmē - procentos no summāra sastāva.

Siltumspēju, kas atbilst degšanas procesā radušāmieš ūdenim šķidrums veidā, sauc par augstāko siltumspēju. Toties, ja ūdens veidojas tvaiku veidā, tad, ievērojot siltuma

Kurināmais	Sausā masā			A,%	S,%	N,%	W,%
	deg C, %	deg O, %	deg H, %				
	50	42	6				
Koksne				1	-		
Kūdra				6-10		40-60	
Brūnogleš				6-40	0,9-3	0,5-2	
Akmeņogleš							
Antracīts						-15	
	93	2	2				

1.21.att. Kurināmā elementu īpatnējais saturs.

daudzumu, kas nepieciešams tā iztvaikošanai, tas nosaka zemāko siltumspēju. Cietais kurināmais ir daudzveidīgs atkarībā no tā izcelšanās.

Kūdra ir visjaunākais izrakteņu kurināmais, kas radies no pārtrūdējušiem purvu augiem.

Brūnogleš ir vecākais kurināmais. Glabājoties gaisā, tas oksidējas un kļūst pulverveida.

Akmeņoglēm ir lielāks blīvums. Visvecākā no tām ir antracīts, kas ir izgājis vislielākās pārvērtības un sastāv 93% no oglekļa.

Atjaunojošamies cietais kurināmais ir koksne. Tās īpatsvars bilancē ir neliels.

Kurināmais satur dažādas vielas un to siltumspēja ir atkarīga no to īpatsvara (1.21.att.). Šeit A – pelni, W – mitrums. Jo vairāk kurināmajā ir skābekļa, jo lielāka oglekļa un ūdeņraža daļa saistīta ar to, t.i., praktiski jau sadeguši.

Ogleklim pilnīgi sadegot, rodas ogļskābā gāze. Degšanai notiekot ar nepietiekošu gaisa daudzumu, var veidoties CO – indīga tvana gāze – ar 2194 kcal/kg siltuma izdalīšanos.

Ogleklim pilnīgi sadegot, izdalās siltums 7822 kcal/kg.

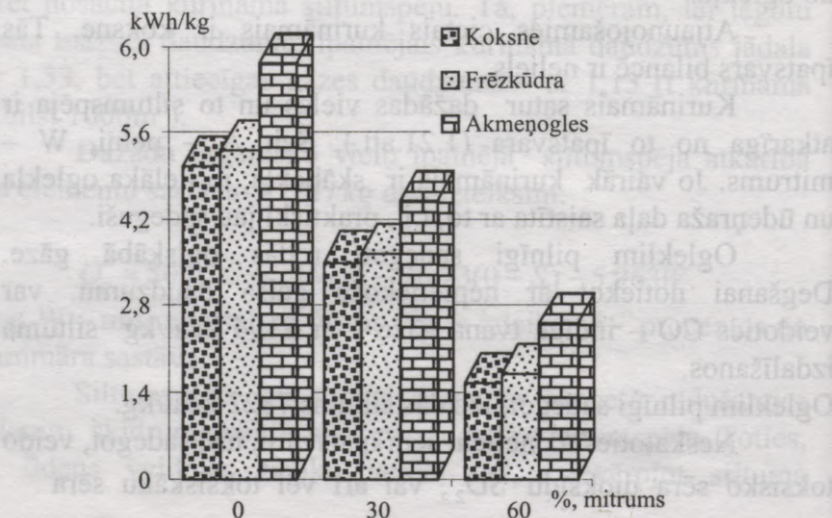
Neskatoties uz nelielu sēra īpatsvaru, tas, sadegot, veido toksisko sēra dioksīdu  $SO_2$ , vai arī vēl toksiskāku sēra

anhidrīdu  $SO_3$ . Arī slāpekļis oksidējoties veido toksiskos oksīdu  $NO$  un dioksīdu  $NO_2$ . Slāpekļa oksīdi  $NO_x$  veidojas arī, oksidējoties gaisa slāpeklim, ja degšana notiek pie augstām temperatūrām.

Lielākā pelnu daļa nav saistīta ar organisko masu. To veido ieži, kurus iegūst kopā ar kurināmo. Pelnu daudzums var sasniegt 50%. Tos mazina, bagātinot iegūto kurināmo, kas prasa papildu izdevumus.

Karsējot kurināmos bezgaisa apstākļos, tas sadalās, kā rezultātā veidojas gāzes, tvaiks, sveķu tvaiki un oglekļa atlikums. Gaistošo vielu īpatsvars – svarīgs kurināmā raksturojums. Jo vecāks kurināmais, jo mazāk tajā gaistošo vielu. Ogles, kas pēc karsēšanas atjauno blīvo struktūru sauc par koksu. Šādu ogļu krājumi ir nelieli un tos izmanto vienīgi metalurģiskos procesos.

Kurināmā rezultējošo siltumspēju nosaka arī mitrums (1.22.att.). Lai palielinātu kurināmā izmantošanas efektivitāti, pēdējā laikā sāk lietot iekārtu, kur izmanto dūmgāžu mitruma kondensācijas siltumu.



1.22.att. Darba masas zemākā sadegšanas siltuma izmaiņa atkarībā no mitruma.

### 1.3. Energijas resursi.

Par primāriem enerģijas resursiem uzskata dabas resursus, ko izmanto enerģijas iegūšanai. Enerģijas pārvēršanas noteiktā secībā. Tā, kurināmā fizikālo (kodola) vai ķīmisko reakciju veidā

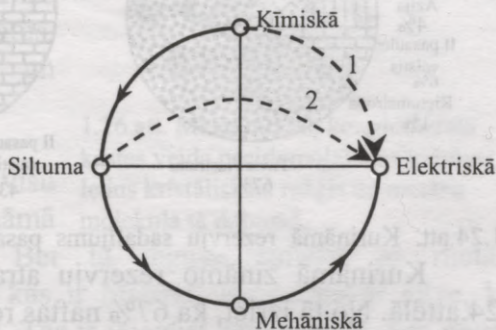
pārvēršas siltumā (1.23.att.). Siltums var tikt izmantots kā patstāvīgs enerģijas veids

sadzīvē vai ražošanā un tiek pārvērsts mehāniskā

enerģijā, piemēram, transportā.

Mehāniskā enerģija tiek pārvērsta elektriskā enerģijā, ko var pārvadīt uz samērā lieliem attālumiem un pievadīt lielo un mazo enerģiju daudzumus patērētājiem. Elektroenerģiju, savukārt, var pārvērst kā mehāniskā enerģijā, tā siltumā.

Organiskā kurināmā resursus sastāda akmeņogles, nafta un dabasgāze. Šo kurināmo enerģētiskais ekvivalents parādīts tabulā 1.4.



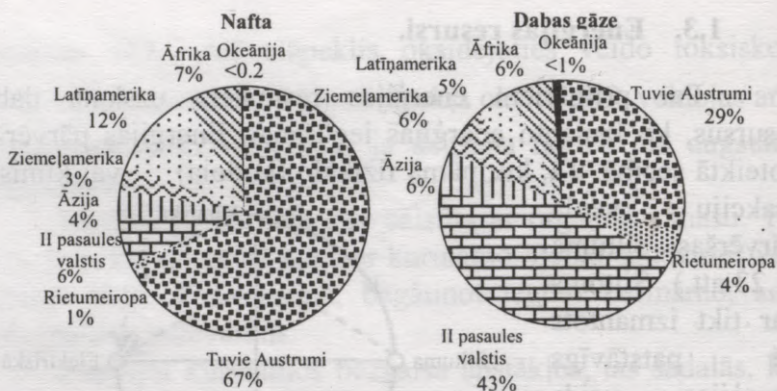
1.23.att. Enerģijas veidu pārveidošanas secība.

1- kurināmā elements, 2- MHD pārveidošana.

1.4. tabula

*Izrakteņu kurināmā resursi*

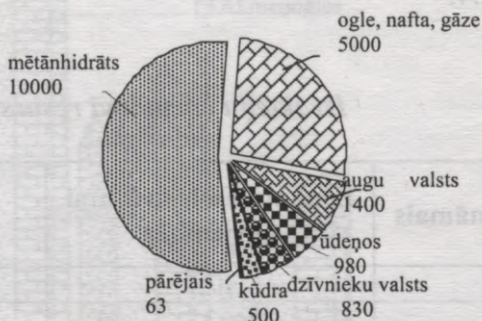
Kurināmais	Izmantojamie krājumi Q vienībās	Ģeoloģiskie krājumi Q vienībās
Ogles	17,7	266,5
Nafta	3	16,2
Gāze	3	14,3



1.24.att. Kurināmā rezervju sadalījums pasaulē.

Kurināmā zināmo rezervju atrašanās vietas parādītas 1.24.attēlā. No tā izriet, ka 67% naftas rezervju atrodas Tuvajos Austrumos. Dabīgās gāzes rezerves 43% apjomā atrodas bijušās PSRS teritorijā un 29% - tāpat Tuvajos Austrumos. Tas nosaka kurināmā transportēšanas izdevumus.

Pēc esošām ziņām naftas krājumi pasaulē varētu būt  $486 \cdot 10^9$  t. No tiem  $121 \cdot 10^9$  t ir jau iegūti.  $160 \cdot 10^9$  t skaitās atklātās atradnēs.  $205 \cdot 10^9$  t vēl jāizpēta. Šie naftas krājumi pieder pie perspektīviem prognozējamiem resursiem. 2000.gadā iegūtas  $3,7 \cdot 10^9$  t. Pie šādiem iegūšanas tempiem naftas pietiks 40 gadiem. Bet, ievērojot to, ka ģeoloģiskās izpētes rezultātā ik 10 gadus krājumi pieaug par 3%, var droši uzskatīt, ka XXI gadsimtam naftas pietiks. Augot kurināmā cenām, izmantojamos



1.25.att. Organiskā oglekļa daudzumi \* 10<sup>9</sup>t.

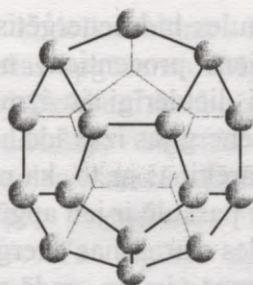
krājumos ieskaitīs papildu ģeoloģiskas rezerves, ko līdz šim uzskatīja par nerentablām.

Pagaidām krājumos neieskaita metānhidrātus, uzkrātus jūru šelfos un mūžīgajā apledojumā.

Metānhidrāta krājumi pārsniedz visu pārējo izrakteņu kurināmā krājumus (1.25.att.). Bet tā ieguve saistīta ar metāna izdalīšanos atmosfērā, kas ir bīstami, jo metāns ir gāze, kas rada siltumnīcas efektu. Tas ir jāiegūst zem kupola, kas novērš gāzes izdalīšanos. Šāda tehnoloģija vēl nav izstrādāta.

Metānhidrāts ir veidojies no metāna molekulas, kas iekļauta ledus kristāliskā režģī (1.26.att.). Ārēji tas atgādina pelēku, it kā netīru ledu (1.27.att.).

Organiskais kurināmais zemes dziļēs ir krājies simtiem tūkstošiem gadu. Tā izmantošana enerģētiskām vajadzībām izraisīs sadedzināšanu no ģeoloģiskās vēstures viedokļa samērā īsā laikā. Kurināmā sadedzināšanas produkti nonāk atmosfērā, kas rada vides piesārņošanu ar putekļiem, sēra un slāpekļa oksīdiem, ogļūdeņražiem, ogļskābo gāzi, kas kaitīgi ietekmē dzīves sfēru. Tas saistīts ar attīrīšanas iekārtu celtniecību un spiež rūpīgi pētīt iespējas samazināt izrakteņu kurināmā izmantošanu.



1.26.att. Metānhidrāta konglomerata kastes veida pseidomolekulas uzbūve: ledus kristāliskais režģis un metāna molekula tā dobumā.



1.27.att. Metānhidrāta gabala izskats.

Pasaules hidroenerģētiskie resursi ir 0,065Q/gadā, kas atbilst dažiem procentiem no primārās enerģijas bilances. Ekonomiski lietderīgi ir izmantot daļu no šiem resursiem. 1990. gadā enerģijas izstrāde hidrostacijās bija 5% no primārās enerģijas. Jārēķinās ar to, ka pašreiz visi ekonomiski izdevīgie hidroresursi pasaulē ir jau apgūti.

Saules starošanas enerģija, kas iziet cauri atmosfērai un sasniedz zemes virsmu, gadā sasniedz 2000 Q. 0,0125% no šā daudzuma spētu apmierināt visas pašreizējās enerģijas vajadzības, bet 0,5% - pilnīgi nodrošinātu vajadzības arī perspektīvā.

Atomenerģijas iegūšanai izmanto kodolkurināmo urānu un toriju. Urānu raksturo samērā plaša izplatība litosfērā. Tā masas īpatsvars sasniedz  $3 \cdot 10^{-4}\%$ . Ekonomiski izdevīgi iegūt urānu atradnēs, kur tā īpatsvars ne mazāks par 0,1%. Šāda urāna iegūšanas izmaksa tiek vērtēta apmēram 80\$/kg. Šajās atradnēs urāns ir 1000 reizes bagātāks nekā vidēji, un tā krājumi tiek vērtēti  $3,3 \cdot 10^6$  t. Urāna krājumu enerģētiskā vērtība ir atkarīga no reaktoru tipa, kur tas tiks izmantots. Siltumneutronu reaktoros tiek izmantots 0,5-1,5% urāna kurināmā un urāna enerģētiskais ekvivalents atbilst 3,7Q. Protams, urāna krājumu dati ir mazāki par reāliem sakarā ar vāju izpēti daudzos pasaules rajonos. Bet saskaņā ar izdarītiem vērtējumiem šo resursu enerģētiskais ekvivalents spēš pieaugt tikai līdz 20Q. Tas nozīmē, ka pie reālās atomenerģētikas attīstības šis resurss var tikt izsmelts samērā īsā periodā.

Izmantojot urānu ātrneutronu reaktoros, kurināmā izmantošanas efektivitāte pieaug līdz 30-40%. Acīmredzot šinī gadījumā, nepalielinot enerģijas izstrādes izmaksas, radīsies iespēja izmantot urānu no atradnēm ar tā īpatsvaru tikai 0,06% un iegūšanas izmaksām līdz 295 \$/kg. Jāatzīmē iespēja kā kodolenerģijas materiālu izmantot toriju. Tā daudzums gan ir mazāks, bet arī izpēte ir vājāka.

Pēc esošiem datiem kodolkurināmā izmantošana ātrneutronu reaktoros pēc to drošas apgūšanas spēj nodrošināt enerģiju daudzās simtgadēs bez jebkādiem ierobežojumiem.

Turpinās pētījumi vadāmās termokodolreakcijas izstrādes virzienā, kur ir nepieciešami ūdeņraža izotopi deiterijs un tritījs. Runājot par enerģētiskiem resursiem jāatzīmē, ka tritija dabā nav. To iegūst, apstarojot ar neitroniem litiju, ko var realizēt enerģijas iekārtās, iegūstot termokodolenerģiju. Litija resursu pietiek daudzām simtgadēm.

Dabīgie kodolenerģētiskie resursi parādīti 1.5. tabulā.

1.5. tabula

*Kodolkurināmā resursi*

Enerģijas ražošanas princips	Kurināmā veids (iegūšanas izmaksa: \$/kg)	Resurss Q
Siltumneutronu reaktori	Urāns ( līdz 130)	40
Ātrneutronu reaktori	Urāns ( līdz 130)	1000
	(līdz 295)	2500
	Urāns okeānā	340 000
	Urāns zemes garozā līdz 500 m dziļumam	670 000
Termokodolreakcijas reaktori	Litījs kā tritija avots	1900
	( līdz 60)	2 750 000
	Litījs okeānā	$4 \cdot 10^9$
	Deiterijs okeānā	

Atomenerģētika ir saistīta ar bīstamiem radioaktīviem materiāliem un procesa atkritumiem. Tas prasa lielu rūpību iekārtas izvēlē un to izgatavošanā. Pavirša pieeja ekspluatācijai un tehnoloģiska procesa izvēlē izraisīja avāriju Gerrisbergā (ASV) un smago katastrofu Černobiļā. Šie notikumi zināmā

mērā diskreditēja atomenerģētiku un radīja noteiktu atturību atomelektrostaciju celtniecībā. Tajā pašā laikā, piemēram, Francijā atomenerģētikā koncentrēti 70% no enerģētiskās jaudas. Ir noteikti panākumi tehnoloģijas pilnveidošanā un ekspluatācijas apgūšanā. Tikmēr tiek strādāts pie jaunu, drošāku atomreaktoru konstruēšanas. Viss tas nākotnē ļaus pamatoti izvēlēties enerģētiskās iekārtas, nepakļaujoties emocionāliem tūlītējiem iespaidiem.

Pie alternatīvās enerģētikas pieder arī jūru un okeānu siltuma enerģija, ģeotermālā enerģija, vēja, jūru viļņu un paisuma-bēguma enerģija. Šo enerģijas veidu potenciālā enerģija parādīta 1.6. tabulā.

1.6. tabula

*Alternatīvās enerģētikas resursi*

Alternatīvo enerģiju veidi	Resurss Q/gadā
Saules starojums 0,5%	10
Jūru un okeānu siltuma enerģija	1,8
Ģeotermālā enerģija	1,0
Hidroresursi	0,065
Vēja enerģija	0,04
Jūru viļņi	0,03
Paisuma-bēguma enerģija	0,04

Šīs enerģijas plaša izmantošana ir problemātiska, jo tas ir saistīts ar lieliem materiālu tēriņiem samērā mazjaudīgās iekārtās.

## **Jautājumi paškontrolei.**

1. *Kādās trīs mērvienībās tiek mērīts enerģijas daudzums?  
Kāda ir sakarība starp šīm mērvienībām?*
2. *Kādās trīs grupās tiek iedalītas valstis no enerģijas patēriņa viedokļa?*
3. *Kāds sakars ir konstatēts starp enerģijas patēriņu un dzīves līmeņiem?*
4. *Kā enerģētika iespaido vidi? Kādi ir iespaida faktori?*
5. *Kādi ir energopatēriņa attīstības scenāriji?*
6. *Energopatēriņa attīstības perspektīvas dažādās valstu grupās.*
7. *Kāds ir normu, standartu un likumu iespaids uz energopatēriņa attīstību?*
8. *Kādas ir iedzīvotāju skaita izmaiņas perspektīvas?*
9. *Kādi faktori nosaka īpatnējo energopatēriņu dažādās valstīs?*
10. *Kāds ir sagaidāms vidējais energopatēriņš pasaulē gadsimta beigās?*
11. *Kurināmā veidi, to resursi.*
12. *Metānhidrāts kā kurināmais perspektīvā.*
13. *Atomenerģētikas kurināmais. Tā resursi.*
14. *Saules enerģētikas resursi.*
15. *Bioenerģētika un tās resursi.*

## 2. NODAĻA. GĀZU ENERĢĒTIKA

### 2.1. Gāzu likumi.

Mehāniskās enerģijas iegūšanai no siltuma enerģijas izmanto gāzu vai tvaiku darba ķermeņus. To izmantošanas pamatā ir gāzu likumi, kas raksturo spiedienu un temperatūru.

Spiediens raksturo molekulu mijiedarbību ar virsmām un skaitliski līdzinās spēkam, kas darbojas pa normāli uz ķermeņa virsmas vienību. Starptautiskā mērvienību sistēmā spiediens tiek mērīts paskalos ( $Pa$ ); spiediens – spēka Ņutonos uz  $1m^2$ :

$$1Pa = 1N / m^2.$$

Sakarā ar to, ka šī vienība ir maza, praktiski izmanto  $1kPa = 10^3 Pa$  (kilopaskals),  $1MPa = 10^6 Pa$  (megapaskals). Starp vienībām eksistē attiecība

$$1bars = 1kgs / cm^2 = 10^4 kgs / m^2,$$

kur  $kgs$  - kilogramspēks.

Sakarā ar to,  $1N$  - spēks, kas piedod  $1 kg$  masai  $1m / s^2$ , bet kilogramspēks piedod šai masai  $9,81m / s^2$  paātrinājumu,

$$1kgs / m^2 = 9,81Pa.$$

Tātad  $1Pa = 0,101927kgs / m^2 \approx 0,102kgs \cdot 10^{-6} atm$ .

Spiediena vienību attiecības parādītas 2.1. tabulā.

2.1. tabula

1 Pa	$1N/m^2$
1 bars	0,1 MPa
0,1 MPa	1,02 Atm
1 mm dzīvsudraba staba	133 Pa
1 mm ūdensstaba	9,807 Pa

Atmosfēras spiedienu nosaka ar barometru un to sauc par atmosfērisko spiedienu. Gāzu spiedienu, kas pārsniedz atmosfērisko, nosaka ar manometru. Gāzes spiedienu, zemāku par atmosfērisko, nosaka ar vakuummēteri un to sauc par retiņājumu. Pēdējie divi ir atkarīgi no atmosfēras spiediena. Absolūtais spiediens ( $p$ ) ir stāvokļa parametrs.

Temperatūra  $T$  ir vielu siltuma kustību intensitātes mērs. SI mērsistēmā par temperatūras mērvienību, kas ir stāvokļa parametrs, pieņemts kelvins ( $K$ ). Praktiski ļoti plaši ir pieņemts lietot Celsija grādu ( $^{\circ}C$ ). Attiecība starp tiem :

$$T, K = t^{\circ}C + 273,15.$$

Īpatnējais vielas tilpums  $\delta$  – masas  $M$  vienības tilpums:

$$\delta = v/M.$$

Vielas īpatnējais tilpums ir apgriezti proporcionāls tā blīvumam  $\rho$ . Lielumu salīdzināšanai, tiem jāvienādo noteikumi.

Par ideālām gāzēm sauc tādas, kam nav molekulu savstarpējo mijiedarbības spēku un to tilpums līdzinās nullei. Reālās gāzēs šādi spēki starp molekulām darbojas un molekulu tilpums ir galīgs. Normālos apstākļos ideālo gāzu stāvokļu parametri atšķiras no reāliem ne vairāk par 3%.

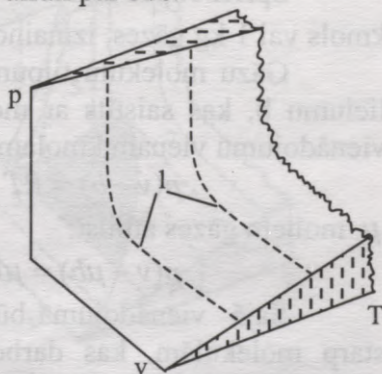
Saskaņā ar Boila-Mariota likumu, konstatētu eksperimentāli, gāzu spiedienu pie pastāvīgas temperatūras ir apgriezti proporcionāli to tilpumiem:

$$p_1 / p_2 = v_2 / v_1,$$

vai

$$p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2 = const.$$

Saskaņā ar Gei-Ļusaka likumu, sildot gāzes, to tilpumi



2.1.att. Gei-Ļusaka un Boila-Mariota likumi; 1- izotermas.

ir proporcionāli absolūtām temperatūrām:

$$v_1 / v_2 = T_1 / T_2.$$

Abi likumi apvienoti 2.1. attēlā.

Saskaņā ar Avogadro likumu dažādām gāzēm vienādos tilpumos pie pastāvīgas temperatūras ir vienāds molekulu skaits, jeb to blīvumi  $\rho$  ir proporcionāli molekulārām masām  $\mu$ ;

$$\rho_1 / \rho_2 = \mu_1 / \mu_2,$$

jeb:

$$\mu_1 v_1 = \mu_2 v_2.$$

Reālām gāzēm šis sakarības zināmā mērā atšķiras.

Klaiperona vienādojums līdzsvarotām ideālām gāzēm rada sakarību starp spiedienu, tilpumu  $v$  un temperatūru  $T$  vienam kg gāzes:

$$pv = RT.$$

Šeit  $R$  - gāzes universāla konstante  $J/kg \cdot K$ , kas līdzinās  $R = 8314/\mu$ , kur  $\mu$  - gāzes masas 1 kilomols.

Gāzes masai  $G$  šis nolīdzinājums ir:

$$pv = GRT.$$

Spriežot pēc mērvienībām,  $\mu R$  un  $R$  ir darbs, ko rada 1 kmols vai 1 kg gāzes, izmainoties temperatūrai par 1 K.

Gāzu molekulu tilpumu ievēro, samazinot tilpumu par lielumu  $b$ , kas saistīts ar molekulu apjomu. Rezultātā iegūst vienādojumu vienam kmolam:

$$p(v - b) = RT.$$

$\mu$  moliem gāzes atbilst:

$$p(v - \mu b) = \mu RT.$$

Šajā vienādojumā būtu jāņem vērā pievilkšanās spēki starp molekulām, kas darbojas trauka sienas tuvumā (uz molekulām trauka vidū šie spēki ir lielāki nekā no sieniņu pusēs). Rezultātā spiediens, ko rada molekulas uz sieniņām, ir

nedaudz mazāks nekā, ignorējot pievilksnās spēkus. Izrādās, ka spiediena samazināšanās ir proporcionāla gāzes blīvuma kvadrātam:

$$\Delta p = a\rho^2,$$

kur  $a$  – koeficients, kas raksturo pievilksnās spēkus starp attiecīgām molekulām:

$$p = p_i - a\rho^2,$$

kur  $p$  – spiediens gāzēs, ja molekulas nepievelkas.

Ievērojot to, ka  $\rho = \mu/v$ ,

$$p_i = p + a/v^2.$$

Izkoriģētais Klaiperona vienādojums būs:

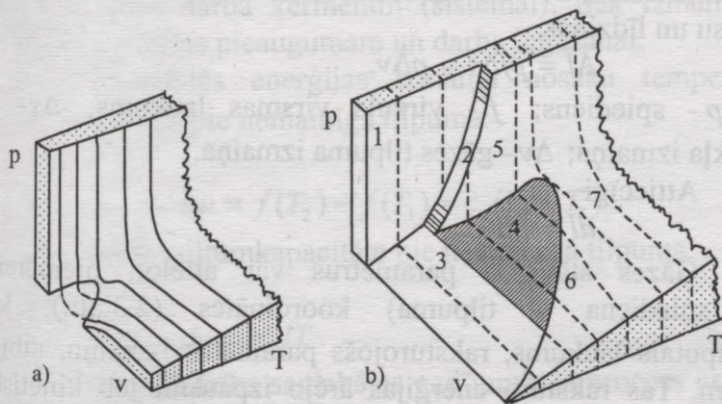
$$(p + a/v^2)(v - b) = RT,$$

vai kilomolam gāzes

$$(p + a(\mu/v^2))(v - \mu b) = \mu RT,$$

ko sauc Van-der-Valsa vārdā.

Sakarības, kas atbilst šim vienādojumam attēlotas 2.2. attēlā.



2.2.att. a) Van-der-Valsa likuma korekcijas; b) vielas agregātstāvokļi  $p$  $v$  $T$  koordinātēs 1- cietā fāze, 2- cietā fāze un šķidrums, 3- cietā fāze un tvaiks, 4- šķidrums un tvaiks, 5- šķidrums, 6- tvaiks.

Neskatoties uz to, ka šis vienādojums nedod apmierinošus datus gāzu kondensācijas zonā, tas ir noderīgs labojumu koeficientu ievērošanai reālām gāzēm, salīdzinot ar ideālām. Šie lielumi ir iegūti eksperimentālā ceļā.

Termodinamiskos procesus pieņem kā līdzsvarotus. Par līdzsvarotiem sauc procesus, kur izmaiņas notiek pietiekoši lēni, salīdzinot ar laiku, kurā parametri atgriežas līdzsvarā. Šajā gadījumā ķermenis atrodas līdzsvara stāvoklī ar vidi. Tā, piemēram, spiediena izmaiņas notiek ar skaņas izplatīšanās ātrumu un, tāpat, šādi procesi ir līdzsvaroti, ja to ātrums ir mazāks par izplatīšanās ātrumu (sekundes). Toties temperatūras procesi līdzsvarojas daudz lēnāk – minūtēs. Nelīdzsvarotos procesos rodas papildu zudumi, kas iespaido iekārtu lietderības koeficientus.

## 2.2. Gāzu izplēšanās darbs.

Gāzu tilpuma izmaiņai atbilst darbs, virzīts pret ārējiem spēkiem. Gāzes saspiežot, tās uzņem ārējo spēku darbu (2.3.att.). Darbs, ko veic spēks tā pielikšanas virzienā, raksturo procesu un līdzinās:

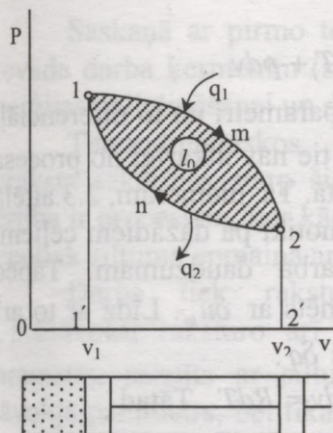
$$\Delta l = pf\Delta s = p\Delta v,$$

kur  $p$  - spiediens;  $f$  - virzuļa virsmas laukums;  $\Delta s$  - tā stāvokļa izmaiņa;  $\Delta v$  - gāzes tilpuma izmaiņa.

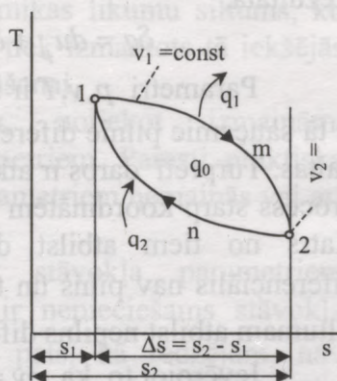
Attiecīgi

$$dl = pdv.$$

Gāzes stāvokļa parametrus var attēlot, piemēram,  $p-v$  (spiediena – tilpuma) koordinātes (2.3.att.), kur aizstrīpotais laukums, raksturojošs parametru izmaiņu, atbilst darbam. Tas raksturo enerģijas ārējo izpausmi jeb kinētisko enerģiju. Bez tam gāzu molekulām atbilst potenciālā enerģija, ko nosaka molekulu mijiedarbība atkarībā no atstatumiem starp tām, tāpat, atkarībā no molekulu siltuma kustībām. Summāro



2.3.att. Darba grafiks  
pv koordinātēs.



2.4.att. Darba grafiks  
Ts koordinātēs.

enerģijas izmaiņu nosaka kinētiskās un potenciālās enerģiju izmaiņas:

$$\Delta q = \Delta u_k + \Delta u_p.$$

Saskaņā ar pirmo termodinamikas likumu siltums, kas tiek pievadīts darba ķermenim (sistēmai), tiek izmantots tā iekšējās enerģijas pieaugumam un darba iegūšanai.

Potenciālās enerģijas izmaiņu nosaka temperatūras  $T_2 - T_1$  izmaiņa pie nemainīga tilpuma:

$$\Delta u = f(T_2) - f(T_1) = c_v(T_2 - T_1).$$

Šeit  $c_v$  - gāzes siltumkapacitāte pie nemainīga tilpuma.

Attiecīgi:

$$du = c_v dT.$$

Šī vienlīdzība saglabājas gadījumā, ja process notiek ar tilpuma izmaiņu, jo iekšējās gāzes enerģiju, atkarīgu tikai no temperatūras un tās izmaiņas, var attēlot kā koeficientu, reizinātu ar temperatūru.

Rezultātā:

$$\delta q = du_p + \delta u_k = c_v dT + p dv.$$

Parametri  $p, v, T$  ir stāvokļa parametri un to diferenciāļi ir tā saucami pilnie diferenciāļi, jo tie nav atkarīgi no procesa gaitas. Turpretī darbs ir atkarīgs no tā. Tā, piemēram, 2.3.attēlā process starp koordinātēm 1-2 var notikt pa dažādiem ceļiem. Katrs no tiem atbilst dažāda darba daudzumam. Tāpēc diferenciālis nav pilns un tiek apzīmēts ar  $\delta u_k$ . Līdz ar to arī siltumam atbilst nepilns diferenciālis  $\delta q$ .

Ievērojot to, ka  $p v = RT$ ,  $p dv = R dT$ . Tātad

$$\delta q = c_v dT + R dT = (c_v + R) dT = c_p dT.$$

Lielums  $c_v + R = c_p$  ir siltumkapacitāte pie pastāvīga spiediena. Mainoties spiedienam, daļa siltuma pārvēršas darbā. Tāpēc  $c_p > c_v$ . Ideālām gāzēm iekšējo enerģiju pieņem līdzīgu nullei pie tā saucamiem normāliem apstākļiem -  $t = 0^\circ C$ ,  $p = 760$  mm dzīvsudraba staba. Darbu SI vienību sistēmā izsaka džoulos ( $J$ ). Iekšējo enerģiju  $J/kg$  vienībās.

Ja ķermeņu temperatūras ir dažādas, tad starp tiem notiek siltuma apmaiņa tiešas saskares vai starojuma veidā.

Siltums var tikt pārvērsts darbā vai darbs siltumā. Bez džouliem siltuma un darba mērvienības var būt kalorijas (cal) un kilovatstundas (kWh). Starp tām ir sekojošas attiecības:

$$1 kWh = 3600 kJ = 860 kcal.$$

### 2.3. Termodinamiskie procesi gāzēs.

Darba ķermeņa stāvokļa izmaiņu raksturo pamatparametri:  $p, v, T$ . Tā stāvoklis izmainās, pievadot vai nepievadot tam siltumu, vai arī mehāniski saspiežot vai paplašinot.

Saskaņā ar pirmo termodinamikas likumu siltums, ko pievada darba ķermenim (sistēmai), tiek izmantots tā iekšējās enerģijas palielināšanai un darba iegūšanai.

Termodinamiskos procesos, notiekot izmaiņām, apraksta sakarības starp šiem parametriem. Parasti praktiska vērtība ir procesiem, kur kāds no parametriem nemainās vai arī nenotiek siltuma apmaiņa ar vidi.

Darbs tiek raksturots ar stāvokļa parametriem  $v, p$ . Stāvokli raksturo arī  $T$ , bet ir nepieciešams stāvokļa parametrs, saistīts ar siltumu, kas pats, kā redzējam, nav stāvokļa parametrs, bet tikai raksturo procesu (tā diferenciālis ir nepilns). R. Klauziuss lika priekšā parametru  $s = \delta q / T$ , ko nosauca par entropiju,  $J / \text{kg} \cdot K$  vienībās.

Pirmā termodinamikas likuma izteiksmē

$$\delta q = du + pdv = c_v dT + \frac{RT}{v} dv.$$

Izdalīsim to ar  $T$ :

$$\delta q / T = c_v dT / T + R dv / v.$$

Sakarā ar to, ka  $c_v$  un  $R$  ir konstantes, vienādojumu ir viegli integrēt:

$$\int \delta q / T = c_v \ln(T_2 / T_1) + R \ln(v_2 / v_1).$$

Labā vienādojuma puse pilnīgi noteikta ar parametru  $T$  un  $v$  galējām vērtībām. Tātad kreisās puses integrālim ir vienīgā vērtība neatkarīgi no ceļa pa kuru sistēma pāriet no sākuma stāvokļa pie temperatūras  $T_1$  līdz beigu punktam  $T_2$ . Tas nozīmē, ka  $\delta q / T$  ir pilnīgs diferenciālis un, tātad, ir stāvokļa parametrs, ko var izmantot termodinamisko sistēmu pētījumiem.

Entropijas izmaiņa līdzinās

$$s_2 - s_1 = \Delta s = \Delta q / T = \int_1^2 \delta q / T,$$

kur  $\Delta q$  - siltuma daudzuma izmaiņa procesā.

Rezultātā rīcībā ir četri parametri termodinamisko procesu izpētei:  $p, v, T, s$ . Procesus var raksturot vai nu spiediena-tilpuma -  $p, v$  vai  $T, s$  koordinātēs. Attiecīgi:

$$du = Tds - pdv.$$

Tagad pēc kārtas apskatīsim procesus ar vienu nemainīgu parametru. Raksturojot enerģijas veidu pārvērtības, apzīmēsim siltumu ar apli  $\odot$ , iekšējo enerģiju (temperatūras izmaiņas veidā) ar trīsstūri  $\triangle$  un darbu ar četrstūri  $\square$ .

*Izohorais process.*

Šajā gadījumā nemainās tilpums:

$$v = \text{const.}$$

Saskaņā ar Klaiperaona izteiksmēm:

$$p_1 v = RT_1 \quad \text{un} \quad p_2 v = RT_2.$$

Tātad  $T_2 / T_1 = p_2 / p_1$ . Ievērojot to, ka  $dv=0$ :

$$\Delta s = \int_1^2 dq / T = \int_1^2 \frac{c_v dT}{T} = c_v \ln(T_2 / T_1) = c_v \ln(p_1 / p_2).$$

Procesi  $Pv$  un  $Ts$  koordinātēs parādīti 2.5. attēlā. Redzam, ka enerģijas apmaiņa notiek starp pievadīto siltumu un darba ķermeņa iekšējo enerģiju.

*Izobārais process.*

Šajā gadījumā

$$p = \text{const.}$$

Pēc Gei-Ļusaka izteiksmes

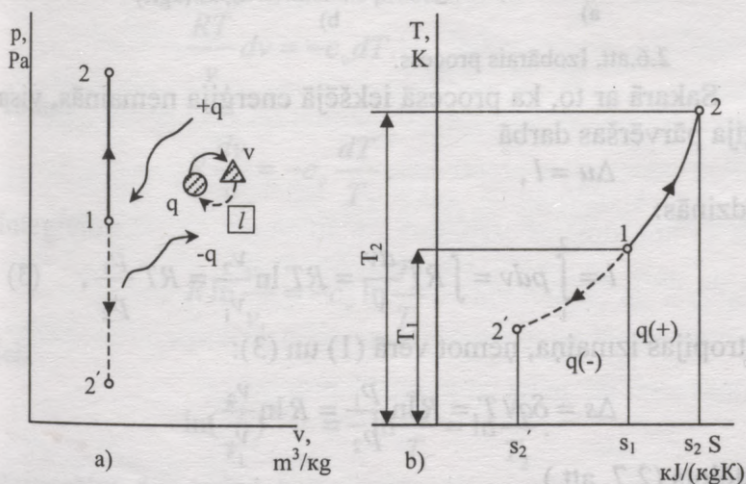
$$v_2 / v_1 = T_2 / T_1;$$

$$l = \int_1^2 p dv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1);$$

$$u = \int_1^2 c_p dT = c_{p,vid} (T_2 - T_1);$$

$$\Delta s = c_p \ln(T_2 / T_1).$$

Procesa raksturs  $p$ - $v$  un  $T$ - $s$  koordinātēs parādīts 2.6. attēlā. Līnija, atbilstoša izobārai, ir lēzenāka par izohora procesa līniju sakarā ar to, ka  $c_p > c_v$ . Enerģiju apmaiņa notiek starp siltuma pievadīšanu un kā iekšējo ķermeņa enerģiju, tā arī darbu.



2.5.att. Izohorais process.

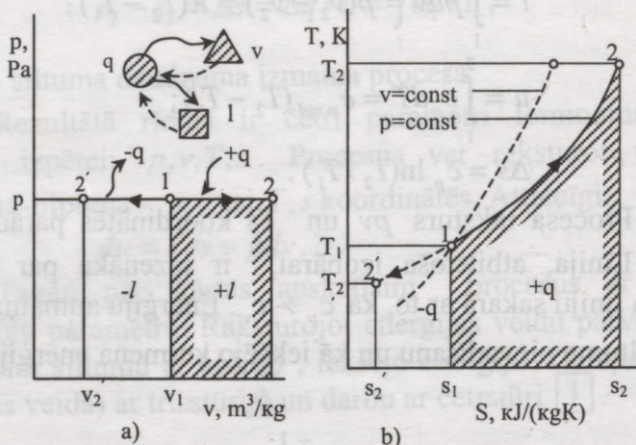
*Izotermiskais process.*

Šinī gadījumā:

$$T = const. \quad (1)$$

$$p_2 / p_1 = v_1 / v_2, \quad (2)$$

un process  $pv$  koordinātēs atbilst vienādsānu hiperbolai.



2.6.att. Izobārais process.

Sakarā ar to, ka procesā iekšējā enerģija nemainās, visa enerģija pārvēršas darbā

$$\Delta u = l,$$

kas līdzinās:

$$l = \int_1^2 p dv = \int RT \frac{dv}{v} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \frac{p_1}{p_2}, \quad (3)$$

un entropijas izmaiņa, ņemot vērā (1) un (3):

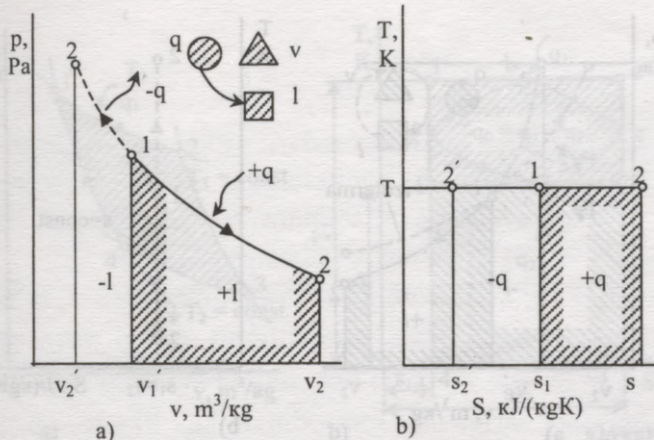
$$\Delta s = \delta q / T = R \ln \frac{p_1}{p_2} = R \ln \frac{v_2}{v_1},$$

kas attēlots (2.7. att.).

### Adiabātiskais process.

Šajā gadījumā  $ds = 0$ , jeb  $du = 0$ , t.i.  $pdv = -c_v dT$ .

Parasti šis process notiek tik ātri, ka siltuma apmaiņa ar vidi praktiski nepaspēj notikt. Aizvietojojot  $p = RT/v$ , iegūstam



2.7.att. Izotermiskais process.

$$\frac{RT}{v} dv = -c_v dT.$$

Tātad:

$$R \frac{dv}{v} = -c_v \frac{dT}{T}.$$

Integrējot:

$$R \ln \frac{v_2}{v_1} = -c_v \ln \frac{T_2}{T_1},$$

jeb

$$\ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{R/c_v} = -\ln \frac{T_2}{T_1} = \ln \frac{T_1}{T_2}.$$

Potencējot šo vienādojumu:

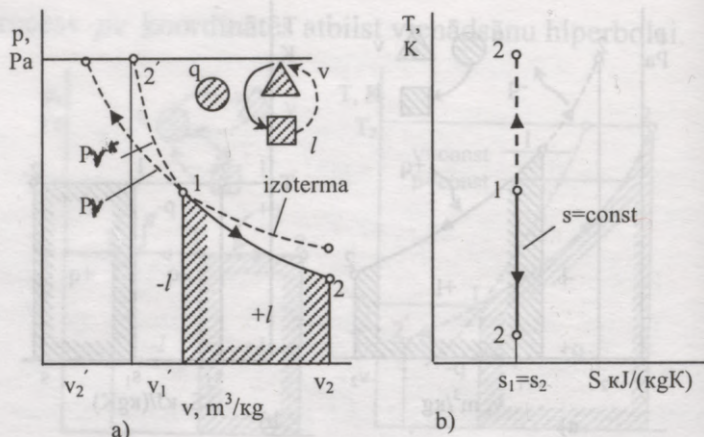
$$\left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{R/c_v} = \frac{T_1}{T_2},$$

jeb:

$$T_1 v_1^{R/c_v} = T_2 v_2^{R/c_v} = \text{const.}$$

Izmantojot šajā izteiksmē:

$$pv = RT, \quad c_p - c_v = R \quad \text{un} \quad k = c_p / c_v,$$



2.8.att. Adiabātiskais process.

iegūstam:

$$pv^k = const.$$

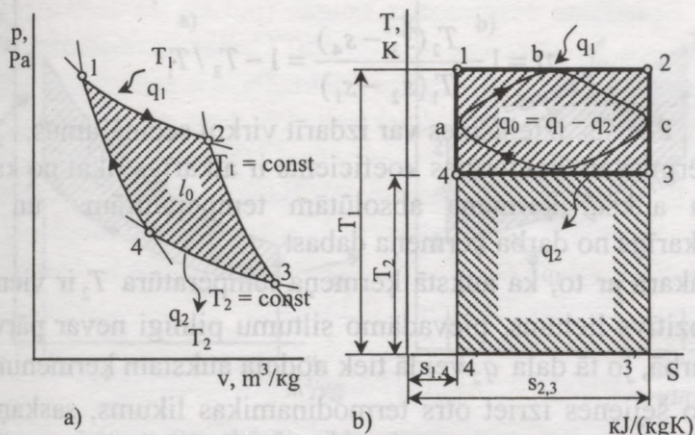
kur  $k = 1,66$  vienatomu,  $1,4$  – divatomu un  $1,33$  daudzatomu gāzēm.

Šis vienādojums raksturo adiabātisko procesu, kas  $pv$  un  $Ts$  koordinātēs atveidots 2.8.attēlā. Šajā gadījumā notiek apmaiņa starp iekšējo un kinētisko enerģiju.

Ievērojot to, ka  $k > 1$  adiabātiskā līkne  $pv$  koordinātēs izmainās straujāk nekā izotermiskā procesā.

## 2.4. Gāzu termodinamiskie procesi.

Process, kā rezultātā gāze pēc stāvokļu virknes, atgriežas sākuma stāvoklī, sauc par noslēgtu procesu. Sīdi Karno 1824.g. lika priekšā noslēgtu ciklu, kas saucas viņa vārdā. Noslēgtā ciklā jāizmanto karsts ķermenis ar temperatūru  $T_1$  un auksts ķermenis ar temperatūru  $T_2$ . Cikls sastāv no divām izotermām un divām adiabātēm (2.9.att.).



2.9.att. Karno cikls.

Punktā 1 darba gāzei tiek padots siltums  $q_1$  ar temperatūru  $T_1$  un gāze izplešas, saglabājot temperatūru (izoterma). Punktā 2 – sākas adiabātisks process. Punktā 3 notiek gāzes saspiešana ar siltuma atdevi  $q_2$  aukstam ķermeņim pie temperatūras  $T_2$ . Punktā 4 sākas adiabātiska saspiešana, atgriežot darba ķermeņi sākotnējā stāvoklī.

Termisko lietderības koeficientu nosaka kā iegūta darba attiecību pret enerģiju (siltumu), pievadītu no karstā ķermeņa:

$$\eta = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - q_2 / q_1$$

Ievērojot to, ka  $\Delta q = T \Delta s$

$$q_1 = T_1(s_2 - s_1);$$

$$q_2 = T_2(s_3 - s_4).$$

Sakarā ar to, adiabātiskiem procesiem 2-3, 4-1,  $s_1 = s_4$

un  $s_2 = s_3$ ,

$$s_3 - s_4 = s_2 - s_1$$

un

$$\eta = 1 - \frac{T_2(s_3 - s_4)}{T_1(s_2 - s_1)} = 1 - T_2 / T_1$$

Pēc šīs izteiksmes var izdarīt virkni secinājumu.

1. Termiskais lietderības koeficients ir atkarīgs tikai no karstā un aukstā ķermeņa absolūtām temperatūrām un nav atkarīgs no darba ķermeņa dabas.
2. Sakarā ar to, ka aukstā ķermeņa temperatūra  $T_2$  ir vienmēr pozitīvs lielums, pievadāmo siltumu pilnīgi nevar pārvērst darbā, jo tā daļa  $q_2$  veidā tiek nodota aukstam ķermenim.

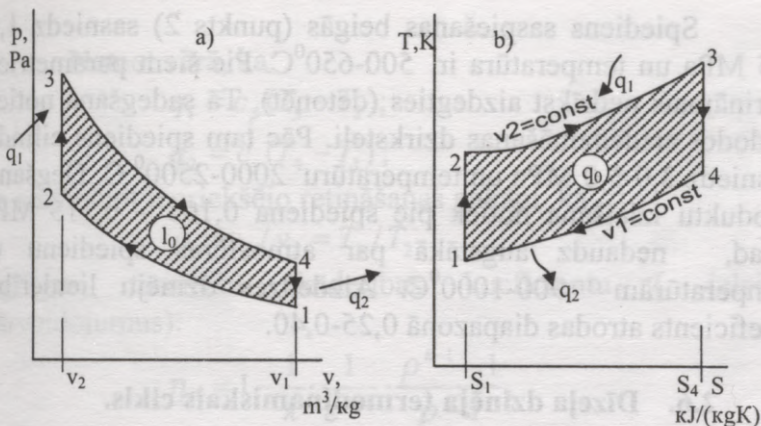
No šejienes izriet otrs termodinamikas likums, saskaņā ar ko noslēgtā procesā pievadāmo siltumu nevar pilnīgi pārvērst darbā, jo daļu no tā novada augstais ķermenis (vide).

Karno ciklam ir augstākais noslēgto termodinamisko procesu lietderības koeficients. Reālo mašīnu cikliem termiskais lietderības koeficients ir zemāks.

## 2.5. Aizdedzes dzinēju termodinamiskais cikls.

Dzinēju izgudroja N.A. Otto (1876.g.). Tajā tiek izmantots cilindrs ar virzuli un vārstiem, caur kuriem tiek padots kurināmais un vidē izlaisti sadegšanas produkti.

Process sākas punktā 1 (2.10.att.). Virzulis, kustēdamies līdz augšējam stāvoklim, saspiež gaisu. Augot spiedienam, gaiss sasilst no  $T_1$  līdz  $T_2$ . Šajā momentā caur atvērušos vārstu tiek padots kurināmais, ko dzirkstele aizdedzina. Kurināmais sadeg, izdalot siltumu  $q_1$ . Gāze izplēšas līdz  $p_3$  un tā temperatūra pieaug līdz  $T_3$ . Līnija 2-3 ir izohora. Virzuļa kustības gaita 3-4 gāze izplēšas pēc adiabatēs. Spiediens un temperatūra samazinās. Punktā 4 izlaides vārsts atveras un sadegšanas produkti tiek izlaisti atmosfērā (izohora).



2.10.att. Otto dzinēja cikls.

Sakarā ar to, ka:

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2);$$

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1),$$

termiskais lietderības koeficients:

$$\eta_r = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1}.$$

Adiabātēm

$$T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}; \quad T_1/T_2 = 1/\varepsilon^{k-1};$$

$$T_3/T_4 = (v_4/v_3)^{k-1} = (v_1/v_2)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}.$$

Tātad:

$$T_2/T_1 = T_4/T_4 = \varepsilon^{k-1}.$$

Līdz ar to:

$$T_3/T_2 = T_4/T_1 = \varepsilon^{k-1},$$

un

$$\eta = 1 - 1/\varepsilon^{k-1}.$$

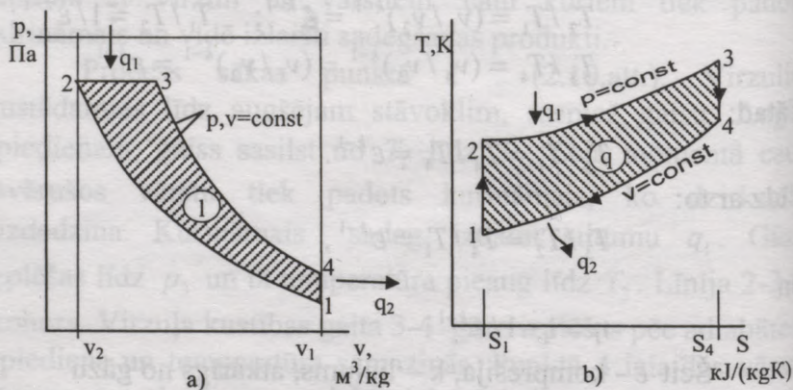
Šeit  $\varepsilon$  - kompresija,  $k$  - lielums, atkarīgs no gāzu fizikālām īpašībām (atomu skaita molekulās).

Spiediens saspiešanas beigās (punkts 2) sasniedz 1,0-1,5 MPa un temperatūra ir 500-650<sup>0</sup>C. Pie šiem parametriem kurināmais nedrīkst aizdegties (detonēt). Tā sadegšana notiek, padodot aizdedzināšanas dzirksteli. Pēc tam spiediens cilindrā sasniedz 3,0-5,0 MPa un temperatūru 2000-2500<sup>0</sup> C. Degšanas produktu izlaišana notiek pie spiediena 0,105 – 0,115 MPa, tātad, nedaudz augstākā par atmosfēras spiedienu un temperatūrām 900-1000<sup>0</sup>C. Aizdedzes dzinēju lietderības koeficients atrodas diapazonā 0,25-0,40.

## 2.6. Dīzeļa dzinēja termodinamiskais cikls.

1897.g.šādu dzinēju lika priekšā R.Dizels. Šā iekšdedzes dzinēja cikls parādīts 2.11.attēlā. Tas tāpat kā iepriekšējām dzinējam sākās punktā 1. Gaiss cilindrā tiek saspriests pa adiabatī, bet līdz spiedienam 4,0 – 4,8 MPa, un temperatūrai 900<sup>0</sup> C, kas pārsniedz kurināmā aizdegšanas temperatūru. Kurināmo padod sūknis, šļircinot to cilindrā zem spiediena.

Degot kurināmajam (2-3) virzulis sāk kustību atpakaļvirzienā (izobāra). Beidzoties degšanai (3), process turpinājās pa adiabatī līdz izpūšanai (4).



2.11.att. R.Dizela dzinēja cikls.

Nemot vērā, ka:

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2);$$

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1);$$

un apzīmējot iepriekšējo retināšanas pakāpi kā:

$$\rho = v_3 / v_2 = T_3 / T_2,$$

iegūstam termisko lietderības koeficientu (izlaižot pārveidojumus):

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^{k-1} - 1}{\rho - 1},$$

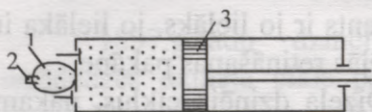
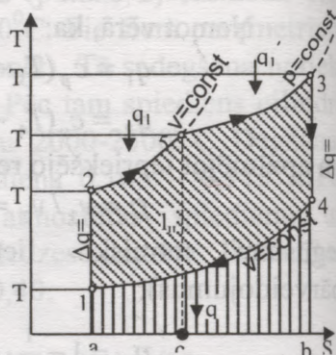
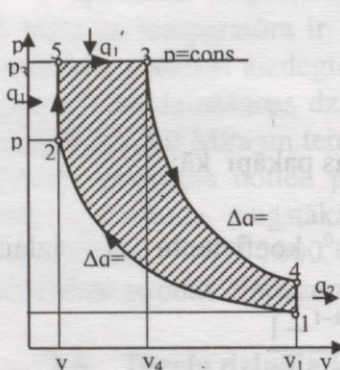
no kā izriet, ka lietderības koeficients ir jo lielāks, jo lielāka ir kompresija  $\varepsilon$  un mazāka iepriekšējās retināšanas pakāpe.

Salīdzinot aizdedzes un Dizeļa dzinēja ciklus, nākam pie slēdziena, ka pēdējā lietderības koeficientu varētu papildus palielināt, ja kurināmā degšanas sākumā izmantotu izohoru.

## 2.7. Trinklera termodinamiskais cikls.

G.V. Trinklers pilnveidoja Dizeļa dzinēju, pielietojot forkameru, ko savieno ar cilindru šaurs kanāls (2.12.att.).

Punktā 2 gaisa temperatūra par 200-300<sup>0</sup> C pārsniedz kurināmā aizdegšanās temperatūru. Kurināmais zem spiediena tiek iesmidzināts forkamerā. Tā mazākā daļa momentāni sadeg ( $v = \text{const}$ ), veidojot procesu 2-5, pievadot darba ķermenim siltumu  $q_1'$ . Forkamerā izveidojies paaugstināts spiediens, izgrūž vēl nesadegušo kurināmo, kas sadeg cilindrā, virzulim kustoties pie  $v = \text{const}$ . Šajā laikā veidojas otrā pievadītā siltuma daļa  $q_1''$ . Turpmākais atkārtoto iekšdedzes dzinēju procesu.



2.12.att. Trinklera dzinēja cikls.

Šajā gadījumā:

$$q_1 = q_1' + q_1'';$$

$$q_1' = c_v(T_5 - T_2);$$

$$q_1'' = c_p(T_3 - T_5).$$

Apzīmējot spiediena paaugstināšanas pakāpi kā:

$$\lambda = p_5 / p_2 = p_3 / p_2 = T_5 / T_2,$$

un iepriekšējās retināšanas pakāpi ar:

$$\rho = v_3 / v_5 = v_3 / v_2 = T_3 / T_5,$$

iegūstam lietderības koeficientu:

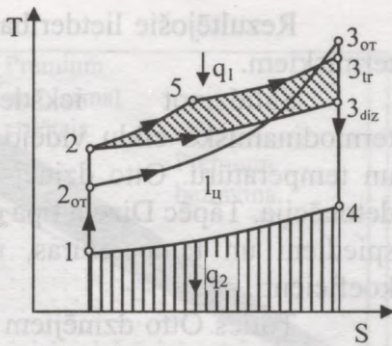
$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^{k-1}}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)}.$$

Lietderības koeficients palielinās, augot kompresijai un mazinoties iepriekšējās retināšanas pakāpei.

Ievērojot to, ka atgāzēm piemīt noteikta kinētiska enerģija, iekšdedzes dzinēju lietderības koeficientu var papildus palielināt, izmantojot izpūšanas turbīnu, kas darbina

kompresoru cilindra spiediena paaugstināšanas nolūkos. Šāda iekārta padārdzina dzinēju un tāpēc to izmanto gadījumos, ja tie tiek ilgstoši nepārtraukti darbināti.

Salīdzinot iekšdedzes dzinēju lietderības koeficientus pie optimālām kompresijām (Dizeļa un Trinklera dzinējiem  $\epsilon = 16 - 18$ , Otto ciklam  $\epsilon = 9$



2.13.att. Iekšdedzes dzinēju ciklu salīdzinājums

izrādās, ka visaugstākais lietderības koeficients ir Trinklera ciklam, bet viszemākais – Otto ciklam (2.13.att.). Apskatīsim dažus termiskā lietderības koeficientu piemērus. Otto dzinēju termiskie lietderības koeficienti pie kompresijas  $\epsilon = 6$  līdzinās  $\eta_t = 44,6\%$ , bet pie  $\epsilon = 9$ ,  $\eta_t = 51,5\%$ . Kas attiecas uz Dizeļa dzinēju, tad pie  $\epsilon = 11,2$ ,  $\rho = 2,5$  un maksimālā spiediena  $2,5 \text{ MPa}$   $\eta_t = 0,46$ , bet Trinklera cikla dzinējam  $\eta_t = 0,55$ , pie maksimālā spiediena degšanas procesa beigās  $p = 8,3 \text{ MPa}$ .

Ekonomisko iekšdedzes dzinēju efektivitāti nosaka ne tikai termiskais, bet arī mehāniskais un indikatora lietderības koeficientiem. Indikatora koeficients  $\eta_i$  ievēro  $p_1$  zudumus, kas ir saistīti ar siltumapmaiņu starp cilindru sieniņām un darba ķermeni, neblīvumiem, vārstu pretestībām, kurināmā degšanas nepilnībām utt.

Mehāniskais lietderības koeficients  $\eta_m$  ievēro berzes zudumus.

Rezultējošais ekonomiskais lietderības koeficients līdzinās:

$$\eta_l = \eta_t \eta_i \eta_m$$

Rezultējošie lietderības koeficienti ir daudz mazāki par termiskiem.

Salīdzinot iekšdedzes dzinējus, jāievēro termodinamisko ciklu vidējo parametru attiecību: kompresiju un temperatūru. Otto dzinējos kompresiju ierobežo kurināmā detonācija. Tāpēc Dizeļa tipa dzinējiem, kam ir augstāki vidējie spiedieni un temperatūras, ir augstāki termiskie lietderības koeficienti.

Toties Otto dzinējiem ir mazāki mehāniskie spriegumi, tātad tie var tikt izgatavoti no vieglākiem materiāliem, piemēram, alumīnija, un tiem ir mazāks svars.

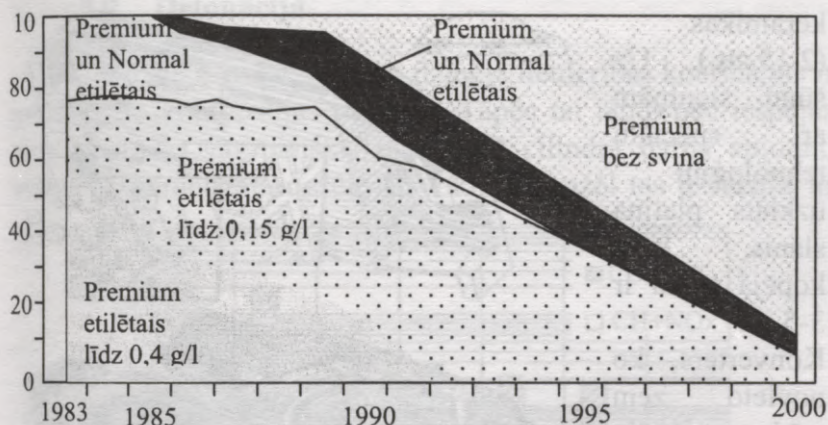
Dizeļa tipa dzinējos var izmantot zemo šķirņu kurināmo, kas ir lētāks.

Pie mazām Otto dzinēju slodzēm un maziem apgriezieniem kurināmā-gaisa maisījums rada samazinātu spiedienu un sadegšana ir nepilnīga. Tas mazina lietderības koeficientu, sevišķi pilsētās. Toties, Dizeļa dzinējos cikls vienmēr sākas pie vienāda sākotnējā spiediena. Palielinātā svara dēļ Dizeļa dzinējiem ir lielāka inerce un vadītāji sūdzas par pazeminātu mašīnu paātrinājumu. Dzinēju lietderības koeficients – 0,40 – 0,53.

Iekšdedzes dzinējos notiek eksplozīva kurināmā sadegšana. Tas rada palielinātas vibrācijas. Jaudas attieksme pret svaru tajos ir samērā augsta. Rezultātā šādus dzinējus izmanto galvenokārt transportā un pārvietojamās enerģētiskās iekārtās.

## 2.8. Iekšdedzes dzinēji un vide.

Pie augstām temperatūrām, kas rodas iekšdedzes dzinējos augsto kompresiju rezultātā, atgāzēs veidojas slāpekļa oksīdi  $NO_x$ . Atgāzēs ir arī nesadeguši ogļūdeņraži, kas saules staru iespaidā atmosfērā oksidējas, veidojot veselībai bīstamas



2.14.att. Benzīnu tipu attīstība augstoktānu izooktānu virzienā.

vielas. Lai samazinātu ogleņdeņraža izmešus automobiļos, parasti pāriet uz lielāku gaisa saturu, veidojot nabadzīgākus maisījumus. Bet tad liekais skābeklis veido lielāku  $NO_x$  daudzumu. Slāpekļa oksīdi gaisā veido kodīgu gāzi, kas piedod smogam brūnganu nokrāsu. Ar papildu gaisa daudzumu, ko padod kurināmā vai slāpētājā, samērā vienkārši tika galā ar tvana gāzi un ogleņdeņražiem. Toties ar slāpekļa oksīdiem ir grūtāk. Šie izmeši tiek normēti ar likumiem.

Modernā atgāzu toksiskuma samazināšanas sistēma – katalītiskais atjaunojošs-oksīdējošs konverters ir ilgstošo rūpīgo pētījumu rezultāts. Tos bojā etilētais benzīns. Naftas pārstrādes rūpniecības pāreja uz neetilētiem benzīniem izmaksāja desmitus miljardu dolāru. Etilēna benzīnu ražošanu sāka samazināt 1986.g. Turpmākā iekšdedzes dzinēju kurināmā attīstība parādīta 2.14.att. No tā redzams, ka etilētā benzīna īpatsvars Rietumu valstīs pašreiz nepārsniedz 10%.

Tikpat sarežģīti bija ieviest konverteru ražošanu. Tā pamatelements ir korpusā ievietots monolīts, kas sastāv no kanālu-šūnām  $1\text{ mm}^2$  platībā ar  $0,04 - 0,05\text{ mm}$  biezām sienām, kas izgatavoti no termostabila nerūsējoša tērauda vai

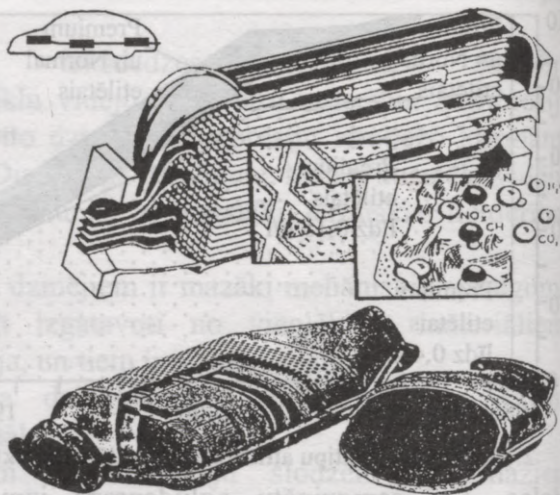
keramikas  
(2.15.att.). Uz  
šūnu sieniņām  
ar speciālu  
tehnoloģiju  
uzklāts platīna  
slānis, kura  
kopējā masa ir  
3-5 gr.

Konverters, ko  
novieto zem  
grīdas priekšējo  
sēdekļu zonā,  
darbojamies

sakarst līdz 2.15.att. Atgāzu konverteri, kas ķīmisko pārvērtību  
900<sup>0</sup>, t.i. līdz virknē pārvērš kaitīgos savienojumus ogļskābā gāzē,  
sarkankvēlei un slāpekli, un ūdens tvaikā.

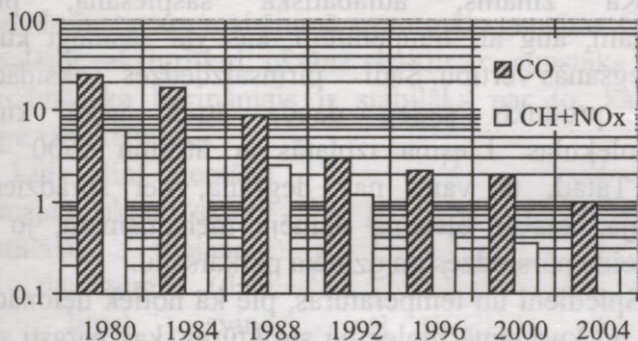
ir efektīvs pie noteiktas gaisa proporcijas kurināmā svara daļās.  
To nespēj nodrošināt karburators un, tātad, no tā atsakās un  
pāriet uz elektronisko dzinēju vadību. Tā darbu iespaido arī  
virzuļgredzenu izdilumi vai aizdedzes sveču defekti.  
Konvertera darbības mūžs – 80 000 km.

Pēdējos 20 gados Eiropas atgāzu toksiskuma normas  
tvana gāzei samazinājās 20 reizes, slāpekļa oksīdiem un  
ogļūdeņražiem – 17 reizes (2.16.att.). 1990. gadā Vācijas  
Federālajā republikā bija 30 milj. automobiļi,  
divreiz vairāk nekā pirms 20 gadiem. Toties tvana gāzes izmeši  
samazinājās no 5,4 milj.t līdz 2,2 milj.t, slāpekļa oksīdi no 475  
milj.t. līdz 355 milj.t. 2010.g. paredzēts samazināt tvana gāzes  
izmešus, salīdzinot ar esošo par 82%, ogļūdeņražus par 78% un  
slāpekļa oksīdus par 83%.



## 2.9. Detonācija.

No 2.5.§ izriet, ka Otto dzinēja lietderības koeficients ir atkarīgs no kompresijas pakāpes. Tāpēc tai jābūt pēc iespējas augstākai. To var panākt, samazinot cilindra darba apjomu, virzulim sasniedzot augšējo stāvokli. Diemžēl tas ir saistīts ar

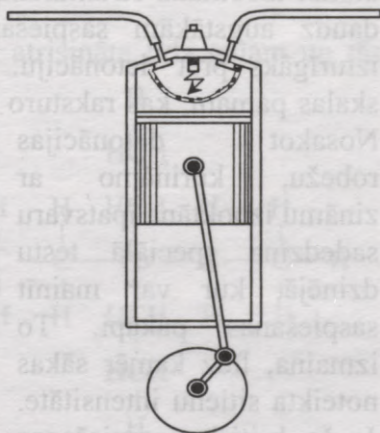


2.16.att. Sasniegtie atgāzu toksiskuma līmeņi.

zināmām problēmām.

Reālā dzinējā process notiek pie mainīgā tilpuma. Lai lielāka sadegšanas procesa daļa notiktu pie minimālā tilpuma, dzirksteli aizdedzina nevis tajā momentā, kad virzulis sasniedz augšējo stāvokli, bet mazliet agrāk. Liesmas izplatīšanās kurināmā maisījumā notiek ar galīgu ātrumu un maksimālais spiediens, kas tiek sasniegts kurināmajam sadegot, iestājas, virzulim kustoties uz leju.

Liesma, aizdegoties no aizdedzes sveces, izplatās ar ātrumu 10-20 cm/sec (2.17.att.). Sadegšanas procesā virzuļa



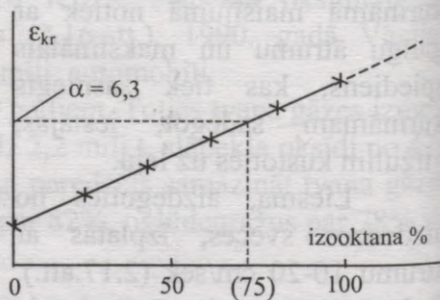
2.17.att. Kurināmā degšanas process cilindrā.

darba tilpums sadalās divās daļās. Pirmo daļu liesma jau aptvērusi, tās temperatūra pārsniedz  $2000^{\circ}\text{C}$  un tajā veidojas videi kaitīgie slāpekļa oksīdi  $\text{NO}_x$ . Auksto daļu liesma vēl nav sasniegusi, un tajā notiek nepilnīga kurināmā sadegšana un rodas kvēpi.

Kā zināms, adiabatiskā saspiešanā, pieaugot spiedienam, aug arī temperatūra, kas var sasniegt kurināmā pašai sadegšanās vērtību. Šādi pirmsaiždedzes oksidācijas procesa produkti sadeg daudz ātrāk nekā kurināmā pamatmolekulas. Liesma izplatās ar ātrumu  $1500 - 2000$  m/sek. Tātad, tā vairs nav degšana, bet sprādziens jeb detonācija, kas ir bīstama dzinēja mehānismam, jo izsauc impulsveida pārslodzes un dzinēja pārkaršanu.

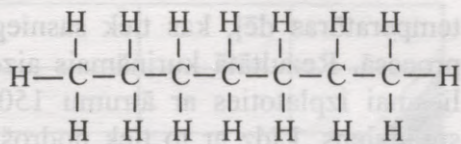
Spiedieni un temperatūras, pie kā notiek detonācijas, ir atkarīgi no kurināmā molekulu struktūras, kas parasti satur 6-10 oglekļa atomu un vairāk nekā divreiz lielāku ūdeņraža molekulu skaitu. Molekulas, kas veido līnijveida ķēdi - geptānu, detonē pie samērā zemām saspiešanas pakāpēm. Toties, ja kurināmā molekulas veido sazarotas ķēdītes, kas atbilst izooktāna struktūrām, detonācijas briesmas iestājas pie daudz augstākām saspiešanas pakāpēm un, tātad, tas ir izturīgāks pret detonāciju. Šīs struktūras veido detonācijas skalas pamatu, kas raksturo kurināmā izturību pret detonāciju.

Nosakot detonācijas robežu, kurināmo ar zināmu izooktāna īpatsvaru sadedzina speciālā testu dzinējā, kur var mainīt saspiešanas pakāpi. To izmaina, līdz kamēr sākas noteikta sitienu intensitāte. Ja šo kritisko saspiešanas pakāpi attēlo grafiski, tad



2.18.att. Testēšanas dzinēja raksturlīkne.

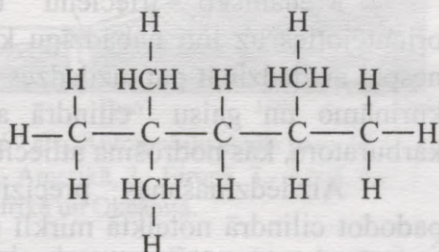
veidojas raksturlīkne, kas ir parādīta 2.18 attēlā. Kurināmajam līdz ar to piesavina noteiktu oktāna skaitli, kas



Geptāns

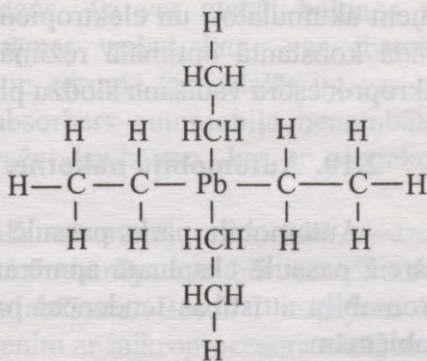
raksturo izooktāna procentuālo īpatsvaru maisījumā ar normālu geptānu. Gadās, ka ekstrapolējot raksturlīkni, oktāna skaitlis ir augstāks par 100. Tas nozīmē, ka kurināmais ir stabilāks par to, kas atbilst parastam izooktānam.

Līdz šim geptāna kurināmajam oktāna skaitli paaugstināja, piejaucot nelielā daudzumā (daži cm<sup>3</sup> uz litru) svina tetraetilū, kam molekula stipri sazarota. Šī viela piesārņo vidi ar svinu, kas ir toksisks. Tāpēc pēdējā laikā etilēto benzīnu aizliedz un pilnveido naftas pārstrādes metodes izooktāna īpatsvara paaugstināšanai.



Izooktāns

Detonācijas problēma nav atrisināta līdz galam un tās izpētes turpinājums cieši saistīts ar iekšdedzes dzinēju pilnveidošanu. Šajā ziņā vērību pelna kurināmā sadegšanas veids, kas tiek izmantots dīzeļdzinējos. Šeit kurināmā aizdegšanās notiek nevis no ārējā avota – aizdedzes sveces, bet darba telpas



Tetraetils

temperatūras dēļ, kas tiek sasniegta adiabatiskās saspiešanas procesā. Rezultātā kurināmais aizdegas visā telpā vienlaicīgi, liesmai izplatoties ar ātrumu 1500-2000 m/sek, un noris kā sprādziens. Līdz ar to tiek nodrošināta pilnīga sadegšana, kas ceļ lietderības koeficientu un mazina ogļūdeņražus atgāzēs kvēpu veidā. Atliek tikai samazināt mehānisko triecienu un sadegšanas temperatūru, atbildīgu par slāpekļa oksīdu rašanos, un nodrošināt kurināmā aizdegšanos stingri noteiktā virzuļa stāvoklī.

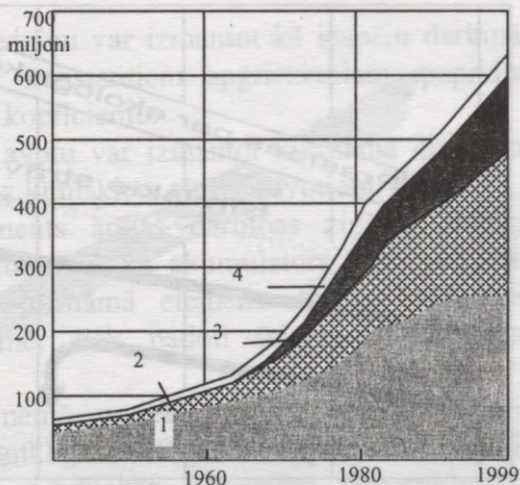
Mehānisko triecienu un temperatūru samazina, orientējoties uz ļoti nabadzīgu kurināmā-gaisa maisījumu, ko nespēj aizdedzināt pat aizdedzes svece. To panāk, iesmidzinot kurināmo un gaisu cilindrā attiecībā 1:50, atsakoties no karburatora, kas nodrošina attiecību tikai līdz 1:15.

Aizdedzināšanas precizitāti laikā var nodrošināt, padodot cilindrā noteiktā mirklī un proporcijā atgāzi no tikko iepriekš nostrādājušā cilindra. Tas strauji paceļ darba telpas temperatūru un nodrošina aizdedzes precizitāti laikā. Šāds perspektīvs risinājums tiek pētīts un tas var kļūt par daudzu problēmu risinājumu. Atliek nodrošināt maisījuma proporcijas pie dažādām noslodzēm, ko viegli var panākt hibrīda (elektroiekšdedzes dzinēju) mašīnām, kur slodzes mainīgo komponenti uzņem akumulatori un elektropiedziņa, bet iekšdedzes dzinējs, strādā konstantā optimālā režīmā, vai arī parastā mašīnā ar mikroprocesora vadīšanu slodžu plašā diapazonā.

## 2.10. Automobiļu nākotne.

Automobiļu parks pasaulē attīstās dinamiski (2.19.att.). Pašreiz pasaulē ekspluatē apmēram 700 milj. mašīnas. Tāpēc automobiļu attīstības tendences pieder pie galvenām pasaules problēmām.

Galvenais ir kurināmais. Līdz šim kā kurināmo izmantoja benzīnus un dīzeļdegvielu. Aktuāla ir automobiļu darbības pārvešana uz gāzi (2.20.att.). Paralēli paredzēts pilnveidot aizdedzes dzinējus, atsakoties no karburatora. Tas var jūtami celt lietderības



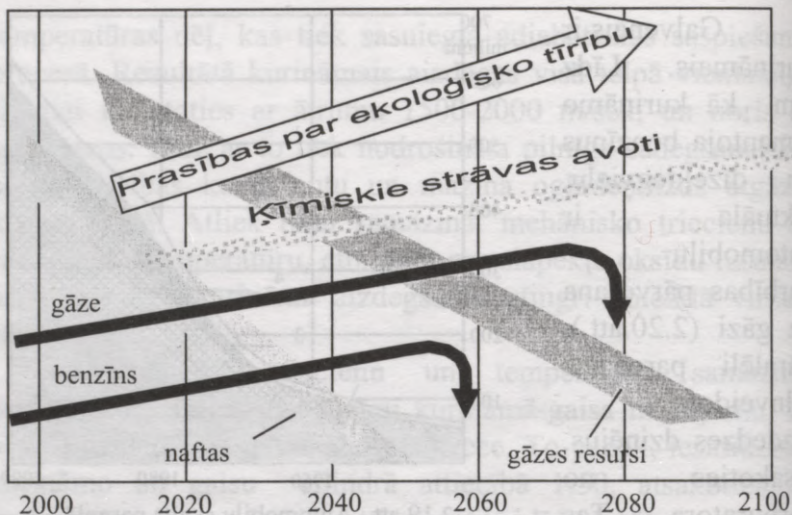
2.19.att. Automobiļu skaits pasaulē  
1.- Amerikā, 2.- Eiropā, 3.- Āzijā, 4.- Āfrikā un Okeānijā.

koeficientu. Liela vērtība tiek dota mašīnas aerodinamikai. Rezultātā plaši lietojamām vieglām automašīnām kurināmā patēriņš ir jau sasniedzis 3 l uz 100 km.

Nākošais attīstības etaps ir automobiļi ar gāzes turbīnas piedziņu. Līdz ar to mazinās vibrācijas un pieaug komforts.

Kā kurināmais interesi izsauc ūdeņradis. Tam sadegot, veidojas dabai nekaitīgs ūdens. To var glabāt balonos vai cietvielu absorberos. Ir zināmas vielas, kur var absorbēt ūdeņradi lielos daudzumos un siltumā tas izdalās un var tikt izmantots. Tā, piemēram, absorbers automobiļa benzīnbākas tilpumā spēj uzņemt ūdeņraža daudzumu, kas ir pietiekošs 1000 km noskrējienuam.

Turpmāk kļūst aktuāla automobiļu elektriskā piedziņa un tās barošanas avoti. Elektrodzinējs var būt centrālais ar mehāniskās transmisijas saglabāšanu. Bet ir iespējami arī individuāli dzinēji katram ritenim ar mikroprocesora vadīšanu.



2.20.att. Automaģiņu degvielu attīstība.

Elektrodzinēju barošanai var izmantot dažādus avotus. Tie var būt akumulatori. Nepieciešams, lai enerģijas uzkrājums akumulatoros atbilstu benzīnbākas enerģijas krājumam. Diemžēl, parastie svina akumulatori spēj nodrošināt tikai 60-80 km noskrējumu, kas ir nepietiekoši. Bet akumulatoru tehnikā ir jau manāms progress. Parādījās alumīnija-gaisa akumulatori ar lielāku kapacitāti. Ir priekšlikumi cinka-gaisa elementu ražošanai izpildītus pēc speciālās cietvielu tehnoloģijas, kas spēj nodrošināt 200 km noskrējumu starp uzlādēšanām. Šādi elektromaģiņi kļūs konkurētspējīgi, sevišķi pilsētās, kur jāuzlabo atmosfēras kvalitāte. Šinī gadījumā izmešu problēma tiek pārnesta uz elektrostacijām, kas tiek apgādātas ar attīrīšanas iekārtām. Šādu automaģiņu ekspluatācijas izdevumi ir nedaudz lielāki par pašreizējiem.

Tiek pārdomātas hibrīda konstrukcijas, kur izmantots iekšdedzes un elektriskais dzinējs dažādās kombinācijās. Iekšdedzes dzinēju izmanto ārpus pilsētas ar paralēlu akumulatoru uzlādēšanu un elektrisko piedziņu pilsētas

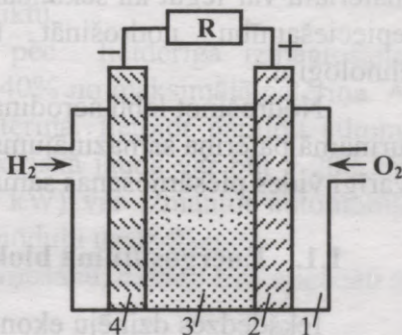
robežās. Elektrisko piedziņu var izmantot kā iespēju darbināt iekšdedzes dzinēju ar konstantiem apgriezieniem, papildus uzlabojot tā lietderības koeficientu.

Kā elektrības avotu var izmantot kurināmā elementu bateriju, orientējoties uz ķīmiskiem strāvas avotiem.

Kurināmā elements ārējās darbības ziņā ir līdzīgs akumulatoram ar to starpību, ka akumulators darbojas, līdz kamēr izlādējas, bet kurināmā elements turpina darboties neierobežoti ilgi, kamēr tiek padoti ūdeņradis un gaiss (2.21.att.).

Kurināmā elementā notiek process, kas ir pretējs elektrolīzei. Parādību atklāja 1839.gadā angļu elektroķīmiķis Grovs pēc profesijas advokāts. Pievadot elektroķīmiskā aparāta elektrodiem attiecīgi skābekli un ūdeņradi, tas kļūst par elektriskās strāvas avotu. Toreiz atklājumu nepamanāja. Vēlāk bija vairāki mēģinājumi ieviest kurināmā elementus līdz beidzot tos pielietoja kosmiskajā tehnikā. Iekārta, kas ļauj iegūt elektrību tieši ķīmiskā procesā, izbēgot mehāniskās enerģijas posmu, izrādījās ļoti kompakta. Elektrodi – poroplasti ar lielu iekšējo virsmu nodrošina lielu strāvu. Starp tiem piesūcināta ar elektrolītu poroplastu matrica.

Elementa biezums – milimetri, noņemama jauda simti vati. Reakcija ar fosforskābes elektrolītu notiek pie  $210^{\circ}\text{C}$ . Nākošās paaudzes elementos izmanto karbonātu šķīdumus. Tajos reakcija notiek pie  $500-700^{\circ}\text{C}$ . Tas dod iespēju izmantot neattīrītās gāzes un ļauj iztikt bez dārgiem katalizatoriem. Paredzamais



2.21.att. Kurināmā elements.

1- korpus, 2- katods, 3- elektrolīts, 4- anods.

lietderības koeficients šajā etapā pārsniedz 60%. Darbs turpinās un ir pamats cerēt uz pozitīvu risinājumu.

Problēma ir ūdeņradis, ko var pārvadāt balonā, vai iegūt no ogļūdeņražiem, piemēram, spirtiem. Vēriņu pelna arī jauni ūdeņraža iegūšanas veidi nākotnē.

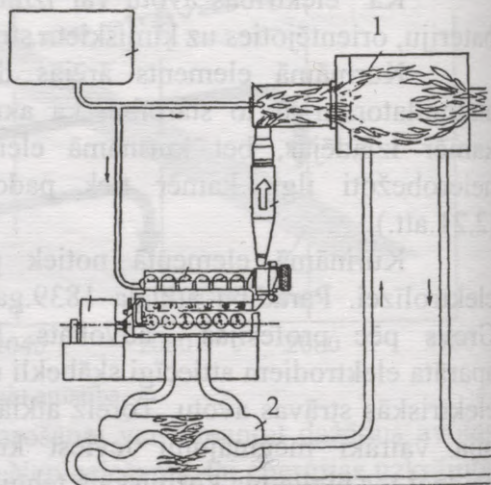
Liela vēriņa tiek veltīta mašīnas svara samazināšanai, saglabājot izmaksas. Svaru var samazināt, izmantojot alumīniju, kas pagaidām gan ir pārāk dārgs. Toties plašas iespējas ir lielgabarīta

termoplastmasu detaļu izmantošanā korpusu konstrukcijās (materiālu var iegūt kā sekundāro izejvielu), kas gan saistīts ar nepieciešamību nodrošināt triecienizturību un remonta tehnoloģiju.

Nodrošinot labu aerodinamiku, tiek panākts liels kurināmā patēriņa samazinājums līdz pat 2,5 l/100 km, kas ir svarīgi vides piesārņošanas samazināšanai.

### 1.1. Energosiltuma bloki.

Iekšdedzes dzinēju ekonomiskais lietderības koeficients ir ap 0,25 – 0,28 aizdedzes un 0,35 Dizeļa dzinējiem. Tik zems lietderības koeficients saistīts ar lieliem siltuma zudumiem. Pirmā šo zudumu daļa tiek izdalīta vidē ar dzesēšanas iekārtu



2.22.att. Energosiltuma bloks.

palīdzību, otrā – ar atgāzēm, kam ir augsta temperatūra. Rezultējošo lietderības koeficientu var palielināt līdz pat 0,80 pie noteikuma, ja siltumu lietderīgi izmanto. To var izmantot apkurei un tehnoloģiskām vajadzībām. Sasildāmais ūdens iet cauri diviem siltummaiņiem (2.22 att.): katlu utilizatoru (1), kas tiek sildīts ar atgāzēm un dzesēšanas iekārtai 2. Dzinēja mehānisko enerģiju var izmantot piedziņai vai elektrības ražošanai, ko lieto uzņēmumā pašu vajadzībām un pārpalikumu var nodot elektriskam tīklam par saskaņotu tarifu.

Kurināmā patēriņš sadalās starp siltumu un elektroenerģiju. Izdevīgos gadījumos var izrādīties, ka pie normālā kurināmā patēriņa siltumam, tā patēriņš elektroenerģijas ražošanai sastāda 0,2 kg/kWh un pat mazāk. Rezultātā šādas modernas iekārtas izmantošana energo-siltuma bloku veidā var izrādīties izdevīga. Parasti tie izrādās izdevīgi, ja izmantošanas laiks pārsniedz 3500 stundas gadā. Siltums var tikt izmantots procesos līdz 115<sup>0</sup>C. Tā, piemēram, kādā ražošanas uzņēmumā izmantots gāzmotors ar gāzes 540 kW patēriņu, siltuma jaudu 310 kW un elektrisko jaudu 160 kW pie izmantošanas ilguma 3400 st/gadā.

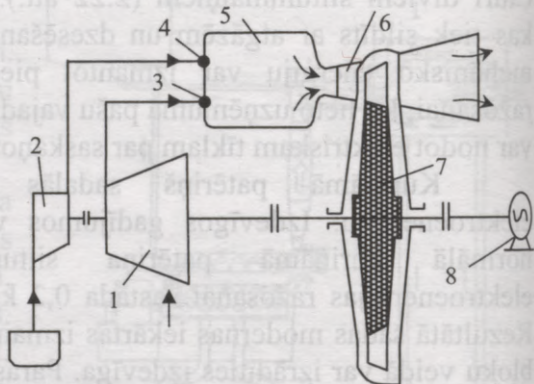
Režīms var tikt vadīts pēc siltuma patēriņa, ražojot elektroenerģiju, kā blakus produktu.

Dzinēja jaudu izvēlas pēc lietderīgā izmantošanas laika. Parasti jauda līdzinās 25-40% no maksimālā patēriņa. Ar to nodrošina 60-75% gada patēriņa, lietojot papildu siltuma avotu sevišķi aukstā laikā. Elektriskā jauda var būt 7-200 kW robežās. Mazās iekārtās (7-15 kW) var izmantot automobiļu dzinējus. Orientējas uz gatavo moduļu uzstādīšanu.

Lai novērstu vides piesārņošanu, dzinēji tiek apgādāti ar katalizatoru iekārtām.

## 2.12. Gāzes turbīnas.

Gāzes turbīna sastāv no kurināmā degšanas kameras 5, sprauslām 6, caur ko karstās gāzes padod uz darba rata lāpstiņām 7 (2.23.att.), paša darba rata, kompresora uz darba rata ass gaisa saspiešanai 1, kas tiek padots degšanas kamerā un sūkņa kurināmā padošanai 2.



Darba ķermenis ir šķidrā vai gāzveidīgā

2.23.att. Gāzes turbīna.

kurināmā degšanas produkti. Degšana notiek pie pastāvīgā spiediena  $p = const$ . Gaiss degšanas kamerā tiek padots pa diviem kanāliem. Pirmais – uz degli, otrais – uz degšanas kameras sienām, to dzesēšanas nolūkā. Arī deggāzes jādzesē, jo to temperatūra var sasniegt  $2000^{\circ}\text{C}$ , bet karstumizturīgie lāpstiņu kausējumi pieļauj  $650\text{-}800^{\circ}\text{C}$ .

Termodinamiskais cikls  $pv$  un  $Ts$  koordinātēs parādīts 2.24.attēlā. 1-2 gaisa padeves adiabatē, 2-3 – degšanas process (izobāra), 3-4 degšanas produktu izplešanās uz turbīnas darba rata (adiabatē), 4-1 – to izpūšana atmosfērā (izobāra).

Lietderības koeficients tāpat kā aizdedzes dzinējam:

$$\eta_T = 1 - 1/\varepsilon^{k-1} = 1 - 1/B^{(k-1)/k},$$

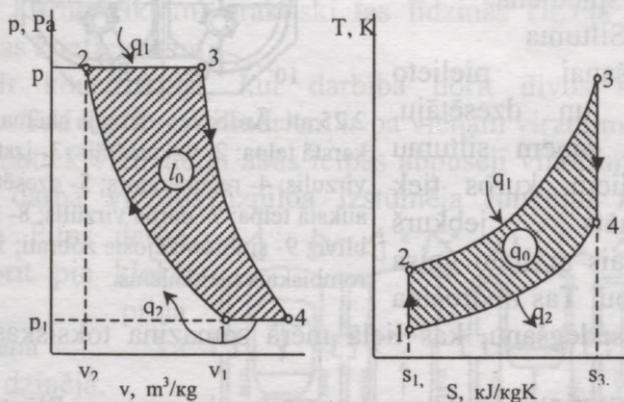
$$\varepsilon = v_1/v_2,$$

$$B = p_2/p_1,$$

kur  $B$  – spiediena izmaiņas pakāpe adiabatiskās saspiešanas procesā. Parasti  $B = 6 - 8$ . Tā palielināšana saistīta ar paaugstinātām prasībām pret karstizturību.

Ievērojot to, ka gāze turbīnas izejā ir  $400-500^{\circ}\text{C}$ , tās izmanto rekuperatīvos siltummaiņos, sasildot izmantojamo gaisu vai ūdeni turpat izmantojamās tvaika iekārtās. Tā, piemēram, uzsildot gaisu, izdalāmais siltums  $-q$  tiek atdots gaisa uzsildīšanai  $+q$ , tādējādi samazinot kurināmā patēriņu. Patiesībā rekuperācijas pakāpe ir  $0,5-0,6$  un to nosaka tehniski-ekonomiskie apsvērumi.

Ir iespējams sadedzināt kurināmo pie  $v = \text{const}$  ar lielāku lietderības koeficientu, bet tad degšanas kamera jāapgādā ar vārstiem, degšanas process kļūst impulsveida. Šādas iekārtas drošums ir mazāks. Tādēļ tas neatrada plašu



2.24.att. Gāzes turbīnas cikli.

pielietojānu.

Gāzes turbīnas plaši izmanto aviācijā un arī stacionārā enerģētikā, jo tās var ātri palaist un apturēt, un kombinācijā ar tvaika iekārtām to lietderības koeficients var sasniegt 40%.

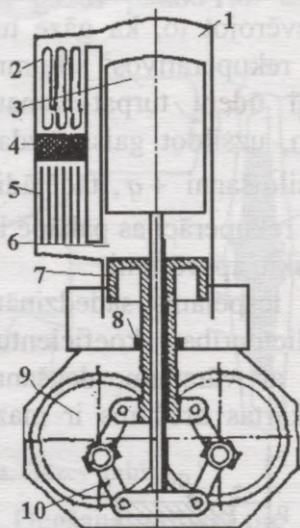
### 2.13. Stirlinga dzinējs.

Ārdedzes dzinēju radīja angļu izgudrotājs R. Stirlings 1840. gadā. Tas darbojas uz sasildāmā gaisa pamata vaļējā ciklā. Dažu nepilnību dēļ to šādā veidā neizmantoja. Pašreiz izmantojamos Stirlinga dzinējos kā gāzi lieto ūdeņradi vai hēliju slēgtā ciklā zem 100-140  $\text{kg}/\text{cm}^2$  spiediena.

Siltuma izmantošanai pielieto sildītāju un dzesētāju. Sildītājs saņem siltumu no degļiem, kuros tiek sadedzināts jebkurš kurināmais ar lielu gaisa pārpilnību. Tas nodrošina pilnīgu sadegšanu, kas lielā mērā samazina toksiskas vielas atgāzēs.

Sildītāju atdala no dzesētāja reģenerators. Plūstot siltai gāzei, reģenerators sasilst. Daļu no šā siltuma uzņem aukstā gāzes plūsma, kas plūst caur reģeneratoru nākošā ciklā. Dzinēja shēma parādīta 2.25. attēlā. Gāze darba gaitā netiek nomainīta un, tikai maina apjomu sasilstot un atdzesējoties.

Dzinēja cilindrā jānodrošina divas funkcijas: saspiešanu-izplešanu un gāzes izstumšanas funkciju, ko panāk ar diviem atsevišķiem darba un izstumšanas virzuļiem.



2.25.att. Ārdedzes dzinēja shēma. 1- karstā telpa; 2- uzkarsētājs; 3- izstumšanas virzulis; 4- reģenerators; 5- dzesētājs; 6- aukstā telpa; 7- darba virzulis; 8- ārēja blīve; 9- sinhronizējošie zobrati; 10- rombiskais mehānisms.

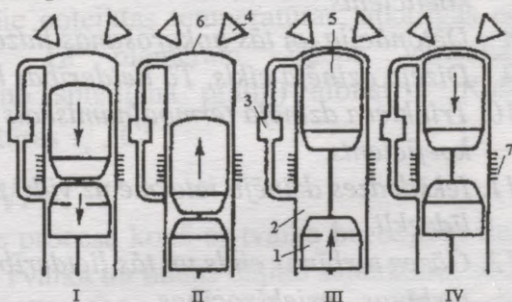
Dzinēja darbības ciklu secība parādīta 2.26. attēlā. I takts- darba gājiens. Sasildīta gāze, kas piepilda karsto telpu, izplešas un abi virzuļi kustas lejup, izraisot dzinēja darbību. Pārejas taktis norit ar inerci. II taktī- izstūmējs kustas uz augšu un izstumj siltu gāzi uz reģeneratoru, no kura caur dzesētāju tā nonāk aukstā telpā. III taktī – darba virzulis kustas uz augšu, saspiežot auksto gāzi un apstājas. IV taktī – izstūmējs kustas uz leju, izspiežot gāzi uz karsto telpu caur reģeneratoru un uzsildītāju.

Virzuļu kustību vada rombiskais mehānisms, ekscentriski piestiprināts zobratiem.

Termodinamiskais cikls sastāv no divām izotermām (I un III cikls) un divām izohorām (II un IV cikli). Kaut gan, pateicoties reģenerācijai, teorētiski lietderības koeficientam jāatbilst Kārno ciklam, praktiski tas līdzinās Dizeļa dzinēja lietderības koeficientam.

Ir konstrukcija, kur darbība norit divos saistītos cilindros. Tad katrā no cilindriem ir pa vienam virzulim. Darba process notiek vienlaicīgi abās telpās abpusēji virzulim. Katra cilindra darba virzulis izpilda izstūmēja funkciju kaimiņa virzulim. Pilns darba cikls norit pie kloķa vārpstas pilna pagrieziena kā divtaktu dzinējā.

Stirlinga dzinējs darbojas klusi, jo tajā nav kurināmā eksplozīvās sadegšanas, tam ir mierīga gaita un tas ir ekonomisks.



2.26.att. Ārdedzes dzinēja darbības shēma. I- darba cikls; II- dzesēšanas cikls; III- saspiešanas cikls; IV- sildīšanas cikls; 1- darba virzulis; 2- auksta telpa; 3- reģenerators; 4- degļi; 5- izstūmšanas virzulis; 6- karsta telpa; 7- dzesētājs.

Kā trūkums jāatzīmē paagstināta masa un augstākas cenas, salīdzinot ar iekšdedzes dzinējiem, kā arī sarežģīta blīvju konstrukcija, kam jāiztur augsts darba ķermeņa spiediens.

Stirlinga dzinēji tiek pilnveidoti masas un gabarītu samazināšanas virzienā. Tos izmanto galvenokārt kravas automobiļos un kuģos.

### ***Jautājumi paškontrolei.***

1. *Kādi ir trīs galvenie gāzu likumi, kas tiek izmantoti enerģētikā?*
2. *Kādus četrus stāvokļa parametrus izmanto gāzu enerģētikā?*
3. *Izohoriskā procesa attēls  $p$  un  $T$ s koordinātēs.*
4. *Izobāriskā procesa attēls  $p$  un  $T$ s koordinātēs.*
5. *Izotermiskā procesa attēls  $p$  un  $T$ s koordinātēs.*
6. *Adiabātiskā procesa attēls  $p$  un  $T$ s koordinātēs.*
7. *Otto dzinēja termodinamiskais cikls, tā lietderības koeficients.*
8. *Detonācija un tās apkaršanas līdzekļi.*
9. *Dizeļa dzinēja cikls. Tā lietderības koeficients.*
10. *Trinklera dzinēja termodinamiskais cikls. Tā lietderības koeficients.*
11. *Iekšdedzes dzinēju ietekme uz vidi. Atgāzu attīrīšanas līdzekļi.*
12. *Gāzes turbīnas cikls un tās lietderības koeficients. Gāzes turbīnas priekšrocības.*

### 3. NODAĻA. TVAIKA ENERĢĒTIKA

#### 3.1. Entalpija.

Vielas var atrasties cietā, šķidrā vai gāzveidīgā stāvoklī. To pāreja no viena agregātstāvokļa otrā sauc par fāzes pārejām. Fāzu pāreja no šķidra stāvokļa gāzveidīgā notiek caur iztvaikošanu vai vārīšanos.

Izgarošana notiek no šķidruma brīvās virsmas. Tas ir divpusīgs process. Daļa no molekulām izdalās vidē tvaika veidā, citas atgriežas šķidrumā. Ja šīs kustības savstarpēji kompensējas, tad pastāv dinamisks līdzsvars. Jo augstāka šķidruma temperatūra, jo kustīgākas molekulas un intensīvāk tās to atstāj.

Ja izgarošana notiek no šķidruma virsmas, tad tam, vāroties, tvaiki veidojas visā šķidruma masā. Ceļoties temperatūrai, mazinās šķidrumā izšķīdušo gāzu daudzums. Pie trauka virsmām veidojas gāzu burbuļi, kur, šķidrumu sildot, izdalās tvaiks. Tvaika piesātinājumam tajos augot, tiek sasniegts atmosfēras spiediens, burbuļi izdalās un sākas vārīšanās, kas notiek pie noteiktas temperatūras, atkarīgas no atmosfēras spiediena. Tā piemēram, ūdens vārīšanās temperatūra, atkarīga no spiediena  $p(\text{atm})$ , atbilst Ruša izteiksmei pie temperatūras  $t_v, ^\circ\text{C}$ :

$$t_v = 100\sqrt{p}.$$

Ūdens vārīšanās procesā kopā ar tvaika burbuļiem tiek iznestas ūdens daļiņas. Tvaika un ūdens daļiņu sajaukumu sauc par slapju piesātinātu tvaiku. Ūdens pārvēršanās tvaikā saistīta ar lielu enerģijas patēriņu (540 cal/gr), ko sauc par latentu siltumu (apslēpto). Tvaikam kondensējoties, šis siltums izdalās vidē.

Verdošā ūdens parametrus parasti apzīmē burtiem ar strīpiņu, piemēram:  $v'$  - īpatnējais tilpums,  $s'$  - entropija,  $u'$  - iekšējā enerģija,  $q'$  - siltums.

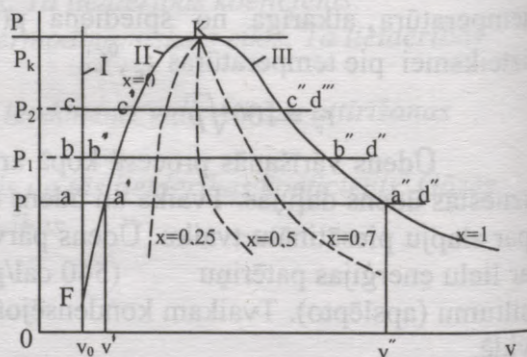
Ja pie dotā spiediena šķidrums pievada papildus siltumu, nepieciešamu visa šķidruma pārvēršanai tvaikā, tad šķidruma pilienu izžušanas momentā tvaiks kļūst par sauso piesātināto. Visi šāda tvaika parametri tiek apzīmēti burtiem ar divām svītriņām:  $v''$ ,  $s''$ ,  $u''$ .

Sauss piesātināts tvaiks ir nestabils, kas atbilst momentānam raksturojumam. Tāpēc tvaiku, ko izmanto enerģētiskās mašīnās, parasti pārkarsē. Par pārkarsēto sauc tvaiku, kam pie tā paša piesātinātā tvaika spiediena ir temperatūra, augstāka par piesātināšanas temperatūru.

Ūdens tvaiku iegūst tvaika katlos (tvaika ģeneratoros) pie pastāvīgā spiediena, kas paredzēts, katlu konstruējot atkarībā no tā pielietošanas mērķa.

Tvaika iegūšanas process  $p-v$  koordinātēs parādīts 3.1.attēlā. Sākotnēji ūdens apjoms ir  $v_0$ . Pievadot siltumu, ūdens temperatūra pieaug līdz piesātināšanas lielumam  $t_{pies.}$ , t.i. līdz vārīšanas temperatūrai pie dotā spiediena. Ūdens izplešas, sasniedzot īpatnējo tilpumu  $v'$ . Verdošā ūdens stāvoklis diagrammā atbilst punktam  $a'$ .

Turpinot siltuma pievadīšanu, verdošs ūdens pārvēršas tvaikā. Tvaika-ūdens maisījumā spiediens un temperatūra saglabājas nemainīgi,



3.1.att. Tvaika iegūšanas līkne.

t.i., process ir izobāri-izotermisks. Momentā, kad pēdējie ūdens pilieni iztvaiko, tiks iegūts sauss piesātināts tvaiks. Sausa piesātināta tvaika stāvoklis atbilst diagrammā punktam  $a''$ . Tātad līnijas nogrieznī  $a' - a''$  rodas tvaika-ūdens maisījums – mitrs piesātināts tvaiks. Mitra tvaika stāvokli katrā šā diapazona punktā nosaka parametri  $p, t_p$  un sausuma pakāpe  $x$ . Ja  $x = 0$ , tad tvaiks tikai sāk rasties. Ja  $x = 1$ , tad tas ir sauss, piesātināts. Starposmos  $x < 1$ .

Ja sausam, piesātinātam tvaikam  $a''$  turpina pievadīt siltumu pie nemainīga spiediena, tad tas pārvēršas pārkarsētā tvaikā ( $d$ ).

Pie augstākiem spiedieniem process notiek analogiski. Bet ūdens īpatnējais tilpums, kas atbilst punktiem  $b, c, \dots$ , pieaug. Pieaugot spiedienam, aug arī tvaika piesātināšanas temperatūra. Pie kam tā iespaids uz īpatnējo tilpumu  $v''$  ir augstāks. Rezultātā veidojas ūdens vārīšanās robežlīkne.

Līnija I, ņemot vērā ūdens tilpuma praktisko neatkarību no spiediena, nosaka ūdens stāvokli pie  $0^{\circ}\text{C}$  un dažādiem spiedieniem. Līnija II nosaka verdošā ūdens stāvokli. To sauc par apakšējo robežlīniju. Turpinot šo līniju uz leju, tā nāk saskarē ar I līniju. Šo punktu sauc par trīskāršo punktu, kur ķermeņa daļiņas var izrādīties cietā, šķidrā vai gāzveidīgā agregātstāvoklī.

Līnija III raksturo sausā, piesātinātā tvaika stāvokli.

Līnija II savienojas ar līniju III punktā K, ko sauc par kritisko punktu. Šajā punktā tvaikam un ūdenim ir vienāds blīvums. Kondensēt pārkarsēto tvaiku, to saspiežot, var ar noteikumu, ja temperatūra ir zemāka par kritisko. Kritiskā punkta parametri ūdens tvaikam ir:

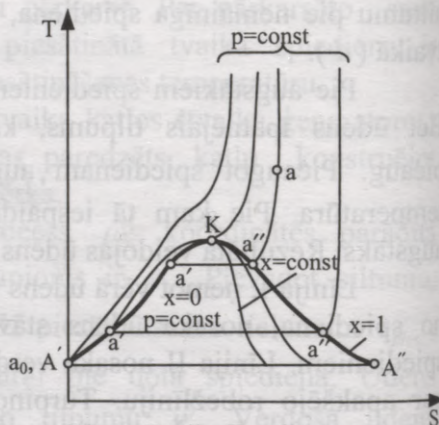
$$p_{kr} = 221,15 \text{ bari}, \quad t_{kr} = 374,12^{\circ}\text{C}, \quad v_{kr} = 31,47 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{kg}.$$

Ūdens tvaika veidošanas diagrammas  $T-s$  koordinātes parādītas 3.2.attēlā. Ūdens stāvoklis trīskārtējā punktā  $A'$  atbilst:

$$s_0 = 0, \quad T_0 = 273,16^\circ K$$

Atzīmējot uz diagrammas  $s'$  un  $s''$  vērtības atbilstošas dažādām temperatūrām  $T$ , iegūstam apakšējo un augšējo robežlīkni. Pa kreisi no apakšējās robežlīknes ir šķidrums zona, starp robežlīknēm – mitra piesātināta tvaika divfāzu zona, pa labi no augšējās robežlīknes pārkarsētā tvaika zona.

Diagrammā parādītas izobāras, izohoras un dažādas sausuma pakāpes līnijas. Šim nolūkam katru izobāru  $a', a''$  daļa vienādās daļās un attiecīgus punktus savieno savā starpā ar līnijām, kas atbilst sausuma pakāpēm  $x = const.$  Diagrammas zona, kas atrodas zem nulles izoterma atbilst tvaika- ledus maisījumam.



3.2.att. Tvaika  $T, s$  diagramma.

Izmantojot procesā ūdens tvaikus, tā dažādos posmos veidojas gan pārkarsēts, gan mitrs tvaiks. Tātad procesā piedalās tvaika un ūdens maisījumi dažādās proporcijās. Tvaika īpašības, tuvojoties piesātināta tvaika robežai, jūtami atšķiras no ideāla tvaika īpašībām. Toties robežzonā paliek spēkā maisījuma īpašības attiecībā pret siltumu pie pastāvīgā spiediena. Tāpēc tvaika iekārtu darbības analīzē izmanto papildu parametru, kas raksturo siltuma daudzumu, ko satur darba ķermenis, sauktu par entalpiju :

$$h = u + pv.$$

Atgādināsim, ka  $du = c_v dT$ , tad

$$h = c_p dT.$$

Sakarā ar pirmo termodinamikas likumu:

$$\delta q = du + p dv = d(u + pv) = dh.$$

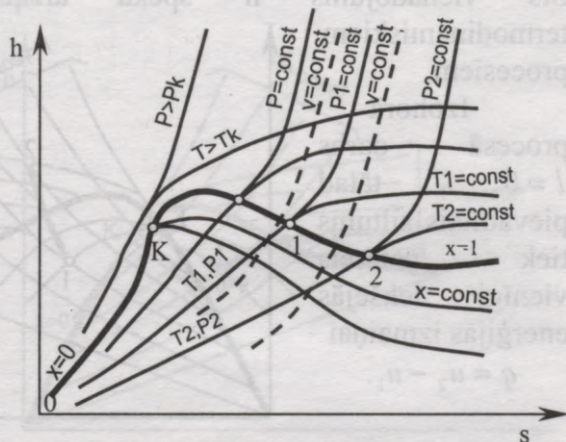
Tātad entalpija ir stāvokļa parametrs un tam ir tāda pati loma procesos ar pastāvīgo spiedienu, kā iekšējai enerģijai  $u$  procesos ar pastāvīgo tilpumu. Līdz ar to var iegūt tādu Klaipera vienādojuma izteiksmi, kas apvieno temperatūru un spiedienu līdzsvarotā procesā, kas ietver divas darba ķermeņa fāzes, piemēram, gāzveidīgo un šķidro:

$$dT / dp = T(\Delta v) / \Delta h,$$

kur  $dT$  - bezgalīgi maza temperatūras izmaiņa, ko izsauc tikpat maza spiediena izmaiņa  $dp$ ;  $\Delta v$  - tilpuma izmaiņa vielai, kas pāriet citā agregātstāvoklī;  $\Delta h$  - entalpijas izmaiņa, mainoties agregātstāvoklim.

Ūdens tvaiks  $h-s$  koordinātēs parādīts 3.3. attēlā. Koordinātu sākumā trīskārtējais punkts. Ūdens stāvokļa robežlīkne līdzīga parādītajai 3.1. attēlā, bet ar nobīdītu uz augšu III zaru

sakarā ar to, ka pieaugot entropijai  $s$  ( $dh = sT$ ) aug arī entalpija.  $K$  - kritiskais punkts. Šajā diagrammā tiek attēlotas izobāras, izotermas un izohoras. Sildāmā ūdens joslā šīs līnijas praktiski



3.3.att. Tvaika iegūšanas līkne  $hs$  koordinātēs.

sakrīt ar robežlīniju OK. Piesātināta tvaika joslā izobāras ( $p=const$ ), tuvojas logaritmiskām līnijām. Sakarā ar to, ka izotermiskā procesā ( $T=const$ ) ideālās gāzes entalpija nemainās (pārkarsēts tvaiks tuvojas ideālai gāzei), izotermas aiz piesātināšanas robežas kļūst par horizontālām līnijām. Izohoras iet stāvāk par izobārām (raustītas). Parasti apskata diagrammas daļu, kas tiek izmantota aprēķinu praksē. Entalpijas dotas tabulās ūdenim, spiedieniem līdz 100,0 MPa un temperatūrām līdz 1000<sup>0</sup>C (M.P.Vukalovičs).

### 3.2. Termodinamiskie procesi hs koordinātēs

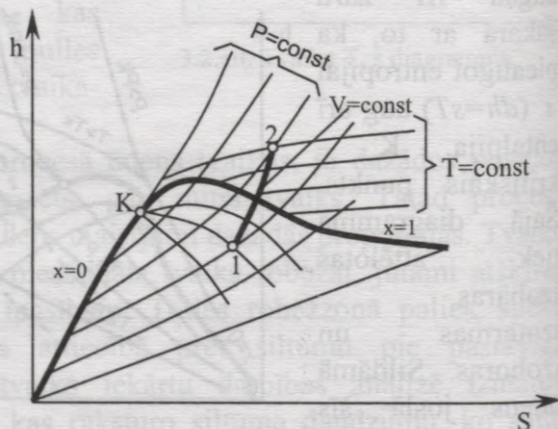
Izohorā procesā (3.4.att.), tvaiku sildot pie pastāvīgā tilpuma, var pārveidot sausā piesātinātā un pārkarsētā. Atdzesējot to var kondensēt, bet ne galīgi, jo pie jebkura spiediena virs šķidruma atrodas noteikts piesātinātā tvaika daudzums. Tātad, izohora nešķērso apakšējo robežlīniju. Tvaika iekšējās enerģijas izmaiņa pie  $v = const$  atbilst vienādojumam:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (u_2 - p_2 v_2) - (u_1 - p_1 v_1).$$

Šis vienādojums ir spēkā arī visiem pārējiem termodinamiskiem procesiem.

Izohorā procesā darbs  $l = 0$ , tātad pievadītais siltums tiek patērēts vienīgi iekšējās enerģijas izmaiņai

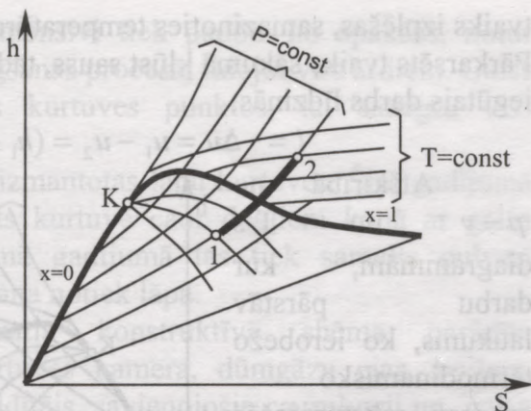
$$q = u_2 - u_1.$$



3.4.att. Izohors process hs koordinātēs.

### Izobārā

procesā, (3.5.att.) pievadot siltumu mitram piesātinātam tvaikam, tā sausuma pakāpe palielinās un tas pie pastāvīgas temperatūras pāriet sausā un, turpinot pievadīt siltumu, temperatūrai palielinoties



3.5.att. Izobārs process  $hs$  koordinātēs.

pārkarsētā tvaikā. Novadot siltumu, mitrais tvaiks kondensējas pie  $p = const$ . Iegūtais siltums līdzinās entalpiju starpībai:

$$q = h_2 - h_1.$$

Darbu nosaka ar vienādojumu:

$$l = p(v_2 - v_1)$$

Izotermiskā procesā (3.6.att.) iekšējā tvaika enerģija pie  $T = const$  nepaliek pastāvīga kā ideālām gāzēm, jo mainās tā potenciālā sastāvdaļa.

### Siltuma

daudzums, iegūts procesā, līdzinās:

$$q = T(s_2 - s_2).$$

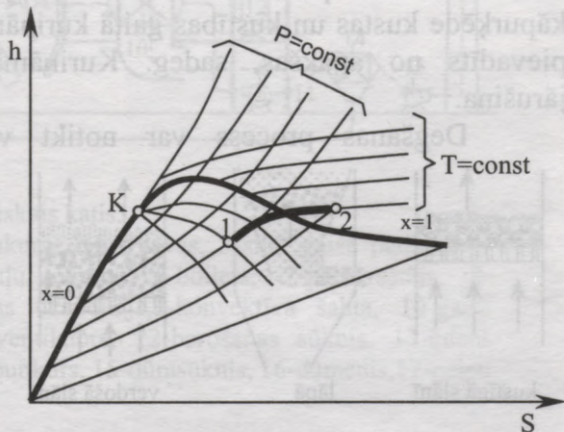
### Iegūtais

darbs līdzinās siltumam, atskaitot potenciālās enerģijas izmaiņu:

$$l = q - \Delta u.$$

### Adiabātiskā

procesā (3.7.att.)

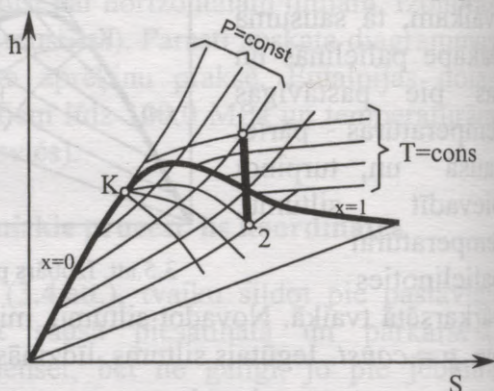


3.6.att. Izotermisks process  $hs$  koordinātēs.

tvaiks izplēšas, samazinoties temperatūrai un spiedienam. Pārkarsēts tvaiks sākumā kļūst sauss, tad mitrs. Šajā procesā iegūtais darbs līdzinās:

$$l = -\Delta u = u_1 - u_2 = (h_1 - p_1 v_1) - (h_2 - p_2 v_2).$$

Atšķirībā no  $p-v$  un  $T-s$  diagrammām, kur darbu laukums, ko ierobežo termodinamisko procesu raksturojošās līknes,  $h-s$  diagrammā darbu raksturo adiabatēs 1-2 garums.

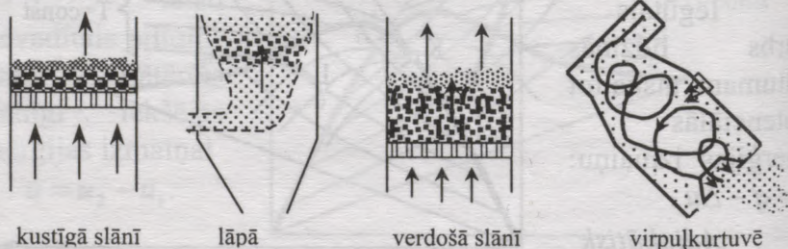


3.7.att. Adiabatīks process  $hs$  koordinātēs.

### 3.3. Energētiskie katli

Galvenā enerģētisko katlu sastāvdaļa ir kurtuve, kur sadeg padodamais kurināmais. Vienkāršāki ir ārdi katli. Šeit kurināmais tiek padots uz ārdiem slānī (3.8.att.). Ārdi kā kāpurķēde kustas un kustības gaitā kurināmais, kam gaiss tiek pievadīts no apakšas, sadeg. Kurināmā slānis periodiski jārušina.

Degšanas process var notikt verdošā slānī. Šinī

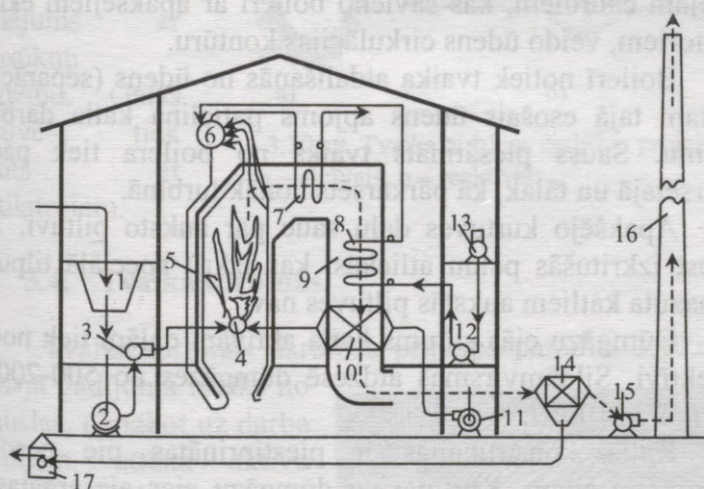


3.8.att. Kurināmā degšanas tehnoloģijas.

gadījumā gaiss, kas intensīvi tiek padots no apakšas, notur kurināmā daļiņas sadegšanas procesā, lidojot virs ārdiem. Gaiss tiek padots arī citos kurtuves punktos, lai sadegtu viss kurināmais.

Visbiežāk tiek izmantotas lāpu kurtuves. Šinī gadījumā kurināmais tiek iepūsts kurtuvē caur degļiem kopā ar gaisa strūklu. Cietā kurināmā gadījumā tas tiek samalts pulverī īpašās dzirnavās. Degšana notiek lāpā.

Enerģētiskā katla konstruktīvā shēma parādīta 3.9.attēlā. Tajā ir kurtuves kamera, dūmgāzu ejas, boilers, sildvirsmas, gaisa uzsildītājs, savienojošie cauruļvadi un gaisa vadi.



3.9.att. Enerģētiskais katls.

1-kurināmā bunkurs, 2-dzirnavas, 3-siltā gaisa padeve, 4-deglis, 5-cauruļu ekrāni, 6-boilers, 7-pārkarsētājs, 8-barošanas ūdens uzsildītājs, 9-konvektīva šahta, 10-gaisa uzsildītājs, 11-ventilators, 12-barošanas sūknis, 13-ūdens bāka, 14-pelnu bunkurs, 15-dūmsūknis, 16-dūmenis, 17-pelnu pulpas sūknis

Kurināmais tiek padots caur degļiem (4), kam pievada gaisu, iepriekš sasildītu uzsildītājā (10) dūmgāzu ejā. Kurināmā-gaisa maisījums, ievadīts caur degļiem kurtuvē (5), sadeg, veidojot augstu temperatūru ( $1500^{\circ}\text{C}$ ) lāpā, kas izstaro siltumu uz kurtuves sienu cauruļu ekrānu. Atdevuši daļu siltuma ekrāniem, dūmgāzes ( $1000^{\circ}\text{C}$ ) iet gar ekrānu, ko caurules veido vairākslāņu rindas, apskalo pārkarstētāju 7. Pēc tam dūmgāzes iet caur ūdens uzsildītāju – ekonomazeru 8, gaisa uzsildītāju 10 un atstāj katlu pie temperatūras  $110\text{-}150^{\circ}\text{C}$ .

Katlu barojošais ūdens, uzsildīts ekonomazerā 8 un gaiss uzsildītājā 10 atņem siltumu dūmgāzēm, ietaupot kurināmo. Ekrānu caurulēs 5, pievienotas boileram 6, un kopā ar ārējām caurulēm, kas savieno boileri ar apakšējiem ekrānu kolektoriem, veido ūdens cirkulācijas kontūru.

Boilerī notiek tvaika atdalīšanās no ūdens (separācija). Bez tam tajā esošais ūdens apjoms palielina katla darbības drošumu. Sauss piesātināts tvaiks no boilerā tiek padots pārkarstētajā un tālāk, kā pārkarstēts nonāk turbīnā.

Apakšējo kurtuves daļu sauc par auksto piltuvi. Tajā atdziest izkritušās pelnu atliekas, kas izkrīt speciālā tilpumā. Gāzmazuta katliem aukstās piltuves nav.

Dūmgāzu ejās siltums katla aktīvām daļām tiek nodots konvektīvi. Sildāmvirsmas atdesē dūmgāzes no  $500\text{-}700^{\circ}\text{C}$  gandrīz līdz  $100^{\circ}\text{C}$ .

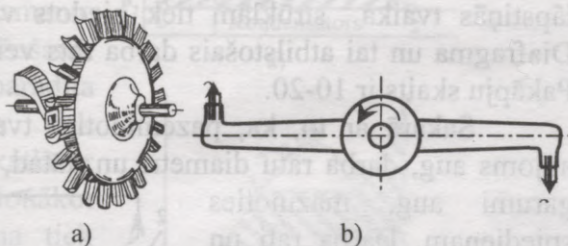
Katla konstrukcijas ir piestiprinātas pie nesošām konstrukciju sijām. Kurtuve un dūmgāzu ejas aizsargātas no siltuma zudumiem ar karstumizturīgo apmūrējumu un siltumizolācijas materiāliem. No ārpuses konstrukcija apšūta ar gāznecaurlaidīgo apšuvi un tērauda platēm, lai novērstu gaisa piesūkšanu kurtuvē un karstu, putekļainu dūmgāzu izsišanu uz āru, sevišķi, ņemot vērā toksisko elementu klātbūtni tajās. Katla funkcionēšana notiek stabili ar noteikumu, ja ir stabila ūdens cirkulācija. Cirkulācijas pārtraukšanas gadījumā cauruļu

iekšējo virsmu dzesēšana pārtraucas un tās pārdeg. Dažos katla veidos ūdens cirkulāciju uztur speciālie sūkņi. Cirkulācija katlos parādīta 3.9.attēlā.

Tiek izmantoti arī katli bez boileriem. Šajos tiešās cirkulācijas katlos ūdens, ūdens-tvaika maisījuma un tvaika cirkulāciju nodrošina tieši barošanas sūkņi.

Tiešās cirkulācijas shēma tiek izmantota arī ūdenssildāmos katlos, kur nav tvaika radīšanas virsmu un pārkarsētāju.

Dūmgāzu  
traktos tiek  
uzturēts  
retinājums ar  
dūmsūkņu  
palīdzību. Gaiss  
kurtuvē tiek  
padots ar  
ventilatoriem.



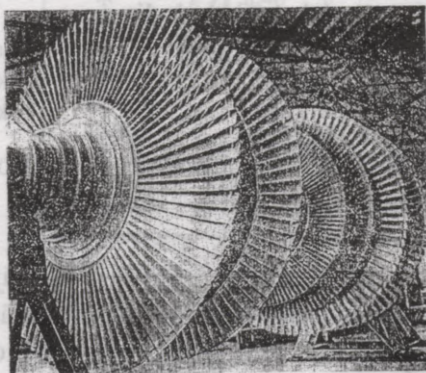
3.10.att. Tvaika turbīnas darbības princips.  
a – aktīvais; b – reaktīvais.

### 3.4. Tvaika turbīnas.

Tvaika turbīnas darbības princips parādīts 3.10.attēlā.

Pirmajā gadījumā tvaiks no sprauslas, nonākot uz darba lāpstiņām, attīsta aktīvu spēku, kas rada darba rata griezes momentu.

Otrā gadījumā sprauslas ir darba ratam. Tvaiks, izraužoties no tām, rada reaktīvu spēku, kas griež darba ratu. Kā reaktīvās sprauslas var



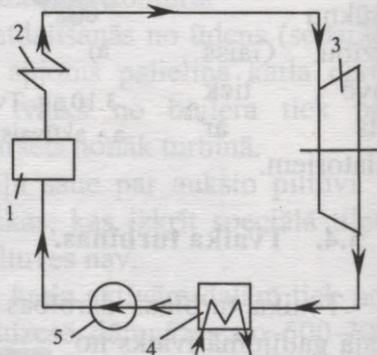
3.11.att. Turbīnas darba rats.

darboties darba lāpstiņās, kam ir nepieciešamais profils.

Reālās turbīnās tiek izmantots kā aktīvais, tā reaktīvais darbības princips, ko panāk ar attiecīgi novietotām darba lāpstiņām. Uz darba ratu lāpstiņām notiek noteikta tvaika spiediena un temperatūras samazināšanās adiabatiskā procesa gaitā. Darba ratu skaits turbīnā atkarājas no tvaika sākotnējā spiediena un temperatūras (3.11.att.).

Starp darba ratiem tiek novietotas diafragmas, kam lāpstiņās tvaika strūklām tiek piedots vajadzīgais virziens. Diafragma un tai atbilstošais darba rats veido turbīnas pakāpi. Pakāpju skaits ir 10-20.

Sakarā ar to, ka, pazeminoties tvaika spiedienam, tā apjoms aug, darba ratu diametri un, tātad, darba ratu lāpstiņu garumi aug, mazinoties spiedienam. Darba rati un diafragmas tiek novietotas pamīšus korpusā, ko sauc par cilindru. Atkarībā no tvaika spiediena, turbīnām ir augstspiediena un zemspiediena cilindri. Lielās jaudas turbīnām ir trīs cilindri: augstspiediena, vidējā spiediena un zemspiediena.



3.12.att. Tvaika enerģētiskā shēma.

- 1- katls, 2- pārkarsētājs, 3- turbīna,  
4- kondensators, 5- barošanas sūknis

Izejot cauri turbīnai, tvaiks nonāk kondensatorā, kas tiek dzesēts ar aukstu ūdeni. Tur tvaiks kondensējas un ūdens kondensāts pēc uzsildīšanas tiek padots katlā, veidojot noslēgtu kontūru (3.12.att.). Kondensatorā ir retinājums (vakuums) un paliekošu spiedienu tajā nosaka dzesējošā ūdens temperatūra un iekārtas neblīvums. Kondensatorā nonākošā tvaika temperatūra ir ap  $40^{\circ}\text{C}$ . Tam kondensējoties, izdalās latentais siltums, iztērēts

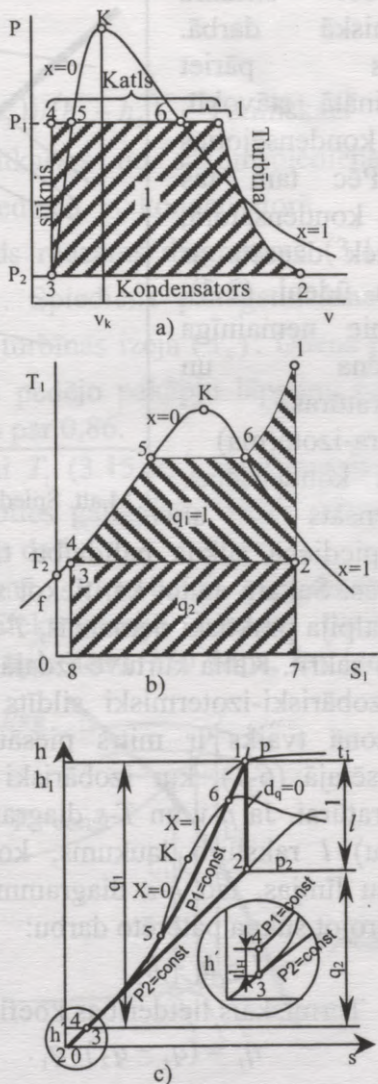
ūdenim iztvaikojojot, kas tiek nodots dzesējošam ūdenim (videi) un līdzinās apmēram 50% no patērētā procesā.

### 3.5. Renkina cikls.

19.gs. vidū U.J. Renkins lika priekšā ūdens tvaika termodinamisku ciklu, ko izmanto elektroenerģijas ražošanā. Šā cikla shēma parādīta 3.12.attēlā. Tvaiks tiek ražots enerģētiskā katlā ar pārkarsētāju. Nonākot turbīnā daļa siltuma tiek pārvērsta mehāniskā enerģijā. Izejot cauri turbīnai, tvaiks nonāk kondensatorā, kur kondensējas. Kondensāts ar barošanas sūkņa palīdzību tiek atkal padots katlā, pārvarot tajā spiedienu, ar ko cikls beidzas.

Renkina termodinamiskais cikls  $p-v, T-s$  un  $h-s$  koordinātēs attēlots 3.13.attēlā.

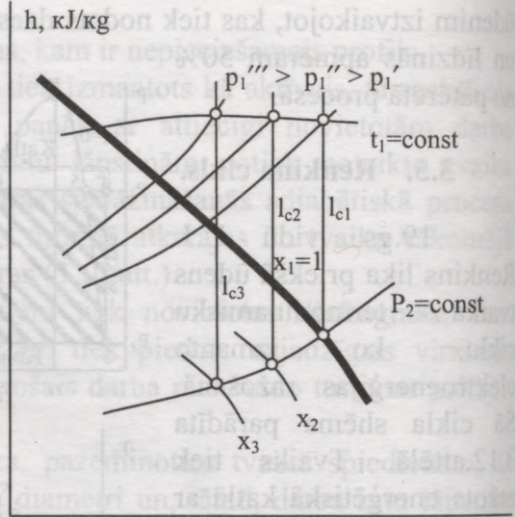
Pārkarsēts tvaiks (I) tiek padots turbīnā, kur



3.13.att. Renkina cikls.

a)  $p-v$  koordinātēs; b)  $T-s$  koordinātēs; c)  $h-s$  koordinātēs.

adiabātiski izplešas, pārvēršot siltumu mehāniskā darbā. Tvaiks pāriet piesātinātā stāvoklī, daļēji kondensējoties (2). Pēc tam tas nonāk kondensatorā, kas tiek dzesēts ar aukstu ūdeni (2-3), kur pie nemainīga spiediena un temperatūras (izobāra-izoterma)



pilnīgi kondensējas. Kondensāts ar

3.14.att. Spiediena iespaids uz lietderību.

augstspiediena sūkņa palīdzību tiek padots katlā (3-4) pēc izohoras. Sakarā ar to, ka, tiekot saspiests, ūdens temperatūra un entalpija praktiski nemainās,  $T$ - $s$  un  $h$ - $s$  koordinātēs punkti 3 un 4 sakrīt. Katla kurtuvē izdalās siltums, kā iespaidā ūdens tiek izobāriski-izotermiski sildīts (5-6) līdz vārīšanai. Šajā diapazonā tvaiks ir mitrs piesātināts. Pēc tam tas nonāk pārkarsētajā (6-1), kur izobāriski tiek uzkaršēts līdz galīgai temperatūrai. Ja  $p$ - $v$  un  $T$ - $s$  diagrammās darbu (tam atbilstošu siltumu)  $l$  raksturo laukums, ko ierobežo termodinamisko procesu līnijas, tad  $h$ - $s$  diagrammā - taisnes nogrieznis 1-2, neievērojot sūkņa patērēto darbu:

$$l = h_1 - h_2.$$

Termiskais lietderības koeficients līdzinās:

$$\eta_t = (q_1 - q_2) / q_1.$$

Siltums  $q_1$  tiek pievadīts procesā starp punktiem 4-1:

$$q_1 = h_1 - h_4.$$

bet siltums  $q_2$  tiek atvadīts 2-3 un tāpat līdzinās entalpiju starpībai

$$q_2 = h_2 - h_3.$$

Tātad  $\eta_t = \{(h_1 - h_4) - (h_2 - h_3)\} / (h_1 - h_4)$ . Termiskais lietderības koeficients ir atkarīgs no sākumspiediena  $p_1$ , temperatūras  $T_1$  un beigu spiediena  $p_2$  kondensatorā.

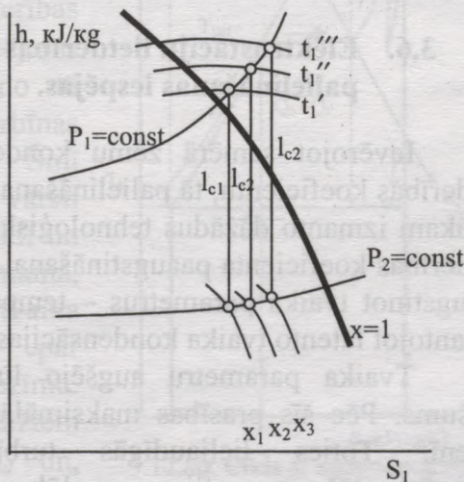
Spiediena  $p_1$  iespaids redzams diagrammā (3.14.att.) pie pastāvīgiem  $T_1$  un  $p_2$ . Spiediena paaugstināšana rada tvaika mitruma pieaugumu turbīnas izejā ( $x_3$ ). Ūdens pilieni mitrā tvaikā izsauc turbīnas pēdējo pakāpju lāpstiņu eroziju. Mitrums nedrīkst būt zemāks par 0,86.

Pieaugot temperatūrai  $T_1$  (3.15.att.), iegūstamais darbs pieaug, vienlaicīgi samazinoties galīgajam tvaika mitrumam, kas labvēlīgi ietekmē turbīnas darbu.

Vēl vairāk ietekmē vienlaicīgi spiediena un temperatūras pieaugumi. Elektrostacijā izmanto tvaiku ar temperatūru līdz  $600^{\circ}\text{C}$  un spiedienu 250 Mpa, ko ierobežo

iekārtas drošuma pakāpe. Pie augstākiem parametriem iekārta jāizgatavo no speciāliem tēraudiem un tās izmaksas vairākkārtīgi pieaug.

Dziļā vakuuma iegūšanu kondensatorā ierobežo dzesējošā ūdens temperatūra. Kondensatorā tiek uzturēts  $(35-55) \cdot 10^{-4}$



3.15.att. Temperatūras iespaids uz lietderību.

MP spiediens, kas atbilst temperatūrai 25-32<sup>0</sup>C, ko dažreiz reālos apstākļos grūti nodrošināt. Tāpēc minētie parametri jāuzskata par galējiem.

Sakarā ar to, ka ūdens tvaika kondensācijas procesā izdalās liels siltuma daudzums (ap 540 cal/gr), 45-50% primārās enerģijas zūd kondensatorā.

Iekārtas lietderības koeficients līdzinās

$$\eta = \eta_k \eta_t \eta_d \eta_{tr} \eta_m \eta_g,$$

kur lielumi ir attiecīgi: katla, turbīnas termiskais, vārstu tvaika droselēšanas, tvaika transporta, mehāniskais un ģenerators lietderības koeficienti. Pieņemot šos lielumus: 0,90; 0,55; 0,85; 0,89; 0,99; 0,985, iegūstam:

$$\eta = 0,406.$$

Elektrostacijas tehnoloģiskais process saistīts ar noteiktu elektroenerģijas patēriņu tehnoloģiskiem mehānismiem. Paša patēriņš sasniedz 4-8% no izstrādes. Ņemot to vērā, īstais lietderības koeficients līdzinās:

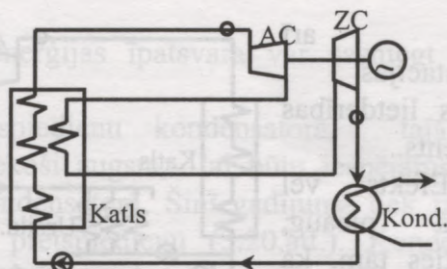
$$\eta_{st} = \eta_{st} (1 - 0,05) = 0,386.$$

### 3.6. Elektrostaciju lietderības koeficienta palielināšanas iespējas.

Ievērojot samērā zemu kondensācijas elektrostacijas lietderības koeficientu, tā palielināšana ir ārkārtīgi aktuāla. Šim nolūkam izmanto dažādus tehnoloģiskos paņēmienus termiskā lietderības koeficienta paaugstināšanai. To var panākt divējādi: paaugstinot tvaika parametrus – temperatūru un spiedienu un izmantojot latento tvaika kondensācijas siltumu.

Tvaika parametru augšējo līmeni ierobežo iekārtas drošums. Pēc šīs prasības maksimālā temperatūra ir 600<sup>0</sup> C līmenī. Toties lieljaudīgās turbīnās izmanto tvaika starppārkarsēšanu. Šim nolūkam tvaiku, izgājušu

augstspiediena cilindru, novada atpakaļ katlā, kur pārkarsētajā, kas novietots radiācijas-konvektīvā vai konvektīvā zonā, tā temperatūru atjauno līdz sākotnējai vai nedaudz augstākai

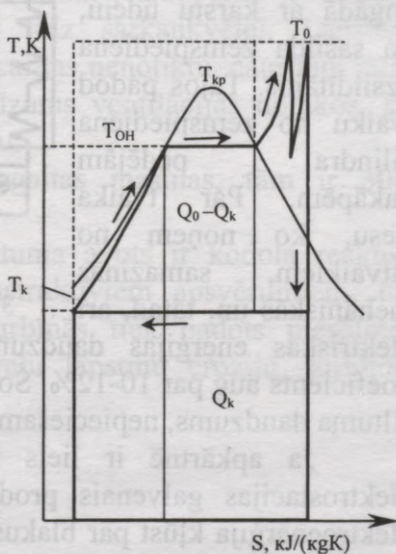


3.16.att. Kondensācijas elektrostacijas shēma ar starppārkarsētāju.

(3.16.att.). Tas labvēlīgi izmaina Renkina ciklu (3.17.att.) un paaugstina lietderības koeficientu par vairākiem procentiem. Lieljaudīgām turbīnām paredz pat divas starppārkarsēšanas pakāpes.

Katla barošanas ūdens papildu sildīšanai izmanto turbīnas tvaiku, izgājušu augstspiediena cilindru (attvaiks), augstspiediena uzsildītājā. Šeit tvaiks, atdevis siltumu ūdenim, kondensējas, atdodot latento siltumu (3.18.att.).

Iekšējo tvaika plūsmas lietderības koeficientu  $\eta_d$  iespējams palielināt, atsakoties no tā droselēšanas turbīnas regulēšanas vārstos. Šinī gadījumā regulēšanas vārsti tiek turēti atvērtā stāvoklī un turbīnas jaudu maina, izmainot katla tvaika spiedienu. To sauc par slīdošo parametru režīmu. Līdz ar to par dažiem procentiem pieaug  $\eta_d$  un,



3.17.att. Cikls ar starppārkarsēšanu.

tātad, arī  
elektrostacijas  
kopējais lietderības  
koeficients.

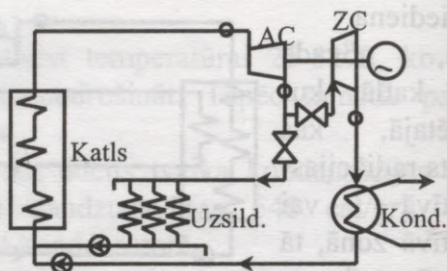
Efekts vēl  
papildus pieaug,  
pateicoties tam, ka  
katla ūdens  
barošanas sūkņi šinī

gadījumā tiek darbināti ar tvaika turbīnu, kam apgriezieni mainās līdz ar tvaika spiediena izmaiņu, vienlaicīgi nodrošinot optimālos apgriezienus pie pazeminātām slodzēm. Sakarā ar to, ka šāds process ir lēns, to var pielietot uz neliela agregātu skaita.

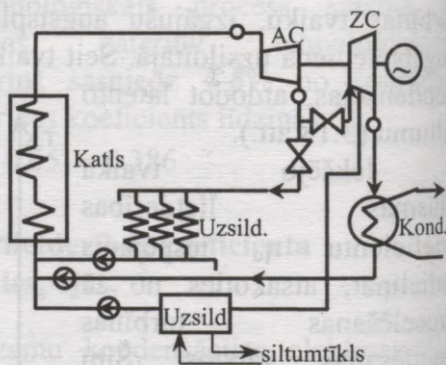
Gadījumā, ja  
elektrostacijas rajonā ir  
siltuma patērētāji, tos  
apgādā ar karstu ūdeni,  
ko sasilda zemspiediena  
uzsildītājos. Tajos padod  
tvaiku no zemspiediena  
cilindra pēdējām  
pakāpēm. Par tvaika  
tiesu, ko noņem no  
attvaikiem, samazinās  
mehāniskās un, tātad, arī

elektriskās enerģijas daudzums, bet termiskais lietderības koeficients aug par 10-12%. Šo iespēju ierobežo samērā neliels siltuma daudzums, nepieciešams kondensācijas elektrostacijās.

Ja apkārtņē ir liels siltumenerģijas patērētājs, tad elektrostacijas galvenais produkts ir siltuma enerģija. Tad elektroenerģija kļūst par blakusproduktu. Tādas elektrostacijas sauc par termoelektrocentrālēm. To lietderības koeficients



3.18.att. Barošanas ūdens uzsildīšana ar attvaiku.

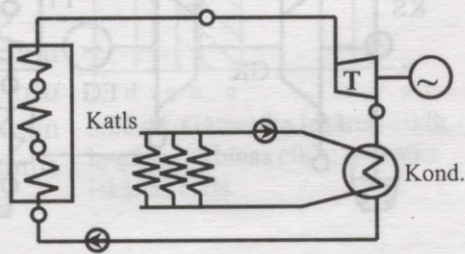


3.19.att. Termoelektrocentrāles shēma.

atkarībā no siltumenerģijas īpatsvara var sasniegt 60-80% (3.19.att.).

Izmantojot spiedienu kondensatorā, tajā tvaika temperatūra ir pietiekoši augsta, lai būtu iespējams sasildīt siltumtīkla ūdeni kondensatorā. Šinī gadījumā tiek izmantots turbīnas režīms ar pretspiedienu (3.20.att.). Kondensācijas režīms šādai turbīnai vairs nav iespējams.

Tvaiks, kas iet caur turbīnas darba ratu pakāpēm, uztur tajās attiecīgu temperatūru. Lai maksimāli palielinātu lietderības koeficientu, būtu vēlams, lai tvaiks neieplūstu kondensatorā. Bet tad pēdējās pakāpes



3.20.att. Pretspiediena shēma.

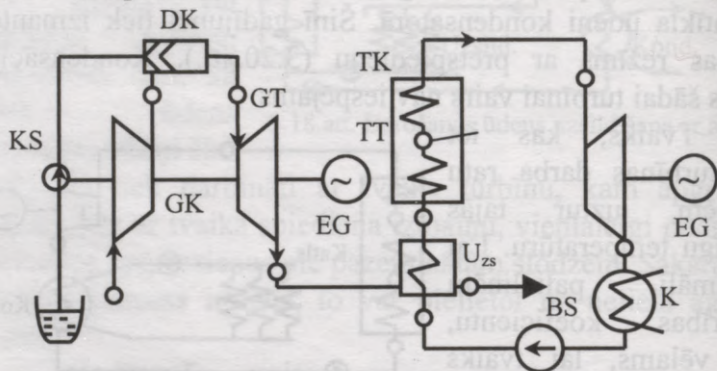
izrādītos beztvaika režīmā un ventilācijas zudumu rezultātā to temperatūra varētu pacelties līdz sarkankvēlei. Lāpstiņas zaudētu stiprību un sabruktu. Lai tas nenotiktu, caur tām jālaiž noteikts minimāls tvaika daudzums ventilācijas nolūkos, kas samazina lietderības koeficientu.

Tvaika turbīnas ir ātrgaitas mašīnas, tām ir 3000 apgr./min.

Atomelektrostacijās siltuma avots ir kodola reaktori. Tiem pēc drošuma un konstruktīviem apsvērumiem, nav tvaika pārkarstētāju. Tāpēc turbīnās tiek padots piesātināts tvaiks. Lai mazinātu darba ratu lāpstiņu eroziju, turbīnām paredz 1500 apgr./min.

### 3.7. Kombinētais cikls.

Gāzturbīnu deggāzes temperatūra pārsniedz  $400^{\circ}\text{C}$ . Pie šādām temperatūrām tās var izmantot ne tikai apkures



3.21.att. Gāztvaika iekārtas:

EG-elektriskais ģenerators; TK-tvaika katls; BS-barošanas sūkņi; K-kondensators; TT-tvaika turbīna; GK-gaisa kompresors; GT-gāzes turbīna; DK-degšanas kamera; KS-kurināmā sūkņi;  $U_{zs}$ -uzsildītājs.

vajadzībām, bet arī enerģijas ražošanas vajadzībām tvaika iekārtās. Tādos gadījumos izmanto divus darba ķermeņus: gāzi un tvaiku.

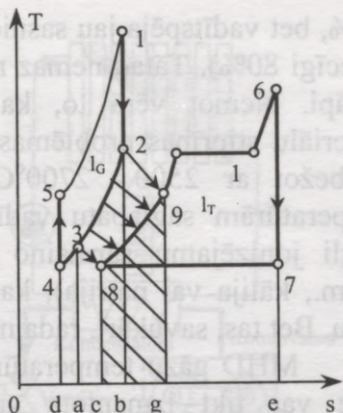
Vienkāršota iekārtas shēma parādīta 3.21.attēlā. Šeit karstās gāzes, kas nāk no gāzes turbīnas, nonāk uzsildītājā, kur tiek uzsildīts tvaika katla barošanas ūdens. Rezultātā samazinās siltuma daudzums, kas jārada tvaika katla kurtuvē tvaika iegūšanai, katlam strādājot atsevišķi.

Gāztvaika kombinētais cikls parādīts 3.22.attēlā. Ja gāzturbīnai strādājot atsevišķi, tiek izmests siltuma  $2bd_4$ , tad kombinētā ciklā daļā no šā siltuma  $9gc_8$  tiek izmantots ūdens-tvaika ciklā. Ietaupītais siltuma daudzums tvaika ciklā līdzinās aizstīpotajam laukumam attēlā. Rezultātā iekārta iegūst gāzturbīnas vieglas palaišanas un apturēšanas

īpašības, lietderības koeficientu palielinot līdz 40% ar zemiem kapitālieguldījumiem.

Gāzes turbīnu degšanas produktu paliekošais siltums var tikt izmantots arī konvektīvā tvaika ģeneratorā tālākai izmantošanai tvaika turbīnā.

Bieži gāztvaika ciklu var izmantot, papildinot esošo tvaika iekārtu ar gāzturbīnu un degšanas produktu siltuma izmantošanu tvaika iekārtās.

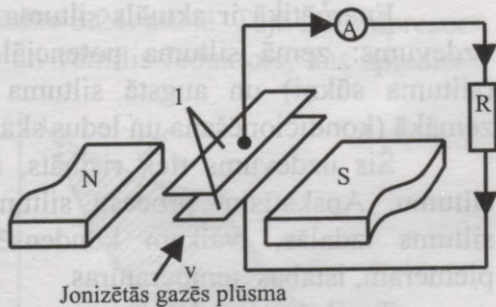


3.22.att. Gāztvaika iekārtas cikls.  
 $l_G$ -gāzes turbīnas cikls;  $l_T$ -tvaika iekārtas cikls.

### 3.8. Magnetohidrodinamiskā enerģijas pārveidošana.

Kurināmam sadegot, gāzu temperatūra var pārsniegt  $2000^{\circ}\text{C}$ . Šādā temperatūrā gāzēm parādās īpašības, kas piemīt zemas temperatūras plazmai, t.i., daudziem atomiem tiek noārdītas elektronu čaulas un gāze satur brīvus elektronus un jonus. Plazma ir elektrības vadoša vide. Izlaižot plazmas strūklu caur magnētisku lauku, no elektrodiem, kas nostādīti šķērsām šim laukam, var noņemt strūklā inducēto elektrisko strāvu. (3.23.att.)

Temperatūrā, kas sasniedz  $3000^{\circ}\text{C}$ , jonizācijas pakāpe ir



3.23.att. Magnetohidrodinamiskā (MHD) ģeneratora principiālā shēma.

0,1%, bet vadītspēja jau sasniedz 50% (pie 1% jonizācijas tā ir attiecīgi 80%). Tātad nemaz nav jātiecas uz augstu jonizācijas pakāpi. Ņemot vērā to, ka augstās temperatūrās saasinās materiālu stiprības problēmas, temperatūru būtu nepieciešams ierobežot ar 2500 - 2700°C. Lai ar šādām pazeminātām temperatūrām saglabātu vadītspēju, jonizācija jāpalielina ar viegli jonizējamu sārmaino metālu piedevām gāzu strūklā (piem., kālija vai nātrija), kas palielina jonizāciju tūkstošiem reižu. Bet tas, savukārt, rada materiālu paaugstinātu koroziju.

MHD gāzu temperatūra izejā sasniedz 2000°C. Karsta gāze var tikt izmantota gaisa sasildīšanai gāzes turbīnu degšanas kamerā un tālāk katlā tvaika ražošanai. Bet, sakarā ar to, ka visaugstākā temperatūra, kas var tikt pieļauta siltummaiņos, nepārsniedz 800°C, diapazons 2000 - 800°C tomēr paliek neizmantots.

Lai gan MHD ģeneratori varētu palielināt attiecīgo šķidra vai gāzveidīga kurināmā iekārtu lietderības koeficientu par 20%, pašreiz darbojas tikai eksperimentālās iekārtās. Daudzas materiālu un konstruktīvās problēmas līdz galam vēl nav atrisinātas.

### 3.9. Siltuma potenciāla transformācija.

Enerģētikā ir aktuāls siltuma potenciāla pārveidošanas uzdevums: zemā siltuma potenciāla pārveidošana augstākā (siltuma sūkņi) un augstā siltuma potenciāla pārveidošana zemākā (kondicionēšana un ledus skapji).

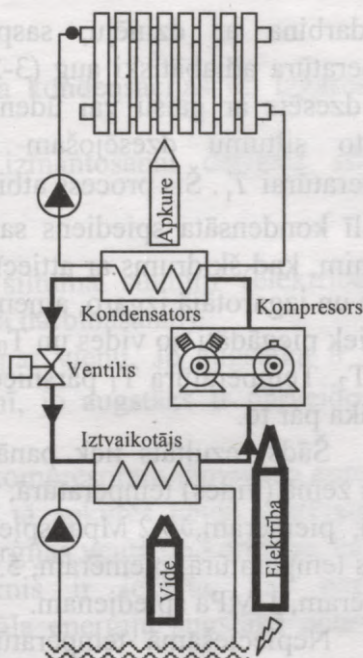
Šis uzdevums tiek risināts, izmantojot tvaiku latento siltumu. Apskatīsim procesu siltuma sūkņī. Šinī gadījumā siltums izdalās, tvaikam kondensējoties pie dotās ārējās, piemēram, istabas temperatūras.

Tvaika kondensācijas un šķidrums vārīšanās temperatūra ir atkarīga no spiediena. Jo augstāks spiediens, jo

lielāka ir šī temperatūra. Tātad, to var nodrošināt, izvēloties spiedienu.

Kondensāciju pie samērā augstas vides temperatūras panāk pie paaugstināta spiediena, ko rada kompresors, darbojamies ar pievadītu enerģiju.

Tvaiks, savukārt, rodas, šķidrumam iztvaikojot citā vidē, piemēram, pie ārējās temperatūras, patērējot siltumu no tās un, tātad, pazeminot tās temperatūru. Šķidruma vārīšanos pie ārējās zemās temperatūras panāk pie zemiem spiedieniem, ko uztur tas pats kompresors iesūkšanas pusē. Ārējā vide var būt ārējā gaisa vai ūdens temperatūra.

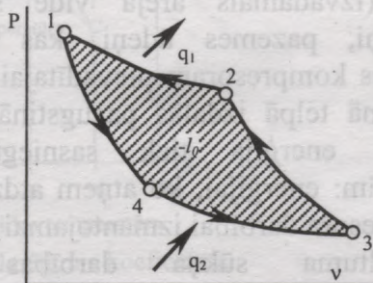


3.24.att. Kompresora siltumsūkņa shēma.

Iekārtas shēma parādīta 3.24. attēlā. Tajā ir kompresors, iztvaikotājs, kondensators un ventilis-reduktors, kas spiedienu samazina.

Kondensators siltumu izdala, bet iztvaikotājs, siltumu patērējot, to ārējā vidē pazemina.

Procesu apraksta apgrieztais cikls (3.25.att.). Kompresors,



3.25.att. Apgriezts termodinamiskais cikls.

ko darbina ar dzinēju, saspiež tvaiku, kā rezultātā tā temperatūra adiabatiski aug (3-2). Nonākot kondensatorā, kas tiek dzesēts ar gaisu vai ūdeni, tvaiki kondensējas, atdodot latentu siltumu dzesējošam ķermenim, kas sasilst līdz temperatūrai  $T_1$ . Šis process atbilst izotermai (2-1). Droselējošā ventilī kondensāta spiediens samazinās adiabatiski (1-4) līdz līmenim, kad šķidrums ar attiecīgu spiedienu izotermiski (4-3) vārās un izgarotājā izgaro, atņemot siltumu ūdenim vai gaisam, kas tiek piegādāti no vides un  $T_0$  temperatūras tiek pazeminātas līdz  $T_2$ . Temperatūra  $T_1$  pārsniedz vides temperatūru, bet  $T_2$  ir zemāka par to.

Šāds rezultāts tiek panākts ar to, ka darba šķidrums vārās zemā (vides) temperatūrā, piemēram, pie  $4^\circ\text{C}$  un, attiecīgi zemā, piemēram,  $0,2$  Mpa spiedienā, un kondensējas augstā izejas temperatūrā, piemēram,  $53^\circ\text{C}$ , pateicoties paaugstinātam, piemēram,  $1$  MPa spiedienam.

Nepieciešamā temperatūru starpība ( $40$ - $50^\circ\text{C}$ ) atbilst spiedienu starpībai (saspiešanas pakāpei), izrietošai no darba ķermeņu fizikālām īpašībām.

Iekārta var tikt izmantota divējādi:

- kā siltuma avots;
- kā aukstuma avots.

Ja šādu iekārtu izmanto kā siltuma avotu (siltuma sūkni), tad iztvaikotājam tiek pievadīts kāds zemā potenciāla siltums (izvadāmais ārējā vidē silts ventilācijas gaiss, notekūdeņi, pazemes ūdeņi, kas ziemā neaizsalst utt.). Pateicoties kompresoram pievadītajai enerģijai, kondensatorā apkurināmā telpā izdalās paaugstināta temperatūra  $T_1$ . Tam atbilstošā enerģija tiek sasniegta, pateicoties divām sastāvdaļām: enerģijai, ko atņem atdzesējamam ķermenim  $Q_1$  un kompresora darbībai izmantojamai enerģijai.

Siltuma sūkņa darbības efektivitāti nosaka pārveidošanas koeficients:

$$\varphi = \frac{T_k}{T_k - T_i},$$

kur  $T_k$  un  $T_i$  - siltuma aģenta kondensācijas un izgarošanas temperatūras.

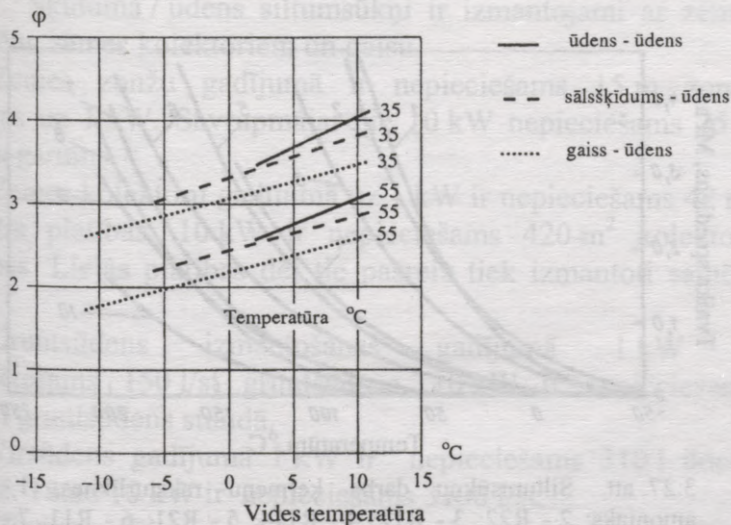
Siltuma sūkņī radītais, izmantošanai derīgais siltuma daudzums līdzinās:

$$Q = \varphi E,$$

kur  $E$  - enerģija, pievadīta siltuma sūkņim (elektrība vai mehāniskā enerģija kompresora darbināšanai).

Lielums  $\varphi$  ir lielāks par vienu. Jo augstāka ir vides temperatūra, ko izmanto sūkņī, jo augstāks ir pārveidošanas koeficients (3.26.att.).

Parasti siltuma sūkņa kompresoram jāpievada apmēram 40% enerģijas, ko saņem no tā apkures veidā. Pārējais tiek piegādāts zemā potenciāla enerģijas veidā no ķermeņa, kas tiek dzesēts. Tātad siltuma sūkņis ir iekārta, kas pārveido neizmantojamo zemā potenciāla enerģiju augstākā potenciāla



3.26.att. Siltumsūkņa izdevīguma koeficienti.

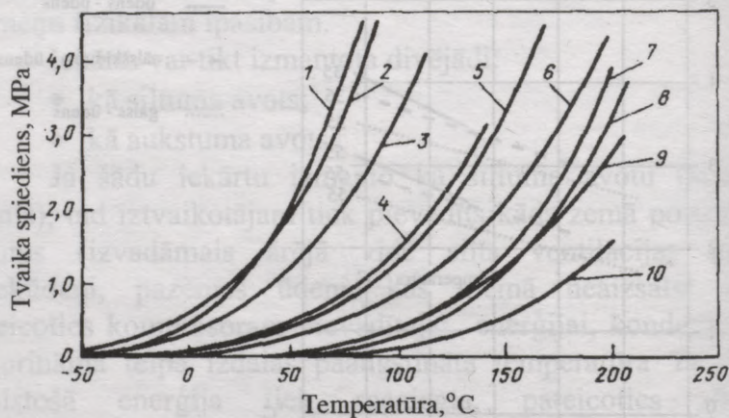
enerģijā, ko iespējams izmantot.

Iekārta, kas darbojas uz apgrieztā termodinamiskā cikla pamata, ir reversīva. Ja apkurināmā telpā ir kondensators, bet ārpus tā - iztvaikotājs, tad tas ir siltuma avots. Turpretī, ja telpā ir iztvaikotājs, bet kondensators ir ārpusē, tad tas ir augstuma avots, ko karstā laikā izmanto gaisa kondicionēšanai.

Šādas iekārtas lieto ļoti plaši apstākļos, kur ziemā nepieciešama apkure, bet vasarā kondicionēšana. Tā, ASV atrodas ekspluatācijā vairāki miljoni siltuma sūkņu-kondicionētāju.

Kā darba ķermeņi siltuma sūkņos izmanto šķidrumus, kas nesasalst iztvaikotāja minimālās temperatūrās un vārās zemās temperatūrās.

Dažādus izmantojamus darba ķermeņus raksturo tvaiku kondensācijas temperatūras atkarībā no spiediena (3.27.att.). Vislabākais darba ķermenis ir amonjaks. Tam ir visaugstākais iztvaikošanas siltums un pie reālām temperatūrām tas var tikt izmantots ar zemiem spiedieniem. Toties tā izmantošanu



3.27. att. Siltumsūkņu darba ķermeņu raksturlīknes. 1 - amonjaks; 2 - R22; 3 - R12; 4 - R114; 5 - R21; 6 - R11; 7 - metilspirts; 8 - etilspirts; 9 - R113; 10 - ūdens

ierobežo toksiskums un krāsaino metālu korozija saskarē ar to. Tāpēc biežāk izmanto freonus. R12 (CClF<sub>2</sub>) pašreiz ir aizliegts, jo tas hlora dēļ nokļūstot atmosfērā, veicina ozona iznīkšanu tās augšējos slāņos, radot ultravioletā starojuma bīstamību. Tā vietā lieto R22, kas ir derīgs līdz  $T_1=50-55^{\circ}\text{C}$ . Turpmāk paredzēts R134a (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub>), kura fizikālās īpašības maz atšķiras no R12, bet kas ir nekaitīgs, jo nesatur hloru.

Ūdens / ūdens-siltuma sūkņi lietojami, ja ir zema potenciāla temperatūra  $T_2 > 0^{\circ}\text{C}$  (gruntsūdens, ūdenskrātuve, notekūdeņi). Glikola šķidrums / ūdens siltumsūkņi lietojami arī pie  $T_2 < 0^{\circ}\text{C}$ . Gaisa / ūdens siltumsūkņi izmantojami, ja zemā potenciāla siltuma avots ir gaiss.

Siltumsūkņi bieži tiek izmantoti kā pamatapkures avots. Sevišķi aukstā laikā tas jāpapildina ar citu apkures veidu, piemēram, elektrisko. Šāda bivalentā apkure ir izdevīga, ja papildu apkure nepieciešama samērā īslaicīgi.

Siltumsūkņu izmantošanas iespējas parādītas 3.28.attēlā.

Šķīduma / ūdens siltumsūkņi ir izmantojami ar zemes zondēm, zemes kolektoriem un gaisu.

Zemes zonžu gadījumā ir nepieciešams 15 m zonžu garums uz 1 kW. Savrupmājai pie 10 kW nepieciešams 75 m zonžu garums.

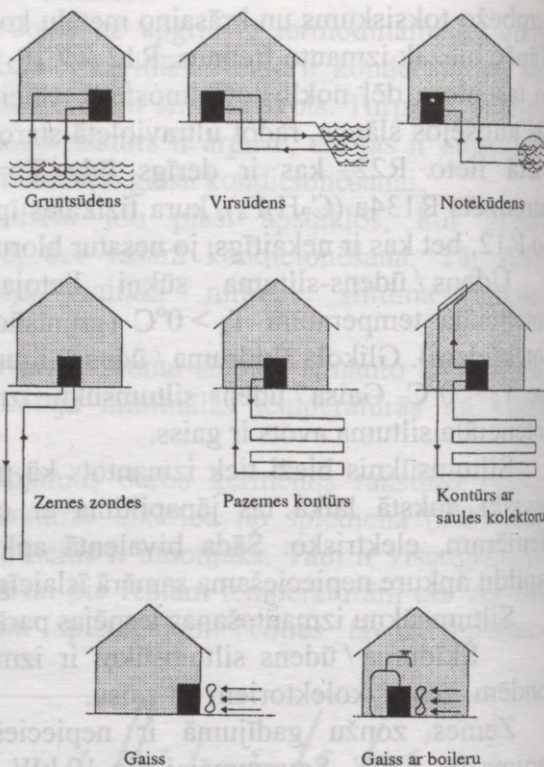
Zemes kolektoru gadījumā uz 1 kW ir nepieciešams 42 m<sup>2</sup> reģistra platības. 10 kW ir nepieciešams 420 m<sup>2</sup> kolektora platības. Lielās platības dēļ tie pašreiz tiek izmantoti samērā reti.

Gruntsūdens izmantošanas gadījumā 1 kW ir nepieciešams 150 l/st gruntsūdens. 10 kW ir nepieciešams 1500 l gruntsūdens stundā.

Virsūdens gadījumā 1 kW ir nepieciešams 310 l ūdens stundā. Tātad 10 kW ir nepieciešams 3100 l/st.

Siltuma sūkņa iekārta, kas izmanto ārējo gaisa temperatūru, parādīta 3.29.attēlā.

Eksistē arī rūpniecībā izmantojamas iekārtas. Šajos gadījumos kā dzinējus izmanto gāzes vai dīzeļdzinējus. Sakarā ar to, ka samērā augsto izmešu siltuma temperatūra bieži jāpaceļ samērā nedaudz (par 10-15 K), efektivitātes koeficients var izrādīties līdz 15. Tajā pašā laikā eksistē rūpnieciskie



3.28. att. Siltumsūkņu izmantošanas varianti.

siltumsūkņi, kas sasniedz  $T_1$  līdz 150 un pat 300°C.

Izmetamā siltuma utilizācijas iespēja ir kompleksa problēma, kas jārisina, ņemot vērā izmetamā siltuma:

- plūsmas un patēriņa sakrišanu laikā un telpā;
- patērējamā siltuma potenciālu un tā apmēru.

Siltuma sūkņu alternatīva ir reģeneratori un rekuperatori. Siltummaiņi ir vienkāršāki montāžā un ātrāk atmaksājas, bet to izmantošanas iespējas daudzos gadījumos ierobežotas zemā izmetamā siltuma potenciāla dēļ (30-50°C).

Divi rūpniecības uzņēmuma siltuma apgādes varianti parādīti 3.30.attēlā. Abos variantos tehnoloģijas vajadzībām

tiek patērēta elektriskā enerģija 24% apmērā. Ņemot vērā to, ka elektroenerģijas ražošanas lietderības koeficients līdzinās 0,369, tas atbilst 65% siltuma enerģijas daudzumam.

Pirmajā gadījumā tehnoloģijas vajadzībām 35% enerģijas ražo katlu māja. Sakarā ar to, ka 4% ir zudumi, ražošanā nonāk 31% enerģijas. Izmantotais karstais ūdens tiek dzesēts ar ūdeni, kas savukārt atdzesējas tornī.

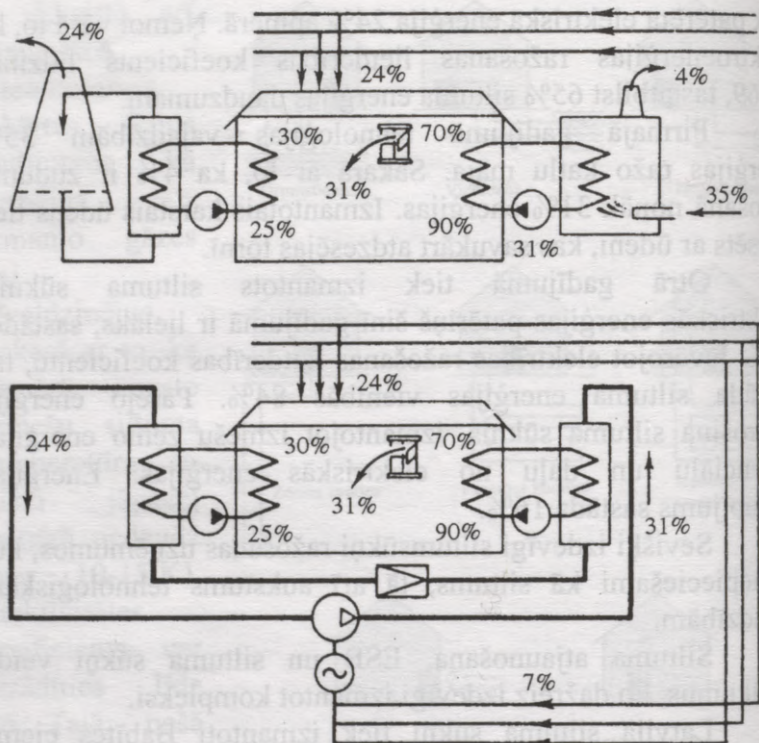
Otrā gadījumā tiek izmantots siltuma sūkņis. Elektriskās enerģijas patēriņš šinī gadījumā ir lielāks, sastādot 31%. Ievērojot elektrības ražošanas lietderības koeficientu, tas sastāda siltuma enerģijas vienībās 84%. Pārējo enerģiju nodrošina siltuma sūkņi, izmantojot izmešu zemo enerģijas potenciālu un daļu no elektriskās enerģijas. Enerģijas ietaupījums sastāda 16%.

Sevišķi izdevīgi siltumsūkņi ražošanas uzņēmumos, kur ir nepieciešami kā siltums, tā arī aukstums tehnoloģiskām vajadzībām.

Siltuma atjaunošana, ESB un siltuma sūkņi veido pasākumus, ko dažreiz izdevīgi izmantot kompleksi.

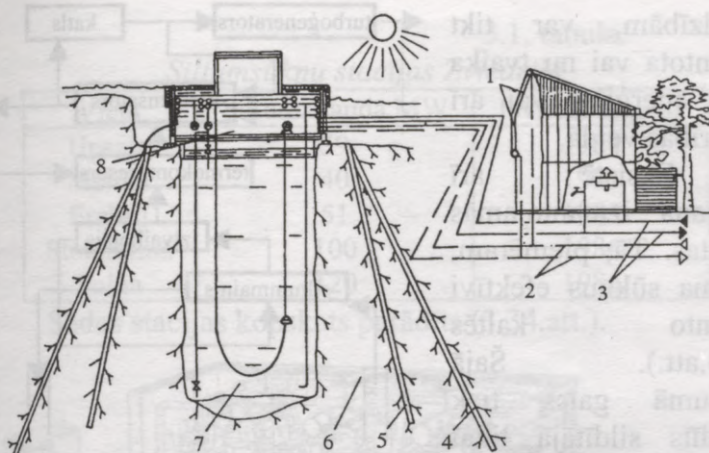
Latvijā siltuma sūkņi tiek izmantoti Babītes ciemā individuālo māju apkures vajadzībām. Kā vidus siltums tiek izmantoti gruntsūdens kontūri. Temperatūra dzīvojamās telpās ir pietiekoša, ja ārējā temperatūra nav pārāk zema. Pie ļoti zemām temperatūrām jālieto papildu apkure, lai nodrošinātu nepieciešamo temperatūru telpās. Sistēma darbojas jau ilgi un izrādījās pietiekoši droša.

Helsinki priekšpilsētā uzbūvēts eksperimentāls ciems Kerave, kurā ir 21 divstāvu sekciju ēkas. Apkures vajadzībām ēkām ir saules kolektori (3.31.att.), kam kopējā platība sasniedz 1100 m<sup>2</sup>. Blakus ciemam klīns gruntī iekārtots 1500 m<sup>3</sup> ūdens siltuma akumulators, (grunts aktīvais apjoms 1100 m<sup>3</sup>).



3.30.att. Divi energoapgādes varianti.

Siltā gada laikā akumulators tiek uzpildīts no saules kolektoriem. Ūdens temperatūra sasniedz  $80^{\circ}\text{C}$ . Kolektora kontūrā cirkulē starpsiltumnesējs (etilēnglikols), kas uzsilda akumulatora ūdeni ar siltummaiņa palīdzību. Aukstā laikā siltumapgādes kontūrā ūdens tiek uzsildīts ar akumulatora ūdeni, kamēr akumulatora ūdens temperatūra samazinās līdz  $50\text{--}60^{\circ}\text{C}$ . Pēc tam tiek palaista siltuma sūkņu iekārta (divas pa  $165\text{ kW}$  katra). To iztvaikotāji tiek uzsildīti ar akumulatora ūdeni. Ēkas apgādātas ar apkures sistēmu un rezerves ūdens sildītājiem. Ciemata apkures energopatēriņš ir  $1325\text{ MW}\cdot\text{h}$ . No akumulatora tiek patērēts  $1200\text{ MW}\cdot\text{h}$ . 40% enerģijas dod saules kolektori. Gada kurināmā ekonomija sastāda 450 tūkst.



3.31.att. Saules-siltumsūkņu apkures sistēma Somijā.

1 - saules kolektori; 2 - starpsiltumnesēja kontūrs; 3 - apkures sistēmas cauruļvads; 4, 5 - kartsā ūdens drenāža, uzpildot akumulatoru; 6 - grunts aktīvais apjoms; 7 - akumulatora apjoms; 8 - siltumsūkņa telpa.

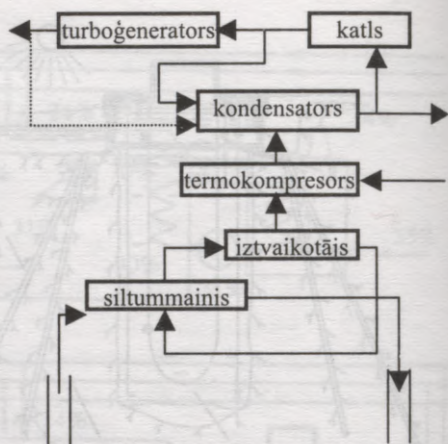
tonnas (pārrēķinā uz nosacīto kurināmo). Sistēma atmaksājās 6 - 7 gados.

Siltuma sūkņi tiek lietoti apkurei, izmantojot termiskos pazemes ūdeņus (3.32.att.). Šeit urbama siltais ūdens (9 bar, 30-60°C) tiek padots siltummaiņī. No siltummaiņa sasildīts sekundārā kontūra ūdens tiek padots siltuma sūkņa iztvaikotājā, kur atdod siltumu cirkulējošai vielai, kas iztvaiko. Ģeotermālais ūdens atzdesējas un tiek iepumpēts noliešanas urbumā (ūdens stipri mineralizēts). Cirkulējošās vielas tvaiki iet cauri kompresoram. Tur tvaiki tiek saspiesti, to temperatūra aug un, kondensatorā kondensējoties, atdod siltumu termotīkla ūdenim, kas tiek izmantots apkurei. Daļa no termotīkla ūdens var tikt izmantota tvaika katla barošanas vajadzībām. Termotīkla atpakaļvada ūdens nonāk atkal kondensatora iekārtā. Augstā potenciāla enerģija, kas vajadzīga kompresora

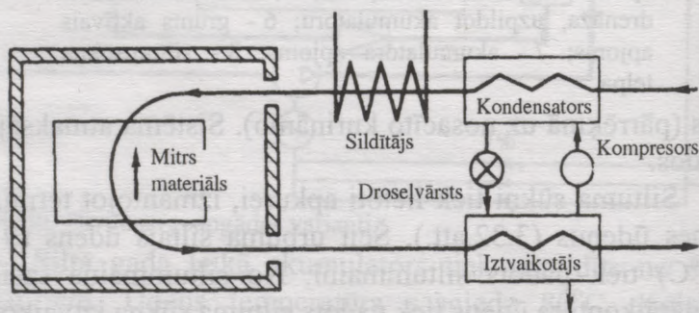
vajadzībām, var tikt izmantota vai nu tvaika katla enerģijas vai arī elektrības veidā.

Eksistē arī ražošanā izmantojamās iekārtas. Tā, piemēram, siltuma sūkņus efektīvi izmanto kaltēs (3.33.att.). Šajā gadījumā gaiss tiek sasildīts sildītājā tikai daļēji. Lielāku siltuma daļu dod siltumsūknis.

Tas, savukārt, izmanto mitrā izmešu gaisa saglabājušos



3.32.att. Termisko pazemes ūdeņu izmantošana ar palīdzību apkurei.



3.33.att. Siltumsūkņa izmantošana materiālu žāvēšanai.

siltumu, atgriežot to sildīšanas kontūrā. Izmantotais gaiss tiek atdesēts līdz temperatūrai, kas zemāka par rasas punktu. Tā rezultātā izdalās kondensāts, bet sauss gaiss tiek izmantots atkārtoti slēgtā kaltes sistēmā. Siltuma izmantošana šāda veida kaltē ir 2-3 reizes efektīvāka nekā parastās kaltēs.

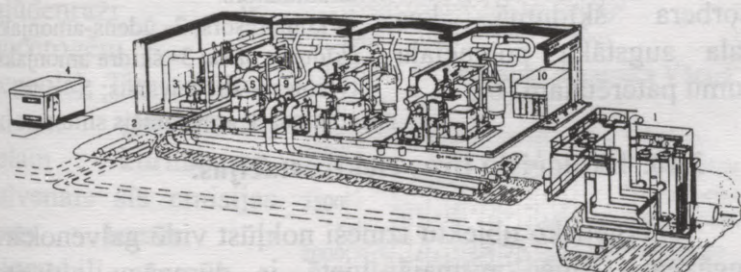
Zviedrijā ir lielas jaudas siltuma sūkņu stacijas (3.1. tab.), kur kā zemā potenciāla siltumu izmanto notekūdeņus.

## 3.1. tabula.

*Siltumsūkņu stacijas Zviedrijā*

Vieta	Siltuma jauda MW	Ieviešanas gads
Upsala	39	1984
Malme	40	1983
Erebrū	51	1985
Stokholma	100	1986
Solna	120	1986

Šādas stacijas kopskats parādīts (3.34.att.).



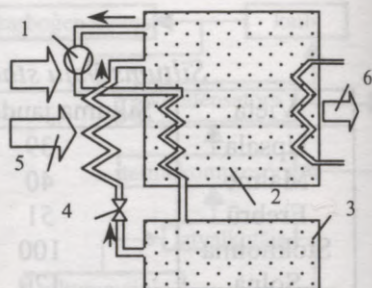
3.34.att. Komunālās siltumsūkņu stacijas kopskats. 1 – notekūdeņu sūkņi; 2 - siltumtīkla ūdens; 3 - siltumtīkla cirkulācijas sūkņi; 4 - elektriskā apakšstacija; 5 - iztvaikotājs; 6 - turbokompresors; 7 - elektrodzinējs; 8 - kondensators; 9 - momentānais iztvaikotājs; 10 - vadības pults.

Izmantojot siltuma sūkņus, svarīga ir problēma, kas saistīta ar to, ka elektroenerģijas un siltuma enerģijas patēriņi var izrādīties nobīdīti laikā. Tā elektroenerģija būtu jāpatērē naktīs, kad tarifs minimāls, bet siltuma enerģiju patērē dienā. Arī zemā potenciāla enerģija būtu jāizmanto saskaņā ar šo ciklu. Siltuma sūkņi tradicionālā veidā šādas prasības neapmierina, jo siltums tiek ražots tikai kompresora darbināšanas laikā.

Šīs prasības var tikt apmierinātas shēmā (3.35.att.), kur izmanto savdabīgu siltuma akumulatoru, kas atrisina situāciju diennakts ietvaros. Kompresors 1 uzsūc no bākas 2 ūdens un amonjaka šķīduma amonjaka tvaikus, un saspiež tos. Tvaiks

atdod siltumu šķīdumam, kondensējas un saglabājas šķidra amonjaka tvertnē 3.

Ārējā zemā potenciāla siltumā (5) šķidrais amonjaks (3), kas glabājas zem spiediena, caur droseļvārstu 4 ārējā siltuma iespaidā iztvaiko un nokļūst absorbera šķīdumā, kas izdala augstāka potenciāla siltumu patērētājam (6).



3.35.att. Šķīduma siltuma akumulators.

1- kompresors; 2- ūdens-amonjaka šķīduma bāka; 3- šķidra amonjaka tvertne; 4- droseļvārsts; 5- vides siltums; 6- atdodamais siltums.

### 3.10. Ekoloģiski tīras elektrostacijas.

Enerģētisko objektu izmeši nokļūst vidē galvenokārt ar dūmgāzēm. Tāpēc pirmajā vietā ir dūmgāzu attīrīšanas iekārtas.

Ar dūmgāzēm atmosfērā nokļūst cietas daļiņas putekļu veidā, tvana gāze, sēra dioksīds ( $\text{SO}_2$ ) un slāpekļa oksīdi ( $\text{NO}_x$ ), kuri slikti iespaido vidi.

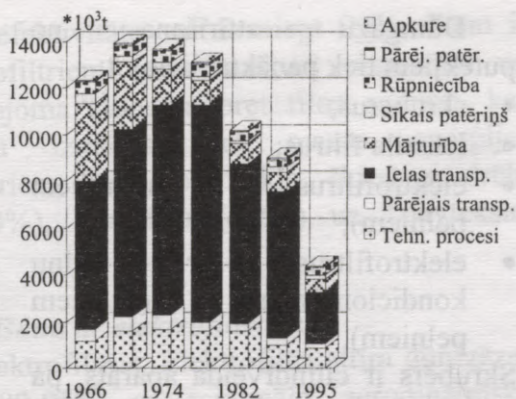
Tvana gāze samazina asiņu skābekļa absorbēšanās efektu. Rezultātā - galvas sāpes, reiboņi, slikta dūša. Lielas tvana gāzes koncentrācijas ir bīstamas dzīvībai.

Oglekļa oksīda emisija rodas, nepilnīgi sadegot kurināmajam, ko nosaka degšanas procesa kvalitāte (padomām gaisa pārpalikuma pakāpe). Galvenais tvana gāzes emisijas avots (65%) tomēr ir automobiļu transports. CO minimizācija dod vienlaicīgu degšanas efektivitātes pieaugumu.

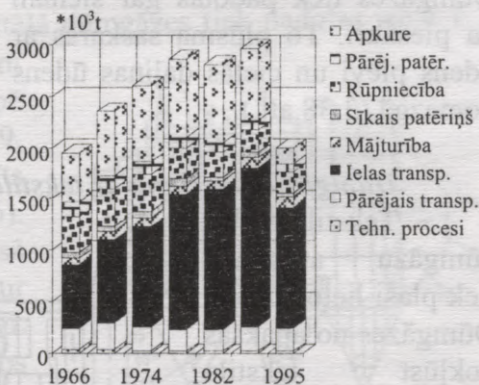
Tvana gāzes emisiju lielākās iekārtās samazina, lietojot tās kontroli ar mērdevējiem un attiecīgi koriģējot degšanas procesu. Mazās iekārtās tas tiek paredzēts jaudām virs 15 kW. Transportā jālieto izpūšamo gāzu katalizatoru iekārtas. Šīs

emisijas veida sekmīgās apkarošanas rezultātus Vācijā var aplūkot 3.36.attēlā.

Arī ogļūdeņražu emisija ( $C_nH_m$ ) rodas nepilnīgas sadegšanas rezultātā. Daži ogļūdeņraži ir kancerogēni (benzols). Tie izdalās, sadegot galvenokārt cietam kurināmajam. Galvenais šīs emisijas avots tomēr ir automobiļi. Ogļūdeņražu savienojumu emisijas samazināšanai jālieto tie paši līdzekļi, kā CO samazināšanai 3.37.att..



3.36.att. CO emisijas dinamika Vācijā.



3.37.att. Ogļūdeņraža emisijas dinamika Vācijā.

### 3.11. Dūmgāzu attīrīšana no putekļiem.

Putekļi, kuri tiek izmesti vidē kopā ar dūmgāzēm, sastāv no kvēpiem un nesadegušām kurināmā daļiņām. To daudzums var svārstīties diezgan plašās robežās un ir atkarīgs no kurināmā veida un degšanas procesa. Pēc svara putekļu daudzums, kurš nonāk atmosfērā var sastādīt 0,2% no sadedzināmā ogļu daudzuma.

Dūmgāzu attīrīšana no putekļiem tiek panākta, lietojot:

- skruberus;
- tekstila filtrus;
- elektrofiltrus (neitrāliem pelniem);
- elektrofiltrus ar pelnu kondicionēšanu (skābiem pelniem).

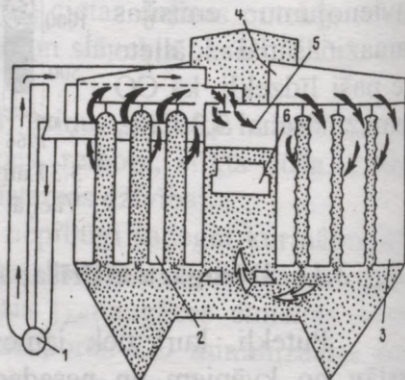
Skrubers ir cilindrvēida aparāts, pa kura sienām plūst ūdens strūkļa. Dūmgāzes tiek padotas gar sienām pa pieskari. To plūsma saskaras ar ūdens plēvi un cietās daļiņas ūdens nomazgā (3.38.att.).



3.38.att. Dūmgāzu filtrācija caur audumu. a - ar gludiem pavedieniem; b - ar izpūrušiem pavedieniem.

### Dūmgāzu attīrīšana ar tekstila filtriem

Tekstila filtri dūmgāzu attīrīšanā tiek plaši lietoti ASV. Dūmgāzes no apakšas nokļūst tekstila caurulēs, kurās pakāpeniski sakrājas putekļi, iziet cauri tekstila porām uz cauruļu ārpusi. Periodiski cauri caurulēm pretvirzienā tiek padota gaisa strūkļa, kura deformē tās un nobēr putekļus (3.39.att.).



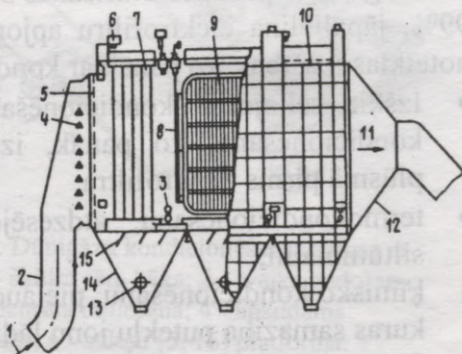
3.39.att. Tekstila filtrs. 1 - ventilators; 2 - strādājošā sekcija; 3 - sekcija attīrīšanā; 4 - gaisa pretstrūkļa; 5 - tīrā gaisa izeja; 6 - putekļainā gaisa izeja.

Tekstila filtru efektivitāte var sasniegt 99%. Tiem ir lielāka nekā elektrofiltru aerodinamiskā pretestība un samērā zema gāzu apjoma attiecība pret filtra virsmu, kas nosaka lielus filtru izmērus, bet mazus enerģijas patēriņus. Tekstila filtriem izmanto: stikla šķiedras drēbi (73,1%), teftonu (7,4%), nomeksu (4,2%) un "dayteksu" (3,7%).

### **Dūmgāzu attīrīšana ar elektrofiltru**

Biežāk lieto elektrofiltrus. Elektrofiltri attīra dūmgāzes no putekļiem par 90-95% ar minimālo aerodinamisko pretestību (150 Pa) un bez gāzu temperatūras pazemināšanas.

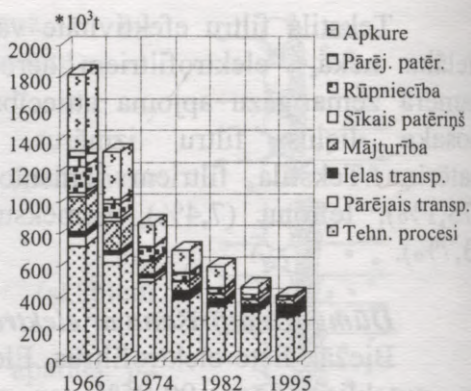
Elektrofiltrā 3.40.attēlā dūmgāzes tiek padotas ieejā 1. Pa šahtu 2 tās caur režģiem 4 un 5 nonāk atstarpē starp elektrodiem 7 un 9, kuriem tiek pievadīts augstspriegums (6). Elektrodi atrodas korpusā 10. Dūmgāzes iziet caur difuzoru 11 uz dūmvadu. Putekļi sakrājas bunkuros 14, kuri tiek apgādāti ar slīpām starpsieniņām, lai samazinātu dūmgāzu plūsmu caur bunkuriem un lūku 13, caur kuriem var kontrolēt procesu.



3.40.att. Elektriskais filtrs.

Viens no elektrodiem ir nosēdinošs (7). Elektriski neitrāli putekļi, nokļuvuši elektriskā laukā, elektrizējas un tiek pievilktas pie elektroda 7. Šie elektrodi tiek periodiski satricināti un rezultātā putekļi nobirst bunkuros. Spriegums, ko pievada elektrodiem, var būt iztaisnots maiņspriegums. Attīrīšanas efektivitāti var celt, ja izmanto impulsveida

spriegumu vai spriegumu ar mainīgu polaritāti. Pasākumi pret putekļu emisiju paredzēti enerģētisko iekārtu jaudām virs 15 kW. Šādi pasākumi, kas realizēti, piemēram, Vācijā, dod jūtamus rezultātus (3.41.att.).



3.41.att. Putekļu emisijas dinamika Vācijā.

### Dūmgāzu ķīmiskā kondicionēšana

Augstākas pakāpes attīrīšanas sasniegšanai, piemēram, līdz 99%, jāpalielina elektrofiltru apjomi, vai jāpievieno putekļiem noteiktas īpašības, ko panāk ar kondicionēšanu.

- Izšķir sekojošas kondicionēšanas metodes: termo-mitro kondicionēšanu, ko panāk, izsmidzinot ūdeni dūmgāzu plūsmā pirms elektrofiltra;
- termokondicionēšanu, atdzesējot dūmgāzes bezkontakta siltummainī;
- ķīmisko kondicionēšanu, piejaucot dūmgāzu plūsmā vielas, kuras samazina putekļu jonu lādiņu blīvumu.

Pirmās metodes trūkums - iesmidzinātais ūdens nepaspēj pilnīgi izgarot, un nosēdumi izsauc dūmvadu koroziju.

Otro metodi var izmantot tikai jaunceļamās elektrostacijās, jo bezkontakta siltummainim vajag daudz vietas, ko nav iespējams atrast darbojošās iekārtās.

Izdevīgāka ir ķīmiskā kondicionēšana, kuru pēdējos 15 gados izmanto daudzās valstīs. Izmantojot elektrofiltrus aiz gaisa uzsildītājiem, efektīvas ir sulfātu kondicionējošas vielas: SO<sub>3</sub>, sērskābe (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) un citas. Šādas kondicionēšanas lietošana 2-3 reizes samazina pelnu izdalīšanos atmosfērā. SO<sub>3</sub>

izmantošana dūmgāzu kondicionēšanā, saistīta ar tā iegūšanu no  $\text{SO}_2$  (3.42.att.).

$\text{SO}_3$  izmantošana kondicionēšanai saistīta ar kapitālieguldījumiem iekārtai, izejvielas ( $\text{SO}_2$ ) transportēšanai,  $\text{SO}_3$  iegūšanai un glabāšanai.

Kondicionēšana ar  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  aizvieto

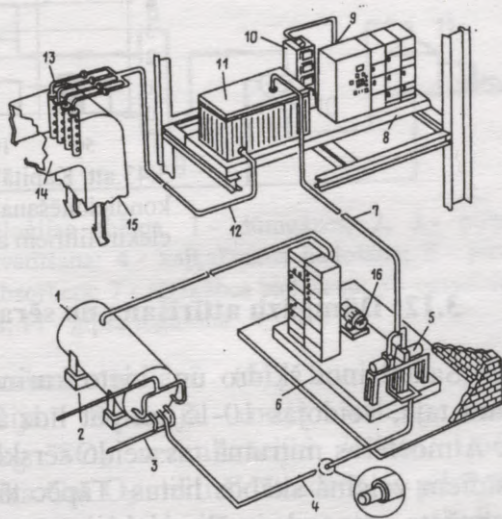
kondicionēšanu ar  $\text{SO}_3$  un sērskābi. Tā ir balta viela, ko izmanto kā mākslīgos mēslus un kura šķīst aukstā ūdenī. Normālā temperatūrā

neitrāla. Skābes īpašības (kuras nepieciešamas kondicionēšanai)

veidojas, vielai sadaloties, sākot ar  $100^\circ\text{C}$ . To var ievadīt ūdensšķīduma veidā ( $0,23-1,8$  moli/l).

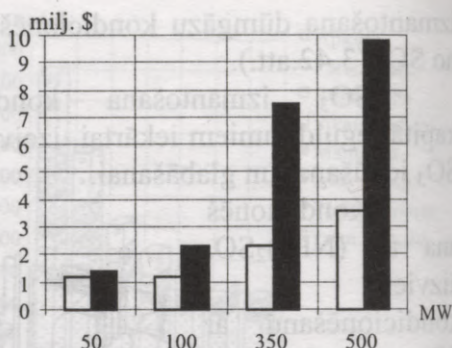
Šāda

kondicionēšana tiek lietota Lielbritānijas un ASV elektrostacijās (3.43.att.). Ja dedzina ogles, kuru pelni satur skābju komponentus, tiek izmantota divkārša kondicionēšana ar  $\text{SO}_3$  un  $\text{NH}_3$ , jo skābie pelni augstās temperatūrās (virs  $130^\circ\text{C}$ ) slikti uztver  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NH}_3$



3.42.att. Dūmgāzu kondicionēšanas shēma ar  $\text{SO}_3$ . 1 - šķidrā sēra bāka; 2 - tvaika padošana; 3 - kondensāta noliešana; 4 - apsildāms cauruļvads; 6 - sūkņu (5, 16) platforma; 7 - sēra padošana pie  $130^\circ\text{C}$ ; 8 - tehnoloģiskās krāsns (11) platforma; 9, 10 - gaisa padeve; 12 -  $\text{SO}_3$  un gaisa maisījuma padeve; 13 - sprauslas; 14, 15 - dūmvads.

uzlabo starpelektrodu  
 telpas elektriskās  
 īpašības, nosēdāmo  
 daļiņu kohēziju un  $\text{SO}_3$   
 uztveri pelnos.



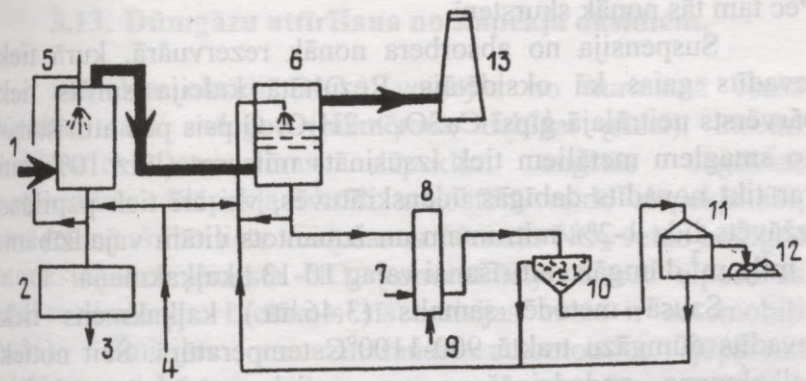
3.43.att. Kapitālieguldījumi  
 kondicionēšanai vai palielinātiem  
 elektrofiltriem atkarībā no iekārtas jaudas.

### 3.12. Dūmgāzu attīrīšana no sēra dioksīda.

Sadedzinot šķidro un cieta kurināmo, atkarībā no sēra satura tajā, veidojas 10-15 un pat līdz 20 g  $\text{SO}_2$  uz dūmgāzu  $\text{m}^3$ . Atmosfēras mitrumā tas veido sērskābi un līdz ar slāpekļa oksīdiem veicina skābos lietus. Tāpēc tā saturs dūmgāzēs tiek ierobežots ar maksimāli pieļaujamām normām, kuras var panākt tikai, lietojot attiecīgas attīrīšanas iekārtas. ASV, Vācijā, Lielbritānijā, Japānā Austrālijā, Somijā un citās valstīs līdz 90% energobloku apgādāti ar sēra dioksīda attīrīšanas iekārtām. Desulfarizācijas iekārtās izmanto šādas tehnoloģijas: slapjas (nereģeneratīvas un reģeneratīvas) un sausas.

Slapjās tehnoloģijas reaģents tiek ievadīts dūmgāzēs šķīduma veidā. Nereģeneratīvās tehnoloģijas reaģents tiek izmantots vienu reizi. Reģeneratīvās tehnoloģijās tas tiek izmantots vairākkārtīgi. Šajā gadījumā reaģents pēc izmantošanas tiek atjaunots termiskā vai ķīmiskā veidā.

Visbiežāk izmanto slapjo kaļķakmens metodi (Vācijā 75%, ASV 50%). Dūmgāzes no katla iziet cauri elektrofiltram, kur tiek attīrītas no putekļiem. Attīrītas dūmgāzes (3.44.att.)

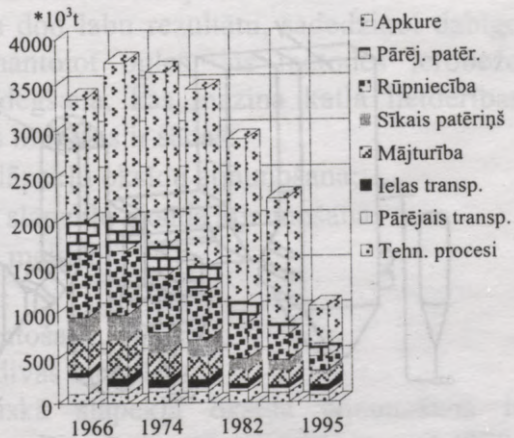


3.44.att. Slapjās tehnoloģijas shēma. 1 - dūmgāzes; 2, 3 - pulpas sagatavošana un tās izvadīšana; 4 - kaļķakmens padošana; 5 - pirmā attīrīšanas pakāpe; 6 - absorbers; 7 - sērskābes padošana; 8 - oksidētājs; 9 - gaiss; 10 - separators; 11 - ģipša iegūšana.

nonāk pirmajā absorbera pakāpē (5), kur tiek padota kaļķakmens suspensija. Reakcijā rodas kalcija sulfīts ( $\text{CaSO}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ). 1 kg  $\text{SO}_2$  neutralizācijai izlieto 1,56 kg  $\text{CaCO}_3$ . Sakarā ar to, ka  $\text{CaCO}_3$  slikti šķīst ūdenī, tā pilnīgākas izmantošanas mērķos absorberā izmanto šķidrums recirkulāciju.

Rezultātā panāk 90-95% attīrīšanas pakāpi (3.45.att.).

Attīrītas dūmgāzes, atdzesētas absorberā (6) līdz rasas punktam ( $45^\circ\text{C}$ ), sajauc ar nelielu neattīrītu dūmgāzu daudzumu, kā rezultātā iztvaiko atlikušais mitrums.

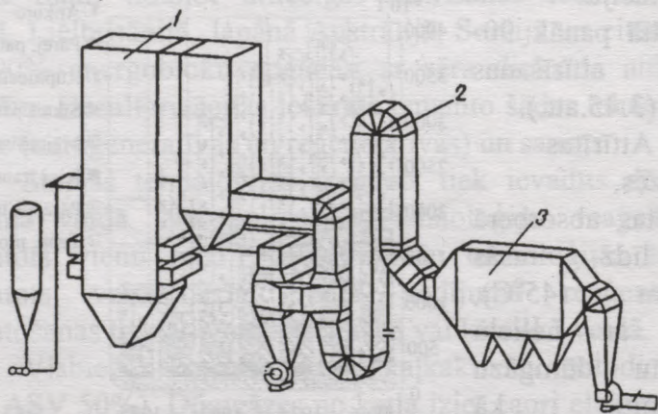


3.45.att. Sēra dioksīda emisijas dinamika Vācijā.

Pēc tam tās nonāk skurstenī.

Suspensija no absorbera nonāk rezervuārā, kurā tiek ievadīts gaiss kā oksidētājs. Rezultātā kalcija sulfīts tiek pārvērsts neitrālajā ģipsī  $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ . Ģipsis pēc attīrīšanas no smagiem metāliem tiek izsusināts mitrums (līdz 10%) un var tikt novadīts dabīgās ūdenskrātuvēs, vai arī tiek papildus izžāvēts līdz 1-2% mitrumam un izmantots citām vajadzībām. 1 milj.  $\text{m}^3$  dūmgāzu attīrīšanai vajag 10-13 t kaļķakmeņa.

Sausā metodē samalts (3.46.att.) kaļķakmens tiek ievadīts dūmgāzu traktā 900-1100°C temperatūrā. Šeit notiek kaļķakmeņa apdedzināšana un notiek nedzēsto kaļķu veidošanās. 500-800°C temperatūrā nedzēstie kaļķi daļēji saista sēra oksīdus. Atlikušie kaļķi aiz katla zonā, kur temperatūras pazeminās līdz 130-160°C speciālā reaktorā - mitrinātājā pāriet dzēstos kaļķos, kuri, savukārt, reaģē ar atlikušo  $\text{SO}_2$ . Pēc ūdens iztvaikošanas kalcija sulfīts tiek nogādāts pelnu izgāztuvē. Tādā veidā tiek panākta attīrīšana par 70-80%. Šo metodi izmanto gadījumos, kad tiek lietotas ogles ar grūti kūstošiem pelniem. Iekārtai vajag mazāk vietas un tā ir lētāka.



3.46.att. Sausās tehnoloģijas shēma. 1 - kurtuve;  
2 - aktivācijas reaktors; 3 - elektrofiltrs.

### 3.13. Dūmgāzu attīrīšana no slāpekļa oksīdiem.

Slāpekļa oksīdi ( $\text{NO}_x$ ) veidojas no kurināmā esošā slāpekļa, tam sadegot (piemēram, dabīgai gāzei), kā arī oksidējoties atmosfēras slāpeklim augstās degšanas temperatūrās. Slāpekļa oksīdi atmosfērā veido slāpekļskābi, kura sekmē skābo lietu veidošanos. Vasarās  $\text{NO}_x$  veido kaitīgos fotooksidantus. Augsta  $\text{NO}_x$  koncentrācija izsauc elpošanas ceļu saslimšanas. Lielākais šīs emisijas avots ir automobiļi (60%). Emisijas samazināšanai automobiļos jāparedz katalizatoru iekārtas.

Dūmgāzu attīrīšanas metodes no slāpekļa oksīdiem var būt primāras un sekundāras. Primāras metodes saistītas ar degšanas organizāciju, kurā samazinās slāpekļa oksīdu veidošanās. Tas tiek panākts ar degšanas temperatūras, gaisa daudzuma optimizāciju aktīvās degšanas zonā,  $\text{O}_2$  parciālā spiediena samazināšanu gaisā ar dūmgāzu recirkulācijas palīdzību, laika samazināšanu, kurā kurināmais atrodas degšanas zonā, pakāpeniska degšanas procesa izmantošanu. Tādā veidā panāk  $\text{NO}_x$  samazināšanu par 50-60%.

Primārās metodes dod labu rezultātu, sadedzinot dabīgo gāzi vai mazutu. Izmantojot ogles, šīs metodes ierobežo kurināmā nepilnīga sadegšana, kas mazina katla lietderības koeficientu. Sekundārās metodes ir šādas:

- selektīvā termiskā slāpekļu oksīdu atjaunošana;
- selektīvā katalītiskā slāpekļu oksīda atjaunošana;
- elektronu starojuma metode;
- absorbcijas metode;
- aktivētā koksa izmantošana.

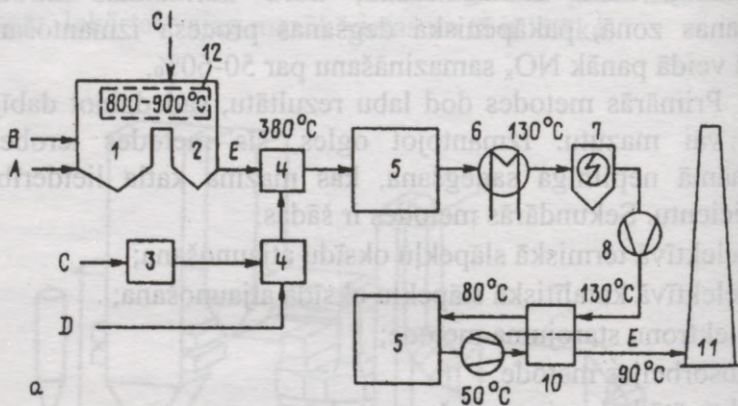
Visbiežāk lieto pirmās divas metodes.

Selektīvā termiskā slāpekļa oksīda atjaunošana ir vislētākā metode. Šajā gadījumā augsttemperatūras zonā (870-

1100°C) ievada NH<sub>3</sub>. Atjaunojošo reakciju rezultātā daļa slāpekļa oksīdu pāriet nekaitīgā molekulārā slāpekļī.

NH<sub>3</sub> tiek ievadīts dūmgāzēs ar inžektoru palīdzību, kuri tiek izveidoti vajadzīgajā temperatūras zonā. Attīrīšanas pakāpe ir 50-90%.

Pēdējā laikā Vācijā, Austrijā, ASV un Japānā NH<sub>3</sub> vietā izmanto katalītisko šķīdumu atjaunošanu ar katalizatoriem, ko izmanto 320-400°C zonā. Japānā izmanto katalizatorus, kuri bija izstrādāti automobiļiem. Kā reaģents tiek izmantots NH<sub>3</sub>. Viena no iespējamām shēmām parādīta 3.47.attēlā. Šeit A - kurināmais; B - gaiss; C - NH<sub>3</sub> (amonjaks); D - piesātināts tvaiks. Dūmgāzes (E) nonāk sajaucējā (4), kur vienlaicīgi nonāk gāzveidīgs NH<sub>3</sub> ar tvaiku. Tam plūstot caur katalizatoru (5) notiek atjaunojošās reakcijas. Tālāk dūmgāzes plūst caur sildītāju (6), elektrofiltru (7), dūmsūkni uz reģeneratīvo siltummaini un, pēc iziešanas caur otro katalizatora pakāpi, uz skursteni. Traktā tiek veikti pasākumi pret dūmgāzu



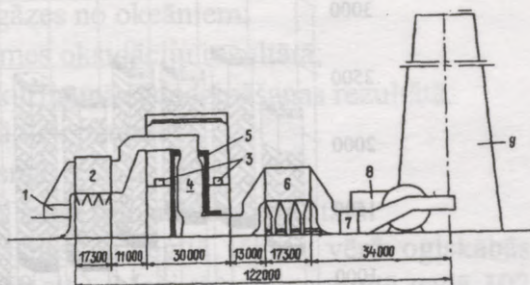
3.47.att. Katalītiskās metodes shēma. A - kurināmais; B - gaiss degšanai; C - amonjaks; D - piesātināts tvaiks; E - dūmgāzes; 1, 2 - katls; 3 - iztvaikotājs; 4 - sajaucējs; 5 - katalizators; 6 - gaisa uzsildītājs; 7 - elektrofiltrs; 8 - dūmsūknis; 10 - reģeneratīvs siltummainis; 11 - dūmenis.

temperatūras samazināšanos zem nepieciešamās.

Attīrīšanas iekārtas no  $\text{SO}_2$  un  $\text{NO}_x$  tiek izmantotas dažādās kombinācijās

atkarībā no kurināmā veida un konkrētiem apstākļiem.

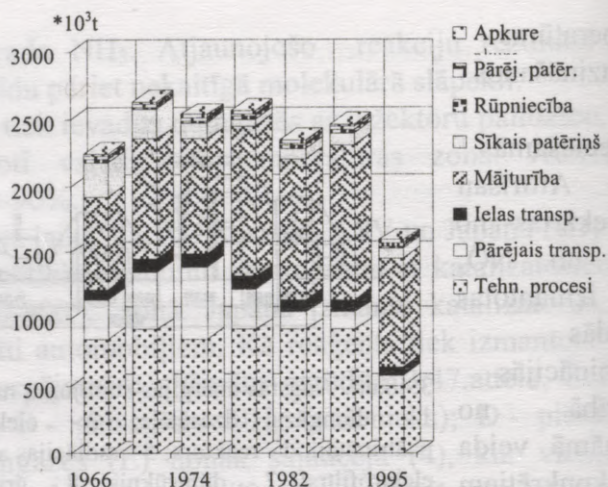
3.48.att. Augstās enerģijas starojumu metodes shēma. 1 - dūmgāzu dzesētājs; 2 - elektrofiltrs; 3 - paātrinātāji; 4 - reaktors; 5 - radiācijas aizsardzība; 6 - elektrofiltrs; 7 - dūmsūknis; 8 - granulators; 9 - dūmenis.



Pēdējā laikā sāk izmantot augstās enerģijas elektronu starojumu vai ozonu. Reakciju mehānisms atgādina smoga fotoķīmisko reakciju atmosfērā, kur apstarošanas rezultātā veidojas OH,  $\text{H}_2\text{O}$ , N, O, H brīvie radikāļi ar slāpekļa oksīdu un  $\text{SO}_2$  oksidēšanos līdz slāpekļskābei un sērskābei (3.48.att.).  $\text{NO}_x$  emisijas dinamika Vācijā attēlota 3.49.attēlā.

ASV attīrīšanas iekārtu izmaksā jaunceļamās un rekonstruējamās elektrostacijās sastāda 45% no ieguldījumiem elektrostacijās. Saskaņā ar Vācijas pieredzi, attīrīšanas iekārtas sadārdzina elektroenerģijas izmaksas par 7,5-21% un samazina lietderības koeficientu par 5%.

Uztvertās vielas, lietojot attiecīgās tehnoloģijas, var izmantot kā izejvielas derīgās produkcijas radīšanai. Tā, piemēram, putekļus var izmantot cementa ražošanā vai ceļu būvē. Ģipsi, ko iegūst, uztverot sēra dioksīdu, var izmantot ģipša būvdetaļu ražošanā, bet slāpekļa oksīdi - kļūst par izejvielu mākslīgo mēslu ražošanai.



3.49.att. NO<sub>x</sub> emisijas dinamika Vācijā.

### 3.14. Vai ir cerības apvaldīt klimata izmaiņas?

Klimata izmaiņas draudi ir saistīti ar ogļskābās gāzes emisiju.

Uz Zemes dažādos ciklos apgrozās ap 150 miljardu tonnu oglekļa. Tā krājumi miljardos tonnās ir:

- okeānu vidējos slāņos 38100
- okeāna dibena augšējos slāņos 150
- okeānu virsējos slāņos 1020
- jūru dzīvnieki 3
- organiskais ogleklis okeānā 700
- augos 610
- augsnes humuss 1580
- atmosfērā ogļskābās gāzes veidā 760

Klimatu nosaka ogļskābās gāzes izdalīšanās daudzums atmosfērā.

Atmosfērā gadā izdalās:

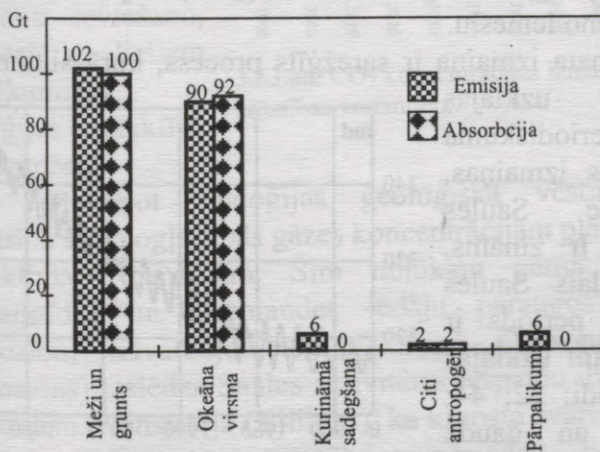
- $90 \cdot 10^9$  t ogleškābās gāzes no okeāniem;
- $102 \cdot 10^9$  t no sauszemes oksidāciju rezultātā;
- $6,4 \cdot 10^9$  t izrakteņu kurināmā sadedzināšanas rezultātā.

Absorbcijas procesā tiek patērēts:

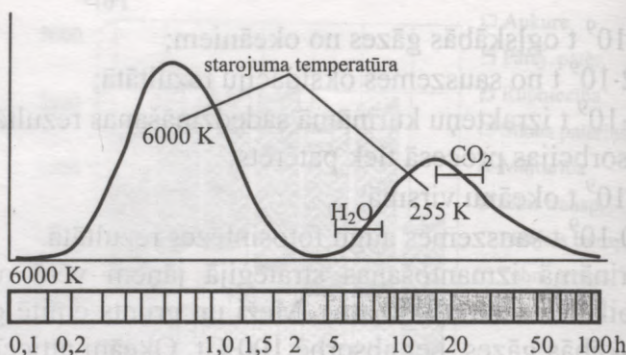
- $92 \cdot 10^9$  t okeānu virsmā;
- $100 \cdot 10^9$  t sauszemes augu fotosintēzes rezultātā.

Kurināmā izmantošanas stratēģijā jāņem vērā ogleškābās gāzes bilance vidē (3.50.att.). Meži un grunts emitē gadā 102 Gt ogleškābās gāzes, bet absorbē 100 Gt. Okeāni attiecīgi 90 Gt un 92 Gt. Ar to tiek ieturēts līdzsvars. 6Gt emitē izrakteņu kurināmā sadedzināšanu, kam nav dabīgo absorbentu. Tas rada  $CO_2$  palielināšanos atmosfērā.

Zemeslode saņem siltumu ar Saules redzamo gaismu (3.51.att.), bet izstaro Visumā 30% enerģijas saņemtās no Saules infrasarkanā starojuma diapazonā. 70% absorbē atmosfēra un zemes virsma, 18% saņemtā starojuma aiztur atmosfērā esošie ūdens tvaiki ogleškābā gāze un metāns. Ūdens tvaiki aiztur siltuma starojumu infrasarkanā starojuma īsviļņu diapazonā, kur tas nav sevišķi intensīvs. Toties  $CO_2$  - intensīvā



3.50.att. Oglekškabes bilance vidē,

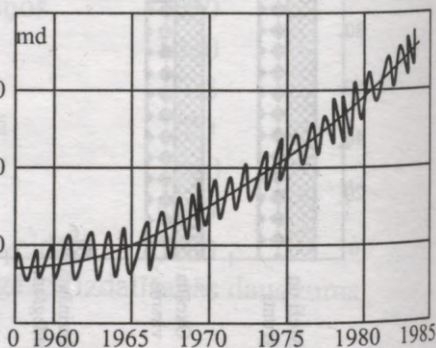


3.51.att. Zemeslodes saņemamais un izstarotais Saules starojums. starojuma zonā, un izraisa siltumnīcas efektu ar visām iespējamām negatīvajām sekām: klimata izmaiņām, okeāna līmeņa celšanos.

Ogļskābās gāzes daudzums pieaug izrakteņu kurināmā sadedzināšanas rezultātā par 0,4% gadā. Tās daudzums pieauga no 0,0315% 1958. līdz 0,036% 2000. gadā. Rezultātā oglekļa daudzums atmosfērā katru gadu pieaug par  $3,4 \cdot 10^9$  t ogļskābā gāzē.

Tātad ogļskābā gāze un metāns kļūst par siltumnīcas efekta galveno iemeslu.

Klimata izmaiņa ir sarežģīts process, kurā siltumnīcas efektam uzklājas dažāda periodiskuma temperatūras izmaiņas, ko izsauc Saules intensitāte. Ir zināms, ka minimālais Saules intensitātes periods ir 11 gadi. Tam uzklājas ilgāki periodi: 22; 44; 88 gadu un daudz ilgāki t.s. ledus



3.52.att. Ogļskābās gāzes koncentrācijas izmaiņa atmosfērā.

laikmeta cikli, kas dažādi iespaido Zemes globālo temperatūru.

Ogļskābās gāzes īpatsvars atmosfērā sāka strauji pieaugt pēdējās desmitgadēs (3.52.att.) galvenokārt enerģētisko iekārtu attīstības rezultātā (enerģētika un transports). Sakarā ar to, ka tuvākās desmitgadēs enerģētiskā kurināmā struktūrā lielas izmaiņas gaidīt nevar, šajā periodā turpināsies CO<sub>2</sub> emisijas pieaugums, kas būs dažāds dažādiem attīstības scenārijiem (3.53.att.). No šiem datiem izriet, ka visos variantos, izņemot C (sk. 1.1.) CO<sub>2</sub> emisija pieaug, salīdzinot ar 1990.gadu. Emisijas pieauguma saglabāšana 40% līmenī saistīta ar pietiekoši

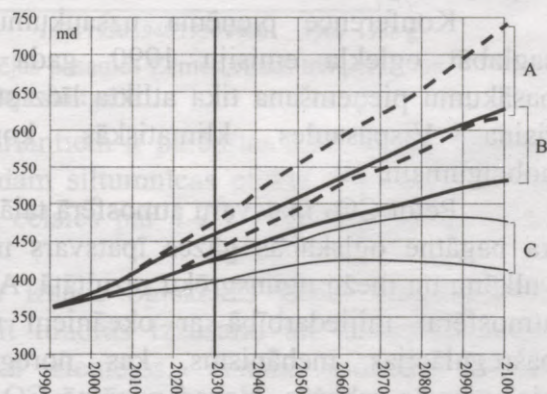
lielām grūtībām un cilvēces apņēmību.

C variants, kurā emisijas līmenis saglabājas, ir saistīts ar ļoti mērķtiecīgu rīcību,

jaunu enerģētisku tehnoloģiju atbalstu un ātru ieviešanu,

kā arī ar lieliem panākumiem enerģijas efektīvā izmantošanā.

enerģijas efektīvā izmantošanā.



3.53.att. CO<sub>2</sub> koncentrācijas izmaiņas prognoze attīstības variantiem.

Meklējot analogijas ģeoloģiskā vēsturē, noteikta sakarība starp ogļskābās gāzes koncentrācijām planētas pagātnē ar klimata izmaiņām. Šim nolūkam pētīja CO<sub>2</sub> saturu Antarktīdas un Grenlandes ledāju paraugos ar urbumu palīdzību, iztvaikojot tos vakuumā (Vilsons). Turpmāk (Tomsons) izslēdza Saules aktivitātes iespaidu uz klimatiskām izmaiņām. Konstatēja (Killings), ka klimata svārstības iespaido okeāni. Temperatūras pacēluma periodos, tiem sasilstot,

mazinās CO<sub>2</sub> šķīšanas spēja ūdenī un atmosfērā izdalās papildu gāzes daudzums. Okeāniem atdzīstot aukstākos periodos, gāze atkal absorbējas tajos.

Ņemot vērā visus faktorus, zinātnieki konstatēja, ka cilvēces darbības iespaidā notiek klimata izmaiņas. 1995. gada Vispasaules klimata izmaiņas konferencē (Madridē), pretēji naftas ieguvēju valstu neapmierinātībai sakarā ar bažām par iespējamo pieprasījuma samazināšanos, pirmo reizi vēsturē oficiāli paziņoja, ka, neskatoties uz vēl neatrisinātiem jautājumiem, kopējie dati liecina, ka eksistē jūtams cilvēces iespaids uz globālo klimatu.

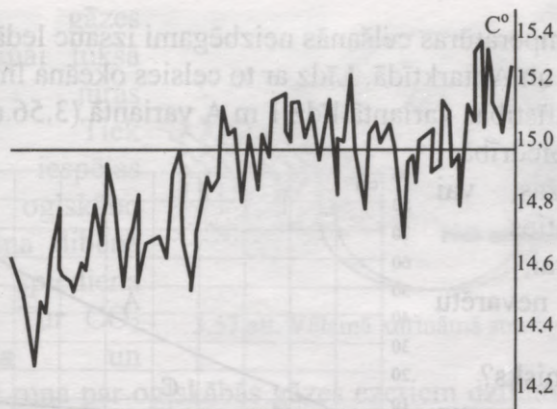
Konference pieņēma uzsaukumu attīstītām valstīm saglabāt oglekļa emisiju 1990. gada līmenī. Nopietnāku pasākumu pieņemšana tika atlikta līdz starpvalstu sarunu, ko risina Vispasaules klimatiskās konvekcijas ietvaros, nobeigumam.

Pētot CO<sub>2</sub> īpatsvaru atmosfērā tālā pagātnē noskaidrots, ka pagātnē ogļskābās gāzes īpatsvars mainījies galvenokārt vulkānu un mežu ugunsgrēku rezultātā. Acīmredzot, ka Zemes atmosfērai mijiedarbībā ar okeāniem un sauszemi piemīt pašregulācijas mehānisms, kas noregulē CO<sub>2</sub> īpatsvaru pieļaujamās robežās. Nekad pagātnē CO<sub>2</sub> īpatsvars atmosfērā nebija sasniedzis pašreizējo līmeni. Uzskata, ka pašregulācijas mehānisma saglabāšanas nolūkā, cilvēcei jā rūpējas par to, lai CO<sub>2</sub> daudzums atmosfērā būtiski nepalielinātos.

Tika noteiktas ogļskābās gāzes emisiju kvotas. Kioto protokols ir vērsts uz izrakteņu kurināmā izmantošanas iesaldēšanu, kas rada grūtības visindustriālākām valstīm.

Pēdējās desmitgadēs līdz ar industrijas attīstību jūtami paaugstinājās globālā temperatūra (3.54.att.).

Ņemot vērā to, ka pašreiz ir iestājies lielākās perioditātes temperatūras pazemināšanas periods, siltumnīcas efekts tomēr izraisīs temperatūras celšanos. Prognoze dažādiem enerģijas

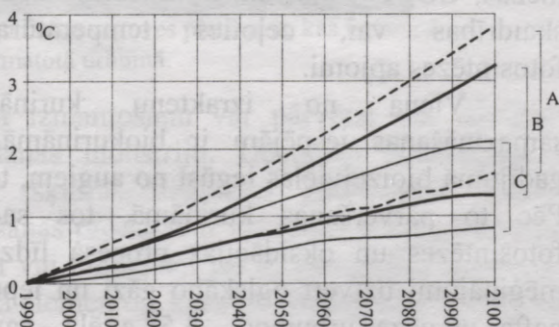


1880, 1890 1900 1928 1930 1940 1950 1960 1980 1988 g.

3.54.att. Vidējās pasaules Zemes virsas temperatūras izmaiņas pēdējā simtgadē.

patēriņa attīstības variantiem ir parādītas 3.55. attēlā. Saskaņā ar to, līdz 2100.gadam siltumnīcas efekta dēļ vidējā Zemes virsmas temperatūra celsies par 1-2<sup>0</sup>C, bet sliktākā gadījumā pat par 3,5<sup>0</sup>C.

Izmaiņas, ko izsauc ogļskābās gāzes koncentrācijas pieaugums, var radīt tundras izzušanu un lauksaimniecības efektivitātes celšanos ziemeļos. Visumā globālās klimata izmaiņas tiek vērtētas kā negatīvas. Diemžēl, šos zaudējumus nespēj novērtēt ekonomiski. Par CO<sub>2</sub> emisijas pieauguma galveno iemeslu kļūst III valstu grupas ekonomiskā attīstība. Bet tas ir vienīgais līdzeklis, kā tām izkļūt no nabadzības un pacelt cilvēku dzīves līmeni.

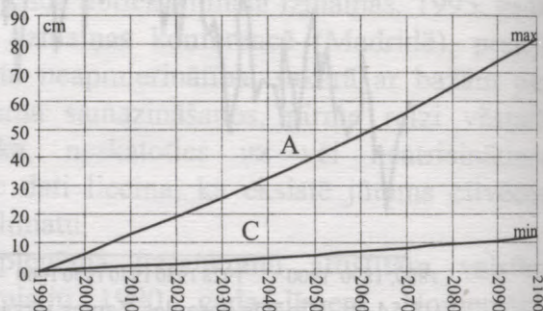


3.55.att. . Temperatūras izmaiņas prognozes pasaulē attīstības variantiem.

Temperatūras celšanās neizbēgami izsauc ledāju kušanu Grenlandē un Antarktīdā. Līdz ar to celsies okeāna līmenis – no 10 cm C attīstības variantā līdz 1 m A variantā (3.56.att.).

### Sabiedrībā

rodas bažas, vai paaugstinoties temperatūrai, process nevarētu kļūt neatgriezenisks? Zinātnieki un politiķi meklē izeju. Jau vairākos vispasaules



3.56.att. Okeāna līmeņa kāpuma prognoze attīstības variantiem.

kongresos tiek izstrādātas un saskaņotas rekomendācijas, obligātas industriālām valstīm.

Vienlaicīgi tiek meklētas jaunas asprātīgas idejas, kas ar laiku varētu stāvokli glābt.

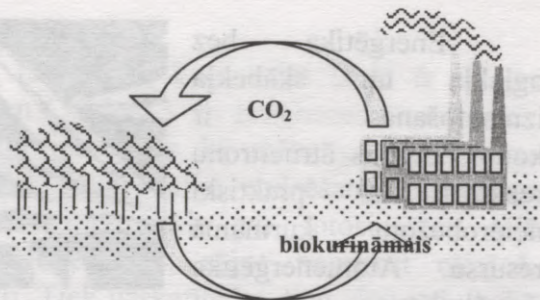
Tika izteiktas domas, ka ražotājiem, kas emitēs CO<sub>2</sub>, būtu jāiestāda meži, kas fotosintēzē uztvertu šo emisiju.

Mežu atjaunošanu nevarētu uzskatīt par jaunu ideju. Diemžēl, pat atjaunojot visus civilizācijas laikā iznīkušos mežus, CO<sub>2</sub> emisija samazināsies tikai par 10%. Pie tam nav skaidrības vai, ceļoties temperatūrai, nesamazināsies fotosintēzes apjomi.

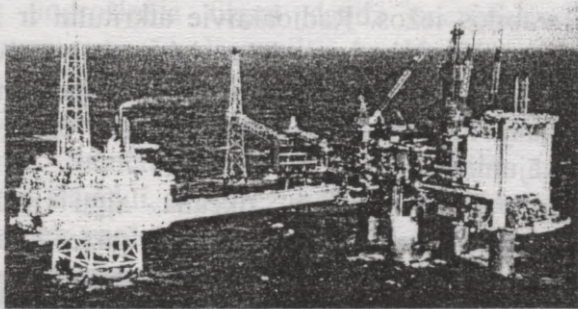
Viena no izrakteņu kurināmā izmantošanas samazināšanas iespējām ir biokurināmā izmantošana. Šinī gadījumā bioizejvielas iegūst no augiem, tos speciāli audzējot. Pēc to pārvēršanas kurināmā, tos sadedzina, saglabājot fotosintēzes un oksidācijas procesa līdzsvaru (3.57.att.). Ir mēģinājumi uztvert ogļskābo gāzi un iepumpēt tos izsmeltas naftas un gāzes urbumos. 3.58.attēlā – savu mūžu nokalpojuši Norvēģu jūras naftas urbšanas platforma tiek izmantota

ogļskābās gāzes  
 iepumpēšanai tukšā  
 urbumā jūras  
 dibenā. Tiek  
 izskatītas iespējas  
 iepumpēt ogļskābo  
 gāzi okeāna dibenā  
 augsta spiediena  
 apstākļos. Tur CO<sub>2</sub>  
 sašķidrinas un

varētu būt runa par ogļskābās gāzes ezeriem dziļumos. Bet tad  
 apkaimes ūdeņos radīsies skāba vide, kas var apdraudēt  
 dziļumu dzīvo dabu.



3.57.att. Vēlamā kurināmā stratēģija.



3.58.att. Norvēģu naftas ieguves platforma, kas iepumpē  
 ogļskābo gāzi izmatotā urbumā.

Biokurināmā izmantošanu var pārvērst par ūdeņraža  
 kurināmā izmantošanas industriju. Ūdeņraža siltumspēja ir  
 daudz lielāka par šķidrās degvielas siltumspēju (34000  
 Kcal/kg). Tā sadegšanas produkts ir nekaitīgs ūdens. Ūdeņradi  
 var iegūt no etilēna vai amonjaka un to var izmantot, vismaz  
 transportā, kurināmā elementos, kuru lietderības koeficients var  
 pārsniegt 60%.

Enerģētika bez oglekļa un skābekļa izmantošanas ir kodolenerģijas ātrneitronu reaktori, ar praktiski neierobežotu kurināmā resursu. Atomenerģētika nemākulīgas

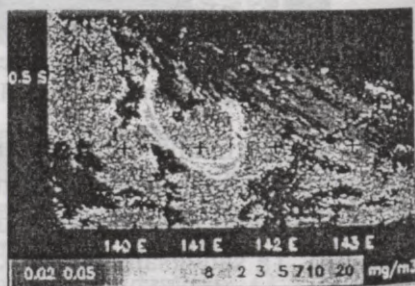


3.59.att. Mikroskopisko aļģu palielināta fotogrāfija.

eksploatācijas dēļ šobrīd ir diskreditējusies un iemantoja sabiedrības negatīvu attieksmi. Tās iespaidā politiķi ir spiesti pieņemt lēmumus par atomelektrostaciju slēgšanu. Protams, atomelektrostaciju eksploatācija ir saistīta ar radioaktīvo atkritumu rašanos. Tie pēc ilgstošas glabāšanas radioaktivitātes samazināšanas nolūkos un stiklošanas jānoliek dziļās šahtās stabilos iezos. Radioaktīvie atkritumi ir 3% no kurināmā masas. Pārējais materiāls tiek atkal reģenerēts derīgajā kurināmajā. Atomu reaktori pilnveidojas un kļūst drošāki, kas ļauj nākotnē atgriezties pie šīs enerģētiskās problēmas risinājumiem.

Par perspektīvu uzskata okeāna aļģu mākslīgās audzēšanas iespēju cīņai pret ogļskābās gāzes īpatsvara paaugstināšanos atmosfērā.

Šis variants tika atbalstīts Hāgas konferencē. Novērots, ka gados, kad atmosfēras plūsmas atnes uz Indijas okeāna dienvidiem (starp Āfriku, Austrāliju, Dienvidameriku un Antarktīdu) tuksnešu smiltis, kas satur dzelzi, tur strauji attīstās peldošas



3.60.att. Indijas okeāna dienvidrajaona fotouzņēmums, izdarīts no pavadoņa, kur ir redzams mikroskopisko aļģu lauku pusapļis.

mikroskopiskas aļģes (3.59.att.), kuru zaļie lauki ir skaidri redzami no pavadoņiem (3.60.att.). Ja prognozes attaisnosies, tad šim nolūkam būtu iespējams kā mākslīgo mēslošanas līdzekli izmantot dzelzs sulfātu aļģu audzēšanai planetāros apmēros. Nobeigušās dzīves ciklu un fotosintēzes ceļā pārveidojušās CO<sub>2</sub> oglekļa dioksīdā, aļģes nogrimst okeānā, apglabājot lieko oglekli. Tiek uzskatīts ka divu simtgadu laikā no atmosfēras būtu iespējams izvilkt minimāli 30-50 miljardus tonnu oglekļa. 2001.gadā sākās eksperiments dzelzs sulfāta izmantošanai okeāna aļģu audzēšanas vajadzībām.

Zinātnieki pārdomā vēl vienu enerģētikas hipotēzi. Septiņdesmitajos gados vācu firmas "Vaker" ķīmiķi eksperimentēja ar automobili, kura bāku piepildīja benzīna vietā ar tetrametilsilānu kur ietilpst silīcijs. Tā sadegšanas process nodrošināja tikpat daudz enerģijas, cik benzīns. Sadegšanas procesā radās smiltis, kas bloķēja dzinēju un spieda pagaidām eksperimentu pārtraukt.

Tas vērsa uzmanību uz ķīmiskām reakcijām, saistītām ar silīciju. Samērā daudz enerģijas izdalās reakcijās starp silīciju un slāpekli, kuru rezultātā arī veidojas smilšu paveids. Tātad netiek patērēts skābeklis un neveidojas oglekļa dioksīds. Toties, vajadzīgs silīcijs. Tas būtu jāatjauno no silīcija oksīdu smiltīm ar saules iekārtām tuksnešos. Protams, tehnoloģisko problēmu pietiek, bet ir par ko padomāt.

## **Jautājumi paškontrolei.**

1. *Ūdens tvaika iegūšanas raksturlīkne.*
2. *Kurināmā sadedzināšanas tehnoloģijas.*
3. *Energētiskais katls un tā elementi. Lietderības koeficients.*
4. *Entalpija kā stāvokļa parametrs.*
5. *Tvaika turbīna. Renkina cikls. Lietderības koeficients.*
6. *Kondensācijas elektrostacijas un to lietderības koeficients.*
7. *Siltumelektrostaciju lietderības koeficientu palielināšanas iespējas.*
8. *Termoelektrocentrāles. To lietderības koeficients.*
9. *Gāztvaika iekārtas priekšrocības. Lietderības koeficienti.*
10. *Degģāzu attīrīšana no putekļiem a) tekstila filtri; b) elektrofiltri.*
11. *Ka attīra degģāzes no sēra dioksīda  $SO_2$ ?*
12. *Kā attīra degģāzes no slāpekļa oksīdiem  $NO_x$ ?*
13. *Siltuma transformācija. Kāds ir siltumsūkņa darbības princips? Kādas vietas slodžu grafikā ieņem dažādas siltumelektrostacijas?*

## 4. NODAĻA. ATOMU ELEKTROSTACIJAS

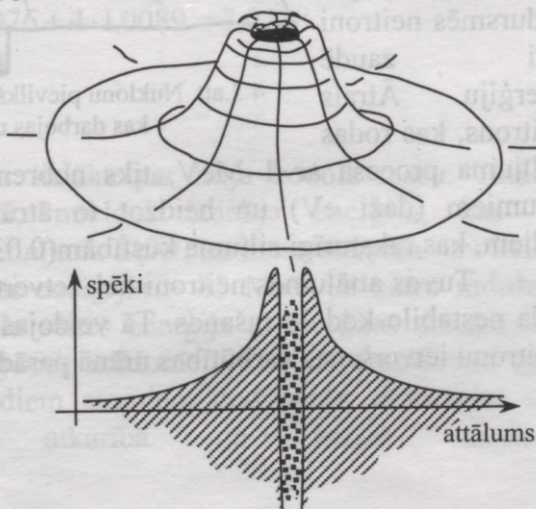
### 4.1. Ieskats elementārlādiņu fizikā.

Atomu kodoli sastāv no pozitīvi lādētiem protoniem un neitrāliem neutroniem. Atomu savstarpējās savienošanās spējas un, tātad, ķīmiskās īpašības nosaka kodola lādiņš, jeb protonu skaits. Neitronu skaits kodolā nosaka izotopus, kam vienādas ķīmiskās īpašības, bet dažāds atomu svars un kodolu stabilitātes īpašības. Tā, piemēram,  $^{235}\text{U}$  atomsvars 235 un neitronu skaits kodolā 92.

Ūdeņraža kodoli – protoni, elektroni, hēlija kodoli –  $\alpha$  daļiņas un neutroni var eksistēt ārpus atomu kodoliem un piedalīties fizikālos procesos. Kodolu tuvumā samērojamos atstatumos daļiņas nonāk mijiedarbībā ar to. Sadursmēs, kas notiek bez iekļūšanas kodolā, daļiņas maina savu kustības trajektoriju un enerģiju. Šādu mijiedarbību sauc par elastīgām sadursmēm.

Iekļūstot tajā (neelastīga sadursme), kodoli nonāk uzbudinātā stāvoklī.

“Atbrīvošanās” no uzbudinājuma notiek, kodolam izdalot  $\gamma$  kvantu un kādu elementārdaļiņu vai arī sadaloties divās nevienādās daļās.

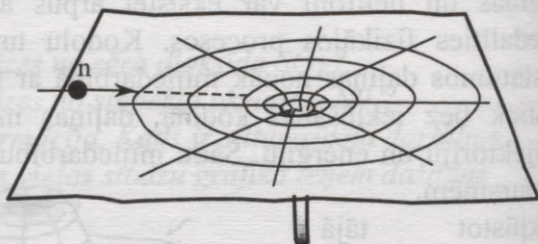


4.1.att. Atomu kodolu spēki.

*Kodolspēki.* Ārpus atomu kodola attiecībā uz uzlādētām daļiņām darbojas Kulona spēki, kas pozitīvās daļiņas atgrūž ar spēku, kas ir apgriezti proporcionāls atstatuma kvadrātam. Ļoti tuvos attālumos no kodola (mazākos par  $0,00001 \text{ \AA}$ ) sāk jūtami izpausties citi kodola elementār-lādiņu pievilkšanās spēki (4.1.att.). Tēlaini var stādīties priekšā, ka stabilo atomu elementārdaļiņas atrodas “kodolbedres” dziļumā. Ja radioaktīvo atomu kodoldaļiņas piepilda to līdz malai, dažas no tām var dažādu iemeslu dēļ to atstāt.

Attiecībā pret neitrālām daļiņām (neutroniem) Kulona spēki nedarbojas. Toties pilnā mērā izpaužas maza rādiusa darbības kodola pievilkšanās spēki (4.2.att.). Tāpēc iedarbei uz atomu kodoliem izmanto neutronus.

Kustoties cauri matērijai, notiek neitronu sadursme ar atomu kodoliem. Šajās sadursmēs neitroni ātri zaudē enerģiju. Ātrais neitrons, kas rodas



4.2.att. Nuklonu pievilkšanas spēki, kas darbojas uz neitroniem.

dalījuma procesā ar  $1 \text{ MeV}$ , tiks nobremzēts līdz vidējiem ātrumiem (daži eV) un beidzot to ātrums samazinās līdz tādiem, kas raksturīgi siltuma kustībām ( $0,03 \text{ eV}$ ).

Tuvos attālumos neitroni tiek ietverti kodolos, kas bieži rada nestabilo kodolu rašanos. Tā veidojas radioaktīvie atomi. Neitronu ietveršanas varbūtības urānā parādītas 4.1. tabulā.

4.1. tabula

Neutroni	$^{238}\text{U}$	$^{235}\text{U}$
Ātrie 1 MeV	Maza varbūtība Pie ietveršanas kodols kļūst nestabils	Maza varbūtība, dalās
Vidējais 1 eV	Liela varbūtība izraisa $^{239}\text{Pu}$ rašanos ar tālākām radioaktīvām pārvērtībām	Maza varbūtība
Siltuma neutroni 0,03 eV	Maza varbūtība	Liela varbūtība

*Nuklonu saites enerģija.* Kodolu nukloni (protoni un neutroni) pievelkas, atdodot daļu savas enerģijas. Līdz ar to kodola masa ir nedaudz mazāka par atsevišķo nuklonu masu summu. Tā, piemēram, litija kodols sastāv no 3 protoniem un 4 neutroniem. Saskaņā ar izdarītiem mērījumiem tā masa līdzinās 7,01165. Brīvā protona masa līdzinās 1,0076, bet neutrona – 1,0089. Šo masu summa ir šāda:

$$3 \cdot 1,0076 + 4 \cdot 1,0089 = 7,0588.$$

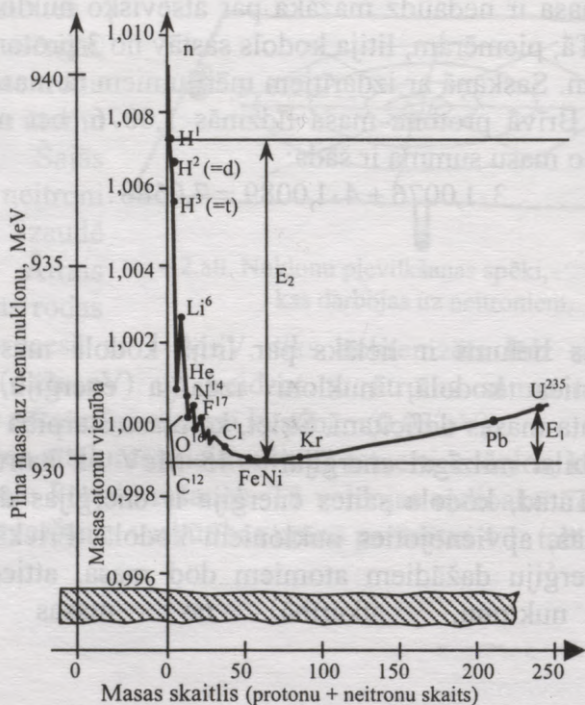
Šis lielums ir lielāks par litija kodola masu. Tātad, savienojoties kodolā, nukloni izdalīja enerģiju, kas ir ekvivalenta masas deficītam. Šķiet, ka masu starpība nav liela, bet tā atbilst milzīgai enerģijai – 45 MeV uz katru radušos kodolu. Tātad, kodola saites enerģija ir enerģijas daudzums, kas izdalās, apvienojoties nukloniem kodolā. Priekšstatu par saites enerģiju dažādiem atomiem dod masa, attiecināta uz vienu nuklonu, atkarībā no masas skaitļa:

masa/nukloni =  $\frac{\text{kodola masa}}{\text{nuklonu skaits}}$ . Jebkuram elementam

kodola masa maz atšķiras no vesela skaitļa. Tā, piemēram,

ūdeņradim 1,0076;  
 litijam 7,0165;  
 dzelzij 55,938;  
 urānam 235,068.

Tuvākie vesēlie skaitļi (1; 7; 56; 235 ...) nozīmē nuklonu skaitu kodolā. Starpība starp atomu masām un vesēliem skaitļiem norāda enerģijas daudzumu, kas izdalās, apvienojoties nukloniem kodolā. Šie lielumi sākas ar 1,008 protonam, 1,009 neitronam, tālāk mazinās līdz 0,9993 dzelzij, varam, bromam un tālāk lēni aug līdz 1,0003 urānam (4.3.att.).



4.3.att. Masa attiecināta uz kodola nuklonu.

Viegli pārliecināties, ka gadījumā, ja smagais kodols sadalītos divos vidējos, tad tā kodoli zaudētu būtisku masu lielās enerģijas izdalīšanās rezultātā ( $E_1$ ). Attiecīgi, ja izdotos vieglos kodolus savienot, sintezējot smagāku elementu, tad varētu izdalīties vēl lielāks enerģijas daudzums  $E_2$ .

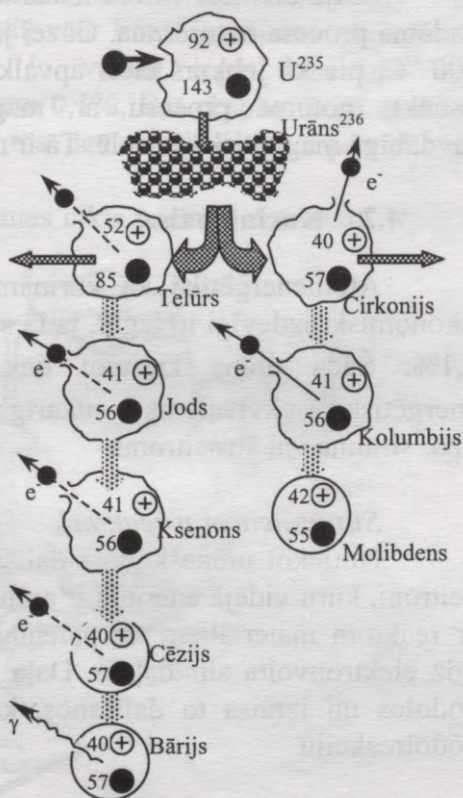
*Kodolu dalīšanās.* Kodola enerģiju, daloties smagiem elementu kodoliem, iegūst divējādi. Ja elements ir radioaktīvs izotops, tad kodola dalīšanai to bombardē ar neitroniem. Ja smagais elements nav radioaktīvs, tad panāk tā iepriekšējo pārvēršanos radioaktīvā izotopā caur neitronu ietveršanu.

Process startē ar  $^{235}\text{U}$ . Bombardējot to ar neitronu, tas saskaldās, izdalot lielu enerģijas daudzumu (4.4.att.).

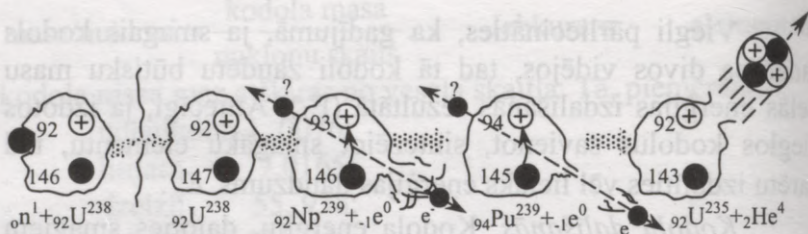
Otrā gadījumā  $^{238}\text{U}$  pārvēršas, radioaktīvā  $^{239}\text{Pu}$ , kas reakcijā ar neitronu izdala  $\alpha$  daļiņu, kļūst par  $^{235}\text{U}$  kodolreaktoros.

Pārvērtību process parādīts 4.5. attēlā.

*Kodolu sintēze.* Lielāku enerģiju  $E_2$  var iegūt, savienojot vieglos kodolus (4.3.att.). Šinī gadījumā neitroni nelīdz. "Sagrūst" vieglo kodolu nuklonus var vienīgi piedodot tiem lielus kustību ātrumus. To var panākt ar augstām



4.4.att. Urāna dalīšanās.



4.5.att. Plutonija iegūšana.

temperatūrām. Sintēzē piedalās ūdeņraža izotopi deiterijs un tritiji. Deiterijs ir dabā. To var iegūt, apstarojot ūdeni ar neutroniem. Tritiju iegūst, apstarojot ar neutroniem litiju.

Litiju arī tieši varētu izmantot sintēzē. Grūtības sagādā vadāmā procesa uzturēšana. Gāzei jābūt sakarsētai līdz 50 000 000 °C, pie kā jebkurš ciets apvalks pārvēršas tvaikā. To cer panākt, noturot procesu ar magnētiskā lauka palīdzību savdabīgā magnētiskā pudelē. Tā ir nākotnes problēma.

## 4.2. Kurināmais.

Atomenerģētikā kā kurināmais tiek izmantots urāns. Ekonomiski izdevīgi to iegūt, ja tā saturs iežos nav mazāks par 0,1%. Šāda urāna krājumi tiek vērtēti ap  $3,3 \cdot 10^6 t$ . Tā enerģētiskais ekvivalents ir atkarīgs no izmantojamo reaktoru tipa: siltuma vai ātrneutronu.

### *Siltumneutronu reaktori.*

Notiekot urāna kodola dalīšanās procesam, rodas ātrie neutroni, kuru vidējā enerģija ir apmēram 2 MeV. Mijiedarbībā ar reaktora materiāliem tie palēninās un to enerģija mazinās līdz elektronvolta simtdaļām. Daļa no neutroniem trāpa urāna kodolos un izraisa to dalīšanos, kas nodrošina nepārtrauktu kodolreakciju.

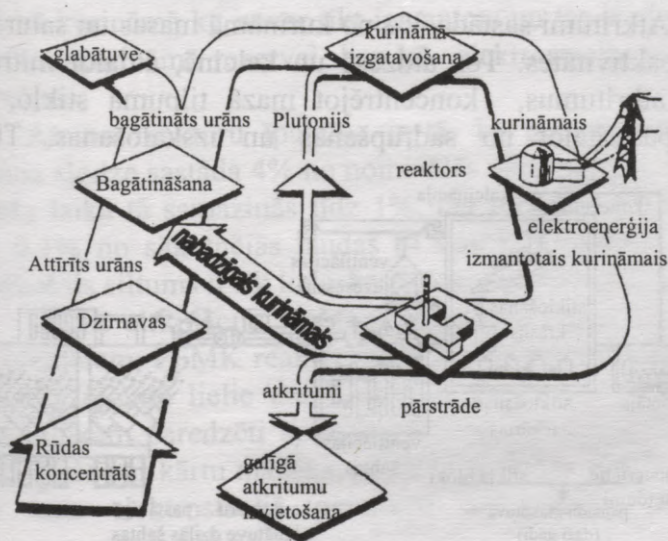
Siltumneutronu reaktoros, kas pašreiz apgūti, tiek izmantots 0,5-1,5% dabīgā urāna. Pārējais kurināmais paliek neizmantojams.

Dabīgais urāns satur  $^{238}\text{U}$  un  $^{235}\text{U}$  izotopus. Pēdējā saturs ir 0,7%.  $^{238}\text{U}$  nav kurināmais, bet atomu reakcijā kļūst par  $^{239}\text{Pu}$ , kas turpmāk var tikt izmantots kā kurināmais.

Dabīgo urānu var izmantot kodolreakcijās tikai smagā ūdens vidē. Citos reaktoros dabīgais urāns jābagātina, palielinot  $^{235}\text{U}$  saturu līdz 2,5-3,3%. Viens kg dabīgā urāna ļauj iegūt  $11,2 \cdot 10^7 \text{ kWh}$  elektroenerģijas.

Ātrneutronu reaktoros kurināmā izmantošana var sasniegt 30-40%. Šinī gadījumā būtu iespējams paplašināt izmantojamā urāna bāzi, jo varētu iegūt kurināmo arī gadījumos, ja tā saturs ir zem 0,1%. Bet ekspluatācijā atrodas nedaudzi šādi reaktori un tos nevar vēl uzskatīt par pilnīgi apgūtiem.

Kurināmā izmantošanas cikls parādīts 4.6.attēlā. Rūdas

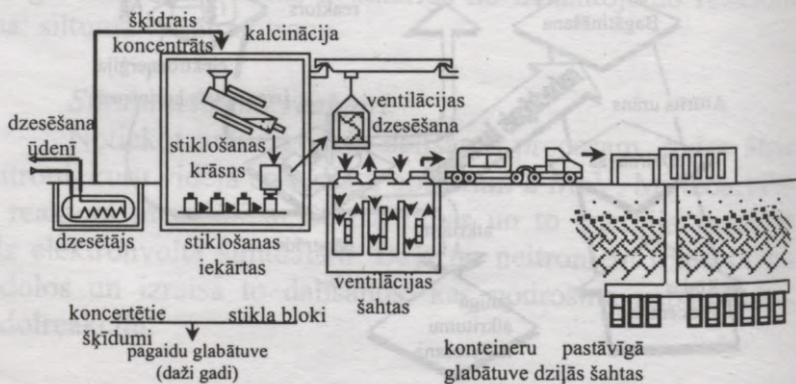


4.6.att. Kurināmā izmantošanas cikls.

koncentrāts tiek samalts, attīrīts un speciālā tehnoloģijā bagātināts līdz nepieciešamajam  $^{235}\text{U}$  saturam. No tā presē tabletes. Tās piepilda garās cirkonija caurulēs, kas kļūst par siltumizdalošo elementu (SIEL). Tos savieno kasetēs un iekrauj reaktoros. Tur  $^{235}\text{U}$  atoma kodols neitronu iespaidā dalās, izdalot siltumu. Vienas kurināmā porcijas izmantošanas laiks ir 1-4 gadi. Turpmāk, pateicoties tehnoloģijas pilnveidošanai, kurināmā kvalitāte uzlabosies un šis laiks palielināsies par 50%. Izstrādāto kurināmo, kas satur sākotnējā kurināmā kritisko masu,  $^{239}\text{Pu}$ , kas reakcijā radās no  $^{238}\text{U}$ , un lieso  $^{238}\text{U}$  izkrauj. Vairāku gadu glabāšanā izotopi ar īsu pastāvēšanas periodu sabruk un radioaktīvā starojuma intensitāte samazinās desmitiem reižu.

Kodolmateriālu kompozīciju ar lielu piesardzību speciālos hermētiskos un dzesējamos konteineros transportē uz pārstrādi. Tur tā tiek sadalīta: kurināmā, liesā urānā un atkritumos. Kurināmais  $^{239}\text{Pu}$  atdalāms ķīmiski. Urāns nonāk bagātināšanā un tiek atkārtoti izmantots kurināmā ciklā.

Atkritumi sastāda 3% no kurināmā masas un satur 99% to radioaktivitātes. Tos atdzesē un kalcinē, atdalot mitrumu. Cietos atkritumus, koncentrējot mazā tilpumā stiklo, tādā veidā pasargājot no sadrupšanas un izskalošanas. Tie ir

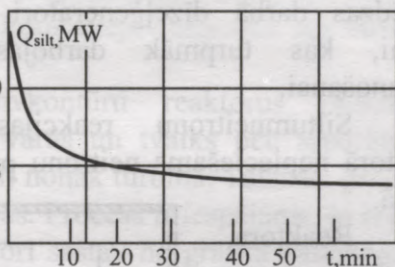


4.7.att. Izmantotā kurināmā atkritumu pārstrādāšana.

radioaktīvi, tāpēc tos ieslēdz nerūsējošā tērauda konteineros un novieto uz vairākiem gadiem ventilējamās šahtās. Pēc tam tos novieto pastāvīgā glabāšanā ģeoloģiski stabilos slāņos (4.7.att.).

### 4.3. Siltumneutronu reaktori.

Lai reaktors sāktu darboties, iekrautā kurināmā daudzumam jāpārsniedz kritiskais daudzums. Tā, piemēram, 440 MW ūdens-ūdens reaktoram  $^{235}\text{U}$  masa ir 700 kg, kas atbilst ogļu kurināmā masai  $2 \cdot 10^6 \text{ t}$ . Ievērojot to, ka  $^{235}\text{U}$  sastāda 3%, kopējā urāna masa ir 23 t. Neviens kritiskā kurināmā kg nevar tikt izmantots un tas ir ekvivalents noteiktai kurināmā rezervei, bez kā elektrostacija nevar sākt darboties.



4.8.att. Siltums, izdalīšanās izmaiņa pēc atoma reaktora apturēšanas.

Atomu reaktoru īpatnība ir tā, ka pēc apturēšanas tā siltuma slodze sastāda 4% no nominālās vērtības. Pēc tam dažu stundu laikā tā samazinās līdz 1%, bet turpmākās 100 dienās līdz 0,1% no sākotnējās jaudas (4.8.att.). Absolūtās vienībās paliekošais siltums ir tik liels, ka reaktors pastāvīgi jādzesē.

Ūdens cirkulāciju reaktorā nodrošina cirkulācijas sūkņi. Tā, piemēram, PBMK reaktoriem ir 8 darba cirkulācijas sūkņi. Apturētā režīmā lieli darba cirkulācijas sūkņi ir pārmērīgi. Šim nolūkam paredzēti apstādināta režīma cirkulācijas sūkņi, kam jauda par kārtu mazāka, piemēram, 0,8 MW 8 MW vietā. Bez tam elektrostacijā paredzēti automātiski palaižamie

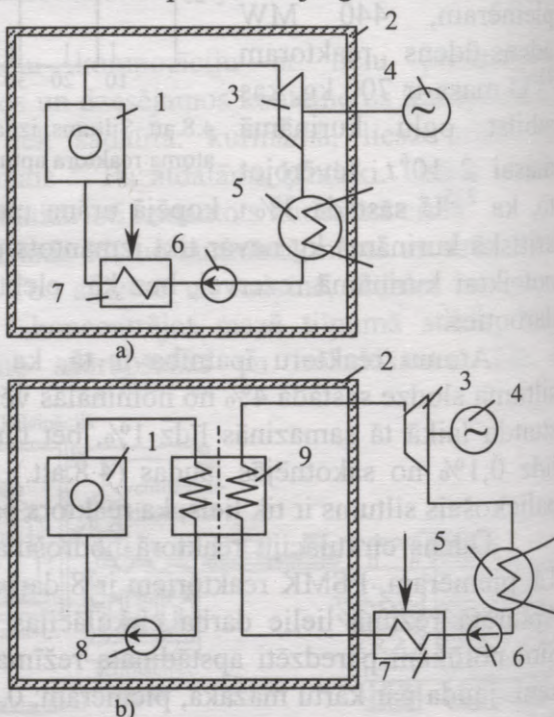
dīzeļģeneratori, kas nodrošina stāvēšanas cirkulācijas sūkņu darbu, pazūdot spriegumam no pamatbarošanas avota.

Reaktora apturēšana, pazūdot iekārtas barošanas spriegumam, ir šāda. Līdz 30 sek turpina darboties darba cirkulācijas sūkņi, pateicoties spara ratiem. Nākamās 30 sekundēs dzesēšana tiek nodrošināta ar ūdeni no avārijas rezervuāra, darbinot vārstus no akumulatoriem. Tikmēr ieslēdzas darbā dīzeļģeneratori un stāvēšanas cirkulācijas sūkņi, kas turpmāk darbojas līdz reaktora darbības atjaunošanai.

Siltumneitronu reakcijas procesa nodrošināšanai reaktorā nepieciešams neitronu palēninātājs grafīta vai ūdens veidā.

Reaktora aktīvās zonas kanālos ievirza neitronu absorbējošos stieņus pildītus ar boru saturošiem materiāliem.

Dažādiem šo stieņu stāvokļiem atbilst dažāda aktīvās zonas jauda. Regulējošo stieņu stāvokļus kanālā regulē speciāla mehāniska sistēma, ko vada automātiskais regulators. Šāda

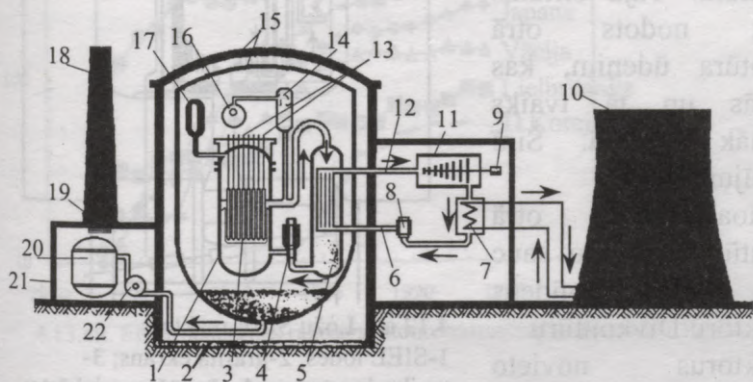


4.9.att.Siltumneitronu reaktoru shēma. a- vienkantūru shēma; b- divkantūru shēma.

regulēšana ar mehānisko sistēmu ir iespējama, pateicoties tam, ka eksistē tā saucamie kavējošie neitroni ar kavējumu līdz minūtēm. Bez tam paredzēti aizsardzības stieņi, kas parasti izvilkti no aktīvās zonas, bet krīt iekšā aizsardzības nostrādāšanas gadījumā. Šie stieņi noslāpē reakciju un aptur reaktoru.

Reaktora aktīvā zona piepildīta ar ūdeni, kas izpilda palēninātāja, dzesētāja un siltumnesēja funkcijas un atrodas zem spiediena.

Izšķir vien- un divkontūru reaktorus (4.9.att.). Vienkontūra reaktorā ūdens vārās un tvaiks pēc separācijas (atdalīšana no ūdens pilieniem) nonāk turbīnā. Tālākais process notiek kā siltuma elektrostacijās. Process ir iespējams, jo tvaiks ir vāji radioaktīvs. Šādi reaktori sastāv no grafitā palēninātāja salikuma. Tajā iemontēti kurināmā elementu individuālie metāliskie korpusi (piemēram, reaktoriem PEMK). Aktīvā zonā



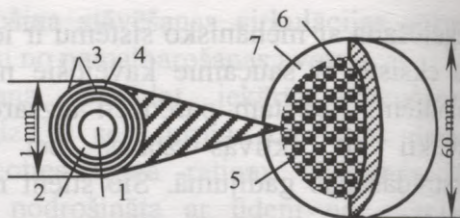
4.10.att. Divkontūra reaktors.

1-reaktora korpusis; 2-aktīvā zona; 3-SIEL kasetes; 4-cirkulācijas sūkņi; 5-tvaika ģenerators; 6-barojošā ūdens komunikācija; 7-kondensators; 8-barojošs sūknis; 9-ģenerators; 10-dzesēšanas tornis; 11-turbīna; 12- tvaika komunikācija; 13-regulējošie stieņi; 14-tilpuma kompensators; 15-reaktora celtne; 16-barboters; 17-ūdens rezervuārs; 18-ventilācijas sistēma; 19-filtri; 20-drenāžas rezervuārs; 21-palīgceltne; 22-drenāžas sūknis.

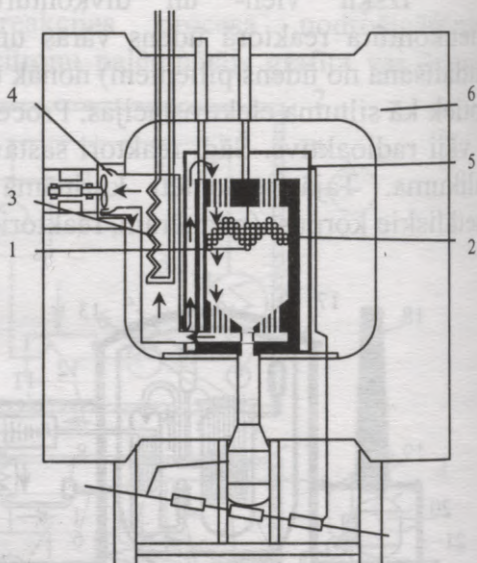
šīnī gadījumā ūdens atrodas divos agregātstāvokļos – ūdens un tvaika, kam ir dažādas neitronu palēnināšanas spējas. Tos sauc par kanālu reaktoriem.

Divkontūra reaktoriem ir izturīgs metālisks korpuss. Par palēninātāju tiek izmantots ūdens, kas būdams sakarsēts, zem spiediena nonāk tvaika ģeneratora pirmajā kontūrā. Tajā siltums tiek nodots otrā kontūra ūdenim, kas vārās un tā tvaiks nonāk turbīnā. Šīnī gadījumā radioaktivitātes otrā kontūra nav. To sauc par ūdens-ūdens reaktoru. Divkontūru reaktorus novieto speciālā betona aizsargcilindrā (4.10.att.) kur tiek

lokalizēta radioaktivitāte gadījumos, ja reaktors avārijas rezultātā zaudē hermētiskumu. Pēdējā laikā sāk izmantot jaunu reaktora konstrukciju, kur SIEL tiek izgatavoti ložu veidā



4.11.att. Ložu siltumizdalošie elementi. 1-UO<sub>2</sub> kodols; 2-bufera slānis; 3,4-RuC un SiC čaulas; 5-kurināmā lodīte; 6-grafīta matrica; 7-grafīta čaula.

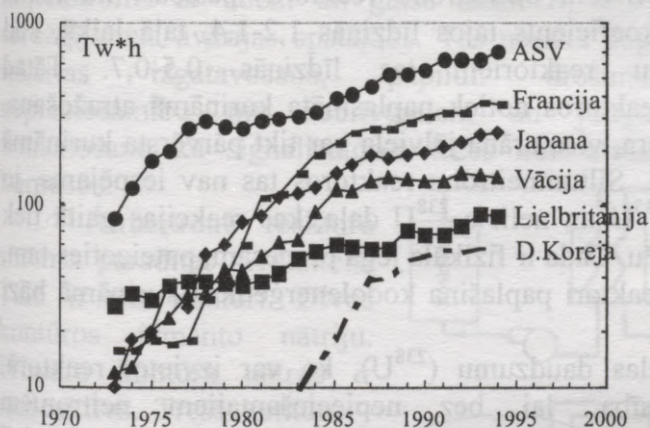


4.12.att. Ložu SIEL reaktors. 1-SIEL lodes; 2-grafīta ekrāns; 3-tvaika ģenerators; 4-gāzpūšanas iekārta; 5-reaktora korpuss; 6-dzelzbetona aizsargkorpuss.

(4.11.att.). Matricā, kas ietverta grafitā čaulā, novieto kurināmā lodītes. Katra no tām sastāv no  $UO_2$  kodola, ietverta bufera slānī un trijās čaulās, izgatavotas no  $RuC$  un  $SiC$ . Šādus SIEL ieber reaktora aktīvā zonā (4.12.att.). Regulējošie un aizsardzības stieņi tiek iegremdēti ložu masā. Grafitā čaulas izmanto kā palēninātāju. Dzesēšanas un siltumnesēja funkcijas izpilda neitrālas gāzes - ogļskābā vai hēlijs, ko siltumatdeves vajadzībām jāizmanto zem spiediena.

Reaktorā paredzēta speciāla sistēma ložu cirkulācijai cauri speciālai diagnostikas iekārtai. Veselas lodes paliek darbā, bet bojātās tiek novadītas uz atsevišķu bunkuru.

Elektriskās enerģijas izstrāde ar siltumneitronu reaktoriem dažādās valstīs parādīta 4.13.attēlā.



4.13.att. Elektroenerģijas ražošana atomelektrostacijas attīstītajās valstīs.

#### 4.4. Ātrneitronu reaktori.

Ātrneitronu reaktori darbojas līdzīgi siltumneitronu reaktoriem. Starpība ir tā, ka siltumneitronu reaktoros speciāli izmanto neitronu palēninātāju ūdens un grafitā veidā, kas samazina to enerģiju. Turpretim, ātrneitronu reaktoros

palēninātājus neizmanto. Reakcija notiek ar vidēji ātriem neutroniem. To enerģija ir zemāka par sākotnējo. Process notiek tāpat kā iepriekšējā reaktorā un rodas tādi paši dalīšanās produkti. Atomu reaktoros noris divi pretēji vērsti procesi: kurināmā izdegšana un jaunā kurināmā rašanās, ko sauc par atražošanu. Skaitliski to raksturo atražošanas koeficients.

Atražošanas jēdziens attiecas uz gadījumu, ja izdeg un atražojas viens un tas pats kurināmais, t.i., ja reaktorā sākotnēji atrodas  $^{239}\text{Pu}$ . Turpretim, ja par primāro kurināmo kalpo  $^{235}\text{U}$ , tad reaktora darbības laikā notiek tā pakāpeniska aizvietošanās ar  $^{239}\text{Pu}$  (4.5.att). Šādu ciklu sauc par konversiju. Ātrneutronu reaktoru darbības pamatcikls ir atražošana, jo konversija šajos reaktoros var būt tikai starta rakstura.

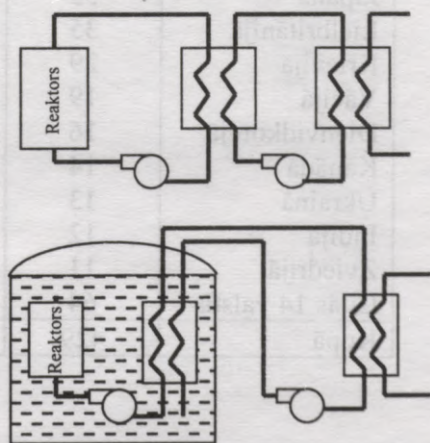
Nemot vērā ātrneutronu reaktoru īpašības, kurināmā atražošanas koeficients tajos līdzinās 1,2-1,4, tajā laikā, kad siltumneutronu reaktoriem tas līdzinās 0,5-0,7. Tātad ātrneutronu reaktoros notiek paplašināta kurināmā atražošana. Pateicoties tam, visa urāna jēlviela var tikt pārvērsta kurināmā un izmantota. Siltumneutronu reaktoros tas nav iespējams, jo izdeg tikai  $^{235}\text{U}$  un neliela  $^{238}\text{U}$  daļa, kas reakcijas gaitā tiek pārvērsta  $^{239}\text{Pu}$ . Tāda ir fizikāla jēga procesam, pateicoties tam, ātrneutronu reaktori paplašina kodolenerģētikas kurināmā bāzi simtkārtīgi.

Jēlvielas daudzumu ( $^{238}\text{U}$ ), ko var izvietot reaktorā, nosaka prasība, lai bez nepieciešamajiem neutroniem stacionārās reakcijas uzturēšanai, tiktu absorbēti tikai "brīvie" neutroni. Uz 100 kodolu dalījumiem pienākas 300 sekundārie neutroni. No tiem 100 izsauc kodolu dalījumus kārtējā ciklā; 170 tiek absorbēti jēlvielā ( $^{238}\text{U}$ ), radot jaunu kurināmo; 40 tiek absorbēti konstruktīvos un citos inertos materiālos; 30 - kurināmā. Kurināmā atomu bilancē jāievēro 30 radiācijas absorbcijā "zudušus" neutronus. Atražošanas koeficients sastāda  $(170-30)/100 = 1,4$ .

Lai novērstu ātro neitronu zudumus bez mijiedarbības ar jēlvielu, to ir nepieciešams kompensēt ar papildus kurināmā masu un attiecīgu kritiskās masas palielināšanu. Lai saglabātu reaktoru efektivitāti attiecībā uz neizmantojamo kurināmo, ātrneutronu reaktoru jaudu ierobežotā apjomā palielina. Līdz ar to pastāv galvenais uzdevums – nodrošināt paaugstinātu siltumnovadīšanu bez izmēru palielināšanas, jo tas, savukārt radītu papildu kritiskās masas pieaugumu. Problēmu sarežģī neiespējamība siltuma novadīšanai izmantot ūdeni, jo tas ir neitronu palēninātājs, kas šinī gadījumā nav pieļaujams. Problēmu atrisināja šķidrās nātrijs, kas nav palēninātājs un kam ir lieliskas kodolfizikālas īpašības.

Grūtības sagādā vienīgi nātrija ķīmiskā aktivitāte mijiedarbībā ar ūdeni un gaisa skābekli, kas varētu radīt sarežģītumus avārijas apstākļos. Tas nosaka augstas prasības iekārtas izgatavošanā, papildu drošuma korpusu nepieciešamību pie neblīvumiem un jutīgu indikatoru izmantošanu kā signalizatorus teces konstatēšanai drošības korposos.

Ātrneutronu reaktoru shēmas parādītas 4.14.attēlā. Tam ir trīs kontūri. Divos kontūros izmanto nātriju. Primārā kontūra nātrijs ir radioaktīvs. Trešā kontūra – ūdens-tvaiks. Tvaiks tiek izmantots tāpat kā siltumelektrostacijās. Siltumpārvade starp kontūriem notiek siltummainī un tvaika ģeneratorā. Otrā variantā reaktors un siltummainis



4.14.att. Siltuma novadīšana ātrneutronu reaktors cilpveida un integrālā risinājumā,

iegremdēti rezervuārā, kas piepildīts ar šķidru nātriju.

Pašreiz ekspluatācijā atrodas 600 MW reaktors Belojarskas atomelektrostacijā, 1200 MW reaktors "Superfeniks" Francijā un vairāki mazāki reaktori: Monju Francijā (300 MW), PER Lielbritānijā (250 MW), SNR -300 Vācijā, Monju Japānā (300 MW).

Reaktora darbības gaitā kritiskās masas kurināmais intensīvās kodolapstarošanas gaitā pasliktinās kodoldalīšanas produktu sakrāšanās dēļ. Tāpēc tas periodiski jānomaina ar svaigu, nododot veco reģenerācijā, ko izdara speciālās rūpnīcās.

#### Atomu reaktoru skaits pasaulē

Valstīs	Reaktoru skaits	Tiek būvēti	Slēgti
ASV	104	0	22
Francijā	59	0	11
Japānā	53	4	2
Lielbritānijā	35	3	10
Krievijā	29	3	4
Vācijā	19	0	17
Dienvīdkorejā	16	4	0
Kanādā	14	0	11
Ukrainā	13	4	4
Indijā	12	2	0
Zviedrijā	11	0	2
Citās 14 valstīs	64	17	1
Kopā	429	37	84

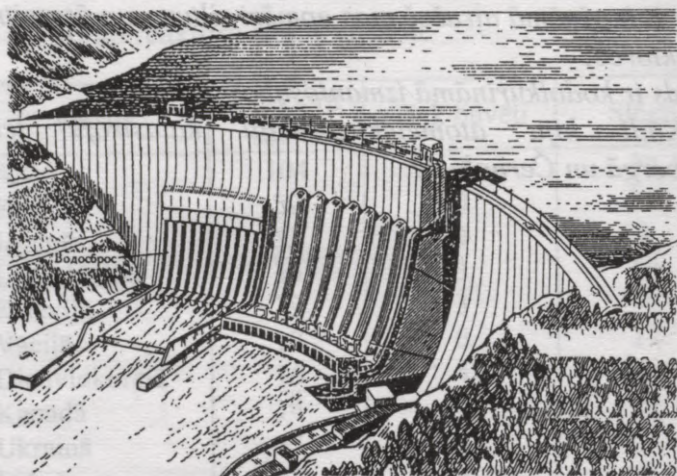
## *Jautājumi paškontrolei.*

1. *Kāda ir atomu kodolu struktūra?*
2. *Ar ko izskaidrojama enerģija, kas izdalās, kodolam daloties?*
3. *Kādu kurināmo izmanto atomu elektrostacijās, tā resursi?*
4. *Kādi procesi rit siltumneitronu reaktoros?*
5. *Ko nozīmē kritiskā kurināmā masa? Kā tiek izmantots kritiskās masas kurināmais?*
6. *Ko nozīmē kurināmā bagātināšana?*
7. *Kādi procesi rit ātrneitronu reaktoros?*
8. *Ko nozīmē kurināmā atražošana?*
9. *Kādi ir kurināmā atražošanas apmēri siltum- un ātrneitronu reaktoros?*
10. *Kāds ir kodolkurināmā izmantošanas cikls?*
11. *Kādi bija atomelektrostaciju katastrofu iemesli Gerrisbergā un Černobiļā?*

## 5. NODAĻA. HIDROENERĢĒTIKA

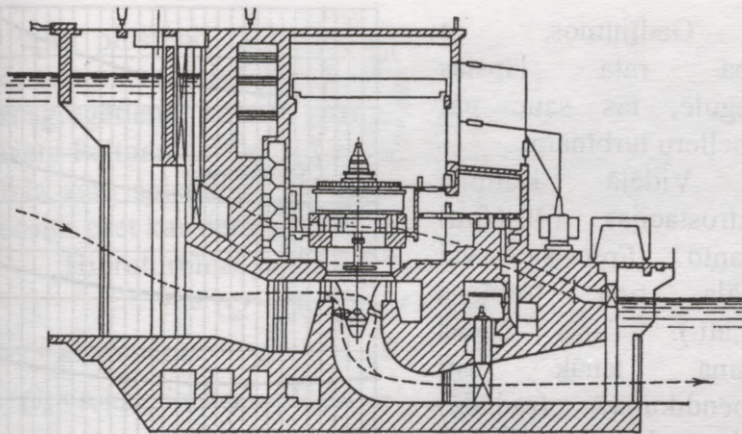
Hidroenerģētikā tiek izmantota ūdens enerģija. Šim nolūkam upes šķērso aizprosti, kas rada ūdens līmeņu starpību līdz un pēc aizsprosta (5.1.att.). Virs aizsprosta veidojas ūdenskrātuve, kur sakrājas noteikts ūdens daudzums. Atkarībā no ūdenskrātuves tilpuma, tā ūdens rezerve var būt pietiekoša gada, sezonas vai nedēļas regulēšanai.

Ūdens līmeņus virs un zem aizsprosta sauc par bjejiem un šo līmeņu starpība nosaka ūdens kritumu.



5.1.att. Hidroelektrostacija.

Ūdenim tekot caur turbīnu (5.2.att.), ūdenskrātuves līmenis mazinās. Elektrostacijai stāvot, dabīgā upes caurplūde ūdenskrātuvi papildina un tās līmenis atkal atjaunojas. Sakarā ar to, ka hidroagregātu palaišana un ieslēgšana darbā ir vienkārša, tas aizņem 1-1,5 min. Hidroelektrostācijas izmanto tādu slodžu segšanai, kas ilgst īsu laiku. Tas dod iespēju celt hidroelektrostācijas, kas darbojas dažas stundas diennaktī. Līdz ar to jaudas var būt samērā lielas.

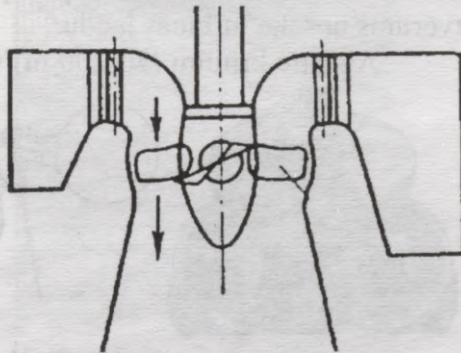


5.2.att. Hidroelektrostacijas šķēlums.

Ūdens no ūdenskrātuves tiek izmantots ūdensturbīnās, kur tas pārvēršas kinētiskā enerģijā, griežot tās. Uz vienas ass ar turbīnu atrodas elektriskais ģenerators. Tajā mehāniskā enerģija pārvēršas elektriskā enerģijā.

Turbīnu konstrukcija ir atkarīga no ūdens krituma. Atkarībā no apvidus reljefiem, kritumi var būt zemi, vidēji un augsti.

Sakarā ar to, ka zema krituma elektrostacijās (4-20 m) kritums darba procesā var izmainīties plašās robežās, tajās izmanto Kaplāna turbīnas (5.3.att.). Tām darba rata lāpstas ir grozāmas un ieņem leņķi, kas atkarībā no krituma vērtības nodrošina maksimālu lietderības koeficientu (5.4.att.). Līdz ar to augsts lietderības koeficients saglabājas plašā kritumu un jaudu diapazonā.



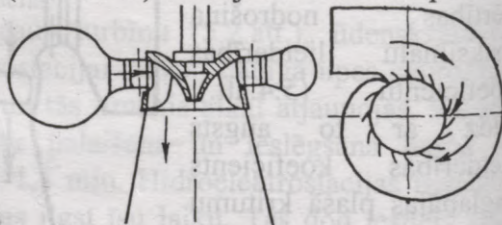
5.3.att.Kaplāna turbīna.

Gadījumos, ja darba rata lāpstas neregulē, tās sauc par propelleru turbīnām.

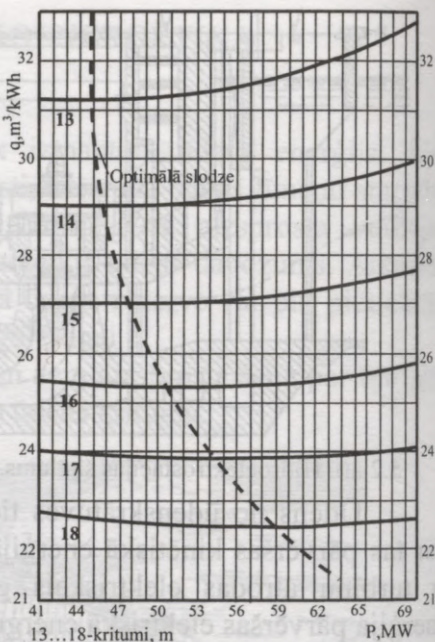
Vidējā krituma elektrostacijas (40-60m) izmanto Frensisa vai radiāla tipa turbīnas (5.5.att.). Tajās ūdens plūsma ienāk asij perpendikulārā (radiālā) virzienā, bet pēc tam tā tiek pagriezta ass virzienā. Augsts lietderības koeficients šīm turbīnām saglabājas samērā šaurā kritumu un jaudu diapazonā (5.6.att.).

Turbīnas novieto spirālkamerā ar vadaparātu, kam gar aploci ir veramas lāpstiņas. Turbīnai nedarbojoties, lāpstiņas ir aizvērtas un ūdens turbīnā netiek. Iedarbinot, lāpstiņas atveras un ūdens plūsma atbilstoši atvēruma pakāpei tajā ieplūst. Lāpstiņu atvērums nosaka turbīnas jaudu.

Augstie kritumi (70-200 m) veidojas kalnainos apvidos,



5.5.att.Frensisa turbīna un spirālkamera.



5.4.att. Kaplāna turbīnu raksturlīknes.

kur upes plūst no lieliem augstumiem. Tad plūsmu ieslēdz lielās caurulēs (derivācijā), kas novada ūdeni zem spiediena uz hidroagregātiem kalnu pakājē. Šādās hidroelektrostacijās izmanto Peltona turbīnas (5.7.att.). Darba ratam ir kausi. Ūdens strūkla zem spiediena, ko nosaka atbilstošs kritums, nāk no sprauslas pret kausiem, griežot ratu.

Hidroturbīnas jauda līdzinās

$$P = (Q - Q_0) \cdot H \cdot \gamma \cdot \eta, \text{ MW},$$

kur  $\gamma$  - koeficients;

$Q_0$  - tukšgaitas caurplūde,  $m^3 / sek$ ;

$Q$  - ūdens caurplūdes daudzums  $m^3 / sek$ ;

$H$  - kritums, m;

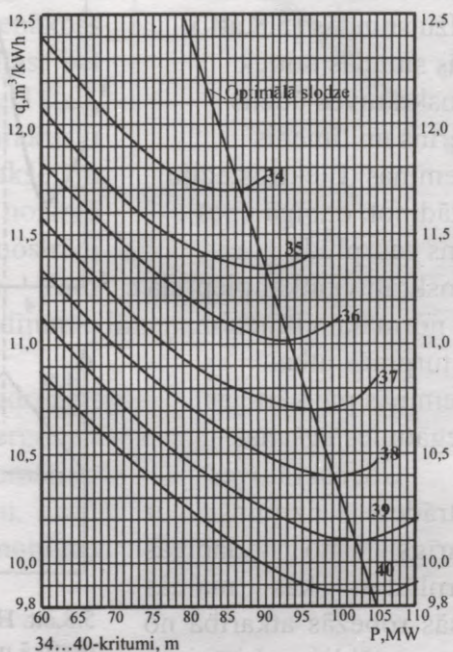
$\eta$  - lietderības koeficients, kas savukārt atkarīgs no krituma un jaudas.

Ūdens

daudzums, kas ir nepieciešams uzdotai jaudai, ir apgriezti proporcionāls kritumam. Ja pie zema krituma nepieciešams liels ūdens daudzums, tad pie augstiem kritumiem nepieciešamais ūdens daudzums var izrādīties neliels.

Turbīnu

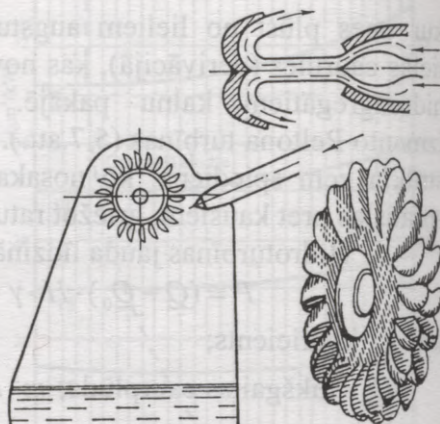
apgriezieni arī atkarīgi no krituma. Visumā hidroturbīnu apgriezieni ir daudz



5.6.att. Frensisa turbīnu raksturlīknes.

mazāki nekā tvaika turbīnām un tas būtiski iespaido elektrisko ģeneratoru konstruktīvās īpatnības.

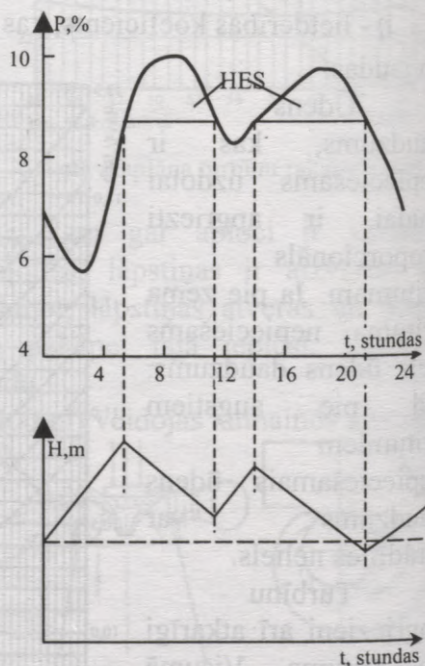
Sakarā ar to, ka zemā un vidējā krituma turbīnu asis ir vertikālas, ģeneratori, kas tiek montēti uz tām, tiek izvietoti horizontālā plaknē.



5.7.att.Peltona turbīna.

Hydroelektrostacija s piedalās slodzes grafika segšanā tikai maksimālo slodžu stundās (5.8.att.). Šajās stundās notiek ūdenskrātuves ūdens patēriņš un līmenis pazeminās. Elektrostaciju apstādinot, dabīgā upes ūdens caurplūde ūdenskrātuvi atkal piepilda līdz normālam līmenim, kas turpmāk atkal pazeminās pie kārtējās agregātu ieslēgšanas.

Ūdenskrātuves nostrādes dziļums ir atkarīgs no dabīgās caurplūdes, kas mainās plašās robežās atkarībā no laika apstākļiem. Lietainos



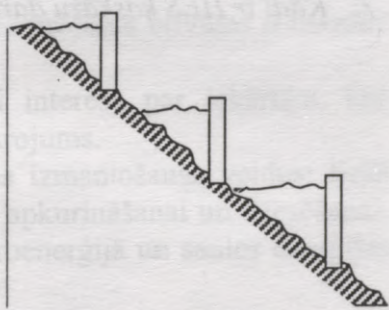
5.8.att. HES izmantošana slodzes grafikā un ūdenskrātuves līmeņa izmaiņa diennaktī.

periodos (cikloni) dabīgā caurplūde pieaug, toties sausā laikā (anticikloni) tā samazinās, pazeminot hidrostaciju efektivitāti.

Līdz ar to hidroelektrostaciju piedalīšanās slodžu segšanā saistīta ar noteiktu ūdenskrātuves līmeņu svārstībām. Šo svārstību ierobežojumi, savukārt, pazemina HES enerģētisko efektivitāti.

Hidroelektrostaciju kaskādi veido vairākas HES, kas izmanto vienas upes ūdens caurplūdi (5.9.att.). Tām var būt dažādi ūdens kritumi, kuri ir atkarīgi no apvidus reljefiem un, tāpat, tām ir dažādas jaudas.

Strādājot augšējām elektrostacijām, ūdens apakšējā bjefā veido plūsmas vilni, kas sasniedz kārtējās HES aizsprostu pēc 1-3 stundām. Elektrostaciju darba sākumu nosaka nevis ūdens, pienākošs no augšējās elektrostācijas, bet slodžu grafika vajadzība. Tātad, tās sāk darboties praktiski vienlaicīgi.



5.9.att. HES kaskāde.

Apakšējām elektrostacijām tas nozīmē augšējā bjefa papildus nostrādi laikā, kad ūdens no augšējās HES vēl nav atnācis. Tam atnākot, ūdenskrātuve tiek papildināta. Arī šinī gadījumā līmeņu svārstības ir kaskādes darbības noteikums.

Ievērojot to, ka hidroagregāti ir viegli un ātri palaižami, tie pat stāvot, atrodas energosistēmas rezervē. Avārijas gadījumos tos palaiž automātiskās iekārtas, kas kontrolē avārijas situācijas sākumu. Tad tie tiek darbināti noteiktu laiku, kas ir nepieciešams, lai mobilizētu ar kurināmo nodrošinātas rezerves jaudas.

## **Jautājumi paškontrolei.**

1. *Upju ūdens enerģētikas resursi. Kāds ir to īpatsvars primārā enerģētikā?*
2. *Kāds ir hidroenerģijas īpatsvars energosistēmu jaudās?*
3. *Kādas hidroturbīnas izmanto atkarībā no ūdens krituma?*
4. *Ar ko atšķiras turbīnas ar regulējamiem darba ratu lāpstu leņķiem no pārējām hidroturbīnām?*
5. *HES vieta slodžu grafikā?*
6. *Ar ko atšķiras HES ūdenskrātuvju režīmi, darbojoties hidroelektrostacijām?*
7. *Kādi ir HES kaskāžu darbības principi?*

## 6. NODAĻA. ALTERNATĪVĀ ENERĢĒTIKA

### 6.1. Saules enerģētika.

Saules enerģijas potenciāls ir ārkārtīgi liels. Ja varētu izmantot 0,0125% saules enerģijas, tas pietiktu, lai nodrošinātu pašreizējo pasaules enerģijas patēriņu.

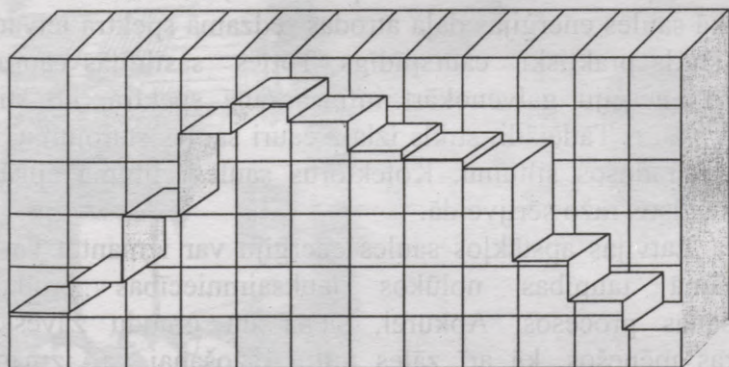
0,5% no saules enerģijas apgādātu zemi ar visu nepieciešamo enerģiju perspektīvā. Diemžēl šos milzīgos potenciālos resursus neizdodas realizēt lielos mērogos. Viens no galvenajiem šķēršļiem ir saules starojuma zemā intensitāte. Pilnīgi skaidrā laikā vasarā saules starojuma blīvums ir mazāks par  $250 \text{ W/m}^2$ .

Pēdējā laikā ir pieaugusi interese par iekārtām, kur enerģijas avots ir tiešais saules starojums.

Izšķir trīs saules enerģijas izmantošanas veidus: tiešā saules enerģijas izmantošana ēku apkurināšanai un dzesēšanai, saules enerģijas pārvēršana elektroenerģijā un saules enerģijas akumulēšana augos.

Līdz 1970. gadam galvenokārt izmantoja saules

$\text{kWh/m}^2$  dienā



mēneši

6.1.att. Saules enerģijas līmeņi dažādos mēnešos.

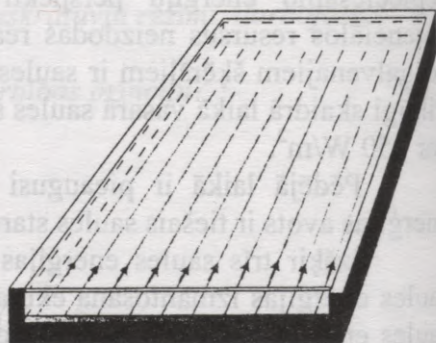
enerģiju, kas akumulēta augos, sadedzinot malku un koksni.

Kaut gan maksimāla enerģijas vajadzība ir aukstā gada laikā, tomēr arī vasaras saules starojuma izmantošana ir noderīga un spēj dot kurināmā ekonomiju (6.1.att.).

Par saules starojuma izmantošanu sāk domāt jau, uzsākot ēku projektēšanu. Celtnes cenšas izvietot tā, lai tiešie saules stari spētu to sasildīt. Šinī gadījumā paredz pasīvu saules enerģijas izmantošanu.

Iespējama aktīvā saules enerģijas pārvēršana siltumā ar saules kolektoru palīdzību (6.2.att.). To izmanto siltā ūdens apgādē.

Visvienkāršākais saules kolektors ir kaste ar vāji siltumu vadošām sienām. Kastē novietotas caurules, pa kurām plūst ūdens. Labākai saules starojuma uztverei caurules un kastes iekšpuse nokrāsota melnā



6.2.att. Saules kolektors

krāsā. Kastes siena, kura vērsta pret Sauli, izveidota no stikla. Lielākā saules enerģijas daļa atrodas redzamā spektra ietvaros, kam stikls praktiski caurspīdīgs. Toties sasildītās caurules izstaro enerģiju galvenokārt infrasarkanā spektrā, ko stikls daļēji aiztur. Tādējādi, stikls izlaiž cauri saules starojumu, bet saglabā radušos siltumu. Kolektorus saules siltuma apgādei dažās valstīs ražo sērijveidā.

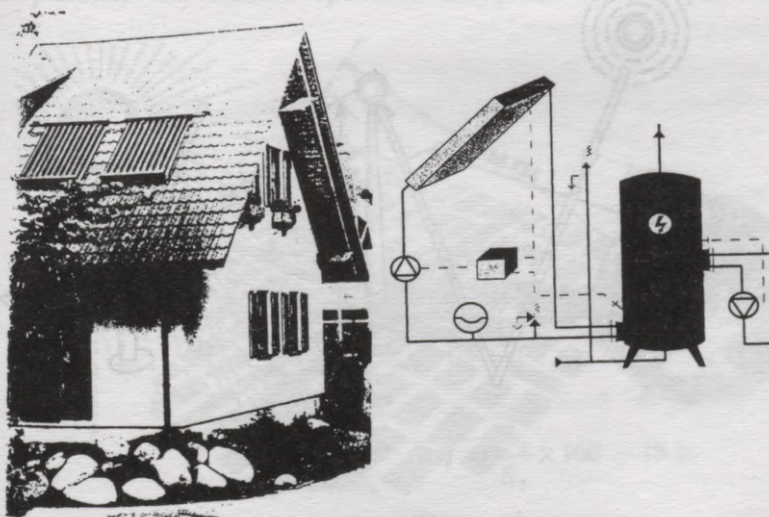
Latvijas apstākļos saules enerģiju var izmantot vasarā kurināmā taupības nolūkos lauksaimniecības produktu žāvēšanas procesos. Apkurei, siena un graudu žāvēšanai vasaras mēnešos, kā arī zāles miltu ražošanai var izmantot plakanos saules kolektorus.

Ar saules kolektoriem vasaras mēnešos paātrina siena žāvēšanu par 40 - 50%. Paaugstina lopbarības uzglabāšanas spējas par 10 - 12%. Elektroenerģijas patēriņu samazina par 35 - 50 kW·h uz 1 t. Žāvējot 100 tūkst. t siena, var ietaupīt 10 milj. kW·h, žāvējot tikpat lielu graudu daudzumu, var ietaupīt 3,5 - 4 milj. kW·h. Kurināmā ietaupījums var sasniegt 0,4 - 0,5 t nosacītā kurināmā uz 1 t izzāvētas produkcijas.

Saules kolektorus izmanto visā pasaulē. Amerikas Savienotajās Valstīs ekspluatē 3 milj. saules kolektoru, Vācijā - 10 tūkst., Polijā - simti saules kolektori.

Ar saules stariem sasildīta ūdens temperatūra sasniedz 40 - 55°C. Tāpēc saules kolektori lietojami tur, kur tos var izmantot siltā ūdens apgādē. Telpu apkurei aukstā laikā tie praktiski nav izmantojami, jo nepieciešamā 50 - 70°C temperatūra šinī laikā nav sasniedzama. Kolektoriem jābūt ieslēgtiem slēgtā sistēmā ar boileru, kur ūdens var tikt uzsildīts arī ar katla palīdzību (6.3.att.).

Kolektori silda ūdeni ne tikai tiešos saules staros, bet arī



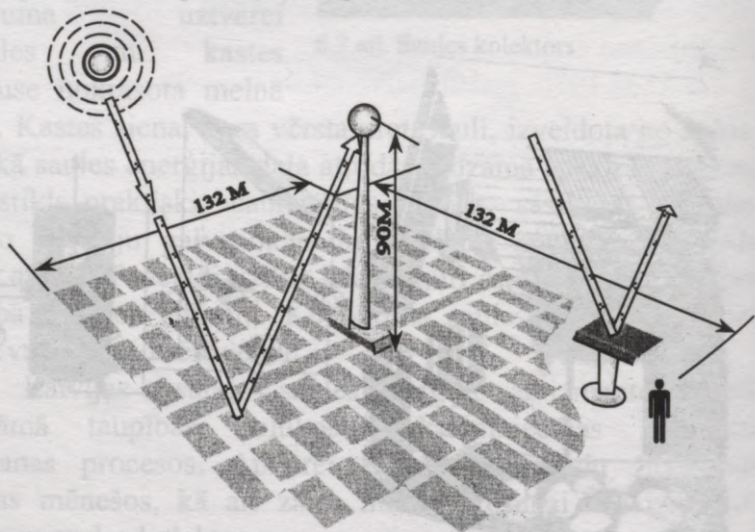
6.3.att. Saules kolektors uz mājas jumta.

apmākušās dienās difūzā gaismā.

Kolektora izmēriem jābūt pietiekamiem siltā ūdens apgādei. Rēķinot 60 litrus 35 - 45°C siltā ūdens uz cilvēku, savrupmājai jāparedz 6 - 8 m<sup>2</sup> kolektoru platība (1,5 - 2 m<sup>2</sup> personai). Tos novieto uz stāva jumta zem 45° pret dienvidiem vai dienvidrietumiem. Daudzu gadu pieredze rāda, ka šāda sistēma nodrošina 80% siltā ūdens patēriņu vasaras mēnešos.

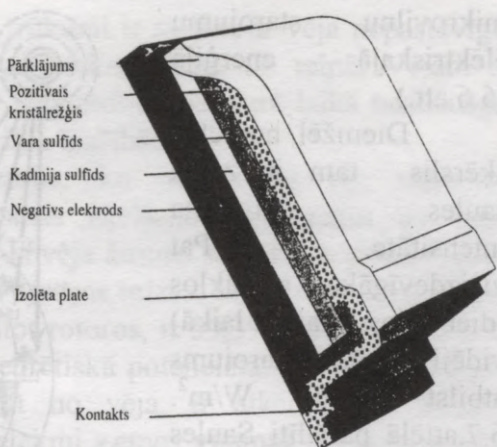
Dienvidu zemēs izmanto tiešu saules enerģijas pārveidošanu elektroenerģijā. Eksploatē saules elektrostacijas, kur saules starojumu koncentrē ar spoguļu koncentratoriem uz tvaika katlu, kas novietots tornī (6.4.att.). Koncentratori seko Saulei, pateicoties automātiskai vadīšanai. Tvaika katlā var sasniegt augstu temperatūru, kas dod iespēju iegūt enerģiju ne tikai tvaika veidā, bet arī transformēt enerģiju ar termokīmisku procesu.

Iegūst enerģiju arī ar saules baterijām, kur saules starojuma iespaidā veidojas elektriskā enerģija (6.5.att.). Šādu bateriju lietderība pašreiz ir ap 10%, bet vērtē, ka tas var



6.4.att. Saules enerģijas spoguļelektrostacija.

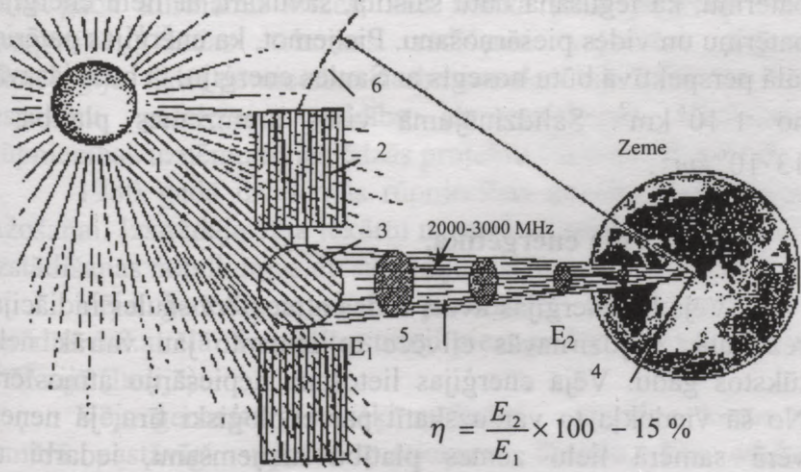
sasniegt 20%. Šādas enerģijas kW·h varētu izmaksāt ap 0,30 Ls. Tāpēc to lieto vietās, kur nav pieejama elektroenerģija no elektriskajiem tīkliem. Dienviņu zemēs tās kopā ar akumulatoru izmanto ārējam apgaismojumam.



6.5.att. Saules baterija

Tiek veikti pētījumi arī tādu elektrisko staciju radīšanā, kur enerģiju iegūst no tā saucamajiem "saules baseiniem", lietojot sāls šķīdumu.

Teorētiski iespējama kosmiskās saules elektrostacijas. No tām elektroenerģiju var raidīt uz Zemi mikroviļņu diapazonā. Uz Zemes speciāla uztverošā antena pārveidotu



6.6.att. Kosmiskā elektrostacija.

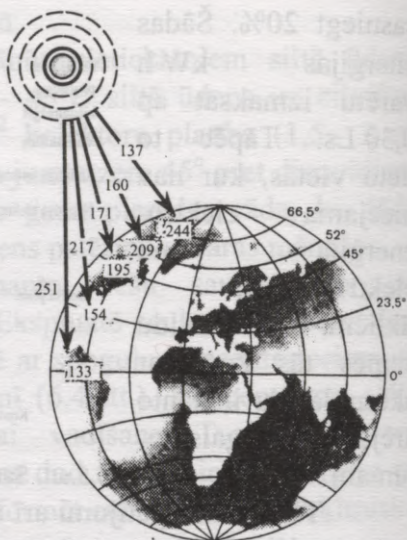
mikroviļņu starojumu elektriskajā enerģijā (6.6.att.).

Diemžēl, nopietns šķērslis tam ir zema saules starojuma intensitāte.

Pat visizdevīgākajos apstākļos (dienvidos, skaidrā laikā) vidēji gadā starojums atbilst  $250 \text{ W/m}^2$ .

6.7.attēlā parādīti Saules starojuma blīvumi ( $\text{W/m}^2$ ) dažādās Zemes joslās. To platība ( $10^2 \cdot \text{km}^2$ ) apzīmēta rāmīšos caurspīdīgas

atmosfēras apstākļiem. 1Q iegūšanai Saules kolektoriem būtu jānoklāj  $130\,000 \text{ km}^2$  platība. Tas izraisītu milzīgu materiālu patēriņu, kā iegūšana būtu saistīta, savukārt, ar lielu enerģijas patēriņu un vides piesārņošanu. Pieņemot, ka enerģijas patēriņš tālā perspektīvā būtu nosegts ar Saules enerģiju, tā būtu jāsavāc no  $1 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ . Salīdzinājumā visas aramzemes platība ir  $13 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ .



6.7.att. Saules enerģijas blīvums dažādos zemes lodes platumos pie skaidrām debesīm attiecinātās uz  $1000 \text{ km}^2$ .

## 6.2. Vēja enerģētika.

Vējš kā enerģijas avots rodas atmosfērā saules radiācijas rezultātā. Vējdzirnāvās cilvēce to izmanto jau vairāk nekā tūkstoš gadu. Vēja enerģijas lietošana nepiesārņo atmosfēru. No šā viedokļa to var uzskatīt par ekoloģiski tīru, ja neņem vērā samērā lielu zemes platību aizņemšanu, iedarbi uz putniem un kaitīgu infraskaņu radīšanu.

Vēja enerģētikas trūkumi ir saistīti ar vēja nepastāvīgo raksturu un nevienmērīgo izkliedi laikā un telpā. Vējam ir varbūtējs raksturs, un tā izmantošana jebkurā laikā neatkarīga no enerģētiskā patēriņa cikla īpašībām.

Enerģijas daudzums, ko var iegūt no vēja, ir proporcionāls vēja plūsmas šķelšanas laukumam un vēja ātrumam trešajā pakāpē. Ja vēja ātrums samazinās divas reizes, tad enerģijas daudzums - astoņas reizes. Maksimālais enerģijas daudzums, ko var izmantot rotoros, ir 59,3%. Mūsdienu rotoru izlieto tikai 70% no šī teorētiskā potenciāla. Reālais enerģijas daudzums, ko var iegūt no vēja, ir atkarīgs no ātruma gradienta, uz ko atstāj ietekmi zemes virsmas raksturs, rotora aerodinamiskā efektivitāte, atskaitot zudumus no berzes reduktorā. Ļoti svarīgi ir atrast vislabāko vietu vēja dzinēju uzstādīšanai. Šim nolūkam kalpo meteoroloģiskie novērojumi, kas vākti vairākus gadus dažādos augstumos. Pieredze rāda, ka vēja dzinēja uzstādīšanai vispiemērotākie ir gludi pakalni, ja tos ietver brīvs laukums 5 - 6 km rādiusā, vai jūras šelfs.

Vēja enerģētika pasaulē sāka strauji attīstīties kopš 1973. gada kurināmā krīzes, kad notika plaši pētījumi vēja enerģētikā. Šādas tehnikas radīšanai vajadzīga augsta tehnoloģija, tādēļ pētniecības darbu izmaksa bija liela. Tie bija iespējami, pateicoties valdību ekonomiskajam atbalstam. Rūpniecības uzņēmumi ieslēdzās projektu realizācijas posmā.

1980. gadā izveidojās rūpniecības nozare vēja turbīnu ražošanai. Izstrādāja vēja iekārtu normas un sertifikāciju, kā arī uzstādīšanas noteikumus un subsīdiu sistēmas.

Vēja ģeneratoru skaits pieaugums laikā pasaulē ir parādīts 6.8.attēlā. To skaits strauji pieauga Eiropā (Vācijā) un arī Āzijā (Indijā).

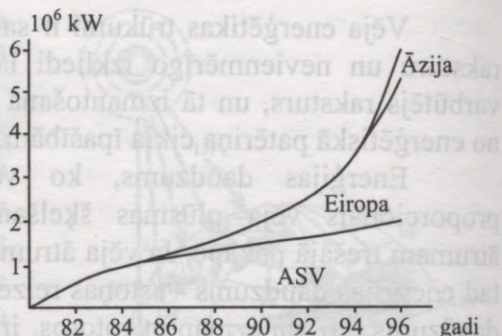
Vēja ģenerators sevišķi noderīgs apvidos, kuros ir samērā pastāvīgi vēji ar pietiekamu ātrumu, kas atbilst piekrastes zonām un kalnu rajoniem. Vēja energoiekārtas

izmanto arī attālos rajonos, kuros nav centralizētas energoapgādes.

Rotoram jābūt tādām, lai vējš, atduroties pret to, atdotu daļu savas kinētiskās enerģijas, ko pievada elektrogeneratoram.

Rotori ir ar vertikālo un horizontālo vārpstu. Tie savukārt mēdz būt lāpstu (propelleru), spirāles (gliemeža jeb S veida), lāpstu un kausu (ķēdes) konstrukcijas. Visizplatītākie ir propellera tipa rotoru. Nesapratni bieži rada tas, ka vēja spēks rodas divu faktoru - spiediena un nosūkšanas rezultātā. Piemēram, uzskata, ka buru laivu dzen gaisa plūsmas spiediens, bet patiesībā laivu virza uz priekšu arī gaisa nosūkšana no buras virsmas. Tāpēc lāpstu formai jābūt tādai, lai nosūkšana radītu rotora griešanos.

Vēja dzinēja efektivitāte ir atkarīga no tā, cik pilnīgi izdodas izmantot šo spiedienu starpību. Lāpstu rotora aerodinamisko efektivitāti raksturo attiecība starp rotora griešanās ātrumu un vēja ātrumu: attiecības 1:1 un 3:1 ir raksturīgas lēniem daudzlāpstu rotoru, ko izmanto ūdens sūkņšanai, bet attiecība 5:8 ir vēlams rotoram elektroenerģijas ražošanai. Jo lielāka šī attiecība, jo lielāks ir lāpstu griešanās ātrums. Savukārt, jo lielāks ir ātrums, jo vienkāršāka pārvade no propellera uz ģeneratoru. Moderniem vēja dzinējiem ir trīs vai divu lāpstu rotoru (6.9.att.). Trīslāpstu rotorus izmanto rajonos, kur vēja ātrums mazāks. Tas ļauj iegūt lielāku enerģijas daudzumu. Rajonos, kur vēja ātrumi ir lieli, mērķtiecīgāk lietot rotorus ar divām lāpstām.



6.8.att. Vēja agregātu summārā jauda pasaulē.

Trīslāpstu rotori strādā vienmērīgāk. Divlāpstu rotori ir jābalansē, un tie jānodrošina pret vibrācijām. Lielākā daļa šo vēja ģeneratoru strādā no pretvēja, tāpēc tiem ir ierīces, kas tos orientē pret vēju.

Lāpstu izgatavošanas materiāliem jābūt viegliem un izturīgiem arī pret laika apstākļiem. Tādēļ lieto koku, tēraudu, alumīniju, plastikātu, stiklaplastu.

Spirāles (gliemežveida) rotori ir ar vertikālu asi. Piemēram, bļodiņu anemometrs, kas griežas horizontālajā plaknē un kura kustības virziens sakrīt ar vēja virzienu. No spirāles tipa dzinējiem visbiežāk lieto S veida rotoru, kas sastāv no diviem puscilindriem. Puscilindri ir nostādīti vienādā attālumā no ass tā, lai vējš var brīvi iekļūt izveidotajās spraugās. Gaiss, atsitoties pret vienu no virsmām, izmaina virzienu un atsitās pret citu, piespiežot rotoru griezties. Var uzstādīt vairākus šādus rotorus uz vienas ass tā, lai attiecībā pret iepriekšējo katrs nākamais ir pagriezts par  $60^\circ$  leņķī. Tas nodrošina iekārtas augstāku efektivitāti. S veida rotoram iegūtais lietderības koeficients ir 39%, kas ir apmēram puse no lāpstu rotoru jaudas. Lāpstu rotori zaudē daudz enerģijas, izmainoties vēja virzienam, bet S veida rotoriem nav šāda trūkuma. S veida rotori nav jāorientē pret vēju. Tie visu



6.9.att. Ainažu vēja ģenerators .

vēja enerģiju kWh/m<sup>2</sup>  
uzņem uzreiz.  
Šādi rotoru ir arī  
vienkāršāk  
izgatavojami,  
tiem nav jābūt  
tik  
aerodinamiskie  $\eta$   
kā lāpstu  
rotoriem.

Maksim  
ālais S veida  
rotora griešanās  
ātrums ir

vienāds ar vēja ātrumu. Tāpēc, pievadot enerģiju ģeneratoram, nepieciešamas griešanās ātruma palielināšanas ierīces.

Balstu galvenā prasība ir tā, lai konstrukcijas būtu pietiekami augstas un noturīgas, jo tām jāiztur liels vēja spiediens un rotora griešanās vibrācijas.

Jo augstāks balsts, jo lielākam spiedienam tas jāaprēķina. Līdzienā reljefā vēja ātrums, pieaugot augstumam, palielinās pēc likuma

$$V_h = V_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha,$$

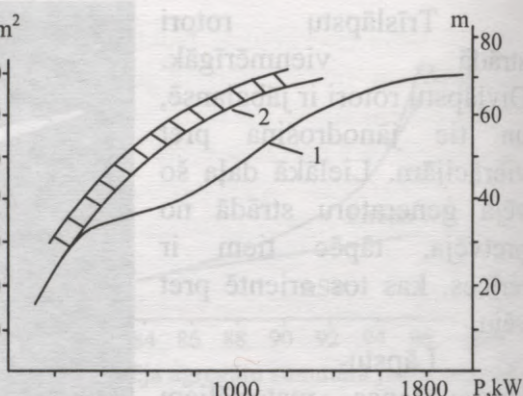
kur  $V_h$  - vidējais vēja ātrums augstumā  $h$ ;

$V_0$  - vidējais vēja ātrums novērošanas augstumā  $h_0$ ;

$h_0$  - novērošanas augstums;

$\alpha=0,28-0,40$  - koeficients, kas ievēro apvidu.

Balsta konstrukcija parasti var būt caurules vai masta veidā. Balstam jābūt ar minimālu virsmu. Jo mazāka virsma, jo mazāki būs plūsmas zudumi, mazāks turbulences un konstrukcijas sūcošais efekts. Tas ir īpaši svarīgi rotoriem ar



6.10.att. Vēja agregātu efektivitātes (1kWh uz vēja plūsmas šķēluma m<sup>2</sup>), turbīnu lāpstu un torņu garumi 2 atkarībā no agregātu jaudas.

aizmugures vēja plūsmu. Agregāts jāuzstāda ne zemāk par 9 m no Zemes un ne mazāk par 3 m virs šķēršļiem, kas atrodas 150 m rādiusā. Svarīgākais vēja iekārtas elements ir jaudas regulēšana. Kā zināms, eksistē divi regulēšanas veidi. Pirmais tiek realizēts, regulējot lāpstas lenķi attiecībā pret vēja plūsmu ("pitch"), kas sarežģī iekārtu un mazina tās drošumu.

Otrā metode "stall" – regulēšana paredz lāpstas ar mainīgu profilu, kurā pie dažādiem vējiem optimāli darbojas lāpstas daļa. Šinī gadījumā iekārta ir vienkāršāka, bet efektivitāte – daļēja.

Iekārtu efektivitāti raksturo enerģijas izstrāde, attiecināta uz darba rata šķēluma platību,  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ , kas parādīts 6.10.attēlā. Efektivitāte aug lielākas jaudas agregātiem, kas nosaka tehnikas attīstības tendenci. Darba ratu diametrs un torņu augstumi atkarībā no jaudas aug no 15/18 m – 50-100kW līdz 80/90m 1000kW agregātiem. Šādu agregātu balstos ir paredzētas iespējas personālam viegli piekļūt regulēšanas un ekspluatācijas darbiem.

Samērā sarežģīti ir vēja agregātu regulēšanas mehānismi. Tie jāaizsargā no stipriem vējiem, brāzmām un vētrām. Jābūt iespējai lāpstas novietot tādā stāvoklī, lai vējš atdurtos pret lāpstu galiem. Lāpstu tādējādi nostāda, pagriežot to ap savu asi vai novirzot no ass pa vītņi. Šie mehānismi var būt centrālās vai atsperu regulatori. Ja izmanto vītnes mehānismu, tad lāpstas kustība notiek centrālās spēku darbības rezultātā. Ja lieto atsperu mehānismu, atsperes jāaprēķina uz spēku, kas vienāds ar centrālās spēku vērtību kritiskam vēja ātrumam. Lāpstu pagriešanās notiek no vēja spiediena uz lāpstu virsmām. Lāpstu atgriešana neitrālā stāvoklī jāizdara sinhroni ar īpašu mehānismu, lai novērstu bīstamu vibrāciju rašanos.

Generatoru ar rotoru sajūdz caur paaugstinošo reduktoru, kas nodrošina nepieciešamo generatora griešanās ātrumu.

Pirmo vietu pasaulē vēja elektrostaciju ražošanā ieņēma Dānija un Vācija.

Energoapgādes kompānijas, kas izmanto vēja elektrostacijas, izvirza tām noteiktas prasības:

- elektroenerģijai, ko ražo vēja elektrostacijas, ir jābūt pietiekami lētai, lai tā varētu konkurēt ar tradicionālās elektrostacijās ražoto enerģiju;
- vēja elektrostaciju kalpošanas ilgumam ir jābūt ne mazākam kā 15 - 30 gadi (tas vēl nav sasniegts);
- vēja elektrostacijām ir jā saglabā darbaspēja jebkuros klimatiskos apstākļos, arī apledojumā, un tām jābūt viegli apkalpojamām;
- vēja elektrostacijas nedrīkst negatīvi iedarboties uz apkārtējo vidi (ainavas bojājumi, televīzijas pārraižu traucējumi, troksnis, putnu bojāeja).

Vislielākā vēja ģeneratoru jauda uzstādīta Amerikas Savienotajās Valstīs - Kalifornijā. Ģeneratorus novieto lielās grupās, izveidojot tā saucamās vēja fermas. Tajā pašā laikā Amerikas Savienoto Valstu austrumu piekrastē vairākas vēja fermas ir likvidētas to sliktās iedarbības dēļ uz apkārtējo vidi.

Līdz 90. gadiem lielāka vēja ģeneratoru jauda bija ASV Kalifornijā (1528 kW), 1995.g. pirmā vietā ir Eiropa (3345 MW), kur līdera lomā – Vācija (1576 MW). Šie lielumi vēl neliecina par vēja ģeneratoru nozīmīgumu enerģētiskā bilancē, bet tie liecina, ka vēja enerģētika sasniedza rūpnieciskā brieduma stadiju.

Vēja ģeneratoru ieviešanu sekmēja ar valstu atbalstiem. Pašreiz Amerikas Savienotajās Valstīs uzstādīti 17 tūkstoši vēja elektrostacijas ar kopjaudu 1800 MW, kas izstrādā 2,2 mljrd. kW·h gadā. Tas ir 0,66% no elektroenerģijas patēriņa Amerikas Savienotajās Valstīs. Dānijā 1990. gadā vēja elektrostacijās uzstādītā jauda sasniedza 785 tūkst. kW, un tās izstrādāja 515 milj. kW·h elektroenerģijas vai 5% no patēriņa.

Izskata iespēju elektrostaciju izvietošanai jūras šelfā. Jūrā vēja ātrums ir lielāks, un elektrostacijas neaizņem sauszemes platības. Protams, uzstādīšanas izmaksa ir lielāka. Iesākti darbi vēja elektrostaciju izmantošanai Anglijā, Vācijā, Beļģijā, Spānijā, Portugālē un Kanādā. Sakarā ar lielām izmaksām šos darbus galvenokārt veic augsti attīstītās zemēs, kas šādus izdevumus var atļauties.

Priekšstatu par 1 kW uzstādītās jaudas izmaksām dažāda tipa elektrostacijās dod 6.1. tabula.

6.1. tabula

*Uzstādītās jaudas izmaksa dažādu tipu elektrostacijās*

Elektrostaciju tips	Izmaksa, dolāri / kW
1. Atomelektrostacija	2250
2. Akmeņogļu elektrostacija	800 - 1300
3. Tvaika-gāzes elektrostacija ar gāzes kurināmo	450 - 500
4. Hidroelektrostacija	800 - 1500
5. Saules elektrostacija	1500 - 3000
6. Vēja elektrostacija	1200 - 2600
7. Okeāna siltuma gradienta izmantošanas elektrostacija	2200 - 2800

Vēja ģeneratora izstrādei pieņemta šāda vēja ātrumu gradācija: 5 - 8 m/s - mērens vējš, virs 14 - stiprs vējš, 20 - 25 - vētra, virs 30 - viesulis.

ASV uzskata, ka vēja ģeneratorus varētu uzstādīt vietās, kur vidējie vēji sasniedz 10m/sek.

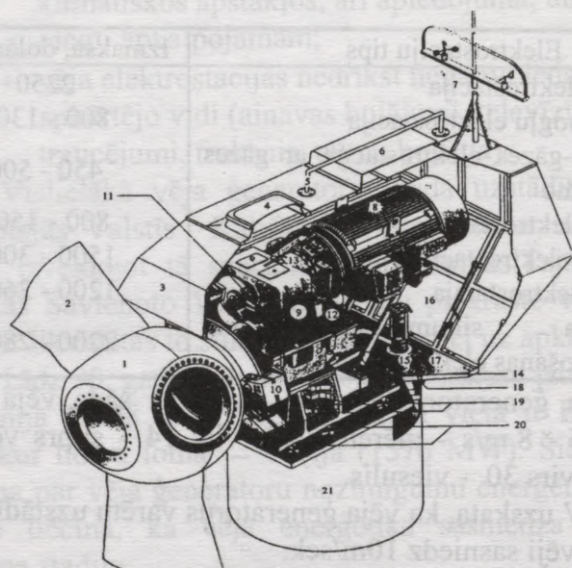
Vidējais vēja ģeneratoru izmantošanas koeficients ir 0,2. Tas ir saistīts ar vēju ātrumu izmaiņām.

Latvijā vidēja ātruma vēji 6 m/s novērojami Kurzemes piekrastē un Ainažu apkārtnē. Pārējos Latvijas rajonos vēja ātrumi ir mazāki par 5 m/s.

Pašreiz Ainažu rajonā uzstādīti divi vēja agregāti 600 kW katrs.

Rotora diametrs ir 43 m. Torņa augstums - 50 m. Vēja lāpstu galu lineārais ātrums 40 m/s. Gondolas skaņas izolācija izraisa skaņas intensitāti līdz 98,6 Db. Vēja ģenerators darba procesā atrodas smagos apstākļos. Tāpēc tā izgatavošanai nepieciešama augsta tehnoloģija. Vēja brāzmas rada triecienslodzes un lielas vibrācijas. Vētru gadījumos agregāts jāatslēdz, pagriežot rotora lāpstas perpendikulāri vējam, lai novērstu bojājumus. Agregāta drošību panāk ar četrām neatkarīgām bremzēm, kuras aptver bremzes disku (6.11.att.).

Neliela vēja laikā agregātu iegriež, ieslēdzot ģeneratoru tīklā kā dzinēju, jo to palaižot, ir nepieciešams palielināt



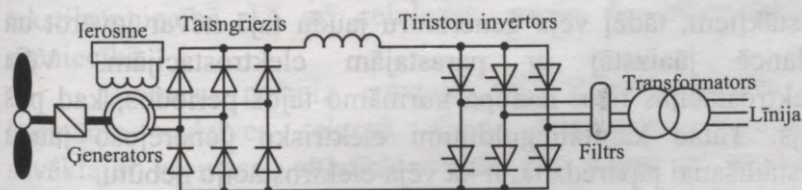
6.11.att. Vēja agregāta iekārta.

1 - rotora bukse; 2 - rotora lāpsta; 3 - apvalks ar skaņas izolāciju; 4 - jumta lūka; 5 - drošības marga; 6 - ventilācijas pārsegs; 7 - zibensnovēdējs; 8 - ģenerators; 9 - ātrumkārbja; 10 - bremze; 11 - sekundārā bremze; 12 - hidrauliskais agregāts; 13 - elastīgs slīdes sajūgs; 14 - ģeneratora balsts; 15 - pagrieziņa darbinātājs; 16 - apkalpošanas lūka; 17 - pamata plate; 18 - ložu savienojuma sistēma; 19 - pagrieziņa bremze; 20 - pretvibrāciju balsti; 21 - tornis.

griezmes moments, ko neattīsta neliels vējš. Iekārta prasa rūpīgu apkalpošanu un tai jāiztur ilgstoša ekspluatācija.

Vēja agregātu drošums vēl nav pietiekoši liels. Vidēji novēro 0,3 apstādīnāšanas vajadzības uz vienu agregātu. Bet atsevišķi elementu sagrāve notiek tikai 1,5% gadījumos uz agregātu. Visbiežāk iziet no darba vadības sistēma 7,7% gadījumos, turbīnas orientācijas mehānisms-4,2%, ģenerators – 3%. Zaudējumi, saistīti ar apturēšanām, nav lieli sakarā ar to, ka agregātu jauda nav liela.

Vēja agregāti var būt ar pastāvīgu un mainīgu ģenerators griešanas ātrumu. Vadīšanā vienkāršāks ir agregāts ar mainīgo ātrumu. Šinī gadījumā ātrumu nosaka vējš. Ģenerators maiņspriegums šinī gadījumā tiek iztaisnots (6.12.att.) un ar invertora palīdzību pārvērsts pastāvīgās frekvences maiņspriegumā. Taisngriezi izmanto parastos ventiļus, toties invertorā – tiristorus vai bipolāros tranzistorus (IGBT).



6.12.att. Sinhronais ģenerators un tiristoru invertors.

Labi izprojektēto un pareizās vietās uzstādīto vēja agregātu elektroenerģijas pašizmaksa ir samazinājusies līdz 3cent/kW\*h., kas liecina, ka vēja enerģija kļūst pieņemama no ekonomiskā viedokļa.

Elektroenerģijas patēriņam ir ciklisks raksturs. Naktī tautsaimniecība patērē maz, jo šajā laikā darbojas tikai trīsmaiņu uzņēmumi un gadījuma rakstura patērētāji. No rīta patēriņš strauji aug un apmēram pulksten deviņos sasniedz maksimālu lielumu. Dienā, dabiskās gaismas periodā, elektrības patēriņš samazinās, bet vakarā, pēc saules rieta, atkal

pieaug. Šie cikliskie patēriņi ir jānodrošina ar enerģētiskās iekārtas darbu. Tā, piemēram, naktī ir jāatslēdz enerģētiskie katli un turbīnas. Tuvojoties rītam, tie atkal jāiedarbina, lai nodrošinātu rīta patēriņu utt.

Hidroelektrostacijas ir uzbūvētas ūdens uzkrāšanai minimālo slodžu stundās un tā izlietošanai maksimālo slodžu segšanai. Pārējā laikā hidroelektrostacijas stāv, krājot ūdeni kārtējam īslaicīgam darbam.

Apskatot alternatīvās enerģijas avotus, ir jānovērtē to nozīme enerģijas bilancē.

Vēja enerģijas avoti nevar strādāt saskaņā ar enerģijas patēriņa ciklu. Tie ieslēdzas darbā, rodoties vējam, neatkarīgi no tā, kādā periodā tas notiek. Vējainā laikā vēja ģeneratori, strādājot elektriskajā tīklā, daļēji aizvieto siltuma elektrostacijas. Periodos, kad vēja nav vai tas ir nepietiekami liels, lai darbotos vēja ģenerators, elektroenerģijas patēriņu sedz elektrostacijas. Elektrisko jaudu bilanci sastāda sliktākiem apstākļiem, tādēļ vēja ģeneratoru jaudu tajā nevar ievērot un bilancē jāaizstāj ar parastajām elektrostacijām. Vēja elektrostacijas tikai ietaupa kurināmo tajos periodos, kad pūš vējš. Tāpat kapitālieguldījumi elektrisko ģenerējošo jaudu uzstādīšanai jāparedz tā, it kā vēja elektrostaciju nebūtu.

Jūras viļņu enerģijas avoti tāpat ir saistīti ar vēju. Ekonomiskā nozīme tiem nākotnē ir okeāna rajonos, kur pūš pastāvīgi vēji.

Paisuma un bēguma elektrostacijas ir iespējams izveidot okeāna krastos, norobežojot okeāna līčus vai fjordu veidojumus. Šie enerģijas avoti prasa samērā lielus kapitālieguldījumus, un to darbības cikls saistīts ar Mēness pievilkšanas spēku cikliem, nevis ar enerģijas patēriņa cikliem. Arī uz tiem attiecas apsvērumi par enerģijas avotu rezervēšanu.

Geotermālās enerģijas potenciāls ir samērā ierobežots, un tā izmantošana plašos apmēros iespējama tikai atsevišķos

lokālos rajonos. Šīs enerģijas izmantošanu apgrūtina dziļas ūdenos izšķīdušie sāļi, gāzveida dzīvsudraba savienojumi, sērūdeņradis, amonjaks, kā arī radioaktīvie elementi. Šīs vielas, nonākot virs Zemes, radīs bīstamību apkārtējai videi, kuras likvidācijai vēl ir jāizstrādā tehniskie pasākumi.

Lai panāktu elektroenerģijas izmaksu samazināšanu, jāturpina zinātniskais darbs un tehnoloģiju izpēte.

### 6.3. Biomasas enerģētika.

Katru gadu atjaunojošās biomasas uz Zemes virsas vērtējama 200 mljrd. t. Tās enerģētiskais potenciāls pārsniedz izrakteņu kurināmo 10 reizes, bet to ir grūti izmantot enerģētiskām vajadzībām, jo tā izkaisīta Zemes virsū, grūti sagatavojama izlietošanai un lielā mērā ir saudzējama, vadoties no ekoloģiskiem apsvērumiem. Biomasu, ko iegūst lauksaimniecībā, lieto galvenokārt kā uzturproduktus un tekstilrūpniecībā, kā arī celulozes, papīra un būvmateriālu rūpniecībā.

Biomasu pašreiz izmanto vāji attīstītās zemēs kā kurināmo sadzīves sektorā. Cenu diapazons centralizēti savāktajai biomasai attīstītās zemēs par tonnu ir: malkai - 18-50 dolāri, salmiem - 25-35 dolāri, mēsliem - 10-25 dolāri, kokvilnas atkritumiem - 5-15 dolāri, rēķinot sausā masā. Salīdzinājumā ar kurināmā izrakteņiem biomasu raksturo zema siltumspēja. Tās īpatnējā siltumatdeve svaigi cirstai koksnei ir 2,9 kWh/kg, sausai koksnei - 4,28, kartonam - 4,39, salmiem - 9,48, tajā laikā mazutam - 11,73 kWh/kg, akmeņoglēm - 6,54-9,39, dabiskai sašķidrinātai gāzei - 14,33.

Biomasu iedala trīs grupās. Pirmajai grupai pieder augi, kurus audzē speciāli enerģētiskām vajadzībām, piemēram, vītolu un papeļu sugas. Par perspektīviem uzskata topinambūru un saldo sorgo. Otrajai grupai pieskaitāmi dažādi atkritumi:

lopkopības mēsli, salmi, mežrūpniecības un pilsētu sadzīves atkritumi. Trešo grupu veido ūdensaugi.

Attīstītās valstīs biomasas izmantošana kurināmā vajadzībām vienlaikus kalpo ekoloģiskās situācijas uzlabošanai. Kurināmo parasti sagatavo brikešu vai granulu veidā. Briketēm izmanto primārās un sekundārās apstrādes, kā arī meža cirsmu atkritumus.

Pēdējā laikā arvien vairāk sāk ražot biokurināmo transportam valstīs, kam nav pašām savu naftas resursu. Šim nolūkam izmanto etanolu un biodīzeļdegvielu. Plaši pazīstama ir Brazīlijas prakse, kur etanolu piejauc benzīnam noteiktā proporcijā. Bioetanola ražošana ir iespējama visur. Tas mazina kurināmā atkarību, nodrošina papildus darba vietas un dod iespēju iegūt dažādus derīgus blakusproduktus.

Etanols kā motoru kurināmais, kur uz vienu oglekļa atomu ir trīs ūdeņraža atomi, var kļūt par efektīvu ūdeņraža iegūšanas avotu, ko varēs izmantot kurināmā elementos (2.21.att.), kur ūdeņradis kopā ar gaisa skābekli tiek izmantots elektriskās strāvas ražošanai. Kurināmā elementu baterijas varēs izmantot elektroautomobiļos, ar ko jau eksperimentē pazīstamas autokompānijas.

Biodīzeļdegvielu ražo no taukvielām, galvenokārt no augu eļļām, tos apstrādājot ar etanolu vai metanolu. Pasaulē biodīzeļa izmantošana ieņem arvien redzamāku vietu dīzeļdegvielas ražošanā un jau sasniedz 700 tūkstoši tonnu gadā. Šāda ražošanas programma ir Spānijā. Vācijā benzīna uzpildes stacijās jau ir atsevišķas tvertnes ar uzrakstu "Biodiesel".

Biodīzeļdegvielas iegūst galvenokārt no sojas, rapšu, saulespuķu eļļas un pārtikai nederīgiem taukiem, zivju eļļas. Spānijā, Vācijā, Itālijā to iegūst no rapšu eļļas un metanola.

Latvijas apstākļos no 1 ha rapšu sējuma var iegūt 1 t biodīzeļdegvielas. Tā kā rapši ir pilnīgi izmantojami augi,

ražošana ir bezatkritumu tehnoloģiskais process. Eļļu spiežot, rodas spraukumi, kas ir vērtīga piedeva lopbarības raušiem un kā blakusprodukts rodas jēlglicerīns, no kā iegūst tīru glicerīnu, ko izmanto polimēru rūpniecībā. Rapšu ziedi ir bagāti ar nektāru, ko bites labprāt pārvērš medū.

Saskaņā ar Eiropas Kopienas "Baltās grāmatas" lēmumiem, Eiropas valstis līdz 2003. gadam ir apņēmušās apgūt šķidrās biodegvielas ražošanu  $5 \cdot 10^6 t$  apmērā. Tā, piemēram, Spānijā jau iegūst 176 tūkstošus t bioetanola, paredzēts iegūt vēl 126 000 t bioetanola, kas ļautu aizvietot 78% no Spānijā lietotas motoru degvielas.

Projekta ietvaros tiks apgūti 85 tūkst. ha neapstrādāto zemju un laukos radīs 3000 jaunas darba vietas, perspektīvā samazinās atkarību no naftas importa par 200 000 t nosacītas degvielas, pozitīvi ietekmēs nodokļu politiku. Bez tam par 10% samazināsies ogļskābās gāzes un par 5% ogļūdeņražu emisija atmosfērā.

Pēdējā laikā uzsākta koksnes audzēšana enerģētiskām vajadzībām. Tām paredz lietot arī salmus. Piemēram, Francijā potenciāls salmu daudzums ir 25 milj. t gadā. No tiem enerģētiskām vajadzībām varēs izmantot 4-5 milj. t salmu. No salmiem iegūst metānu (anaerobā pārstrāde) vai šķidro kurināmo (hidrolīze). Dānijā ir 20 tūkst. iekārtas salmu izmantošanai kurināmajam.

Sevišķi svarīga ir mazvērtīgo kūtsmēsļu bioloģiskā pārstrāde biogāzē. Šinī procesā vienlaikus iegūst dedzināmu gāzi, ko var izlietot iekšdedzes dzinējos, un palielina kūtsmēsļu kvalitāti. Šis process ir ļoti svarīgs no ekoloģiskā viedokļa. Biogāzes iegūšanu kūtsmēsļu fermentācijas rezultātā sevišķi lieto Francijā, kur ir vairāk nekā 1000 fermentācijas iekārtu. Biogāzi izmanto saimniecības patēriņa vajadzībām. Izdevumi iekārtu izbūvei fermās ar 50 govīm, 500 cūkām, 4000 mājputniem ir 200-250 tūkst. franku. Atmaksāšanās laiks - 10

gadi. Iekārtām ar 500 tūkst. franku izmaksu fermentatora apjoms ir  $100 \text{ m}^3$ , procesa ilgums - 6,5 diennaktis, biogāzes apjoms -  $1,3 \text{ m}^3$  uz  $1 \text{ m}^3$  fermentatora apjoma, metāna saturs biogāzē 62%.

Ilgu laiku uzskatīja, ka biogāzes enerģētika ir vāji attīstītu valstu nozare. Tiešām, šodien vislielākais biogāzes iekārtu daudzums ir Indijā, Ķīnā, Bangladešā, Pakistānā, Taizemē, Jaunzēlandē. Tikai Indijā vien katru gadu sāk darboties 5 - 6 tūkstoši biogāzes iekārtu, Ķīnā - vairāk nekā 7 miljoni mazu biogāzes iekārtu, kas ražo kurināmo vietējām elektrostacijām, kā arī dažas lielas, kuras nodrošina termoelektrocetrāļu darbu.

Vācijā izmanto atkritumu sadedzināšanas stacijas, kurās izstrādā līdz 5% no elektroenerģijas daudzuma (11 mljrd. kW·h). Mūsu apstākļos jārūnā par mazvērtīgas koksnes un koksnes atkritumu izmantošanu kurināmā veidā. Galvenā problēma šī kurināmā lietošanā ir rentabilitāte. Kurināmā cenai pieaugot, koksnes kurināmais kļūst rentablāks.

Vienlaikus jāpiebilst, ka jāizstrādā koksnes kurināmā sagatavošanas tehnoloģija. Nepieciešamas koksnes sasmalcināšanas iekārtas, kuras būtu pieejamas patērētājiem, kā arī sasmalcinātās koksnes sadedzināšanas iekārtas. Pašreiz ir kurtuvju iekārtu konstrukcijas, kuras paredzētas koksnes sadedzināšanai šķeldas veidā.

Latvijas apstākļos ar koksnes kurināmo var aizvietot 90 tūkst. t kurināmā 2010. gadā.

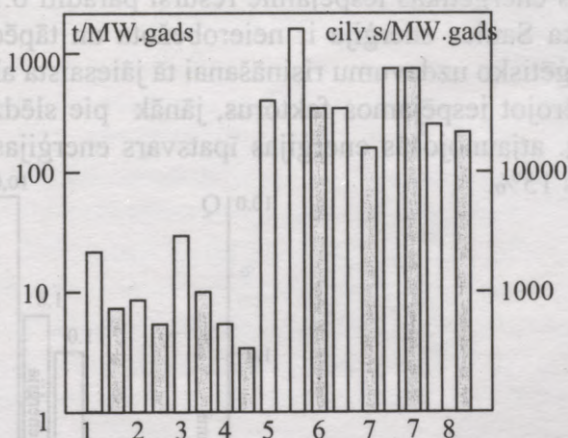
Bioenerģētiskie agregāti lietderīgi ekoloģiskās situācijas uzlabošanai un biogāzes izmantošanai uzņēmumu pašpatēriņa vajadzībām. Jāizstrādā un jāievieš koksnes kā kurināmā izmantošanas tehnoloģija, lai samazinātu šā kurināmā veida lietošanas darbietilpību.

Galvenais faktors, kurš neveicināja biogāzes iekārtu izmantošanu, bija dabiskās gāzes zemā cena.

Kopumā vērtē, kas biogāzes iekārtas attiecīgajos uzņēmumos var izmantot pašu siltuma enerģijas nodrošināšanai, kā arī ekoloģisko apstākļu uzlabošanai, atbrīvojot vidi no piesārņošanas.

Enerģētiskās iekārtas ir vienas no visdārgākajām iekārtām tehnikā. Šo iekārtu pamatā tehnikas vēsturē ir sasniegtas augsti attīstītās tehnoloģijas. Pašreiz plaši lietojamās enerģētiskās tehnoloģijas ir pilnveidojušās 100 gadu periodā. Ievērojot zinātniski tehnisko progresu, jaunas enerģētiskās tehnoloģijas attīstās ātrāk, bet nez vai var orientēties uz laiku, kas būtu daudz mazāks par 40 gadiem.

Kopumā jāatzīst, ka alternatīvie enerģijas avoti, iesaistīti enerģētiskā bilancē, spēs nodrošināt samērā nelielu



6.13.att. Materiālu patēriņš t/MW.gadā un cilvēku darba stundas uz MW.gadu dažādiem enerģijas veidiem.

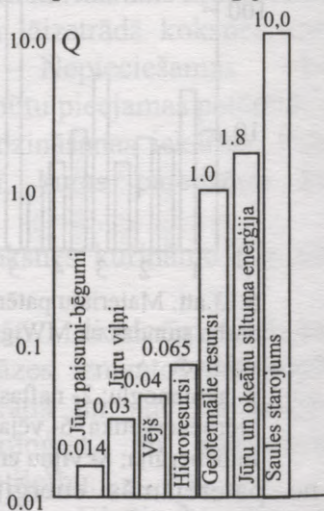
1- akmeņogļu; 2- naftas; 3- kodola; 4- dabasgāze; 5- hidroenerģētika; 6- vēja; 7- saules: apkure un fotoenerģija; 8- viļņu enerģētika.

daļu no patērējamās enerģijas arī perspektīvā, tāpēc liela mēroga enerģētikas attīstības problēma paliek arī joprojām viena no aktuālākajām pasaules problēmām.

Netradicionālo enerģijas avotu turpmākajai attīstībai jāveic zinātniskie un eksperimentālie darbi.

Materiālu ( $t$ ) un darba patēriņš (cilv.h), attiecinātus uz enerģijas izstrādes vienību (1MW.gads) attēloti 6.13.attēlā (Kanādas apstākļos). No tā izriet, ka vismazākie šie tēriņi ir gāzes enerģētikai. Tad seko ar samērā maziem izdevumiem naftas, ogļu, atomenerģētika. Lielāki šie izdevumi ir alternatīvai enerģētikai, izmantotai plašos apjomos. Tehnoloģijas attīstība nākotnē var šos izdevumus daļēji samazināt. No šiem datiem izriet, ka saules enerģētika pieder pie vismateriālietilpīgākiem enerģijas iegūšanas veidiem. Rezultātā var konstatēt, ka praktiski iespējamie saules enerģijas avoti pagaidām spēs sastādīt nelielu daļu enerģētiskās bilances. Alternatīvās enerģētikas iespējamie resursi parādīti 6.14.attēlā. Jāatceras, ka Saules enerģija ir neierobežota un tāpēc dažādu lokālo enerģētisko uzdevumu risināšanai tā jāiesaista aktīvāk.

Ievērojot iespējamus faktoros, jānāk pie slēdziena, ka līdz 2020.g. atjaunojošās enerģijas īpatsvars enerģijas bilanci nepārsniegs 15%.



6.14.att. Alternatīvo enerģijas veidu resursi nākotnē.

## *Jautājumi paškontrolei.*

1. *Kādi saules enerģijas izmantošanas veidi ir zināmi.*
2. *Saules enerģijas resursi un to izmantošanas grūtības.*
3. *Kādas ir bioenerģijas izmantošanas iespējas?*
4. *Kādi ir bioenerģētiskie kurināmie iekšdedzes dzinējiem?*
5. *Kādas ir vēja enerģētikas perspektīvas?*
6. *Kādi ir vēja turbīnu darbības principi?*
7. *Vēja iekārtu ģeneratori un to pieslēgšana enerģētiskiem tīkliem.*
8. *Kāds ir sagaidāms alternatīvās enerģētikas īpatsvars tuvākos 20 gados?*

## 7. NODAĻA. ELEKTROENERĢĒTIKA

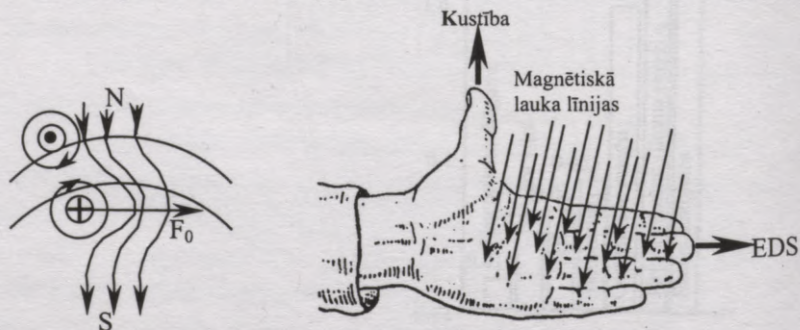
### 7.1. Mehāniskās enerģijas pārveidošana elektriskā enerģijā.

Elektroenerģija ir ērti izmantojams enerģijas veids. To var ražot lielās elektrostacijās, pārvadīt lielos attālumos ar samērā nelieliem zudumiem, pievadīt lieliem un maziem patērētājiem elektrisko tīklu darbības robežās un pārveidot citos enerģijas veidos: mehāniskā, siltumā utt.

Elektriskās enerģijas ražošanas īpatsvara dinamika trijās pasaules valstu grupās parādīta 1.2.attēlā, kur tā sastāda 25% vāji attīstītās valstīs, līdz 38% industriālās zemēs. Ievērojot elektrisko tehnoloģiju priekšrocības, arī nākotnē var gaidīt elektroenerģijas īpatsvara palielināšanos ražošanā uz siltuma īpatsvara rēķina. Elektriskās enerģijas patēriņš uz vienu iedzīvotāju dažādās valstīs attēlots 1.20.attēlā.

Mehāniskās enerģijas pārveidošana elektriskajā notiek ar ģeneratoru palīdzību, ko darbina turbīnas.

Sinhronā ģeneratora darbības princips izriet no 7.1.attēlā. Rotējošais magnētiskais lauks, šķērsojot vadu, inducē tajā elektrodzinējspēku saskaņā ar kreisās rokas likumu.



7.1.att. Kustības, lauka un elektrodzinējspēka mijiedarbība ģeneratorā un kreisās rokas likums.

Tā iespaidā statora tinumā inducējas elektrodzinējspēks  $e$ :

$$e = Blv,$$

kur  $B$  - magnētiskā lauka indukcija gaisa spraugā starp rotoru un statoru;

$l$  un  $v$  - vadītāja garums un kustības ātrums.

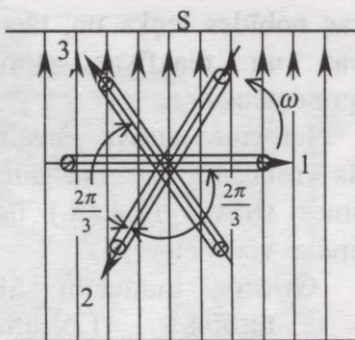
Magnētisko lauku rada rotora tinums. Tajā tek līdzstrāva. Statora tinumā inducētā maiņsprieguma frekvence  $f$  ir atkarīga no ģenerators griešanās ātruma (apgr/min) saskaņā ar izteiksmi.

$$f = \frac{p \cdot n}{60},$$

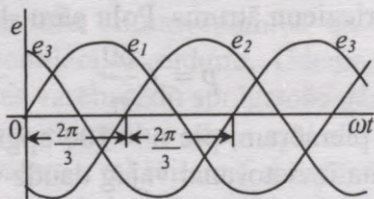
kur  $p$  - rotora polu pāru skaits;  
 $n$  - apgriezību skaits minūtē.

Maiņsprieguma sistēmas tiek izpildītas trīsfāzīgas (7.2.att.). Trīs ir minimālais fāžu skaits, kas spēj radīt rotējošo magnētisko lauku, nepieciešamu vienkāršas dzinēju konstrukcijas nodrošināšanai. Līdz ar to ģenerators statoriem ir trīsfāžu tinumi, ar  $120^\circ$  nobīdes leņķi starp tām. Fāžu spriegumu momentānas vērtības attēlotas 7.3.attēlā.

Noslogojot statoru, tā strāva rada magnētisku lauku. Šis magnētiskais lauks gaisa spraugā starp rotoru un statoru ir virzīts pretēji ierosmes tinuma laukam, mazinot indukciju  $B$  un, tātad EDS. Šo enkura reakcijas efektu kompensē, palielinot rotora ierosmes strāvu. Tās nepieciešamais lielums ir atkarīgs no statora



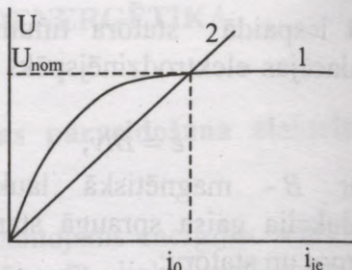
7.2.att. Trīsfāžu tinums magnētiskā laukā.



7.3.att. Sprieguma momentānā vērtība trijās fāzēs.

strāvas nobīdes leņķa un, tātad, aktīvas un reaktīvas strāvu komponentēm.

Ierosmes strāva jāmaina plašās robežās no tukšgaitas ierosmes strāvas (7.4.att.) līdz nominālai vērtībai.



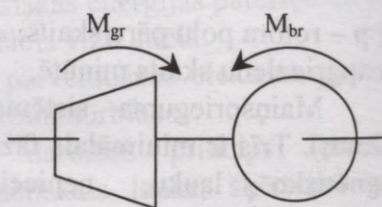
7.4.att. Ģeneratora tukšgaitas ierosmes raksturlīkne (1) un tās aizvietošana aprēķinos (2).

Griezes momentu  $M_{gr}$  rada turbīna (7.5.att.). Ģenerators attīstīta bremzes momentu  $M_{br}$ , kas darbojas pretī griezes momentam. Stacionārā režīmā šie pretēji vērstie momenti ir vienādi:

$$M_{gr} = M_{br}.$$

Ģeneratoru jaudas pašreizējās elektrostacijās sasniedz 1000 MW vienā vienībā.

*Dzesēšanas sistēma* nodrošina ģeneratoru darbu pieļaujamo temperatūru diapazonā. Magnētiskie lauki un strāvas ģeneratoros rada zudumus, kas izsauc agregāta silšanu. Lielas ģeneratoru jaudas tiek realizētas samērā mazos tilpumos, tāpēc dzesēšanai jābūt intensīvai.

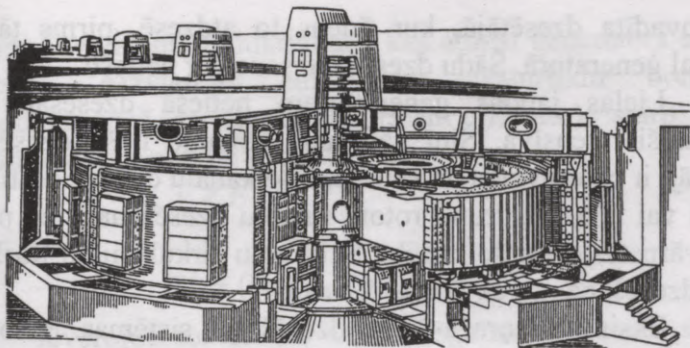


7.5.att. Turbīnas griezes un ģeneratora bremzes momenti.

Hidroģeneratoru konstrukciju nosaka hidroturbīnu zems apgriezienu ātrums. Polu pāru skaits ģeneratorā līdzinās :

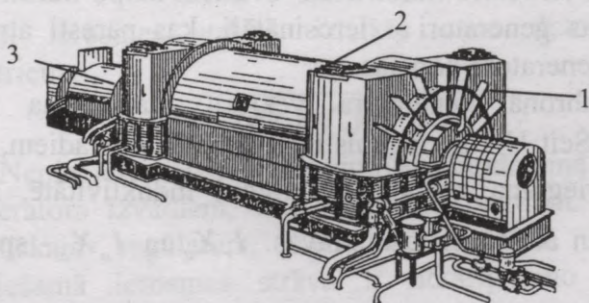
$$p = f \frac{60}{n}.$$

Tā, piemēram, pie  $n = 100$  apgr./min.,  $p = 30$ . Šādu polu pāru skaita izvietojanai vajag daudz vietas un tāpēc hidroģeneratoru izmēri ir lieli, un tiem parasti ir vertikāla ass. Šie ģeneratori nav hermētiski un tos dzesē ar gaisu (7.6.att.).



7.6.att. Hidroģenerators.

Ģeneratoriem, kas tiek izmantoti ar tvaika vai gāzes turbīnām ir liels apgriezīnu ātrums un parasti viens (3000 apgr./min) vai divi (1500 apgr./min) polu pāri. Mazas jaudas ģeneratori, kas tiek izmantoti termoelektrocetrālēs tiek bieži dzesēti ar gaisu. Lielākas jaudas ģeneratorus (7.7.att.) izgatavo hermētiskus un tos dzesē ar ūdeņradi, ko iegūst ar elektrolītisko



7.7.att. Turboģenerators. 1- turbīna; 2- ģenerators; 3- ierosinātājs.

iekārtu palīdzību. Ūdeņradim ir laba siltumvadāmība un kā visvieglākajai gāzei minimāli ventilācijas zudumi. Ūdeņradis nedrīkst nākt saskarē ar gaisu, kas varētu radīt sprāgstošo gāzi.

Abos gadījumos ģenerators elementus gāzes apskalo no ārienes, cirkulējot pa ģenerators iekšējiem dzesēšanas kanāliem. Atņēmusi siltumu, gāze tiek izvadīta no ģenerators.

un novadīta dzesētājā, kur ūdens to atdzesē, pirms tā tiek atpakaļ ģeneratorā. Šādu dzesēšanu sauc par netiešo.

Lielas jaudas ģeneratoriem netiešā dzesēšana nav pietiekoši intensīva. Šinī gadījumā izmanto tiešo dzesēšanu. Vadītāji ir cauruļveida un caur iekšējo kanālu cirkulē destilētais ūdens vai eļļa. Šķidrums rotora tinumu dzesēšanai tiek padoti caur vārpstas centrālo kanālu. Šķidrums cirkulācija ir noslēgta. To atdzesēšana notiek ūdens dzesētājā.

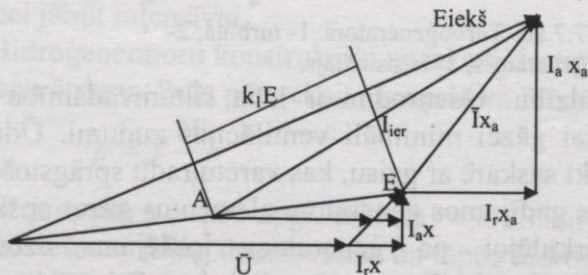
Eksistē ūdeņraža-ūdens dzesēšanas sistēmas. Rotors un aktīvā statora dzelzs tiek dzesēti ar ūdeņradi netieši, bet statora tinums, kas izpildīts no cauruļveida vadītājiem — ar destilēto ūdeni.

Ūdens-eļļas dzesēšanas sistēmā eļļa dzesē statora tinumus, aktīvo dzelzi un konstruktīvos elementus, bet destilētais ūdens — rotora tinumu.

Visi ģeneratori ir apgādāti ar ierosmes sistēmu.

Par *ierosmes līdzstrāvas* avotiem kalpo līdzstrāvas vai maiņstrāvas ģeneratori — ierosinātāji, kas parasti atrodas uz turbīnas-ģeneratora kopējās ass.

Sinhronā ģeneratora vektoru diagramma parādīta (7.8.att.). Šeit  $U$  - spriegums uz ģeneratora ievadiem,  $I_r X$  un  $I_a X$  - sprieguma kritumi ģeneratora induktivitātē, ko rada reaktīvā un aktīvā statora strāvas.  $I_r X_a$  un  $I_a X_a$  - sprieguma



7.8.att. Sinhronā ģeneratora vektora diagramma.

kritumi ekvivalentā induktivitātē, kas atbilst ģenerators enkura reakcijai. Aizvietojojot tukšgaitas raksturlīkni nominālā sprieguma zonā ar taisnes nogriezni (7.4.att.), starp E un ierosmes strāvu eksistē sakarība :

$$I_0 = k_1 E.$$

Savukārt

$$E^2 = (U + I_r X)^2 + (I_a X)^2.$$

Ievērojot to, ka  $k_1 < 1$ , tukšgaitas ierosmes strāvas vektoru var atlikt kā daļu no vektora E no punkta A (7.8.att.). Savukārt sprieguma kritumu enkura reakcijas induktivitātē  $X_a$  kompensē ar tai proporcionālu ierosmes strāvas sastāvdaļu:

$$\Delta I_{ie} = I_0 + \Delta I_{ie} = (k_1 U + I_r (k_1 X + a X_a))^2 + (I_a (k_1 X + a X_a))^2.$$

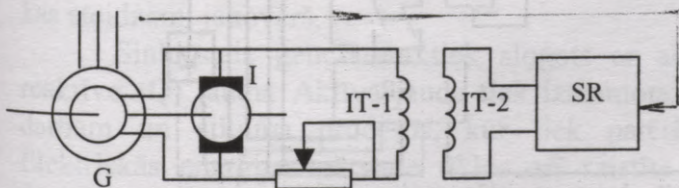
Apzīmējot:

$$k_1 X + a X_a = k_2,$$

iegūstam ierosmes strāvu, izteiktu caur statora režīma parametriem:

$$I_{ier} = \sqrt{(k_1 U + k_2 I_r)^2 + (k_2 I_a)^2}.$$

Nepieciešamai ierosmes strāvai jānodrošina spriegums uz ģenerators izvadiem, tuvs nominālajai vērtībai. To regulē automātiskais regulators, SR kas kontrolē spriegumu. Nepieciešamā ierosmes strāva ir atkarīga no tukšgaitas



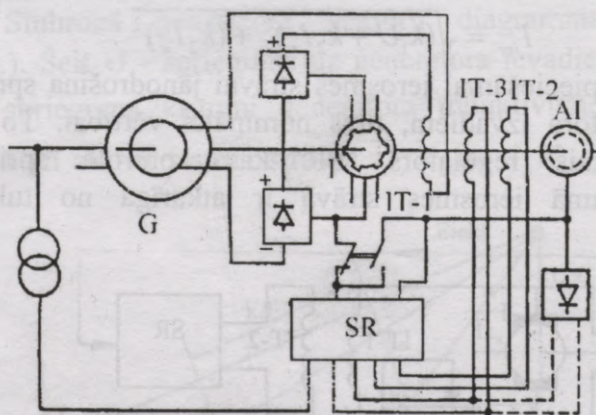
7.9.att. Ierosmes sistēma ar ierosinātāju - līdzstrāvas ģenerators.  
I- ierosinātājs; IT- ierosinātāja ierosmes tinumi; SR- sprieguma (ierosmes) regulators; G- ģenerators.

ierosmes strāvas, kas nodrošina normālu spriegumu ģeneratoram tukšgaitā un, noslogojot to, no aktīvās un reaktīvās jaudas.

Ierosmei ir nepieciešama jauda, kas sasniedz līdz 1% no ģenerators jaudas.

Līdzstrāvas ierosinātājiem ir kolektors (7.9.att.) un to jauda iespējama līdz 1000 kW. Tāpēc tos lieto samērā mazjaudīgiem ģeneratoriem. Šiem ierosinātājiem ir savs ierosmes tinums, izvietots uz statora, turpretī rotora tinums, caur kolektoru pievienots ģenerators ierosmes tinumam, nodrošinot ģenerators darbību. Ierosmes (sprieguma) regulators SR, kas maina ierosmes strāvu sprieguma uzturēšanas vajadzībām, nodrošina energosistēmas darbības drošumu.

Lielākiem ģeneratoriem, kam lielas jaudas dēļ nevar izmantot līdzstrāvas ierosinātāju, kā ierosinātāju lieto maiņstrāvas ģeneratoru. Šāda ierosinātāja spriegumu iztaiso (7.10.att.) un tad pievieno ģenerators ierosmes tinumam. Šādu ierosinātāju ierosmes izmaiņa ļauj izmainīt tā spriegumu plašās

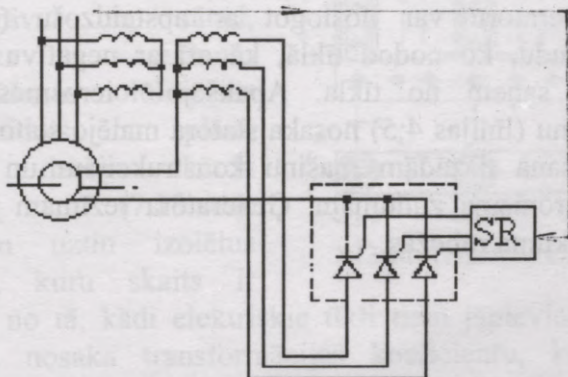


7.10.att. . Ierosmes sistēma ar ierosinātāju - maiņstrāvas ģeneratoru.

I- ierosinātājs; AI- apakšierosinātājs – mašīna ar ierosmes tinumi; SR- sprieguma (ierosmes) regulators; G- ģenerators.

robežās.

Trešais ierosmes sistēmas variants parādīts 7.11.att. Šinī gadījumā par ierosmes barošanas avotu izmanto paša ģenerators spriegumu, ko iztaiso ar vadāmo taisngriežu (tiristoru) palīdzību, tādā veidā nodrošinot iztaiso notā sprieguma izmaiņu plašā diapazonā.



7.11.att. Ierosmes sistēma ar vadāmiem taisngriežiem (tiristoriem) un barošanu no ģenerators izvadu sprieguma.

Visi energosistēmas ģenerators rotē ar vienādu elektrisko ātrumu it kā atrazdamies uz kopējās vārpstas, tātad tie darbojas sinhroni. Šajā stāvoklī tos notur sinhronais griešanās moments, kas rodas, pateicoties ierosmei. Ģeneratoram zaudējot sinhronismu rodas avārijas stāvoklis, kas steidzami jānovērš.

Sinhronais ģenerators tiek slogots ar aktīvo (P) un reaktīvo (Q) jaudu. Aktīvā jauda tiek izmantota mehāniskam darbam un siltuma procesos, kur tiek patērēta enerģija. Elektriskās enerģijas pārvade tīklos arī saistīta ar vadu un dzelzs serdeņu silšanu, kur tiek patērēta aktīvā jauda.

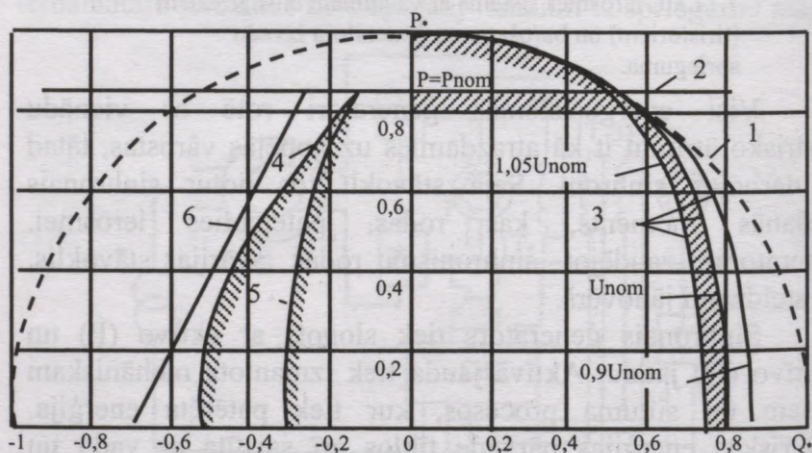
Reaktīvā jauda saistīta ar elektromagnētisko lauku uzturēšanu elektriskās iekārtās (ģeneratoros, transformatoros, līnijās, elektrodzinējos u.c.). Ģeneratoru statora strāva līdzinās

$$I = \sqrt{(P^2 + Q^2)} / U^2 .$$

Raksturlīkne, kas attēlo šo sakarību ir aploce. Līnija 1 (7.12.att.) atbilst statora nominālai strāvai, kas no statora silšanas viedokļa ierobežo tā noslodzi.

Otrs ierobežojums ir ierosmes tinuma silšana, kam atbilst līnija 3 dažādiem statora spriegumiem.

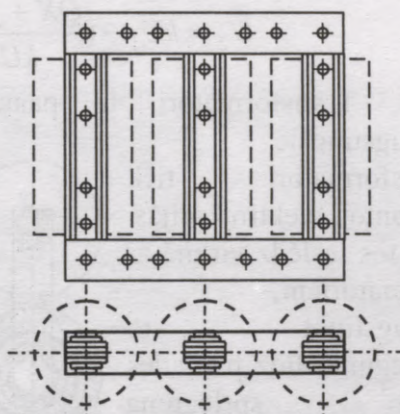
Ģeneratoru var noslogot ar apsteidzošu (pozitīvu) reaktīvu jaudu, ko nodod tīklā, kā arī ar negatīvu reaktīvu jaudu, ko saņem no tīkla. Apakšējo ierosmes strāvas ierobežojumu (līnijas 4;5) nosaka statora malējo statora dzelzs pakešu silšana dažādām mašīnu konstrukcijām un līnija 6 atbilst sinhronisma zudumam. Ģeneratora režīmam jāatrodas svītrotā laukuma robežās.



7.12.att. Ģeneratora režīma diagramma. Ierobežojumi: 1- pēc statora tinuma augstākās pieļaujāmās temperatūras; 2- turbīnas nominālā jauda; 3- ierosmes tinuma augstākās temperatūras; 4,5- statora dzelzs temperatūras dažādām mašīnām; 6- sinhronisma saglabāšanas noteikuma.

## 7.2. Transformatori.

Transformatori tiek izmantoti pārvadamās jaudas sprieguma pārveidošanai. Iekārtai ir feromagnētisks serdenis. Virpuļstrāvu un, tāpat, tukšgaitas zudumu samazināšanas nolūkos tas tiek veidots no plānā speciālā dzelzs skārda paketēm (7.13.att.). Serdenim uztin izolētus tinumus, kuru skaits ir



7.13.att. Transformatora serdenis.

atkarīgs no tā, kādi elektriskie tīkli tiem jāpievieno. Vijumu attiecība nosaka transformācijas koeficientu, kas līdzinās sekundārā un primārā sprieguma attiecībai, transformatoram strādājot tukšgaitā (7.14.att.):

$$k = \frac{\varpi_2}{\varpi_1} = \frac{U_{02}}{U_{01}}$$

Lieto divtinumu un trīstinumu transformatorus. Kādam no tinumiem spriegumu pievada, no pārējiem spriegumu saņem. Pirmo tinumu sauc par primāro, otro – par sekundāro. Sakarībā starp primāro un sekundāro spriegumu, transformatoru slogojot ar aktīvo P un reaktīvo Q jaudu, jāņem vērā sprieguma kritumu transformatora pretestības R un X:

$$\bar{U}_2 = k\bar{U}_1 - \Delta U \approx k\bar{U}_1 - \left( \frac{PR + QX}{kU_1} + j \frac{PX - QR}{kU_1} \right),$$

kur k – transformācijas koeficients;

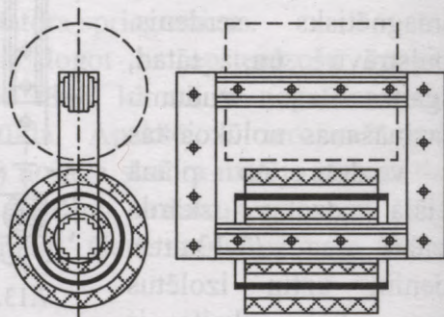
$\Delta U$  – sprieguma kritums, ko veido jaudu plūsmas transformatoru aktīvā un induktīvā pretestībā.

Sakarā ar to, ka transformatoru aktīvā pretestība  $R_T$  ir neliela, salīdzinot ar induktīvo  $X_T$ , šo sakarību var vienkāršot:

$$\bar{U}_2 \approx k\bar{U}_1 - \left( \frac{QX + jPX}{kU_1} \right).$$

Transformatori ir paaugstinoši vai pazeminoši.

Paaugstinošie transformatori tiek izmantoti elektrostacijās. Tur tos ieslēdz virknē ar ģeneratoriem, paaugstinot to spriegumu līdz pārvades tīkla sprieguma līmeņiem (7.15.att.).



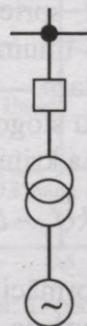
7.14.att. Transformatora tinumi.

Pazeminošie transformatori pazemina

spriegumus līdz zemākā sprieguma tīklu līmeņiem. Visur, kur saskaras dažāda sprieguma tīkli, izmanto transformatorus ar dažādiem transformācijas koeficientiem.

Transformatora tinumiem ir atzarojumi. Ar to palīdzību iestata vajadzīgo transformācijas koeficientu. Tinumu atzarojumu pakāpes var būt pārstatāmas, transformatorus atslēdzot no tīkla vai pārslēdzamas, transformatoram darbojoties zem slodzes. Pēdējā gadījumā pakāpes izmanto sprieguma automātiskai regulēšanai tīklos.

Transformatora serdenis tiek novietots bākā uz metāliskiem konstruktīviem elementiem. Transformatoros ir zudumi serdeņa dzelzī, ko rada mainīgais magnētiskais lauks un tinumos tajos



7.15.att. Ģenerators virknē ar paaugstinošo transformatoru.

plūstošās strāvas. Zudumi pārvēršas siltumā.

Zudumi transformatorā ir proporcionāli tā noslodzei pakāpē  $\frac{3}{4}$ :

$$\Delta P = c_1 S^{3/4}.$$

Toties transformatora dzesēšana notiek no tā virsmām, kas ir proporcionālas nominālai jaudai  $S$  pakāpē  $\frac{1}{2}$ :

$$P_{dzs.} = c_2 \cdot S^{1/2}$$

kur  $c_1$  un  $c_2$  – proporcionalitātes koeficienti.

Ievērojot to, ka transformatoru noslodze ir atkarīga no to nominālās jaudas, dzesēšanas intensitātei jābūt dažāda dažādu nominālu jaudu transformatoriem.

Dzesēšanu nodrošina eļļa. Tajā atrodas serdenis ar tinumiem. Bez tam eļļa izpilda arī izolācijas funkciju. Eļļa, sasilusi, izplēšas. Transformatoriem paredzēts speciāls tilpums – konservators.

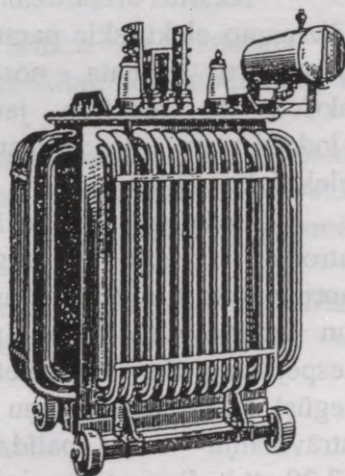
Mazas jaudas transformatoriem dzesēšana notiek ar dabīgo eļļas konvektīvo cirkulāciju (7.16.att.).

Eļļai sasilstot, notiek konvektīva cirkulācija. Siltā eļļa bākā paceļas uz augšu. No turienes tā nonāk bākai piemetinātos radiatoros, kur atdzesējas, to virsmām saskaroties ar ārējo gaisu, un nonāk bākas apakšā (7.17.att.).

Lielākas jaudas transformatoriem nepieciešama intensīvāka dzesēšana. Šinī gadījumā izmanto radiatorus ar lielāku dzesēšanas virsmu, ko appūš ar ventilatoru radītu gaisa strūklu (7.17.att.).

Vēl transformatoriem

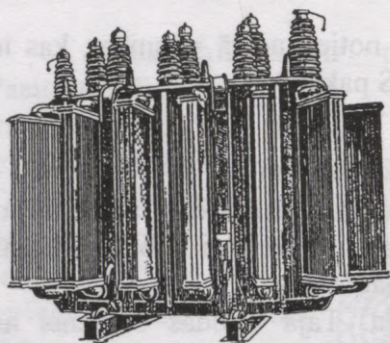
jaudīgākiem paredz



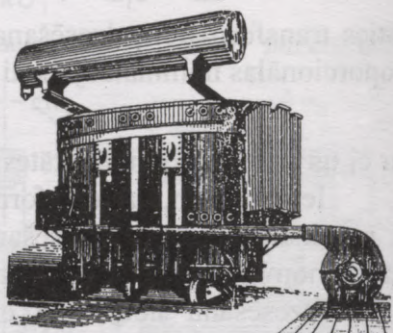
7.16.att. Mazas jaudas transformators.

mākslīgu eļļas cirkulāciju ar speciālu sūkni. Un visjaudīgākiem paredz gan ventilatorus, gan eļļas cirkulācijas sūkni (7.18.att.).

Gadījumos, kad jāsavieno tīkli, kuru spriegumi atšķiras



7.17.att. Lielas jaudas transformators.

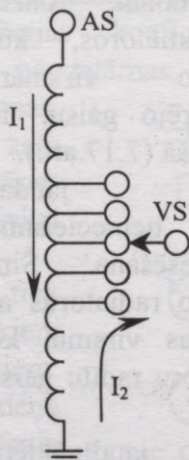


7.18.att. Transformators ar piespiedu eļļas cirkulāciju.

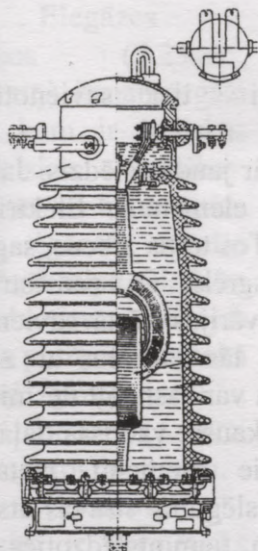
2-5 reizes, izmanto autotransformatorus. Tiem divu tinumu vietā ir viens tinums ar atsevišķiem izvadiem katram no tīkliem (7.19.att.). Tas ļauj ietaupīt materiālus un zudumus tajos.

Iekārtas aizsardzības un sistēmas vadīšanas vajadzībām jāizmanto elektriskie parametri – spriegums un strāva. Uz šo parametru pamata nosaka aktīvo un reaktīvo jaudu slodzes un to plūsmas elektriskos tīklos.

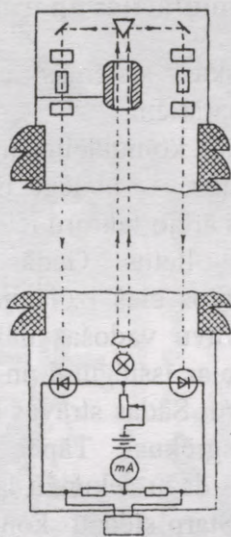
Ievērojot to, ka iekārta atrodas zem augsta sprieguma, tiešie sprieguma un strāvas mērījumi nav iespējami. Šos parametrus iegūst ar spriegummaiņu un strāvmaiņu palīdzību (7.20.att.). Spriegummaiņiem var pievienot aparatūru ar



7.19.att. Autotransformatora tinums.



7.20.att. Spriegummainis



7.21.att. Strāvmainis ar gaismas starppārraidi.

nelielu patēriņu, kas neizsauc mērķēdēs lielu sprieguma kritumu.

Strāvmaiņu sekundārais tinums ir noslēgts uz mēriekārtām ar mazu iekšēju pretestību, kas nodrošina tā darbību praktiski isslēgtā režīmā.

Par strāvmaiņiem un spriegummaiņiem ir iespējams izmantot aparātus, kas atrodas zem sprieguma un pārraida izmērītu strāvu un spriegumu uz izpildiekārtām ar gaismas stara palīdzību (7.21.att.).

Mērījumi bieži jāpārraida lielos attālumos līdz vadības centram. Šim nolūkam izmanto telekanālus un telekomunikācijas tehniku.

### 7.3. Komutācijas aparāti.

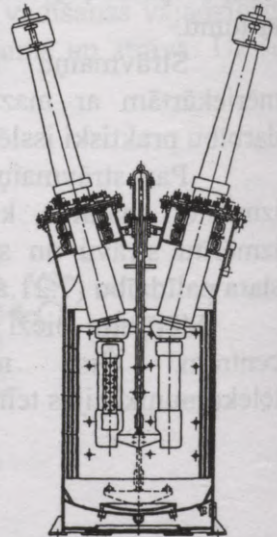
Elektriskās sistēmās elementi tiek savienoti ar komutācijas aparātiem.

Galvenais komutācijas aparāts ir jaudas slēdzis. Jaudas slēdža uzdevums - atslēgt bojātos elementus. Elektriskās ietaises atrodas ārējo faktoru ietekmē. Tos trāpa zibens, sagrauj vētras, slapina lietus. Gadās ugunsgrēki un zemestrīces. Bojātos elementos cieš izolācija un avārijas kārtā savienojas savā starpā strāvu vadošas daļas vai tās saskaras ar zemi. Rezultātā veidojas īsslēgumi un strāva var sasniegt desmitiem tūkstošu ampēru. Šādas strāvas spēj izkausēt vadošās daļas un izsaukt ugunsgrēkus. Tāpēc bojātie elementi jāatslēdz iespējami ātri - dažu sekunžu laikā. Īsslēguma strāvas atslēdz jaudas slēdži. Starp slēdžu kontaktiem, tiem atslēdzoties, deg elektriskais loks, kas pēc iespējas ātrāk jānodzēš. Parasti loka degšanas zonā novietoti speciāli režģi. Loks tiek sašķelts vairākos kanālos un tos ir vieglāk nodzēst nekā loku, kas deg vienotā kanālā.

Loka dzēšana notiek eļļā, gaisā, elegāzes strūklā vai vakuumā. Līdz ar to ir sekojošie jaudas slēdži: eļļas, spiestā gaisa, elegāzes un vakuuma slēdži.

Eļļas slēdžos (7.22.att.) loks izsauc eļļas disociāciju (sadalīšanos) ūdeņradī un ogleklī. Ogleklis izkrīt dibenā, bet ūdeņradis loka dzēšanas režģī nodzēš loku, strāvai ejot caur nulli.

Spiestā gaisa slēdži dzēš loku, padodot tajā zem spiediena gaisa strūklu. Šiem slēdžiem nepieciešami kompresori, saspiestā gaisa tvertnes un gaisa vadi.



7.22.att. Eļļas slēdzis.

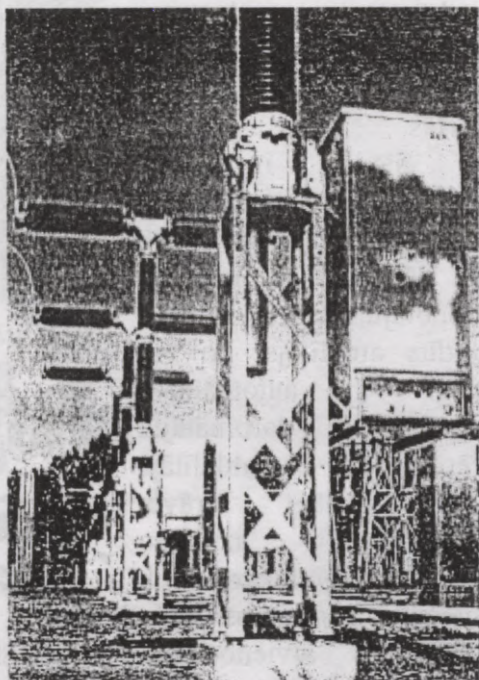
## Elegāzes

slēdžos (7.23.att., 7.24.att.) izmanto gāzi FS<sub>6</sub>, kam ir lieliskas elektriskās īpašības. Slēdzis ir hermētisks. Tajā gāze atrodas noslēgtā telpā. Slēdzim atslēdzoties, darbojas gāzes pumpis, kas lokā padod gāzes strūklu. Tas nodzēš loku, strāvai ejot caur nulli.

Vakuuma slēdzim ir hermētisks korpuss, kurā ir vakuums. Kontakti tiek darbināti no ārpuses ar magnētiskā lauka palīdzību. Loks starp kontaktiem tiek nodzēsts, kontaktus atslēdzot pie jebkuras strāvas vērtības, kas tīklā var izsaukt pārsprieguma procesus. Lai novērstu bīstamību, citām elektriskām iekārtām nepieciešami pasākumi pārspriegumu novēršanai. Jaudas slēdzis tiek pielietots arī slodzes strāvas atslēgšanai pārslēgumu gadījumos.

Slodzes slēdzis tiek izmantots slodzes atslēgšanai. Tam ir loka dzēšanas iekārta nelielām strāvām. Toties to nevar izmantot īsslēgumu strāvas atslēgšanai.

Atdalītājam (7.25.att.) ir kontakti sviru vai pantogrāfu veidā. To uzdevums – radīt elektriskās iekārtās labi redzamu pārtraukumu, tos atslēdzot, jo atslēdzot jaudas slēdzi, pārtraukums ārēji nav labi redzams. Tāds pārtraukums ir

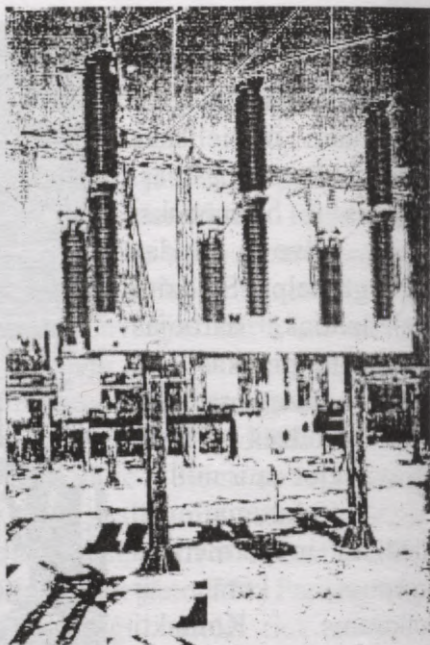


7.23.att. 330kV elegāzes slēdži.

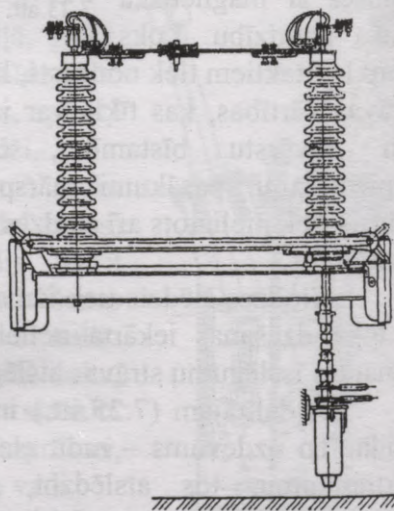
vajadzīgs drošības  
 radīšanai, personālam  
 strādājot elektriskās  
 iekārtās.

Slēdzis ir dārgs aparāts. Tāpēc gadījumos, kad tas ir iespējams, iztiek bez slēdža. Tad izmanto atvienotāju. Tas ir speciāli izpildīts atdalītājs, ko var atslēgt automātiski, izmantojot darbinātāju. Ievērojot to, ka atdalītājs nespēj atslēgt strāvu, atvienotāju izmanto mirkļos, kad no iekārtas tiek noņemts spriegums un, atslēdzoties atvienotājam, tas strāvu neslēgs. Tā, piemēram, īsslēguma gadījumā nostrādā aizsardzība un no visas iekārtas tiek noņemts spriegums. Tad automātiski atslēdzas atvienotājs, atdalot bojāto elementu. Tam seko sprieguma automātiskā atpakaļieslēgšana un, līdz ar to atjaunojas elektroapgāde caur nebojātiem tīkla elementiem.

Ar zemēšanas nazi



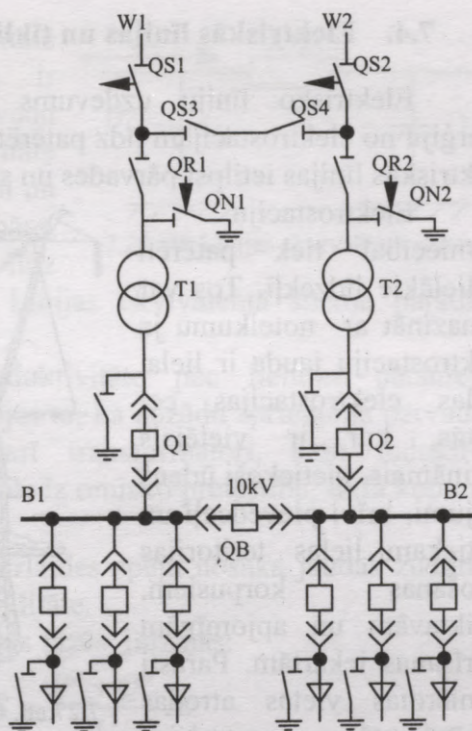
7.24.att. Elegāzes slēdži.



7.25.att. Atdalītājs.

iekārta tiek pievienota zemei (7.26.att.). Tas novērš sprieguma parādīšanos uz remonta esošās iekārtas kļūdainās ieslēgšanas gadījumos.

Zemēšanas nažus dažreiz izmanto to automātiskās ieslēgšanas vajadzībām. Tas notiek gadījumos, ja aizsardzība, kas ir izvietota vienā vietā, nejūt bojājumu, kas ir izcēlies citā vietā. Tad automātiski ieslēdz zemēšanas nazi, kas rada īsslēguma strāvu, ko jūt aizsardzība tālumā.



7.26.att. Apakšstacijas shēma  
 QS un QR- atvienotāji; QN- automātiskie  
 zemēšanas naži; Q- jaudas slēdži; QB- kopņu  
 sekcijas jaudas slēdzis.

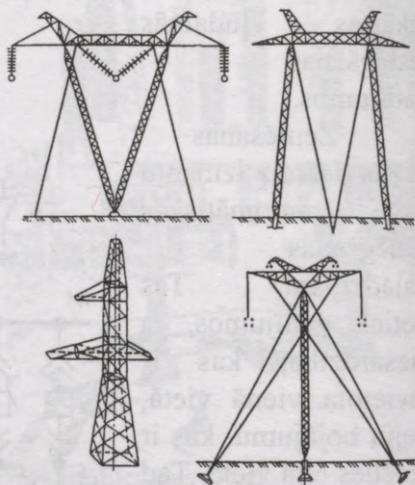
## 7.4. Elektriskās līnijas un tīkli.

Elektrisko līniju uzdevums – piegādāt elektrisko enerģiju no elektrostacijām līdz patērētājiem. No šāda viedokļa elektriskās līnijas ietilpst pārvades un sadales tīklos.

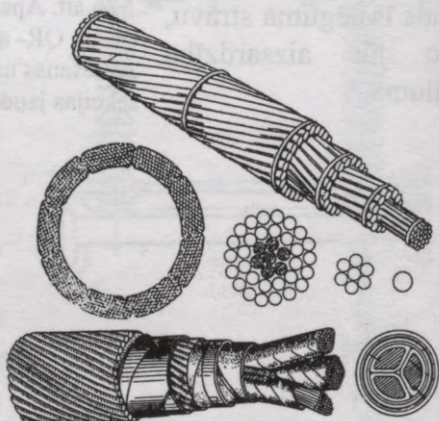
Elektrostaciju celtniecībai tiek patērēti vislielākie līdzekļi. Tos var samazināt ar noteikumu ja elektrostaciju jauda ir liela. Šādas elektrostacijas ceļ vietās, kur ir vietējais kurināmais, pietiekoši ūdens krājumi, brīvi pievedceļi un pietiekami lielas teritorijas ražošanas korpusiem, noliktavām un apjomīgām attīrīšanas iekārtām. Parasti piemērotas vietas atrodas samērā tālu no enerģijas patērēšanas centriem un, tāpēc, tā ir jāpārvada lielos attālumos.

Izmanto gaisa vadu un kabeļu līnijas. Gaisa vadu līnijās (7.27.att.) vadus piekar balstos. Kabeļu līnijās (7.28.att.) fāžu vadi atrodas kopējā apvalkā vai caurulē un tie tiek guldīti zemē.

Līniju raksturo omiska pretestība  $R$ ,

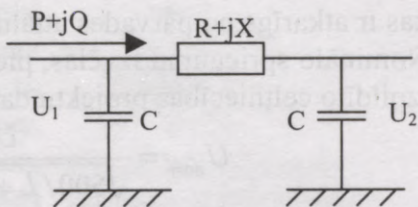


7.27.att. Gaisa vadu līnijas.



7.28.att. Kabeļu līnija.

induktivitāte  $X$  un kapacitāte  $C$ . Omiskā pretestība ir atkarīga no vadu šķērsriezuma. Induktivitāte – no attāluma starp fāzēm un konstruktīvām īpatnībām. Kapacitāte – no attāluma līdz zemei un starp fāzēm. Līnijas ekvivalentā shēma parādīta 7.29.attēlā.



7.29.att. Līnijas ekvivalentā shēma

7.29.attēlā.

Parasti līniju induktivitāte pēc lieluma pārsniedz omisko pretestību. Ievērojot to, ka dažādu sprieguma pārvades tīklu shēmās atrodas arī transformatori, kam induktīva pretestība daudzkārt pārsniedz omisko pretestību, tīklā kopumā  $X \gg R$ .

Pārvades tīklu caurlaides spēju nosaka jaudas zudumi, sprieguma kritumi un stabilitāte.

Jaudas zudumi trijās fāzēs līdzinās:

$$\Delta P = 3I^2 R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R.$$

Sprieguma kritums (7.42.att.):

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} + j \frac{PX - QR}{U}.$$

Caurlaide no stabilitātes viedokļa ( sk. 7.9. §):

$$P_{\max} = \frac{EU}{X}.$$

kur  $E$  - ģeneratoru EDS;

$U$  - spriegums pārvades līnijas jaudas saņemšanas pusē;

$X$  - līnijas induktīvā pretestība.

Visi trīs parametri ir atkarīgi no sprieguma, kas ir jāizvēlas tāds, lai jaudas zudumi, sprieguma kritumi un caurlaides spēja būtu tehniski un ekonomiski pieņemami. Tātad, ceļot pārvades līnijas, ir jāizvēlas nominālais spriegums,

kas ir atkarīgs no pārvades attāluma  $L$  un pārvadāmās jaudas  $P$ . Nominālo spriegumu izvēlas, pielietojot izteiksmi, kas raksturo izpildīto celtniecības projektu datus (7.30.att.):

$$U_{nom} = \frac{U}{\sqrt{500/L + 2500/P}} \text{ kV}.$$

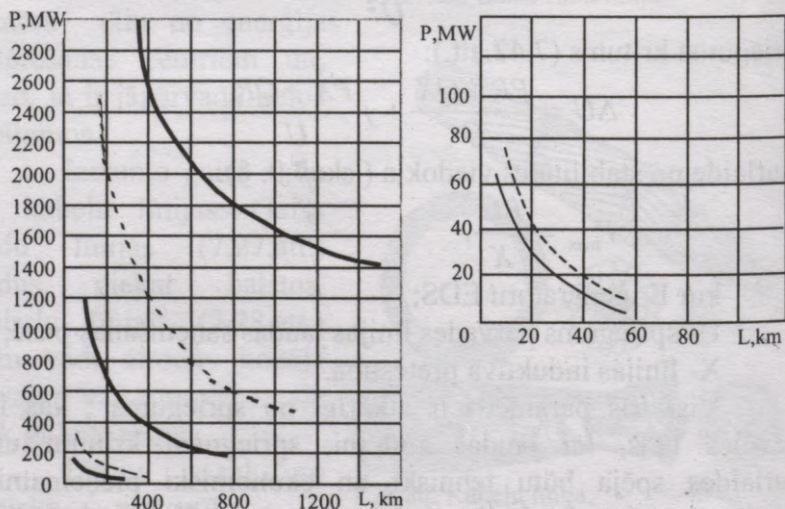
Tīklā ir arī reaktīvās jaudas zudumi, atkarīgi no pārvadāmās jaudas:

$$\Delta Q = I^2 X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X,$$

kas atrodas mijiedarbībā ar reaktīvo jaudu, ko ģenerē kapacitātes  $Q = U^2 \cdot \omega C$ .

Līnijas darbu raksturo elektriskā lauka intensitāte uz vadu virsmas (7.31.att.), ko var attēlot ar elektriskā lauka līniju blīvumu uz vadu virsmas. Ja intensitāte ir pārmērīga ( $> 29 \text{ kV/cm}$ ), tad veidosies daļējā izlāde strāvas noplūdes veidā no vada apkārtējā vidē – korona.

No attēla skaidrs, ka palielinoties vada diametram lauka



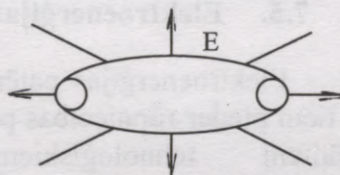
7.30.att. Līniju nominālo spriegumu izvēle.

intensitāte mazinās. Bet uzkārt ļoti liela diametra vadus nav iespējams. Problēmas risinājumu dod vairāku vadu uzkāšana (7.32.att.). Elektriskam laukam, kas veidojas tiem apkārt, ir tāda konfigurācija, it kā vada diametrs būtu daudz lielāks, kas risina koronas problēmu. Tā 330 kV līnijām fāzē lieto divus vadus, augstākiem spriegumiem 3;5 un 8 vadus.



7.31.att. Elektriskā lauka intensitāte uz vada virsmas.

Pārvades tīkli tiek izmantoti noslēgtās shēmās, kur veidojas slēgtie kontūri. Jaudas plūsmas slēgtos kontūros plūst apgriezti proporcionāli elementu pretestībām, ievērojot pirmo un otro Kirhofa likumu. Saskaņā ar pirmo likumu jaudu (aktīvās un reaktīvās) summa tīkla mezglā līdzinās nullei. Saskaņā ar otro likumu nullei līdzinās sprieguma kritumu un elektrodzinēj spēku summa slēgtā kontūrā.



7.32.att. Elektriskais lauks ap šķeltiem vadiem.

Jāņem vērā, ka tīkla elementu aktīvās un induktīvās pretestības un arī tīkla kapacitātes iespaido jaudas plūsmas. Tāpēc aprēķinā speciālās datoru programmās izmanto kompleksus skaitļus.

Aptuvenu priekšstatu par likumsakarībām dod sprieguma krituma vienādojums. Ievērojot to, ka  $X \gg R$ , pirmā tuvinājumā var atņemt locekļus, kas satur  $R$ . Tad

$$\Delta U \approx \frac{QX}{U} + j \frac{PX}{U},$$

no kurienes seko, ka aktīvās jaudas sadalās slēgtos kontūros apmēram apgriezti proporcionāli induktīvām pretestībām un uz šo sadalījumu praktiski neatstāj iespaidu gareniskie

elektrodzinējspēki, kas darbojas slēgtos kontūros, ja tajos ir transformatori ar nevienādiem transformācijas koeficientiem.

Sadales tīklos tiek izmantoti pazeminošie transformatori, ko uzstāda transformatoru punktos un kam transformācijas koeficientu izvēlas, tos atslēdzot. Spriegumu sadales tīklos regulē barojošās apakšstacijās, kur transformatoriem ir sprieguma regulēšana zem slodzes.

Veidojot sadales tīklu un iestatot tā režīmu, ievēro prasības par patērētāju barošanas drošumu un elektroenerģijas kvalitātes standartu.

### 7.5. Elektroenerģijas patēriņš.

Elektroenerģijas patēriņu formē dažādi patēriņa veidi. Pie tiem pieder rūpniecības patēriņš, kas sastāv no ražotnēm ar dažādiem tehnoloģiskiem procesiem. Nepārtraukti tehnoloģiskie procesi saistīti ar trīsmaiņu uzņēmumiem, kas patērē enerģiju visu diennakti. Nakts maiņas patēriņš, protams, ir zemāks par patēriņu dienas laikā, jo šajā laikā strādā tikai iekārtas, kas saistītas ar nepārtrauktu tehnoloģiju.

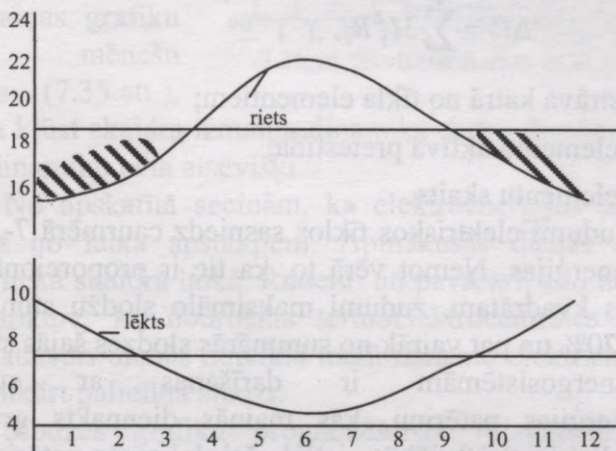
Lielākam uzņēmumu skaitam ir divmaiņu darba cikls. Šie uzņēmumi nestrādā naktīs. Vienmaiņas uzņēmumi, kas ir vairākumā, strādā dienas pirmajā pusē. Tāpēc no rītiem slodze ir lielāka.

Noteiktu slodžu daļu patērē elektrotransports, kas pielāgojas pasažieru pārvadājumu vajadzībām. Tās pieaug pirms darba maiņām uzņēmumos un iestādēs. Tāpēc slodze pieaug, pirms darbs ir sācijas.

Būtisku elektroenerģijas daļu patērē elektrostaciju tehnoloģijas. Šo patēriņu sauc par elektrostaciju pašpatēriņu, kas sasniedz 4-8% no elektrostaciju izstrādes. Tam ir trīsmaiņu raksturs, jo elektrostacijas darbojas nepārtraukti. Katram

elektrostacijas agregātam ir savs pašpatēriņš: sūkņi, ventilatori, kurināmā dzirnavas, utt.

Svarīga slodzes sastāvdaļa ir apgaismošana. Mākslīgā apgaismošana ir atkarīga no saiknes starp cilvēka diennakts



7.33.att. Saules riets un lēkts mūsu platuma grādos.

aktīvās dzīves un dabīgās gaismas diennakts cikliem. To nosaka Saules lēkta un rieta stundas (7.33.att.). Aktīvās dzīves posmos, kas norit tumšos periodos, tiek izmantots mākslīgais apgaismojums. No 7.35 attēla redzams, ka šis enerģijas patēriņš ir atkarīgs no gada sezonām. Ziemā apgaismojums ir nepieciešams kā no rītiem, tā arī vakaros. Vasarā no rītiem ir jau gaišs un vakara krēsla mūsu platuma grādos iestājas ap pulksten 23. Tātad mākslīgais apgaismojums vasarā tiek izmantots tikai vietējam darba apgaismojumam un pie nepietiekošā dabīgā apgaismojuma, ja ir apmācies. Pavasarī un vasarā ir pārejas periodi, kad apgaismojuma patēriņš mainās no vasaras uz ziemas patēriņu vai pretēji.

Elektroenerģijas pārvade ir saistīta ar tās zudumiem elektriskos tīklos. Tos var iedalīt divās sastāvdaļās. Pirmie ir iekārtu tukšgaitas zudumi. Tā, piemēram, ieslēdzot

transformatoru, tas patērē noteiktu enerģijas daudzumu, jo zudumi dzelzs serdeņos ir saistīti ar pārmagnetizēšanas procesu. Otrā zudumu sastāvdaļa ir patēriņš vadu silšanai, kas līdzinās

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n 3I_i^2 R_i,$$

kur  $I_i$  – strāva katrā no tīkla elementiem;

$R_i$  – elementu aktīvā pretestība;

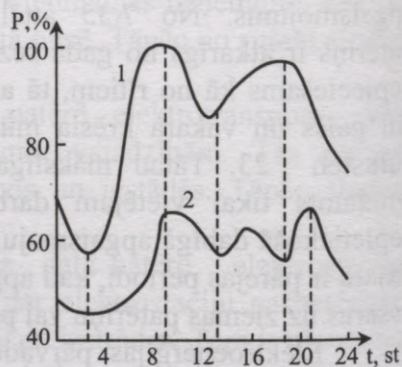
$n$  – elementu skaits.

Zudumi elektriskos tīklos sasniedz caurmērā 7-15% no ražotās enerģijas. Ņemot vērā to, ka tie ir proporcionāli tīkla noslodzes kvadrātam, zudumi maksimālo slodžu stundās var sasniegt 20% un pat vairāk no summārās slodzes šajās stundās.

Energosistēmām ir darīšanas ar summāro elektroenerģijas patēriņu, kas mainās diennakts griezumā. Enerģētiskai jaudai ir jābūt pietiekošai, lai segtu patēriņu katrā no stundām. Tātad šis patēriņš ar noteiktu precizitāti jāzina iepriekš.

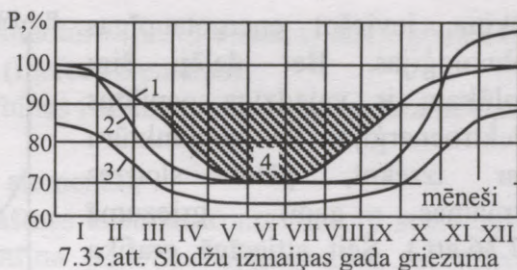
Patēriņa dinamika diennakts laikā veido slodzes grafiku. To izmaiņai energosistēmās rūpīgi seko, tos pēta un uz novērojumu datu pamata iepriekš programmē.

Diennakts slodžu grafiku formas ziemai un vasarai parādītas 7.34.attēlā. No attēliem redzam, ka grafikus lielā mērā nosaka četri to punkti, kas atbilst rīta un vakara maksimālām, nakts un dienas minimālām



7.34.att. Diennakts slodžu grafiks ziemā (1) un vasarā (2).

slodzēm. Šīs slodzes mainās sezonu griezumā. Šo izmaiņu noskaidrošanai zīmē to izmaiņas grafiku gada mēnešu ietvaros (7.35.att.),



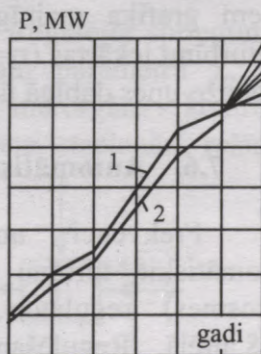
no kura kļūst skaidra izmaiņu dinamika darba dienām. Izejamo dienu dinamiku pēta atsevišķi.

No apskatītā secinām, ka elektroenerģijas patēriņš ir atkarīgs no laika apstākļiem. Apmākušās dienās slodze ir lielāka nekā skaidrā laikā. Rudenī un pavasarī, kad nedarbojas centrālapkure, ko nodrošina termoelektrocēntrāles un katlu mājas, aukstās dienās noteiktā mērā izmanto elektrisko apkuri, kas savukārt palielina slodzi.

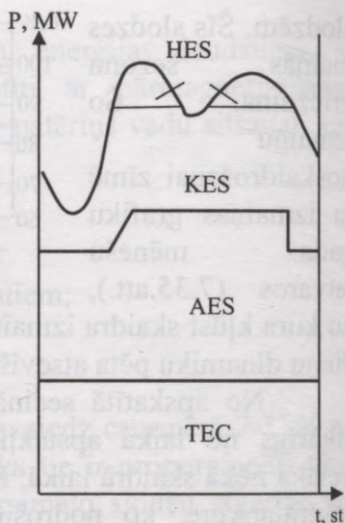
Slodzes grafiku prognozēšanas vajadzībām nosaka slodzes atkarību no laika apstākļiem – temperatūras un dabīgās gaismas samazināšanās pakāpes. Prognozes parasti attiecinā uz sezonai atbilstošiem vidējiem apstākļiem.

Rīcība esošai energosistēmas jaudai jāatbilst slodžu grafiku datiem. Prognozēšanas procesam ir 3-7% precizitāte. Sakarā ar to, ka jaudai pilnīgi jānodrošina patēriņš, to sastāvā jāparedz rezerve, ko normālos apstākļos neizmanto. Parasti paredz rotējošās rezerves 5-10% apmērā. Pateicoties tam, ka hidroagregātu palaišana notiek 60 sekunžu laikā, stāvošos hidroagregātus arī ieskaita rotējošā (karstā) rezervē.

Tautsaimniecības attīstība notiek daļēji uz enerģijas ietaupījuma



rēķina, ieviešot energotaupīgas tehnoloģijas. Bet daļēji šim nolūkam ir vajadzīga papildus elektroenerģija. Šo konjunktūru var izsekot, pētot slodzes izmaiņas gadu griezumā (7.36.att.). Šeit attiecīgā grafika stundā slodze (piemēram, rīta slodze janvārim) attēlota vairāku gadu griezumā. Nākošā gada janvāra mēneša rīta slodzi var paredzēt, ekstrapolējot iegūto līniju. Tāpat nosaka arī pārējo slodzes grafiku raksturīgus punktus, orientējoties uz slodzes grafiku formu.



7.37.att. Elektrostaciju vieta diennakts grafikā.

Dažādas elektrostacijas grafikā ieņem dažādas vietas, atkarībā no enerģijas izmaksas (7.37.att.). Vislētāko enerģiju izstrādā termoelektrocentrāles. Tās novieto grafika apakšējā daļā. Nākošo vietu ieņem atomelektrostacijas. Dārgākā ir elektroenerģija kondensācijas elektrostacijās ( $\eta=35-40\%$ ). Tās ieņem grafika mainīgo daļu. Grafika augšējo daļu ieņem gāzturbīnu iekārtas ( $\eta=20\%$ ) un HES, kuru enerģētisko resursu ierobežo upes dabīgā ūdens caurplūde.

## 7.6. Automātisko regulatoru statiskās raksturlīknes.

Frekvenci un spriegumu energosistēmā uztur automātiskie turbīnu apgriezīnu un ģeneratoru sprieguma (ierosmes) regulatori. Regulatoru struktūrshēma parādīta 7.38.attēlā. Regulēšanas procesā jāizpilda noteikumi, kas nodrošina procesa regulēšanas stabilitāti. Šim nolūkam jāievēro regulējamo objektu – turbīnu un ģeneratoru inerces elementi.

Turbīnai:  $T_s$ - servomotora (pastiprinātāja) laika konstante 0,2 sek. (inerces elements);

$T_{tv}$  – turbīnas tvaika apjoma laika konstante 0,25 sek.

(inerces elements);

$T_m$  – mašīnas kustības konstante 10 sek.- laiks kurā mašīna palielina apgriezienus no miera stāvokļa līdz tukšgaitas apgriezieniem pie pilnīgi atvērtiem regulēšanas vārstiem (integrējošs elements).

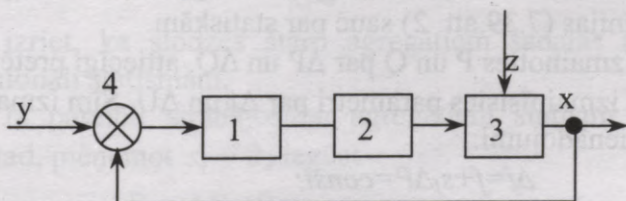
Generatoram:  $T_p$ - pastiprinājuma laika konstante 0,2 sek. (inerces elements);

$T_{ie}$ - ierosinātāja laika konstante 2 sek. (inerces elements);

$T_g$ - ģenerators ierosmes ķēdes laika konstante 10 sek. (inerces elements).

Regulatoru darbības noteikumu izpildei jānosaka, kā zināms, summārais pieļaujamais no regulēšanas stabilitātes viedokļa pastiprinājuma koeficients  $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = 1/s$ , kur  $K_i$  – atsevišķo augstākminēto locekļu pastiprinājumu koeficienti.

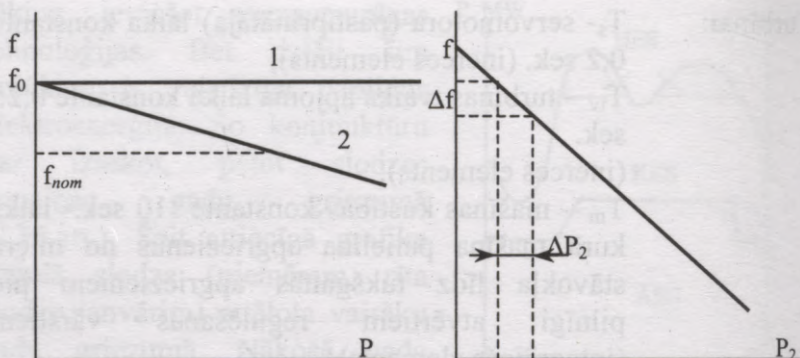
Regulējot frekvenci,  $y=f_0=\text{const}$ . Regulējot spriegumu,  $y=U_0=\text{const}$ . Regulators uztur konstantu parametru  $x$ , ko kontrolē mērorģāns. Gadījumā, ja mērorģāns kontrolē frekvenci  $f$  un spriegumu  $U$ , šie parametri stacionārā režīmā



7.38.att. Regulatora struktūrshēma

$y$ - iestatījums;  $z$ - iedarbe;  $x$ - regulējamais parametrs;

1,2,3- struktur-shēmas locekļi; 4- mērorģāns.



7.39.att. Regulēšanas statistiskās raksturlīknes.

tiek uzturēti nemainīgi, kas atbilst raksturlīnijai I (7.39.att.). Šādu raksturlīniju sauc par astatisku. Šāds raksturs var būt regulatoram, kas regulē pilnīgi autonomu iekārtu. Uz energosistēmas tīklu strādā liels turbīnu un ģeneratoru skaits. Šinī gadījumā jānodrošina noteikts aktrīvās un reaktīvās jaudas sadalījums starp paralēli strādājošiem agregātiem, ko var panākt, ja mērogāns kontrolē divus savā starpā saistītus parametrus:  $f$  ar  $P$  un attiecīgi  $U$  ar  $Q$ . Otrs no šiem parametriem tiek ieviests ar koeficientu  $s_f$  un  $s_U$  palīdzību. Rezultātā regulatora iestatīšanas vienādojumi:

$$f_0 = f + s_f P = \text{const};$$

$$U_0 = U + s_U Q = \text{const}.$$

Ievērojot to, ka iestatījumi  $f_0$  un  $U_0$  ir konstanti lielumi, parametri  $f$  un  $U$  būs atkarīgi attiecīgi no  $P$  un  $Q$ . Šādas raksturlīnijas (7.39.att. 2) sauc par statistiskām.

Izmainoties  $P$  un  $Q$  par  $\Delta P$  un  $\Delta Q$ , attiecīgi pretējā virzienā izmainīsies parametri par  $\Delta f$  un  $\Delta U$ . Šīm izmaiņām atbilst vienādojumi:

$$\Delta f = f + s_f \Delta P = \text{const};$$

$$\Delta U = U + s_U \Delta Q = \text{const}.$$

Viegli pārliecināties, ka, pieaugot  $P$  un  $Q$ , pretējā virzienā samazināsies  $f$  un  $U$ . Citiem vārdiem sakot, stacionārā režīmā

regulēšanas raksturlīknēm būs tāds raksturs, kāds parādīts 7.39 attēlā. Šīs raksturlīknes sauc par regulēšanas statistiskām raksturlīknēm un lielumu  $s$  – par statistumu, izsakot to attiecinātās vienībās:

$$s_f = -\Delta f / \Delta P_{nom},$$

$$s_U = -\Delta U / \Delta Q_{nom}.$$

Piemēram, 0,05, kas norāda, ka frekvence vai spriegums izmainās par 5%, izmainoties agregāta slodzei no tukšgaitas līdz nominālam.

Agregātiem strādājot paralēli uz vienotu sistēmu, slodžu P un Q sadalīšanos starp agregātiem apskatīsim pēc frekvences regulēšanas piemēra. Šim nolūkam vienādojumu sistēmā jāieved atsevišķu agregātu regulēšanas vienādojumus, kas jāatrisina attiecībā uz jaudām, ievērojot bilances vienādojumu:

$$\begin{cases} \Delta f + s_1 \Delta P_1 = 0; \\ \Delta f + s_2 \Delta P_2 = 0; \\ \dots\dots\dots \\ \Delta f + s_n \Delta P_n = 0; \\ \Delta P_\Sigma + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots \Delta P_n = 0. \end{cases}$$

ī-tā agregāta slodzes izmaiņa būs līdzīga:

$$\Delta P_i = \Delta P_\Sigma / s_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{s_i}.$$

No tā izriet, ka slodzes starp agregātiem sadalās apgriezti proporcionāli statistam.

Ja paralēli strādājošiem agregātiem statisti līdzinās nullei, tad, pieņemot  $s_i = 0$ , iegūst

$$\Delta P_i = \Delta P_\Sigma / 0 \cdot \infty,$$

kas nozīmē, ka slodzes sadalījums starp agregātiem ir nenoteikts, tātad, var spontāni mainīties visā diapazonā, kas nav pieļaujams.

No apskatītā seko, ka sistēmā strādājošiem agregātiem jābūt statistiskām regulēšanas raksturliķnēm. Statisma lielums parasti ir 0,05. Parametrus  $f$  un  $U$  iestatīšanai regulēšanas

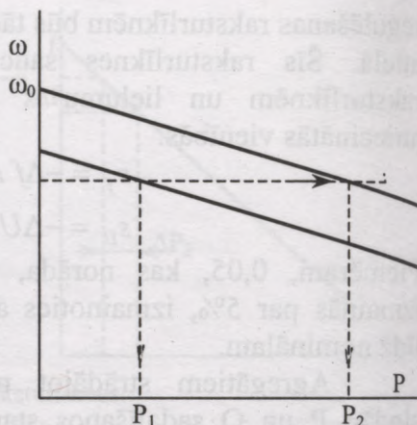
vajadzībām izmanto iestatīšanas orgānus, kas, mainot iestatījumus  $f_0$  un  $U_0$ , pārbīda raksturliķnes pēc vajadzības paralēli sev (7.40.att.).

Agregātu individuālās regulēšanas raksturliķnes kopumā veido ekvivalentās energosistēmas regulēšanas raksturliķnes aktīvās un reaktīvās jaudas bilanču nodrošināšanai.

### 7.7. Aktīvās jaudas bilance.

Elektriskā enerģija gaisa vadu līnijās izplatās ar gaismas izplatīšanās ātrumu. Tātad, praktiski enerģijas patēriņš un tās ražošana sakrīt laikā. Tas nozīmē, ka ražošanai un patēriņam pastāvīgi jāsakrīt reālā laikā.

Aktīvā jauda tiek izmantota mehāniskam darbam un procesiem, kas saistīti ar siltumu. Aktīvā jauda tiek ražota galvenokārt lielās elektrostacijās un tiek pārvadīta pa elektriskiem tīkliem lielos attālumos līdz patērētājiem. Elektriskās enerģijas pārvadē rodas zudumi katrā no tīkla posmiem:



7.40.att. Regulēšanas raksturliķnes nobīde (sekundārā regulēšana).

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n 3I_i^2 R_i,$$

kur  $I_i$  - strāva elektriskā tīkla posmos;

$R_i$  - elektriskā tīkla posmu aktīvā pretestība.

Aktīvās jaudas bilances vienādojums:

$$P_{\text{ģen.}} = P_{\text{patēr.}} + \Delta P = P_{\text{sl.}},$$

kur  $P_{\text{ģen.}}$  - ģeneratoru jauda,

$P_{\text{pater.}}$  - patērējamās slodzes jauda.

Katra bilance tiek nodrošināta, noturot nemainīgā līmenī tai atbilstošu parametru. Tā, piemēram, ūdens bilanci ūdensvadā nodrošina, turot konstantu spiedienu. Preču bilanci tirgū - cenu. Aktīvās jaudas bilancei atbilst parametrs, kas raksturo tās fizikālo būtību.

Aktīvās jaudas avots energosistēmās ir agregāts, kas pārvērš siltuma enerģiju mehāniskā enerģijā - turbīna. Turbīna un ģenerators, kas pārvērš mehānisko enerģiju elektriskā, ir rotējošas mašīnas.

Turbīna šo divu agregātu pāri attīsta griezes momentu  $M_{gr}$ . Ģenerators rada bremzes momentu, kas pretojas griešanai  $M_{br}$ . Stacionārā režīmā šie momenti ir vienādi un pretēji vērsti. Kustību raksturo diferenciālais vienādojums:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{gr} - M_{br}.$$

kur  $J$  - inerces konstante,

$\omega$  - griešanās ātrums,

$M_{gr}$  - griešanās moments, ko attīsta turbīna;

$M_{br}$  - bremzes moments, ko rada ģenerators.

No mehānikas zināms, ka

$$\omega M = P.$$

Tātad,

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = P_{gen.} - P_{sl.}$$

Rezultātā aktīvās jaudas bilance tiek nodrošināta ar noteikumu ka (7.5.att.):

$$P_{gen.} = P_{sl.} \text{ ja } \frac{d\omega}{dt} = 0, \text{ jeb } \omega = const.$$

Ievērojot to, aktīvās jaudas bilanci nodrošina, regulējot frekvenci.

Slodze savukārt ir atkarīga no parametra izmaiņas. Tā, samazinoties frekvencei, elektrodzinēji griežas lēnāk un izpilda mazāku darbu laika vienībā, t.i., patērē mazāku jaudu. Sakarību starp patērējamo jaudu un frekvenci raksturo līkne, ko sauc par slodzes statisko raksturlīkni (7.14.att.). Plašā diapazonā tā ir nelineāra. Pēc aptuveniem vērtējumiem šaurā frekvences izmaiņas diapazonā to lineārizē, izsakot:

$$\Delta P_{sl.} = k\Delta f, \quad (7.1)$$

kur  $\Delta P$  - slodzes izmaiņa, mainoties frekvencei;

$k$  - statisma koeficients, līdzīgs  $\Delta P\% / \Delta f\%$ .

Parasti  $k = 1-3$ .

Frekvenci uztur turbīnu apgriezienu regulatori, iedarbojoties uz regulējošiem vārstiem.

Turbīnu regulēšanas raksturlīknes nosaka apgriezienu regulatoru ieskaņojums. Regulatoriem ir noteikta nejutība un, tātad, to raksturo divas savstarpēji tuvas līnijas. Praktiski sakarību izsaka ar vienādojumu:

$$f = f_0 - sP_{gen.}, \quad (7.2)$$

kur  $f_0$  - frekvence, atbilstoša apgriezieniem tukšgaitā pie sākotnējā iestatījuma;

$s$  - regulatora statisma koeficients,  $\Delta f\% / \Delta P\%$ ;

$P$  - aktīvā slodze.

Izsakot šo sakarību diskrētās starpībās:

$$\Delta f \% = -s \Delta P_{gen.} \% \quad (7.3)$$

Parasti  $s \approx 0,04$ .

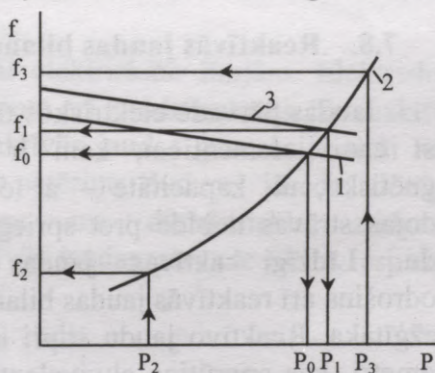
Stacionārā stāvoklī ģenerējošā jauda līdzinās patērējamajai  $P_{gen.} = P_{sl.}$  pie frekvences novirzes  $\Delta f$ . No (7.1) un (7.3) secinām, ka frekvences izmaiņas rezultātā  $P_{gen.}$  un  $P_{sl.}$  mainīsies pretējos virzienos. Summārā jaudas izmaiņa līdzinās izmaiņu starpībai:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta f \left( \frac{1}{s} - k \right) \quad (7.4)$$

Tā, piemēram, ja  $s = 0,05$  un  $k = 3$ , tad  $\Delta P_{\Sigma} \% = \Delta f (20 - 3) = 17 \Delta f \%$ , jeb  $\Delta f \% = 0,059 \Delta P \%$ .

Pateicoties tam, ka energosistēmas funkcionē lielās apvienībās un atsevišķo slodžu izmaiņas ir nelielas, salīdzinot ar kopējo ģenerējošo jaudu, frekvences izmaiņas normālos režīmos ir samērā nelielas. Toties, avārijas gadījumos, kad energosistēmas sadalās daļās, tās var sasniegt bīstamus lielumus.

Ģenerēšanas (1)  
un slodzes (2)  
raksturlīniju savietojums  
parādīts 7.41.attēlā.  
Mainoties slodzei,  
frekvence mainās  
noteiktā diapazonā, kas  
nav vēlams. Frekvenci  
stabilizē, iedarbojoties uz  
apgriezīenu regulatoru  
iestatījumu  $f_0$  (7.2), kas  
pārvieto raksturlīniju (3)  
ar nolūku, lai  $\Delta f = 0$ .



7.41.att. Aktīvās jaudas ģenerēšanas un slodzes statiskās raksturlīknes.

1- ģenerēšanas raksturlīkne; 2- slodzes statiskā raksturlīkne; 3- ģenerēšanas koriģēta raksturlīkne.

Turbīnu apgriezienu regulatoru sauc par primāro regulatoru. Tā iestatījumu izmaiņas bieži realizē ar citu automātisko regulatoru, kas izpilda plašākas funkcijas. Tādu regulatoru sauc par sekundāro, kas kopā ar primāro veido regulatoru hierarhisko sistēmu. Tiek izmantotas arī trīslīmeņu regulatoru hierarhiskās sistēmas.

Izmainoties slodzei  $P_{sl}$ , frekvenci iespējams noturēt nemainīgu ar noteikumu, ka ģenerējošiem avotiem ir divpusīgas jaudas rezerves, kas ļauj izmainīt  $P_{gen}$  nepieciešamā diapazonā. Ja jaudas rezervju nav, tad ģenerējošā jauda izrādās ierobežota un mainās režīma parametrs – frekvence līdz izpildās noteikums  $P_{gen} = P_{sl}$ . Tā, piemēram, jaudas deficīta gadījumā to ierobežo turbīnu pilnīga noslodze. Tādos gadījumos šai jaudai  $P_2$  atbilst pazemināta frekvence  $f_2$ , saskaņā ar slodzes raksturlīkni 2. Gadījumā, ja īslaicīgi tiek fiksēta palielināta ģenerējošā jauda  $P_3$ , tad tai uz slodzes raksturlīknes atbilst paaugstināta frekvence  $f_3$ .

## 7.8. Reaktīvās jaudas bilance.

Jaudas pārvadē elektriskos tīklos un to patērējot, strāva plūst cauri elementiem, kam ir pašindukcija, saistīta ar magnētisko, un kapacitāte – ar elektrisko lauku. Rezultātā veidojas strāvas nobīde pret spriegumu, kas nosaka reaktīvo jaudu. Līdzīgi aktīvās jaudas bilancei energosistēmā jānodrošina arī reaktīvās jaudas bilance, kaut gan šī problēma ir sarežģītāka. Reaktīvo jaudu stipri iespaido sadalīti telpā tīkla parametri, kas apgrūtina ekvivalentā parametra jēdzienu. Bez tam reaktīvās jaudas jēdziens, stingri ņemot, attiecināms uz simetrisko slodzes režīmu un rūpniecisko frekvenci bez sprieguma līknes kropļojumiem.

Reaktīvās jaudas avots ir sinhronās mašīnās: ģeneratori un sinhronie kompensatori (sinhronās mašīnas, kas tiek izmantotas dzinēju režīmā kā reaktīvās jaudas avoti vai patērētāji). Mašīnu reaktīvā strāva un, tātad, reaktīvā jauda ir atkarīga no ierosmes strāvas:

$$I_r = \frac{\sqrt{I_{ier}^2 - (k_2 I_a)^2} - k_1 U}{k_2},$$

kur  $I_a, I_r$  - aktīvā un reaktīvā strāva, A;

$I_{ier}$  - ierosmes strāva, A;

$U$  - spriegums, V;

$k_1$  un  $k_2$  - koeficienti, atkarīgi no mašīnas konstrukcijas, izteikti attiecīgi  $1/\Omega$  un relatīvās vienībās.

Koeficients  $k_1$  ievēro mašīnas ierosmes strāvu tukšgaitā (spriegums nomināls, aktīvā un reaktīvā slodze līdzinās nullei).

Arī kapacitātes ir reaktīvās jaudas avoti:

$$Q = U^2 \cdot b = U^2 \omega C$$

kur  $b$  - kapacitatīvā vadāmība.

Kapacitāte  $C$  piemīt elektriskām līnijām. Elektriskos tīklos kā tīkla elementu izmanto arī kondensatorus. To reaktīvā jauda piedalās bilancē. Reaktīvās jaudas ģenerācija tieši nav saistīta ar primārās enerģijas patēriņu. Zudumi jāsedz, vienīgi, sinhrono mašīnu tinumos un dielektriskie zudumi-kondensatoros. Toties reaktīvās jaudas pārvade tīklos iespaido strāvu:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

un, tātad, aktīvās jaudas zudumus tīkla elementos:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n 3I_i^2 R_i,$$

kur  $I_i$  un  $R_i$  ir tīkla elementu strāva un to parametri.

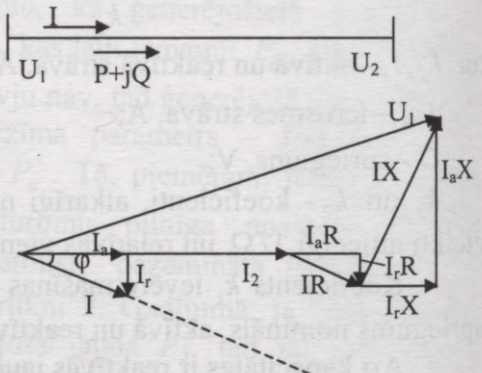
Izsakot strāvas ar jaudām, zudumi līdzinās:

$$\Delta P = \sum_{r=1}^n \frac{P_i^2 R_i}{U_i^2} + \sum_{r=1}^n \frac{Q_i R_i}{U_i^2}.$$

Aktīvās jaudas plūsmas no lielām un tālām elektrostacijām ir neizbēgamas. Turpretī reaktīvo jaudu nav jāpārvada lielos attālumos, jo to iespējams ģenerēt patērēšanas vietā,

uzstādot kondensatorus. Tas dod iespēju minimizēt zudumu izteiksmes otro locekli.

Reaktīvo jaudu patērē elektriskie dzinēji un citas patērētāju iekārtas, kur ir elektromagnētiskie lauki, kā arī transformatori un



7.42.att. Elektriskās līnijas sprieguma krituma vektoru diagramma

elektriskās līnijas reaktīvās jaudas zudumu veidā:

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^n I_i^2 X_i = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2 X_i}{U_i^2} + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i^2 X_i}{U_i^2}.$$

No izteiksmes izriet, ka reaktīvās jaudas patēriņš elektriskos tīklos ir atkarīgs no aktīvo jaudu plūsmām. Ja aktīvās jaudas zudumi elektriskos tīklos sasniedz 10-20% no ražotās, tad reaktīvās jaudas zudumi tīklos sasniedz 50% tāpēc, ka induktīvā pretestība  $X$  ir lielāka par aktīvām pretestībām:

$$X \gg R.$$

Lai noteiktu parametru, kas nosaka reaktīvās jaudas bilanci, jāapskata elektriskās līnijas vektora diagramma (7.42.att.). Līnijā plūst strāva  $I$ , nobīdīta pret spriegumu  $U_2$  zem leņķa  $\varphi$ .  $I_a$  un  $I_r$  - attiecīgi aktīvās un reaktīvās strāvas

komponenti. Lielumi  $I_a R, I_r X$  - sprieguma kritumi garenvirzienā,  $I_r R$  un  $I_a X$  - šķērsvirzienā. Izsakot strāvas ar jaudām:

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_2 = \frac{PR + QX}{U_1} + j \frac{PX - QR}{U_1}.$$

Sprieguma kritumi ir katrā tīkla posmā. Atšķirībā no frekvences, kas ir vienāda visos mainstrāvas tīkla punktos, spriegumi dažādos tīkla punktos ir dažādi. Tātad, reaktīvās jaudas bilances jēdzienam, atšķirībā no aktīvās jaudas bilances ir lokāls raksturs, un to apskata lielu slodzes mezglu ietvaros.

Nemot vērā to, ka  $X \gg R$ , sprieguma krituma izteiksmē rada bažas lielumi  $QX/U$  un  $PX/U$ .

No lieluma  $QX$  izriet, ka lielas reaktīvās jaudas plūsmas tīklos rada lielus sprieguma kritumus un, tātad, sprieguma pazeminājumus patērēšanas mezglos. Tas nav pieļaujams, jo spriegums ir viens no galvenajiem elektriskās enerģijas rādītājiem. Enerģiju pilnvērtīgi var izmantot tikai pie spriegumiem, kas ir tuvi nomināliem. Reaktīvās jaudas bilances jānodrošina lielu patēriņa mezglu ietvaros. Ja slodžu mezglā trūkst ģenerējamās reaktīvās jaudas, tajā pazemināsies spriegums. Tātad, spriegums ir reaktīvās jaudas bilances parametrs:

$$Q_{gen.} = Q_{sl.} \text{ pie } U = const.$$

Sprieguma stacionāro režīmu nosaka reaktīvās slodžu un reaktīvo ģenerējamo jaudu atkarība no spriegumiem. Ievērojot to, ka spriegumi dažādos tīkla punktos atšķiras un ka bez ģeneratoriem reaktīvās jaudas avoti ir ne tikai koncentrētās, bet arī tīklu kapacitātes, statiskās slodžu un ģenerējošo jaudu raksturlīknes figurē kā ekvivalenti. Tos var noteikt eksperimentāli vai uz matemātiskā modeļa.

Sprieguma uzturēšanas vajadzībām tīklā izvēlas kādu kontrolpunktu, ar nolūku, lai tā spriegums varētu visumā raksturot tā apkārtnē esošā tīkla spriegumu.

Vienkāršotu reaktīvās slodzes raksturlīniju nominālo spriegumu zonā var izteikt:

$$\Delta Q_{sl} = k_u \Delta U, \quad (7.5)$$

kur  $\Delta Q_{sl}$  - slodzes izmaiņa, mainoties spriegumam par  $\Delta U$ ;

$k_u$  - stāvuma koeficients līdzīgs  $\Delta Q_{sl} \% / dU\%$ .

Parasti  $k_u = 2-5$ .

Spriegumu uztur regulējamo ģenerējošo avotu sprieguma regulatori, iedarbojoties uz sinhrono ģeneratoru ierosmes strāvu. Procesā piedalās arī statistiskie reaktīvās jaudas avoti un diskrēti regulējamie kondensatori. Ekvivalentā ģenerējošā avota raksturlīniju nosaka sinhrono ģeneratoru sprieguma (ierosmes) regulatori. Lai nodrošinātu reaktīvās jaudas sadalījuma noteiktību starp ģeneratoriem, tiem jābūt ar pozitīvu statistisku attiecībā pret savu reaktīvo jaudu:

$$U_o = U_g + s_u Q_g,$$

kur  $U_g$  un  $Q_g$  - ģeneratora spriegums un reaktīvā jauda;

$U_o$  - regulatora sprieguma iestatījums;

$s_u$  - sprieguma statistiska koeficients

( $s_u = \Delta U \% / \Delta Q_g \% \approx 0,05$ ).

Līdz ar to arī ekvivalentā sistēmas rajona raksturlīknes izteiksme ir:

$$U_o = U_{ekv} + s_{uekv} Q. \quad (7.6)$$

Izsakot šo sakarību diskrētās starpībās:

$$\Delta U \% = -s_{uekv} \Delta Q \% . \quad (7.7)$$

Stacionārā stāvoklī ģenerējamā jauda līdzinās patērējamajai  $Q_g = Q_{sl}$  pie sprieguma  $U$ . No (7.5) un

(7.6) redzam, ka sprieguma izmaiņas rezultātā  $Q_g$  un  $Q_{sl}$  izmainīsies pretējos virzienos. Summārā jaudas izmaiņa līdzinās šo izmaiņu starpībai:

$$\Delta Q_{\Sigma} = \Delta U \left( \frac{1}{s_{uekv}} - k_u \right).$$

Tā, piemēram, pie  $s_u = 0,05$  un  $k_u = 4$ :

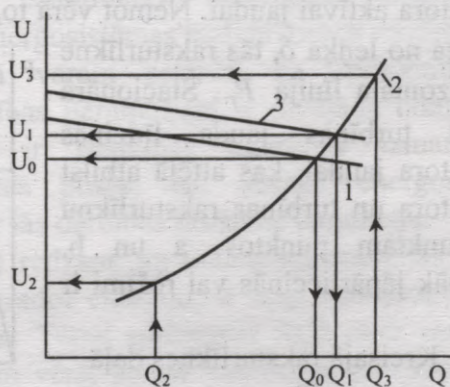
$$\Delta Q_{\Sigma} \% = 16 \Delta U \%,$$

jeb

$$\Delta U \% = 0,063 \Delta Q_{\Sigma} \%$$

Ģenerēšanas (1) un slodzes raksturlīniju (2) savietojums U-Q koordinātēs parādīts 7.43.attēlā. Spriegums tiek stabilizēts, iedarbojoties uz sprieguma (ierosmes) regulatora iestatījumu  $U_0$  no rokas vai ar sekundārā regulatora palīdzību.

Normāli režīmu iespējams nodrošināt tikai ar noteikumu, ja eksistē divpusīgas reaktīvās jaudas rezerve, izvietota ģeneratoros. Ja veidojas reaktīvās jaudas deficīts, tad sistēmā iestājas sprieguma pazeminātais līmenis  $U_2$ , pie kura tiek izpildīts bilances vienādojums  $Q_g = Q_{sl}$ . Toties, ja iestājas reaktīvās jaudas pārpalikums, tad iestājas attiecīgais paaugstināts spriegums  $U_3$ .

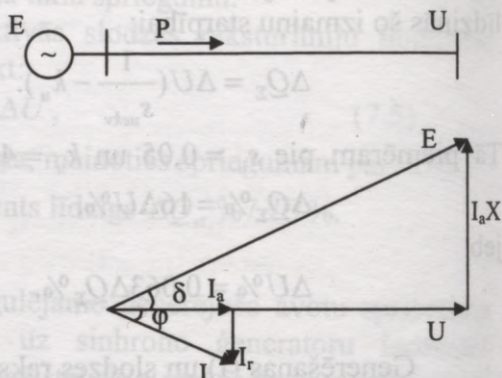


7.43.att. Reaktīvās jaudas ģenerēšanas un slodzes statistiskās raksturlīknes.

1- ģenerēšanas raksturlīkne; 2- slodzes statistiskā raksturlīkne; 3- ģenerēšanas koriģēta raksturlīkne.

## 7.9. Pārvades stabilitāte.

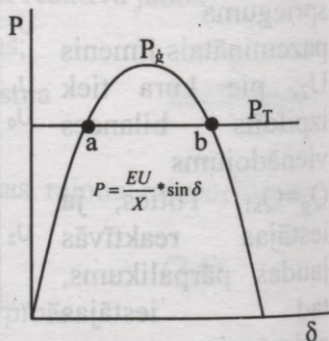
Sevišķu vērtību  
pelna  $PX/U$  sprieguma  
krituma locekļis.  
Neņemot vērā  $R$  un  
 $I_r$  to mazo lielumu  
dēļ, vektoru  
diagramma  
vienkāršojas  
(7.44.att.). Tad:



$I_a X = E \sin \delta$ . 7.44.att. Sprieguma kritumu diagramma  
Reizinot abas induktīvā pretestībā.  
vienādojuma puses ar  $U$ :

$$P = \frac{EU}{X} \sin \delta.$$

Šā vienādojuma grafiskais attēls (7.45.att.) atbilst ģeneratora aktīvai jaudai. Ņemot vērā to, ka turbīnas jauda nav atkarīga no leņķa  $\delta$ , tās raksturlīkne ir horizontāla līnija  $P_T$ . Stacionārā režīmā turbīnas jauda līdzinās ģeneratora jaudai, kas attēlā atbilst ģeneratora un turbīnas raksturlīkņu krustpunktam punktos a un b. Turpmāk jāpārlicinās vai režīmi ir stabili.



Kreisajā raksturlīknes daļā

$$\frac{dP}{d\delta} > 0.$$

Pieaugot leņķim  $\delta$  elektriskā  
jauda aug, pārsniedz turbīnas jaudu

7.45.att. Elektrostacijas  
stabilitātes raksturlīkne.  
 $P_g$  - ģeneratoru  
raksturlīkne;  $P_t$  - turbīnu  
raksturlīkne.

$P_T$  un rezultātā agregāts bremsējas, atgriežot leņķi  $\delta$  sākuma stāvoklī. Tātad šajā raksturlīknes daļā režīms ir stabils.

Kreisajā pusē

$$\frac{dP}{d\delta} < 0.$$

Šinī gadījumā, pieaugot leņķim  $\delta$ , elektriskā jauda kļūst mazāka par turbīnas jaudu, agregāts paātrinās un, nepārtraukti palielinoties leņķim  $\delta$ , zaudē sinhronismu.

No apskatītā redzam, ka, pārvadot lielas jaudas caur garām līnijām, eksistē stabilitātes problēma, kas ierobežo pārvadāmās jaudas. Stabilitātes sabrukums var iestāties kā stacionārā režīmā, kad jaudas plūsma sasniedz lielumu

$P_{\max} = \frac{EU}{X}$  (statiskā stabilitāte) normālā vai pēcavārijas

režīmā, kā arī avārijas gaitā, kad sprieguma  $U$  samazināšanās

dēļ lielums  $P_{\max} = \frac{EU}{X}$  kļūst jūtami mazāks par pirmsavārijas

lielumu (dinamiskā stabilitāte). Stabilitātes robežlielumu nosaka, izmantojot energosistēmas matemātiskos modeļus.

No apskatītā varam secināt, ka spriegumam kā energosistēmas darbības parametram ir divējāda nozīme. No vienas puses, tas ir normālas enerģijas izmantošanas noteikums. No otras puses, tas nosaka energosistēmas stabilitāti un, tātad, ir tās darbības drošuma parametrs.

No (7.45.att.) redzam, ka jaudas un enerģijas zudumi tīklā, kas rodas, pārvadot enerģiju, ir apgriezti proporcionāli sprieguma kvadrātam. Tātad spriegums tīklā jātur maksimāli augsts. Vienīgi jāņem vērā, ka tas neattiecas uz tīklu, pie kā tiek pieslēgti patērētāji, jo paceļot spriegumu, saskaņā ar statiskām raksturlīknēm pieaugs patēriņš. Šo divu prasību saskaņošanu panāk, pareizi izvēloties transformatoru transformācijas koeficientus.

Var secināt, ka spriegums ir arī tīklu ekspluatācijas ekonomiskuma rādītājs.

### 7.10. Elektrisko iekārtu aizsardzība.

Elektrisko iekārtu bojājumu gadījumos notiek īsslēgumi. Tos izraisa strāvas, kas spējīgas izkausēt vadus, izsaukt ugunsgrēkus, energosistēmas stabilitātes sabrukumus un nodara lielus zaudējumus. Tāpēc bojātie elementi jāatslēdz pēc iespējas īsā (dažu sekunžu) laikā. Šo funkciju izpilda aizsardzības. Bojājumu vietā deg elektriskais loks. Atslēdzot bojāto elementu pietiekoši ātri, pazūd barojošs spriegums un loks nodziest. Daudzos gadījumos, lokam nodziestot, bojājums nepaspēj attīstīties. Tāpēc pēc 1-1,5 sek. spriegumu atkal ieslēdz un normālais stāvoklis atjaunojas. Šo funkciju izpilda automātiskā atpakaļieslēgšanās iekārta (AAI), ko iedarbina, nostrādājusī aizsardzība.

Aizsardzībām tiek uzstādītas vairākas prasības:

- tām jābūt jutīgām pret izcēlušamies bojājuma pazīmēm;
- tām jābūt selektīvām, kas nozīmē spēju atslēgt tieši bojāto elementu un pēc iespējas tikai to;
- aizsardzībām jābūt rezervētām. Ja pamataizsardzība vai jaudas slēdzis dažādu apstākļu dēļ atsaka, tad jānostrādā rezerves aizsardzībai, kas atrodas uz tā paša slēdža vai uz blakuselementa slēdža, kas tad arī atslēdz bojājuma vietu.

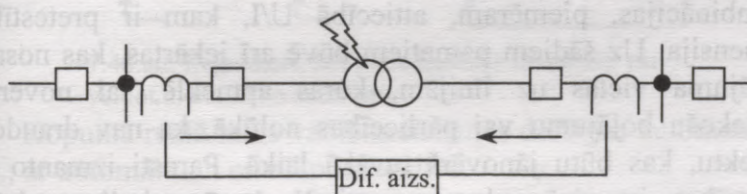
Aizsardzību jutību nodrošina uz matemātiskā modeļa aprēķinu pamata, imitējot iespējamus bojājuma veidus un attiecīgi ieskaņojot aizsardzības mēroģanus.

Elektrisko iekārtu barošana var būt vienaspusīga vai divpusīga. Tā, piemēram, sadales tīklu barošana parasti ir vienaspusīga. Toties pārvades tīklu barošana, kuri darbojas slēgtās shēmās, parasti ir divpusīga. Pie vienaspusīgas barošanas

elementus aizsargā un bojājumu gadījumos atslēdz no barošanas puses.

Divpusīgi barojamiem elementiem ir aizsardzības un jaudas slēdži no abām pusēm.

Divpusīgas aizsardzības, kas spēj pilnīgi aizsargāt elementu minimālā slēdža atslēgšanās laikā reaģē uz elementa galos izcēlušamies īsslēguma strāvas starpību (7.46.att.). Šādas aizsardzības sauc par diferenciālām. Šinī gadījumā aizsardzībai jāpievada informācija par abām strāvām. Elementam, kas atrodas viena objekta ietvaros, piemēram, transformatoram, to var realizēt samērā vienkārši. Turpretī garām līnijām šinī



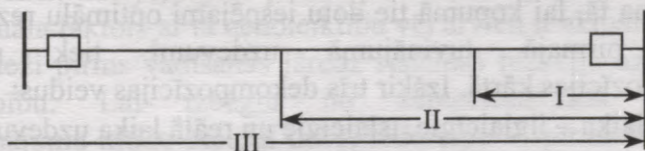
7.46.att. Diferenciālās aizsardzības struktūra.

gadījumā jāizmanto speciāli izveidotus informācijas kanālus.

Momentānās aizsardzības ir iespējamas arī vietās, kur nekļūdaini var konstatēt bojājumu, pamatojoties uz īsslēguma parametriem.

Pārējos gadījumos elementu aizsargā no abām pusēm ar aizsardzībām, kas kontrolē lokālos parametrus.

Selektivitāti nodrošina, izmantojot nelielus laika ieturējumus. Tas nozīmē, ka pamataizsardzība nostrādā ar



7.47.att. Aizsardzības zonas.

minimālu laika ieturējumu, piemēram 0,5 sek. Rezerves aizsardzības arī vienlaicīgi nostrādā, bet tām ir lielāks laika

ieturējums. Gadījumā, ja pamataizsardzība nostrādā sekmīgi, rezerves aizsardzības nostrādāt nepaspēj un pēc bojājuma atslēgšanas atgriežas sakumā stāvoklī. Aizsardzības darbības zonas uz elektriskās līnijas parādītas piemērā 7.47. attēlā. Šeit I- momentānas darbības zona, ko nodrošina jutība pret īsslēguma parametru, II- otrā zona ar laika ieturējumu 0,6 sek., un III- rezervēšanas zona 1,2 sek.

Bojājumu gadījumos, kas saistīti ar īsslēgumiem, elektriskie parametri izmainās: daudzkārtīgi pieaug strāva, samazinās spriegums. Uz šiem parametriem tad arī reaģē aizsardzība. Šim nolūkam izmanto arī šo parametru kombinācijas, piemēram, attiecībā  $U/I$ , kam ir pretestības dimensija. Uz šādiem pamatiem būvē arī iekārtas, kas nosaka bojājuma vietas uz līnijām, kuras apmeklē, lai novērstu paliekošu bojājumu vai pārliecības nolūkā, ka nav draudošu defektu, kas būtu jānovērš tuvākā laikā. Parasti izmanto šīs attiecības imagināro komponenti  $X$ , kurā neietilpst aktīvā komponenta un, tātad, samazinās kļūda nenoteiktās loka pretestības dēļ bojājuma vietā.

Aizsardzības iekārtas būvē galvenokārt uz mikroprocesoru pamata.

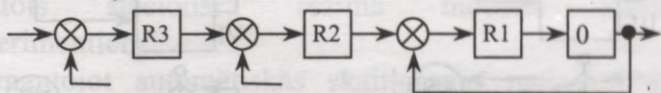
### 7.11. Energosistēmu vadīšana.

Energosistēmas vadīšanas gaitā jārisina dažādi sarežģīti uzdevumi. Ir jābūt skaidrībai par šo uzdevumu dažādību un tie ir jārisina tā, lai kopumā tie dotu iespējami optimālu rezultātu. Tātad pirmajā tuvinājumā uzdevumi tiek risināti dekompozīcijas kārtā. Izšķir trīs dekompozīcijas veidus:

- pēc laika – ilglaicīgie, īslaicīgie un reālā laika uzdevumi;
- pēc uzdevuma tipa – saimnieciskie, tehniskie (aktīvās, reaktīvās jaudas bilances, pretavārijas) utt.

- pēc teritorijas – sadales tīkla uzņēmumi, pārvades tīkli, elektrostacijas, uzskaites un norēķinu uzņēmumi.

No vadīšanas viedokļa sevišķu vērtību pelna reālā laika uzdevumi, kas lielā mērā tiek automatizēti. Šim nolūkam veidojas automātisko regulatoru hierarhiskās struktūras (7.48.att.). Regulatori šajās struktūrās pilda dažādus uzdevumus ar dažādu ātrdarbību, netraucējot viens otru. Pie šiem uzdevumiem pieder aktīvās un reaktīvās jaudas bilances, kas apskatītas §7.6.



7.48.att. Regulatori, kas pilda dažādas funkcijas, var veidot hierarhisko struktūru.

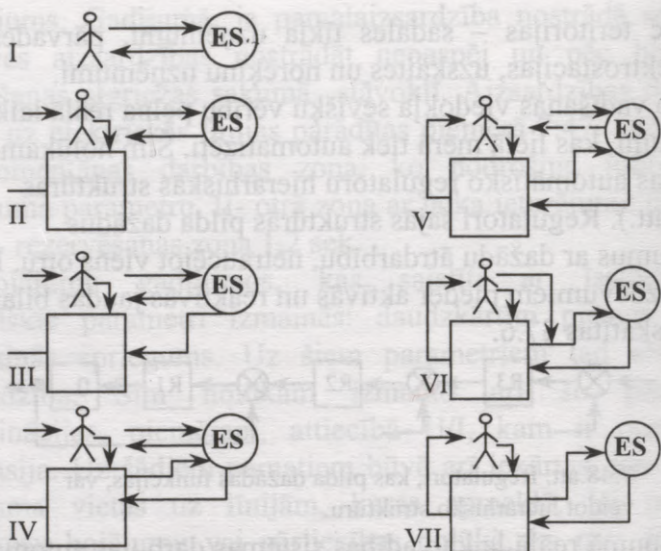
Kopumā reālā laika vadības sistēmas darbojas automatizēti, t.i., ar automātu un cilvēku līdzdalību.

Vadības sistēmu attīstības pakāpēs cilvēku līdzdalība procesos ir dažāda (7.49.att.). Sākotnēji vada cilvēks. Pēc tam to atbalsta ar padomiem skaitļošanas iekārtas. Šinī posmā sāk plaši pielietot matemātiskos modeļus un datu bāzes.

Vēlāk noteiktus procesus jau vada automātika uz skaitļošanas iekārtu pamata. Citus vēl turpina vadīt personāls.

Ar laiku arvien lielāks uzdevumu skaits tiek formalizēts un automātikas darbības sfēra paplašinās, bet personāls turpina pildīt uzraudzības funkcijas. Neformalizēto uzdevumu daudzums, kas joprojām paliek personāla ziņā, ir plašs. Tāpat personāla faktors ar tā nenoteiktību vēl arvien ir aktuāls.

Bieži pirms vadīšanas jāredz sistēmas reakcija uz vadības iedarbību. Lai izbēgtu no nepieciešamības pielietot mēģinājumu-kļūdu metodi dabā, iedarbību vispirms realizē uz matemātiskiem modeļiem. Tādā veidā panāk to, ka dabā rīcība kļūst nekļūdaina.



7.49.att. Energosistēmas vadīšana pie dažādas sistēmu attīstības pakāpēm.

Vadības gaitā izmanto dažādus matemātiskos modeļus. Pirmais no tiem ir stacionārā režīma modelis. Tas atveido aktīvās un reaktīvās jaudas plūsmas pārvades tīklos pie zināmiem un ievadāmiem izejas datiem. Šajā modelī notiek pakāpenisko tuvinājumu – iteratīvie aprēķini, līdz kamēr kļūdas nepārsniedz uzdoto lielumu (konverģence). Šis modelis ir arī citu modeļu sastāvdaļa.

Otrais ir aktīvās jaudas optimizācijas modelis. Šajā modelī saskaņā ar noteiktu metodiku tiek variētas elektrostaciju noslodzes, līdz kamēr tiek atrasts variants, kas atbilst minimāliem izdevumiem. Katrā no variantiem tiek izrēķināts stacionārs režīms.

Trešais ir spriegumu un reaktīvās jaudas optimizācijas modelis, saskaņā ar kuru iestata pārvades tīkla mezglos optimālus spriegumus, saites autotransformatoru transformācijas koeficientus un elektrostaciju noslodzes ar

reaktīvu jaudu, kā arī nosaka reaktoru režīmu kapacitatīvās jaudas patēriņam minimālo slodžu režīmos.

Ceturtais modeļa uzdevums – noteikt statistiskās stabilitātes robežnoteikumus. Arī šeit izmanto pirmo modeli tā pakāpeniskās noslodzes gaitā līdz kamēr kļūdas iterācijas procesā sāk nevis samazināties, bet, otrādi, palielināties (divergence). Tas liecina par tuvošanos robežrežīmam.

Piektais modelis tiek izmantots pārejas procesu un, tāpat, dinamiskās stabilitātes noteikšanai. Arī šeit tiek izmantots stacionārā režīma modelis katrā no "eksperimentiem".

Izmantojot automātiskās skaitļošanas metodes, veidojas imitācijas modeļi. Tad lielā skaitļošanas masā var tikt izdibinātas vājās vietas, kas var parādīties pie dažādām pat retām avārijām, kas dod iespēju savlaicīgi izbēgt no bīstamām sekām, kā arī izpētīt aizsardzības darbības rezultātus dažādās bojājumu situācijās.

Sestais ir sadales tīklu matemātiskā modeļa komplekss, kas nosaka normālos tīkla pārtraukumus, sprieguma regulēšanas parametrus, transformatoru transformācijas koeficientus, kā arī dod priekšstatu par tīkla noslodzi un atklāj tā vājās vietas.

Katram modelim atbilst noteikta datu bāze. Tajā ietilpst ziņas par shēmām, parametriem, slodzēm un to izmaiņām laikā. Bez tam aktuāla ir datu bāžu attīstība, situācijām, kad samērā sarežģītos gadījumos jāpieņem atbildīgie lēmumi. To skaits kļūst arvien lielāks.

### **Jautājumi paškontrolei.**

1. *Kāds ir sinhronā ģenerators darbības princips?*
2. *Ko nozīmē enkura reakcija?*
3. *Kāpēc ģeneratoriem jāmaina ierosmes strāva plašās robežās?*
4. *Kādas ierosmes sistēmas tiek izmantotas?*
5. *Kā ģeneratorus dzesē?*
6. *Kādiem nolūkiem tiek izmantoti transformatori?*
7. *Kādos gadījumos izmanto autotransformatorus?*
8. *Kādiem mērķiem izmanto jaudas slēdžus?*
9. *Kādi ir jaudas slēdžu tipi?*
10. *Kādus vēl komutācijas aparātus izmanto elektriskos tīklos?*
11. *Kā izvēlas elektrisko līniju nominālos spriegumus?*
12. *No kā ir atkarīgi jaudas zudumi tīklos?*
13. *No kā ir atkarīgs sprieguma kritums līnijā?*
14. *Ko nozīmē pārvades stabilitāte un no kā tā ir atkarīga?*
15. *Kāds parametrs raksturo aktīvās jaudas bilanci?*
16. *Kāds parametrs raksturo reaktīvās jaudas bilanci?*
17. *Kādam nolūkam tiek izmantota aktīvā jauda?*
18. *Kādam nolūkam tiek izmantota reaktīvā jauda?*
19. *Kādi ir reaktīvās jaudas avoti?*

## 8. NODAĻA. ENERĢIJAS IZMAKSAS UN TARIFI

### 8.1. Izdevumu struktūra enerģētikā.

Izdevumi enerģētikā, tāpat kā citās ražošanas nozarēs, sastāv no divām daļām.

Pirmā izdevumu daļa ir saistīta ar iekārtas un enerģētiskās infrastruktūras uzturēšanu. Pie šīs izdevumu daļas pieder iekārtu amortizācijas izdevumi, personāla uzturēšana, enerģijas patēriņš, kurš tieši nav saistīts ar ražošanas apjomu, zemes nodoklis utt.

Energosistēmu funkcijas saistītas ne tikai ar tekošā enerģijas patēriņa nodrošināšanu, bet arī ar funkcionēšanas nodrošinājumu nākotnē. Šim nolūkam tiek prognozēts patēriņš un savlaicīgi ieviestas jaunas ražošanas iekārtas. Izdevumi attīstības vajadzībām arī attiecināmi uz pastāvīgiem.

Otrā izdevumu daļa saistīta ar kurināmā un citu ražošanas procesā nepieciešamo izejmateriālu iegādi. Šie izdevumi ir atkarīgi no enerģijas ražošanas apjoma. Ievērojot enerģētisko agregātu īpašības, šiem izdevumiem ir komplicēta sakarība, ko pirmā skatījumā var ņemt vērā kā lineāru. Šo izdevumu daļu sauc par mainīgo.

Mainīgie izdevumi ir elektrostacijās. Turpretī izdevumi elektrisko un siltuma tīklu uzturēšanai, neskaitot zudumus tajos (kurus varētu daļēji attiecināt uz mainīgajiem), ir pastāvīgi.

Izdevumus var izteikt ar vienādojumu:

$$I = A + a \cdot W,$$

kur A - izdevumu pastāvīgā sastāvdaļa;

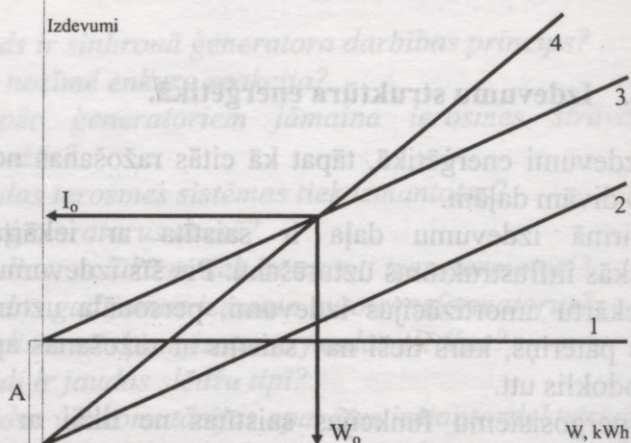
a - ražotās enerģijas vienības izmaksa;

W - enerģijas patēriņa apjoms.

Ienākumus var izteikt ar vienādojumu:

$$I_{ien} = b_{vid} \cdot W,$$

kur  $b_{\text{vid}}$  - enerģijas vienības cena jeb vidējais tarifs.



8.1.att. Izdevumu atkarība no nodotās enerģijas daudzuma. Izdevumi: 1 - pastāvīgā sastāvdaļa; 2 - mainīgā sastāvdaļa; 3 - summārie izdevumi; 4 - summārie ienākumi

Vidējo tarifu  $b$  var noteikt, pielīdzinot ienākumus izdevumiem:

$$b_{\text{vid}} = \frac{A}{W} + a.$$

Acīmredzot, ka vidējais tarifs  $b$  būs atkarīgs no realizācijas apjoma  $W_0$  (8.1.att.).

Savukārt, pie zināma vidējā tarifa  $b_{\text{vid}}$  var noteikt realizācijas apjomu, kurš nepieciešams izdevumu attaisnošanai:

$$W_0 = \frac{A}{b_{\text{vid}} - a}.$$

Tātad, saimnieciskai darbībai nepieciešama enerģijas realizācijas apjoma prognoze.

Lai enerģijas tarifa struktūra atbilstu enerģijas izmaksu struktūrai tajā būtu nepieciešama pastāvīgā un mainīgā sastāvdaļa. Cenu noteikšanā citās nozarēs tāda pieeja izraisa grūtības. Enerģētikā tas ir iespējams.

No 7.37.attēla izriet, ka enerģijas patēriņam ir sarežģīts raksturs. Patēriņa nevienmērība ir par cēloni tam, ka noteiktā laika periodā patēriņš tiek segts ar termoelektrocentrālēm, kuru kurināmā patēriņš ir minimāls (ap 250 g/kWh). Citā laikā patēriņu sedz kondensācijas elektrostacijas ar patēriņu 350 g/kWh. Maksimālo slodžu stundās patēriņu sedz vēl mazāk ekonomiskas elektrostacijas, kuru enerģija tiek vērtēta vēl augstāk, vai HES.

Izmantojot tarifus ar vairākām sastāvdaļām, iespējams iesaistīt patērētājus slodzes rakstura uzlabošanas procesā, kas dod ekonomisku ieguvumu kā patērētājiem, tā energosistēmai, samazinot patērējamo jaudu maksimālo slodžu stundās.

Sīkākkiem patērētājiem izmanto visvienkāršāko tarifu

$$T_1 = b_1 \cdot W.$$

Var izmantot tarifu

$$T_2 = A_1 + b_2 \cdot W,$$

kur  $A_1$  - var uzskatīt par abonēšanas maksu, atkarīgu no patērējamās jaudas (drošinātāja nominālās vērtības).

Ievērojot enerģijas dažādās izmaksas tarifu zonās, var veidot tarifu saskaņā ar:

$$T_3 = A_3 + b_1 \cdot W_1 + b_2 \cdot W_2 + b_3 \cdot W_3 + \dots$$

kur -  $b_1 \dots b_i$  - dažādu laika zonu enerģijas vienības cenas.

Šis tarifs rada stimulu patērēt vairāk enerģijas lētāko tarifu periodos, piemēram, naktīs. Līdz ar to izlīdzinās patēriņa raksturs, kas kļūst izdevīgs arī energosistēmai. Izdevīga patēriņa rakstura formēšanai lietderīgs arī tarifs:

$$T_4 = A + c \cdot P + b_1 \cdot W_1 + b_2 \cdot W_2 + \dots,$$

kur  $c \times P$  - maksa par pieņemto jeb atļauto maksimālo aktīvās jaudas patēriņu.

Ja  $c \times P$  sastāda būtisku maksas sastāvdaļu, patērētājam kļūst izdevīgi izslēgt no tehnoloģijas maksimālo slodžu stundās energoietilpīgus agregātus, paredzot pusfabrikātu sagatavošanu

rezervei citā laikā pat tad, ja tas prasa zināmus kapitālieguldījumus.

Visas tarifu grupas kopā veido vidējo tarifu:

$$\frac{T_1W_1 + T_2W_2 + \dots + T_nW_n}{W_0} = b_{vid}.$$

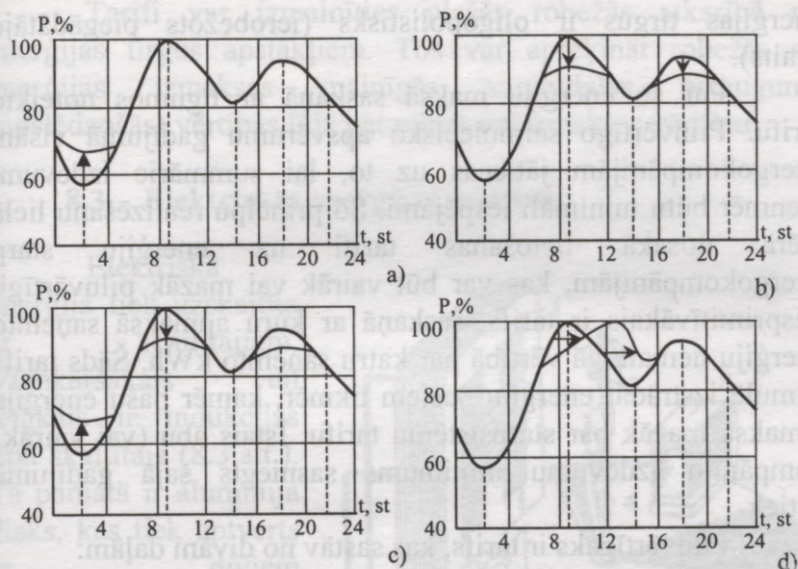
Veidojot tarifa politiku, jāņem vērā sociālie apsvērumi, saistīti ar ražošanas un reģionu attīstību.

Dabīgi, ka sarežģītāku tarifu īstenošanai ir nepieciešamas iekārtas, kas fiksē kā enerģijas patēriņu dažādos tarifa intervālos, tā arī jaudas patēriņu maksimālo slodžu stundās.

Vēl jāņem vērā, ka patērētāji var saņemt enerģiju no dažādiem energosistēmas tīkliem. Tā lielas jaudas patērētāji var saņemt enerģiju no 110 kV tīkla. Dabīgi, ka šinī gadījumā tarifā neiekļauj apmaksu par zemāko spriegumu tīklu uzturēšanu un tas būs attiecīgi zemāks. Tas pats attiecas arī uz patērētājiem, kas saņem enerģiju tieši no 6...20 kV tīkliem. Tātad tarifi var būt dažādi patērētājiem, kas saņem enerģiju no dažādām energosistēmas vietām.

Aktīvo jaudu ražo elektrostacijās un nodod lielos attālumos patērētājiem. Zudumus tīklā var jūtami samazināt, novēršot reaktīvās jaudas plūsmas. Reaktīvo jaudu var ražot patēriņa vietās, ieslēdzot darbā kondensatoru baterijas, kas ģenerē reaktīvo jaudu. Tātad kondensatoru baterijas uzstāda pie patērētājiem un tām jāatbilst reaktīvās jaudas patēriņam. Šim nolūkam lieto automātiskās iekārtas, kas, patēriņam augot, ieslēdz papildu kondensatorus, bet, tam samazinoties, atslēdz tos. Dabīgi, ka pareiza reaktīvās jaudas kompensācija arī jākontrolē un tas ietilpst uzskaites funkcijās. Tā novērš liekas reaktīvās jaudas izdošanu energosistēmas tīklā un pārāk lielu reaktīvās jaudas patēriņu no tīkla maksimālās slodzes laikā.

8.2.attēlā parādītas patēriņa rakstura izmaiņas, ko izsauc dažādu tarifu lietošana.



8.2.att. Slodzes grafika izmaiņas piemēri.

Ja enerģijas patērētāji nevar brīvi izvēlēties piegādātāju, tad energosistēma attiecībā pret patērētāju ir monopola uzņēmums. Tarifus šādiem uzņēmumiem pārbauda un apstiprina valsts institūcijas.

## 8.2. Starpsistēmu enerģijas tarifi.

Enerģētikas kompānijas bieži apgādā savas darbības reģiona patērētājus ne tikai ar pašas ražoto elektrisko enerģiju, bet šim nolūkam pērk enerģiju arī no kaimiņu reģionu kompānijām, saņemot to pa augstā sprieguma līnijām. Pēc tam šī enerģija tiek pārveidota zemākos spriegumos, līdz nonāk pie patērētājiem. Tātad kaimiņu energokompānijām ir savstarpējie enerģijas pirkšanas-pārdošanas darījumi.

Energosistēma var izvēlēties kaimiņu piegādātājus, vadoties pēc enerģijas tirgus apstākļiem. Šādā skatījumā

enerģijas tirgus ir oligopolistisks (ierobežots piegādātāju skaits).

Par šo enerģiju maksā saskaņā ar līgumos noteikto tarifu. Pilnvērtīgo saimniecisko apsvērumu gadījumā visām energokompānijām jātiecas uz to, lai summārie izdevumi vienmēr būtu minimāli iespējami. Šo principu realizēšanu lielā mērā nosaka lietošanas tarifi uz enerģiju starp energokompānijām, kas var būt vairāk vai mazāk pilnvērtīgi. Visprimitīvākais ir tarifs, saskaņā ar kuru apmaksā saņemto enerģiju nemainīgā vērtībā par katru saņemto kWh. Šāds tarifs stimulē izstrādāt enerģiju pašiem tīkmēr, kamēr pašu enerģija izmaksā mazāk par starpsistēmu tarifu. Īstais abu (vai vairāk) kompāniju izdevumu minimums sasniegts šajā gadījumā netiek.

Pilnvērtīgāks ir tarifs, kas sastāv no divām daļām:

$$T = a \cdot P_{\max} + b \cdot W,$$

kur  $a$  - tarifs par papildu jaudu  $P_{\max}$ , ko spiesta darbināt kaimiņu energosistēma, lai nodrošinātu līgumā noteikto enerģijas daudzumu;

$b$  - tarifs par enerģijas vienību, kuru nosaka, balstoties uz vidējiem mainīgiem izdevumiem.

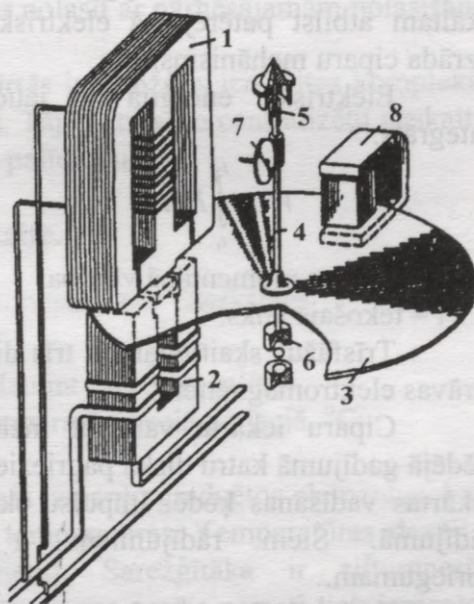
Šāds tarifs dod lielāku iespēju minimizēt kopējos izdevumus.

Tirgus ekonomikai piemērotos gadījumos lielumu  $b$  nepieņem konstantu, bet nosaka nepārtraukti reālā laikā. Šajā gadījumā enerģijas izmaksas katram laika intervālam (piemēram, pusstundai) un katrai vietai tiek attēlotas uz datoru sistēmām, un operātors (kurš strādā nepārtraukti) var būt pilnvarots slēgt darījumus par enerģijas pirkšanu un pārdošanu. Tā, piemēram, ja vienas energosistēmas enerģija uz robežas ar kaimiņu energosistēmu ir 4 centi, bet otrai tajā pašā vietā 5 centi, un ja pirmās rīcībā ir 100 MW brīvās jaudas, tad noslēdz līgumu par šādas jaudas piegādi par tarifu 4,5 centi, tādējādi dalot 0,5 centu ienākumu savā starpā.

Tarifi var izmainīties plašās robežās atkarībā no enerģijas tirgus apstākļiem. Tos var aprēķināt robežās no enerģijas izmaksas mainīgās sastāvdaļas pieauguma (noslēdzošās) vērtības līdz pat pilnas pašizmaksas vērtībai.

### 8.3. Elektriskās enerģijas uzkaite.

Elektriskā enerģija tiek uzskaitīta ar skaitītājiem. Vienkāršākais un lētākais ir indukcijas tipa skaitītājs (8.3.att.). Tā pamatā ir alumīnija disks, kas tiek aptverts ar diviem magnētiskiem laukiem. Pirmo lauku rada elektromagnēts ar tinumu, kas tiek barots no sprieguma. Lauks, ko rada šis elektromagnēts, ir proporcionāls spriegumam. Otro magnētisko lauku rada elektromagnēts ar spoli, caur kuru tek patērējamā strāva. Šie divi lauki rada momentu:



8.3.att. Induktīvais elektroenerģijas skaitītājs. 1- sprieguma spole; 2- strāvas spole; 3- alumīnija disks; 4- ass; 5,6- gultņi; 7- ciparu mehānisma zobrats; 8- demfers.

$$M = k\Psi_U\Psi_I \sin \Psi,$$

kur  $\Psi$  – leņķa nobīde starp laukiem;

$k$  – proporcionalitātes koeficients.

Sakarā ar to, ka šo leņķi rada nobīde starp strāvu un spriegumu  $\varphi$ , izvēloties attiecīgi ķēžu parametrus, panāk, lai

$$M = k_1 UI \cos \varphi.$$

Tātad skaitītājs mērī patērējamo aktīvo jaudu, kam ir proporcionāli skaitītāju apgriezieni. Noteiktam apgriezienu skaitam atbilst patērējamā elektriskās enerģijas vienība, ko uzrāda ciparu mehānisms.

Elektriskā enerģija ir jaudas momentāno vērtību integrāls:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt,$$

kur  $P$  – jaudas momentānā vērtība;

$t$  – tekošais laiks.

Trīsfāžu skaitītājam ir trīs diski ar trim sprieguma un strāvas elektromagnētiem.

Ciparu iekārta var būt mehāniskā vai elektroniskā. Pēdējā gadījumā katru diska pagriezienu pavada impulss ciparu iekārtas vadīšanas ķēdē. Impulsu skaits tiek pārvērsts ciparu rādījumā. Šiem rādījumiem ir jāsauglabājas, pazūdot spriegumam.

Zemsprieguma ietaisēs skaitītājus ieslēdz tieši ķēdē. Ja strāva ir liela, izmanto strāvmaiņus. Augstsprieguma ietaisēs skaitītājus, tāpat kā citus mērinstrumentus, ieslēdz strāvmaiņu un spriegummaiņu sekundārās ķēdēs, graduējot rādītājus primārās vienībās.

Komplicēto tarifu gadījumos skaitītāji tiek papildināti ar citām iekārtām. Stundu tarifu gadījumos izmanto vairākas ciparu iekārtas – savu katrai tarifam zonai. Pārslēgšanās no vienas ciparu iekārtas uz otru notiek ar pulksteņa palīdzību.

Gadījumos, ja tarifā ietilpst jaudas momentānā vērtība iepriekš noteiktās stundās, uzskaitē bez pulksteņa tiek papildināta ar iekārtu, kas kontrolē jaudas vidējo vērtību īsos laika sprīžos, piemēram, minūtēs. Šādas uzskaites iekārtas apgādā arī ar atmiņu, kas datus saglabā, un ar printeri protokola izdrukai.

Uzskaites vajadzībām izmanto arī mikroprocesoru iekārtas. To rādījumus var nolasīt ar pārnēsājamām nolasīšanas iekārtām.

Rūpnieciskās iekārtās ir sarežģīts uzskaites komplekss, ko veido daudzi skaitītāji. Tajos izmanto centralizētu uzskaites analīzi ar datoru sistēmas palīdzību.

#### 8.4. Siltuma uzskaitē.

Siltuma daudzumu nosaka pēc izteiksmes

$$W = Q \cdot (t_1 - t_2) \cdot T,$$

kur  $Q$  - siltumnesēja daudzuma caurtece,  $m^3/st$ ;

$t_1, t_2$  - siltumnesēja temperatūra ieejā un izejā,  $^{\circ}C$ ;

$T$  - laiks,  $st$ .

Temperatūras mērīšanai izmanto graduētos elementus, kuru parametri ir atkarīgi no temperatūras. Temperatūras devēji ir samērā vienkārši elementi. Sarežģītāka ir siltumnesēja daudzuma noteikšana. Kā siltuma nesējs parasti tiek izmantots ūdens. Galvenais siltuma skaitītāja elements ir ūdens mērītājs. Šķidrums tek nepārtrauktas straumes veidā, kas ir ierobežots ar cauruļu sienām. Šķidruma daļiņu ātrums ir dažāds dažādās šķēluma vietās. Uz caurules ģeometriskās ass ātrums ir maksimāls, bet pie pašas sienas iekšējās berzes un šķidruma viskozitātes dēļ līdzinās nullei. Tāpēc vispārinātam plūsmas raksturojumam izmanto šķēluma vidējo šķidruma ātrumu.

Šķidrumu plūsmas var būt stacionāras vai nestacionāras, vienmērīgas un nevienmērīgas, kā arī lamināras (bezvirpuļu) un turbulentas.

Laminārās ir plūsmas ar nelieliem ātrumiem  $v$  neliela caurmēra caurulēs. Pretējā gadījumā plūsmai ir turbulents raksturs. Atšķirību starp lamināru un turbulentu plūsmu nosaka bezdimensiju Reinoldsa skaitlis

$$R_e = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu},$$

kur  $d$  - cauruļvada diametrs;

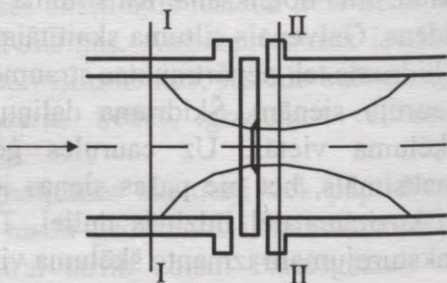
$\rho$  - šķidruma blīvums,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\mu$  - šķidruma dinamiskās viskozitātes koeficients,  $\text{N} \times \text{sek/m}^2$ .

Kritiskais Reinoldsa skaitlis, pie kura laminārā šķidruma plūsma pāriet turbulentā, tekot pa caurulēm, kuru sieniņām ir parastā grumbuļainība, līdzinās 2320. Ja  $R_e > 2320$ , tad plūsma ir turbulenta.

Ja plūsma ir turbulenta, tad tās aprēķina parametri kļūst neatkarīgi no Reinoldsa skaitļa un to var uzskatīt par konstantu. Tādēļ turbulentās plūsmas var izmērīt precīzāk nekā laminārās.

Vecākā un vislabāk izpētītā mērīšanas metode balstās uz lokālā spiediena izmaiņu, mainoties plūsmas ātrumam. Šim nolūkam cauruļvadā novieto diafragmu ar caurumu, mazāku par caurules iekšējo diametru. Nesaspiežamā šķidruma plūsmas forma diafragmas zonā parādīta 8.4. attēlā. Diafragmas dēļ plūsma tiek saspiesta. Minimālais plūsmas diametrs lokalizējas noteiktā attālumā aiz diafragmas. Šajā vietā ir



8.4.att. Plūsmas mērīšana ar diafragmas palīdzību.

maksimālais ātrums un minimālais spiediens p. Diferenciāls manometrs kontrolē spiediena starpību cauruļvada šķērsgriezumā I noteiktā attālumā pirms diafragmas un II visšaurākā plūsmas vietā.

Ievērojot konkrētos apstākļus, izmanto koriģējošos ātruma koeficientus, kas ievēro ātruma sadalījumu šķērsgriezumā un blīvumu. Tos izmanto gan šķidrums, gan gāzes caurteces mērīšanai. Blīvuma koeficienti gāzēm atkarīgi no masas un Reinoldsa skaitļa  $Re$ . Dotam materiālam (ūdenim, gāzei) diafragmas iespējams graduēt ar netiešo aprēķinu metodi.

Caurteces mērīšanas vajadzībām lieto standarta mērdiafragmas un citas sašaurinošas iekārtas (sprauslas un Venturi caurules).

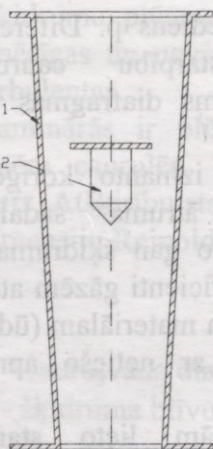
Vidējā kvadrātiskā mērīšanas kļūda pie netiešās aprēķina graduēšanas pārsniedz 1,5%. Šo kļūdu var samazināt līdz 0,5-1%, lietojot tiešo individuālo graduēšanu.

Mainīgā spiediena krituma metodes lietošanas sfēra ir stacionāro vienfāzes ūdens, sauso gāzu vai pārkarsēta tvaika caurteces mērīšana cauruļvados ar diametru virs 50 mm taisnos posmos pie pietiekoši lieliem Reinoldsa skaitļiem plūsmu maiņas gadījumos.

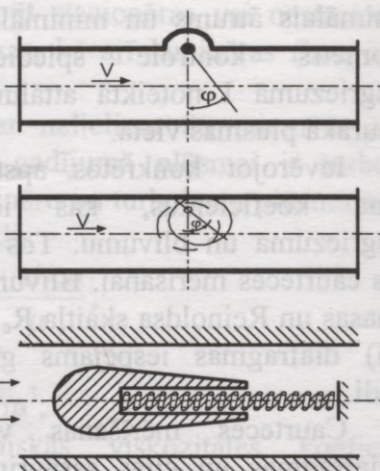
### *Pastāvīga spiediena krituma caurteces mērītāji*

Kā piemēru šādām iekārtām var minēt rotamētru. Šīs iekārtas pamatelements ir koniskā caurule ar pludiņu (8.5.att.) Pludiņš sastāv no apakšējās koniskās un augšējās cilindriskās daļas, uz kuras sāniem ir vītnes. Vītnes, plūstot mērāmai videi, izsauc pludiņa stabilu rotāciju, kas nepieciešama tā centrēšanai pret caurules sienām.

Hidrodinamisks plūsmas spiediens izsauc pludiņa vertikālu pārvietošanos. Tas saistīts ar kanāla šķērsgriezuma



8.5.att. Plūsmas mērīšana ar hidrodinamisko metodi (ar pludiņu).



8.6.att. Plūsmas mērīšana ar dažāda profila ķermeņiem, izmantojot hidrodinamisko principu.

izmaiņu tā, ka spiedienu starpība uz pludiņa paliek konstanta. Pludiņa vertikālais stāvoklis raksturo caurplūdes lielumu. Iekārta satur pārveidotāju. Ar tā palīdzību pludiņa stāvoklis tiek pārveidots ērti izlietojamā signālā.

Lieto arī virzuļu vai citu konstrukciju pludiņu iekārtas, kur tāpat tiek izmantots plūsmas hidrodinamiskais spiediens. To darbības principi parādīti 8.6. attēlā. Tie atšķiras ar ķermeņa formu, kas uztver plūsmas iedarbi.

### Turbīnu devēji

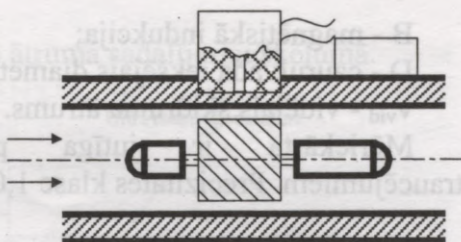
Šāds devējs sastāv no: turbīnas primārā pārveidotāja, sekundārā pārveidotāja un skaitītāja (8.7.att.). Signāls tiek nodots uz nekustīgu pārveidotāju ar indukcijas spoles palīdzību. Griešanās frekvence līdzinās:

$$\omega = A \cdot (Q - Q_0),$$

kur  $A$  - pastāvīgs koeficients;

$Q$  - caurplūde;

$Q_0$  - minimālā caurplūde, kurā turbīna pārvar pretestību un sāk griezties, vai arī izmaina iestājušamies griešanās ātrumu.



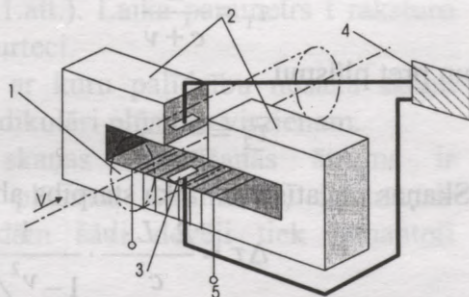
Turbīnas devējs ir jāgraduē uz parauga mērīšanas iekārtas. Šādi devēji nav derīgi netīru šķidrumu mērīšanai.

8.7.att. Plūsmas mērīšana ar turbīnas devēju.

Pie tahometriskiem mērītājiem pieder arī lodīšu aparāti. Kustīgās sastāvdaļas vietā šeit izmanto lodītes, kas rotē uz atbalsta virsmas ar iepriekš sagrieztās plūsmas palīdzību.

### Elektromagnētiskais plūsmas mērītājs

Iekārtas shēma parādīta 8.8. attēlā. Šeit cauruļvadu 1 aptver elektromagnēts 2, kas tiek barots no elektriskā avota 5. Šķidrumā, kuram piemīt noteikta elektriskā vadāmība,



elektromagnētiskā lauka iespaidā inducējas elektrodzinējspēks. Tas tiek mērīts ar elektrodiem 3, pastiprinātāja 4 un skaitītāja palīdzību.

8.8.att. Elektromagnētiskais plūsmas mērītājs.

Potenciālu starpība uz elektrodiem līdzinās:

$$E = -K \cdot B \cdot D \cdot v_{vid}$$

kur  $K$  - pastāvīgais koeficients;

B - magnētiskā indukcija;

D - cauruļvada iekšējais diametrs;

$v_{\text{vid}}$  - vidējais šķidrums ātrums.

Mēriekārta ir jutīga pret elektromagnētiskiem traucējumiem. Precizitātes klase 1,0 - 2,5%.

### Ultraskaņas caurteces mērītāji

Principiālā shēma parādīta 8.9. attēlā. Šinī gadījumā uz cauruļvada nostiprina elektroakustisku vibratoru - izstarotāju-uztvērēju. Ja  $v$  - plūsmas ātrums un  $c$  - skaņas izplatīšanās ātrums, tad skaņas izplatīšanās laiks plūsmas virzienā ir:

$$\tau_1 = \frac{L}{c + v}$$

un pret plūsmu

$$\tau_2 = \frac{L}{c - v}$$

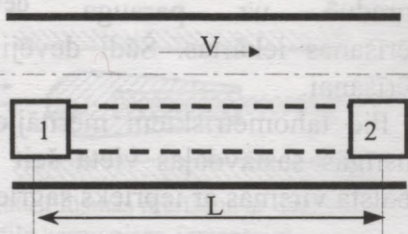
Skaņas izplatīšanās laika starpība abos virzienos līdzinās:

$$\Delta\tau = \frac{2 \cdot L \cdot v}{c^2} \cdot \frac{1}{1 - v^2/c^2}$$

Ievērojot to, ka  $v^2/c^2$  ir neievērojami mazs skaitlis, salīdzinot ar  $L$ , un, izsakot ātrumu caur:

$$\Delta\tau = 2 \cdot \varphi \cdot \frac{L}{F \cdot c^2} \cdot Q,$$

kur  $F$  - plūsmas šķēluma laukums;

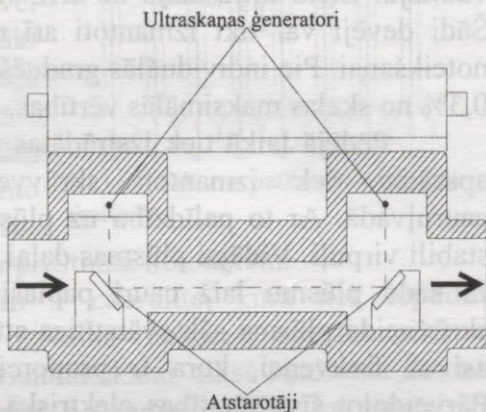


8.9.att. Ultraskaņas devēju izvietojums.

$\phi$  - koeficients, kas ievēro ātruma sadalījumu šķēlumā.

Iekārta var noteikt: fāzu nobīdi ultraskaņu viļņiem pa un pret plūsmu; impulsu frekvenču starpību īsiem skaņu impulsiem vai ultraskaņu svārstību paketēm; īsu impulsu izplatīšanās laiku pa un pret plūsmu.

Ultraskaņas caurtes mērītāja darbības shēmā (8.10.att.) redzams

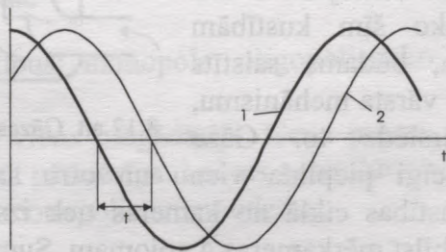


8.10.att. Ultraskaņas devējs.

plūsmas virziens. Ultraskaņas signāls, ko izstaro devēji, atstarojas no reflektoriem un izplatās otra devēja virzienā, kas pārmaiņus izpilda uztvērēja lomu. Signāli plūsmas virzienā un pret to ir nobīdīti laikā (8.11.att.). Laika parametrs  $t$  raksturo šķidrums ātrumu un tātad caurteci.

Eksistē mēriekārtas, ar kuru palīdzību nosaka skaņu viļņa nobīdi virzienā, perpendikulāri plūsmas virzienam.

Ievērojot to, ka skaņas izplatīšanās ātrums ir nesamērojami lielāks par plūsmas ātrumu  $v$ , iekārta ir pietiekoši sarežģīta. Pagaidām šādi devēji tiek izmantoti galvenokārt šķidrums caurtes mērīšanai. Ultraskaņas izstarotājos un uztvērējos izmanto kvarca vai bārija titāna plāksnītes, kuras tiek uzstādītas cauruļvada ārpusē, vai arī tiek aizsargātas no tieša



8.11.att. Ultraskaņu signāli: 1 - plūsmas virzienā; 2 - pret plūsmu.

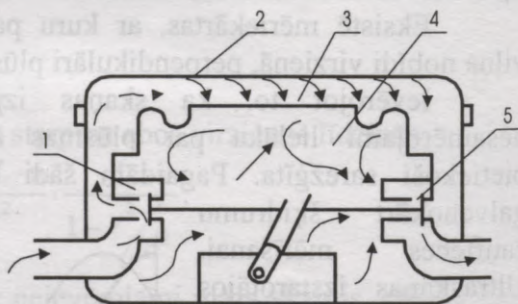
kontakta ar mērāmo vidi ar metālisku vai plastmasas skaņas vadītāju. Lieto ultraskaņu 20 kHz vai pat augstāku frekvenci. Šādi devēji var tikt izmantoti arī netīru šķidrumu caurteces noteikšanai. Pie individuālās graduēšanas var panākt precizitāti 0,3% no skalas maksimālās vērtības.

Pēdējā laikā tiek izstrādātas virpuļa mēriekārtas. Šajos aparātos tiek izmantoti skrūvveida ķermeņi, novietoti cauruļvadā. Ar to palīdzību uz plūsmas perifērijas tiek radīti stabili virpuļi. Vidējai plūsmas daļai tad ir skrūvveida raksturs. Ja šādu plūsmu laiž cauri paplašinātai telpai, tad centrālā skrūvveida plūsma sāk svārstīties attiecībā pret paplašinājuma asi ar frekvenci, kura ir proporcionāla vidējam ātrumam. Pārveidojot šīs svārstības elektriskā signālā, iegūsim lielumu, kas ir proporcionāls. Sagaidāmā precizitāte ir 1,5 - 2,0%.

Gāzes apjoma noteikšanai lieto skaitītājus ar vārstu gāzes sadalījumu (8.12.att.). Skaitītājā ir divas gāzes sadalījuma kameras 1 un 5. Kameras atdalītas ar starpsieniņu, ko izgatavo no elastīgas diafragmas (āda, polihlorvinīls).

Diafragmas centrā nostiprināts metāliskais disks 3.

Gāzes spiediena diferences iespaidā diafragma izplešas vai saraujas. Disks seko šīm kustībām un, būdams saistīts ar vārsta mehānismu, pārslēdz to. Gāze



8.12.att. Gāzes skaitītājs.

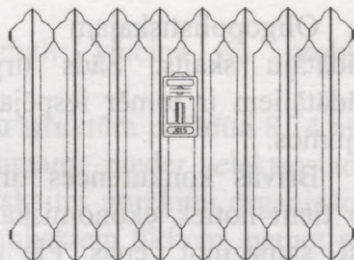
secīgi piepilda vienu un otru sadalījuma kameru. Vienas kustības ciklā no kameras tiek izspiesta gāze, kuras apjoms atbilst mērkameras 4 apjomam. Summārais starpsienas kustības skaits tiek fiksēts skaitītājā, kas saistīts ar disku 3 caur svirām.

Ievērojot to, ka caurplūdes devēju problēma vēl pastāv, ir izstrādāti vēl dažādi citi, sarežģītāki devēju veidi. Darbs šajā virzienā vēl arvien turpinās.

Bez oficiālām norēķina funkcijām izmanto palīguzskaiti apmaksas sadalījuma vajadzībām starp siltuma lietotājiem.

Vienkāršākais no tiem ir caurulīte, kurā tiek iepildīts speciāls šķidrums, kas iztvaiko apkures aparātu siltuma iespaidā. Caurulīte ir pievienota skalai, fiksē šķidruma līmeni. Skala tiek graduēta atkarībā no radiatoru tipa un izmēriem. Iekārta tiek stacionāri piestiprināta pie radiatora 2/3 augstumā (8.13.att.). Sākoties apkures sezonai, aparāta ampula tiek uzpildīta līdz nulles atzīmei, lai kompensētu "auksto iztvaikošanu". Nolasīšanas veic rūpīgi un pie visiem lietotājiem vienlaicīgi.

Šim nolūkam lieto arī elektroniskās iekārtas, kuras tāpat piestiprina pie radiatoriem. Šādiem mērītājiem ir vismaz viens temperatūras devējs. Izmērītā temperatūra vai temperatūras starpība pārveido salīdzināmās vienībās, kas ir nolasāmas. Iekārtas darbojas no ilgstoši izmantojamām baterijām.



8.13.att. Siltuma patēriņa sadalījuma skaitītājs.

## 8.5. Enerģijas tirgus.

Izšķir trīs tirgus tipus: monopola, oligopolistisko un tīrās konkurences tirgus.

Monopola tirgū ir viens piegādātājs. Cena precei, ko piegādā monopolists var būt pārmērīga. Lai tas nenotiktu valsts dibina speciālas komisijas monopolistu uzraudzībai.

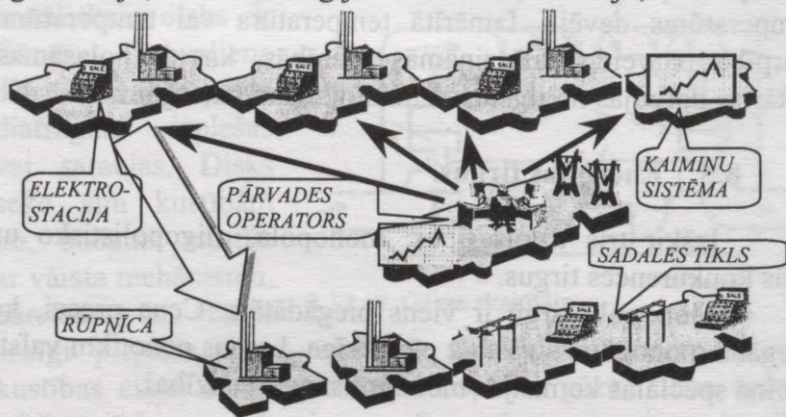
Oligopolistiskajam tirgum raksturīgs neliels piegādātāju skaits. Šāds tirgus arī jāuzrauga, jo starp piegādātājiem ir tomēr iespējamās slepenas vienošanās cenu jautājumos.

Brīvās konkurences tirgū piegādātāju skaits ir liels. Starp tiem notiek ekonomiskā sacensība par vietu tirgū, ko iegūst, samazinot cenas. Pie noteiktās peļņas normas cenas nosaka ražošanas izdevumi, kas sastāv no pastāvīgiem un mainīgiem, atkarīgiem no ražošanas apjomiem. Tas uztur pastāvīgu stimulu samazināt izdevumus neatkarīgi no to struktūras.

Brīvās konkurences tirgum ir pašregulēšanās īpašības, kas atbilst preču pircēju un, tāpat, sabiedrības interesēm. Tāpēc attīstītās valstīs cīnās pret monopoliem, meklējot iespējas radīt konkurences vidi.

Enerģija arī ir prece. Mainīgos izdevumus lielā mērā nosaka enerģētisko iekārtu konstruktīvās īpašības. Tās ir jāuztur labā kārtībā. Šo izdevumu būtiska samazināšana saistīta ar iekārtas papildināšanu un nomaiņu, kas prasa investīcijas.

Pastāvīgo izdevumu samazināšana saistīta ar darba organizāciju, tehnoloģijas automatizāciju, vadības



8.14.att. Tehnoloģiskās optimizācijas struktūras.

restrukturizāciju. Spēcīgi stimuli veicina šo problēmu risināšanu.

Līdzšinējā energosistēmu struktūra parādīta 8.14 attēlā. Energosistēmai kā lieluzņēmumam pieder elektrostacijas, pārvades un sadales tīklu un uzskaites-norēķinu organizācijas. Patērētāji saņem enerģiju no publiskiem tīkliem, ņemot to no kopējā "maisa". Energosistēmā darbojas mainīgo izdevumu minimizācijas stimuli, dodot priekšroku ekonomiskām darbā esošām iekārtām. Bet pastāvīgo izdevumu minimizācijas stimulu praktiski nav. Var teikt, ka noteiktā mērā šajā nozarē iespējami stagnācijas elementi.

Vai ir iespējams izmainīt stāvokli ar nolūku iedarbināt konkurences stimulus enerģijas tirgū? Kas šim nolūkam būtu vajadzīgs?

Lai problēmu atrisinātu jānovērtē izdevumu lokāls (teritoriāls) sadalījums. Izdevumi ir trijās vietās: elektrostacijās, pārvades un sadales tīklos, uzskaites-norēķina iestādēs.

Tālāk var mēģināt atbildēt uz jautājumiem, kas būtu jā dara, lai ieviestu konkurences elementus katrā no šiem izdevumu klāstiem.

Kas būtu nepieciešams, lai elektrostacijas konkurētu savā starpā? Atbilde skaidra. Tām jābūt pašstāvīgām un jāpiedalās ekonomiskajā sacensībā ar savām enerģijas cenām. Protams, tam ir nozīme, ja ir konkurenti.

Konkurence uzskaites-norēķinu sfērā tiek atrisināta pie noteikuma, ja dibina vairākas paralēlas organizācijas, kas cīnās par klientiem, minimizējot norēķinu izdevumus. Tātad konkurences radīšana šajās divās sfērās ir iespējama pie noteikuma, ka notiek energosistēmu restrukturizācija.

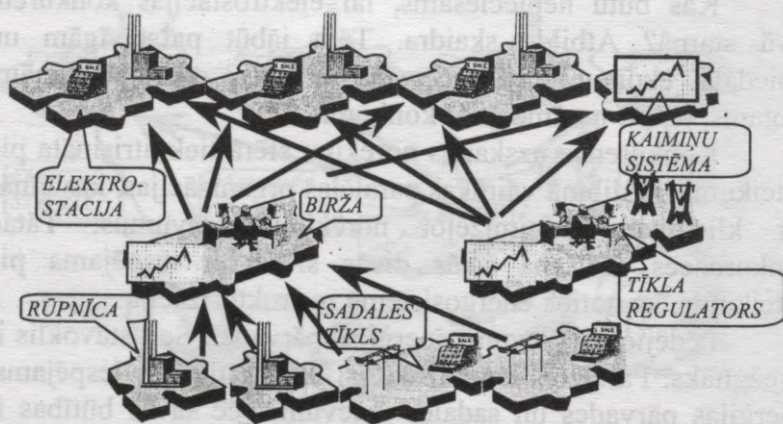
Pēdējie ir izdevumi enerģijas pārvadei. Šeit stāvoklis ir sarežģītāks. Paralēlus konkurējošus tīklus radīt nav iespējams. Enerģijas pārvades un sadales izdevumi pēc savas būtības ir transporta izdevumi un tiem jāpaliek monopola sfērā.

Maksājumiem par enerģijas transportu jāsedz izdevumi elektrisko tīklu uzturēšanai un zudumi tajos, kas saistīti ar enerģijas pārvadi. Patērētājiem jāsedz to tīklu uzturēšanas izdevumi, caur kuriem plūst saņemamā elektroenerģija. Sadzīves patērētājiem jāapmaksā visu tīklu uzturēšanas izdevumi proporcionāli iztērētajai enerģijai, ja tie tiek pieslēgti zemsprieguma tīkliem. Enerģija līdž tiem plūst cauri 10; 110; 330 kV tīkliem.

Ja patērētājs saņem enerģiju no 10 kV, tad tam nav jāpiedalās zemsprieguma tīkla uzturēšanā. Attiecīgi, saņemot enerģiju no 110 kV tīkla, nav jāpiedalās zemāko spriegumu tīklu uzturēšanā. Iespējamās arī precīzākas tīklu izmantošanas rādītāji.

Prakse liecina, ka enerģijas transporta izmaksu īpatsvars enerģijas kopējā izmaksā var sasniegt: pārvades tīklos 5-7%, bet sadales tīklos līdz 40%.

Zudumi, kas rodas tīklos no enerģijas pārvades, ir atkarīgi no tīklu garumiem. Jo garāks tīkls, jo lielāka to pretestība  $R$ . Bet sakarā ar to, ka tie ir kvadrātiskā atkarībā no enerģijas pārvades, zudumi, kas rodas no atsevišķa patērētāja



8.15.att. Attiecību saites atklātā enerģijas tirgū.

jaudas pārvades notiek uz summārās tīkla noslodzes fona. Tātad zudumi, ko izraisa kādam patērētājam pārvadāmā jauda vāji noslogotā, bet garajā tīklā, var būt mazāki nekā īsā, bet stipri noslogotā tīklā.

Atšķirībā no vertikāli integrētas enerģētikas struktūras (8.14.att.) tirgus enerģētikas struktūra parādīta 8.15.attēlā. Šeit piegādātāji figurē kā patstāvīgas konkurējošas vienības. Operatīvo tehnisko vadību realizē tāpat kā iepriekš. Bet papildus dibina tīkla tirgus operatoru, caur kuru tiek realizēti pasūtījumi, kas pienāk no patērētājiem.

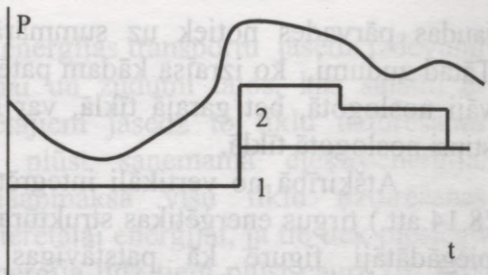
Tirgū nevar figurēt tikai piegādātāji. Tajā ir nepieciešama arī izvēles brīvība pircējiem (patērētājiem). Tātad nepieciešama piegādātāju izvēles iespēja no patērētāju puses. Šādas attiecības notiek caur datortīklu. Attiecības notiek tieši vai caur vidutāju – tīkla operatoru, kas izpilda enerģētiskās biržas funkciju. Biržas dati satur ziņas par rīcībā esošo jaudu un tai atbilstošām enerģijas cenām. Ņemot vērā to, ka pie dažādām iekārtas noslodzēm mainīgie izdevumi mainās, enerģijas cenas diennakts stundās ir dažādas.

Pirkuma darījumi var būt ilglaicīgi, īslaicīgi un reālā laika patēriņi. Pasūtījumi tiek apmaksāti darījuma noslēgšanas brīdī. Ilgtermiņa darījumos piegādātājs saņem naudu priekšlaicīgi, ko tas var savukārt brīvi izmantot izdevīgākos kurināmā iepirkšanas darījumos un citām organizācijas vajadzībām. Tāpēc enerģijas pirkumi šādos darījumos ir lētāki. Īslaicīgie darījumi ir dārgāki. Visdārgākā ir reālā laika enerģijas piegāde. Tātad, enerģijas cenas nosaka kā iekārtas noslodzes pakāpe, tā tirgus darījumu termiņi.

Nopirktā enerģija jāizmanto saskaņā ar darījuma noteikumiem. Ja situācija mainās, tad savlaicīgi pirkumu var atgriezt tirgus klāstā pārdošanai citiem patērētājiem.

Nepieciešamo enerģiju patērētājs var iedalīt dažādu termiņu pasūtījumos atkarībā no patēriņa grafika konfigurācijas

(8.16.att.). Ilglaicīgā darījumā ietilpina grafika daļu, par kura izmantošanu patērētājs ir pārliecināts. Parasti tā ir grafika bāzes daļa. Grafika otro daļu, ko var paredzēt ar mazāku drošumu, ievieto īslaicīgos darījumos. Pārējo lieto reālā laikā par maksimālām cenām.

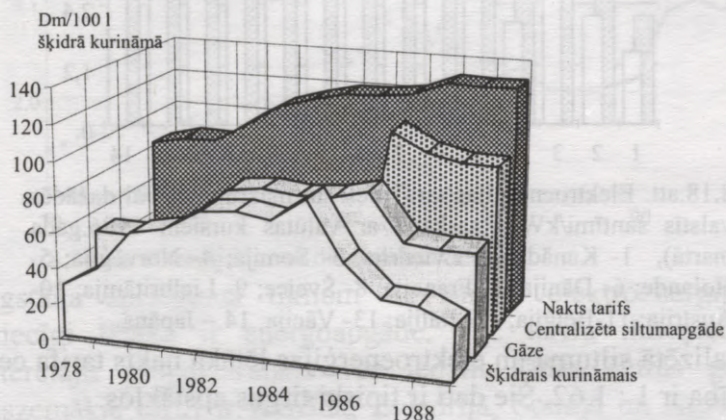


8.16.att. Pasūtītāja prognozējamā slodzes grafika segums.  
1- ilgtermiņa; 2- īstermiņa pasūtījums.

No apskatītā seko, ka enerģijas pasūtīšana iespējama ar noteikumu, ja patēriņam rūpīgi seko speciālais dienests. Patērētāji, kam šāda iespēja ir, tiek uzskatīti par "kvalificētiem". Tie tiek reģistrēti biržā un piedalās darījumos. Par tādiem kļūst pietiekoši lieli uzņēmumi.

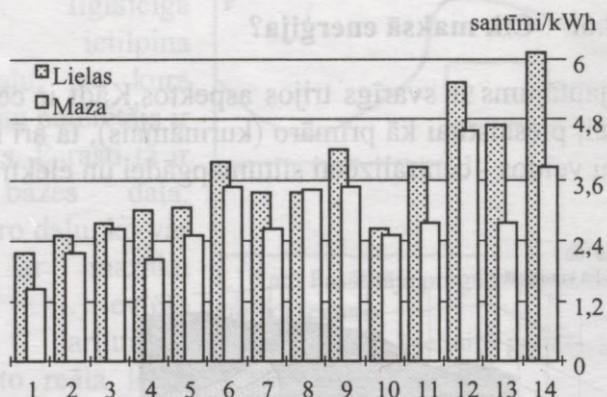
## 8.6. Cik maksā enerģija?

Šis jautājums ir svarīgs trijos aspektos. Kādi ir cenu līmeņi enerģijai, piesaistītai kā primāro (kurināmais), tā arī sekundāro enerģiju veidos - centralizētai siltumapgādei un elektroenerģijai?



8.17.att. Enerģijas cenas Vācijā.

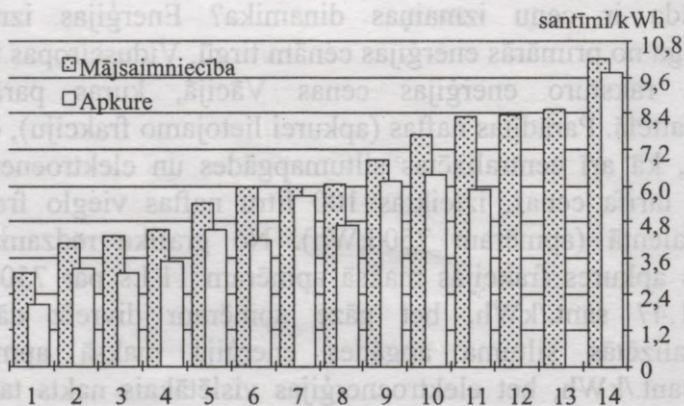
1. Kādi ir cenu līmeņi dažādās valstīs atkarībā no vietējiem apstākļiem un tirgus konjunktūras?
2. Kāda ir cenu izmaiņas dinamika? Enerģijas izmaksa atkarīga no primārās enerģijas cenām tirgū. Viduseiropas tirgus cenas raksturo enerģijas cenas Vācijā, kuras parādītas 8.17. attēlā. Parādītas naftas (apkurei lietojamo frakciju), dabas gāzes, kā arī centralizētas siltumapgādes un elektroenerģijas nakts tarifa cenas, izteiktas 100 litru naftas vieglo frakciju ekvivalentā (apmēram 750 kWh). No grafika redzams, ka naftas apkures frakcijas maksā apmēram 11 Ls par 750 kWh jeb 1,47 sant./kWh, bet gāze apmēram divreiz dārgāk. Centralizētās siltuma apgādes enerģija maksā apmēram 3,96 sant./kWh, bet elektroenerģijas vislētākais nakts tarifs - 6,43 sant./kWh. Šo cenu attiecības ir 1 : 2 : 2,7 : 4,4.



8.18.att. Elektroenerģijas tarifi liel- un mazrūpniecībai dažādās valstīs santīmi/kWh (saskaņā ar valūtas kursiem 1996.gada martā), 1- Kanāda; 2- Zviedrija; 3- Somija; 4- Norvēģija; 5- Holande; 6- Dānija; 7- Francija; 8- Šveice; 9- Lielbritānija; 10- Austrija; 11-Beļģija; 12- Itālija; 13- Vācija; 14 – Japāna.

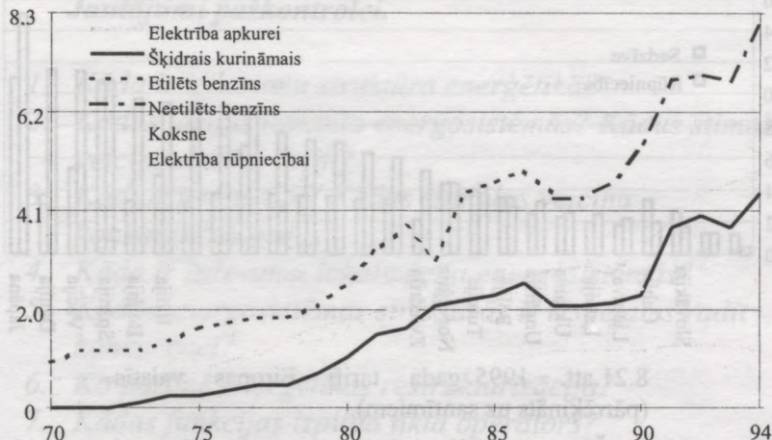
Centralizētā siltuma un elektroenerģijas lētākā nakts tarifa cenu attiecība ir 1 : 1,62. Šie dati ir tipiski tirgus apstākļos.

Tarifus dažādās valstīs raksturo vidējie elektroenerģijas tarifi dažādiem elektroenerģijas lietotājiem 1989. gadā (8.18.att. un 8.19.att.). Jo koncentrētāki ir patērētāji, jo no



8.19.att. Elektroenerģijas tarifi mājsaimniecībai un apkurei dažādās valstīs.

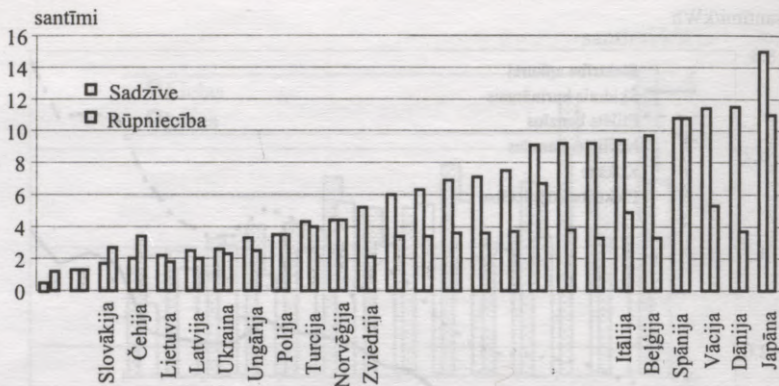
santīmi/kWh



8.20.att. Enerģijas cenu dinamika Zviedrijā.

augstāka sprieguma tīkliem tie saņem elektroenerģiju un attiecīgi lētāka ir energoapgāde. Pēc tarifu līmeņiem šai patērētāju grupai valstis var iedalīt šādās četrās grupās. Viszemākie tarifi ir Kanādā, Zviedrijā, Somijā un Norvēģijā. Tas izskaidrojams ar to, ka šajās valstīs ir daudz hidroenerģijas. Mēreno tarifu grupā ir Holande, Dānija, Francija un Šveice. Paaugstināto tarifu valstis ir Lielbritānija, Austrija un Beļģija un augstie tarifi ir Itālijā, Vācijā un Japānā. Tarifu izmaiņas laikā raksturotas 8.20. attēlā. Šeit attēloti benzīna, nakts elektrības tarifi apkurei, naftas produkti apkures vajadzībām, elektrības tarifs rūpniecībai un malkas cenas Zviedrijā. No šiem datiem izriet, ka enerģijas cenas ilgstošā laika posmā aug un acīmredzot arī nākotnē šī tendence saglabāsies, sevišķi, ņemot vērā to, ka izrakteņu kurināmā iegūšanas apstākļi kļūst arvien sarežģītāki.

Augsti tarifi uz elektroenerģiju attīstītās valstīs (Šveice - Japāna) daļēji izskaidrojami ar nodokļiem uz šķidro un gāzveida kurināmo. Tā, kurināmā nodokļi 1993. gadā bija Anglijā 50% no tās cenas, Vācijā, Francijā un Dānijā - 64%,



8.21.att. 1995. gada tarifi Eiropas valstīs (pārrēķināts uz santīmiem).

Itālijā - 70%. Šie nodokļi tiek izmantoti vides aizsardzības nolūkiem un nerentablu akmeņogļu atradņu atbalstīšanai darba vietu saglabāšanas nolūkos.

Mazāk attīstītās valstīs, kā arī bijušajās Austrumeiropas bloka valstīs, tarifi tiek uzturēti zemā līmenī iedzīvotāju zemās maksātspējas dēļ. Tas tiek panākts, orientējoties uz kurināmo, kura cenas vēl pagaidām zemākas nekā pasaules tirgū, un atsakoties no novecojušās iekārtas nomaiņas, kas, protams, jūtami samazina energoapgādes drošumu un prasīs palielinātus izdevumus turpmāk.

Nākotnē ir neizbēgama enerģijas tarifu celšanās līdz līmenim, kurš nepieciešams šīs ekonomikas infrastruktūras uzturēšanai. Kā rāda 8.18., 8.19. un 8.21. attēlu salīdzināšana, tarifi Eiropas valstīs bija auguši laikā no 1989. līdz 1995. gadam no 20% Beļģijā līdz 50% Japānā un 90% Dānijā.

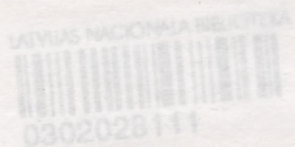
Tarifa pieaugumi valstu vairākumam sastāda 8...10% gadā, neskatoties uz jau sasniegtiem augstiem līmeņiem.

## **Jautājumi paškontrolei.**

1. *Kāda ir izdevumu struktūra enerģētikā?*
2. *Kādus tarifus izmanto energosistēmās? Kādus stimulus veicina dažādi tarifi?*
3. *Kādi ir tirgus tipi? Kādus stimulus veicina konkurences tirgus?*
4. *Kāda ir izdevumu lokalizācija energosistēmās?*
5. *Kādās energosistēmas struktūrās ir iespējams radīt konkurenci?*
6. *Ko nozīmē enerģētikas restrukturizācija?*
7. *Kādas funkcijas izpilda tīkla operators?*
8. *Kādus darījuma veidus slēdz patērētāji ar enerģijas piegādātājiem?*
9. *Kādā secībā tiek slēgti enerģētiskie darījumi starp patērētājiem un piegādātājiem?*
10. *Kādi ir maksājumi par enerģijas transportu?*
11. *Kāds ir šo maksājumu īpatsvars summārā enerģijas izmaksā?*

## Literatūras saraksts

1. Легасов В.А., Кузьмин И.И. Проблемы энергетики. В кн. Ядерная и термоядерная энергетика будущего. М.: "Энергоатомиздат". 1987.
2. Капица С. Рост населения Земли и его математическая модель. Наука и жизнь 1998.N3
3. Fenn J.B. Engines, Energy and Entropy.A Thermodynamics Primer, W.H.Freeman and Company, NY, San Francisco, 1982.
4. Roger E.M. Rphysics for the Inquiring Mind. Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 1966.
5. Nagla J. Siltumtehnikas pamati. Rīga.1981.
6. Баскаков А.П. /под ред./. Теплотехника. М.: "Энергоатомиздат".1991.
7. Лашутина Н.Г. и др. Техническая термодинамика.Л.: Машиностроение".1988.
8. Веников В.А., Путятин Е.В. Введение в специальность.М.: "Высшая школа".1988.
9. Защита окружающей среды при сжигании топлива.М.: "ВИНИТИ".1991.
10. Баркан Я.Д. Эксплуатация электрических систем.М.: "Высшая школа".1990.
11. Роль нетрадиционных возобновляемых источников энергии.М.: "ВИНИТИ".1991.
12. Шаров Г. Обуздаем ли мы климат? Наука и жизнь 1998.N2
13. Barkāns J. Kā taupīt enerģiju un saudzēt vidi. Rīga. 1997.



Jēkabs Barkāns

Enērgijas ražošana

---

Parakstīts iespiešanai 2002.13.02. Reģ. apl. Nr. 2-0282.  
Formāts 60x84/16. Ofsets. Ofseta papīrs. 16,0 iesp.l.,  
16,25 uzsk.-iesp.l., 11,68 uzsk-izd.l. Metiens 500 eks.  
Pasūt. Nr. 7. Iespiests RTU tipogrāfijā, Rīga LV-  
1658, Kaļķu ielā 1.

## Literatūras saraksts

1. Логасов В.А., Кузьмин И.И. Проблемы энергии в ки. Ядерная и термоядерная энергетика. М.: "Энергоатомиздат", 1987.
2. Капица С. Рост населения Земли: математическая модель. Наука и жизнь 1993.
3. Fenn J.B. Engines, Energy and Environment. Thermodynamics Printer, W.H.Freeman and Co. NY, San Francisco, 1982.
4. Roger E.M. Physics for the Inquiring Mind. Princeton New Jersey, Princeton University Press, 1966.
5. Nagla J. Silumatēhnika raksti. Rīga, 1981.
6. Баскаков А.П. /под ред./ Теплоэнергетика. "Энергоатомиздат" 1991.
7. Лавгутина Н.Г. и др. Термодинамика. М.: "Машинное строительство" 1983.
8. Велихов В.А. Пугачев Р.В. Высшая специальность. М.: "Высшая школа" 1985.
9. Защита окружающей среды при сжигании топлива. М.: "ВИНИТИ" 1991.
10. Баркан Я.Д. Эксплуатация энергетических систем. М.: "Высшая школа" 1990.
11. Роль неравномерных возобновляемых источников энергии. М.: "ВИНИТИ" 1991.
12. Шаров Г. Обузлём ли мы климат? Наука и жизнь 1992 N2.
13. ~~Велихов В.А. Пугачев Р.В. Высшая специальность. М.: "Высшая школа" 1985.~~

LĀTVIJAS NĀCIONĀLĀ BIBLIOTEKA



0302028111

**OBLIGĀTAIS  
EKSEMPĻĀRS**

2.60

2002-4

L119