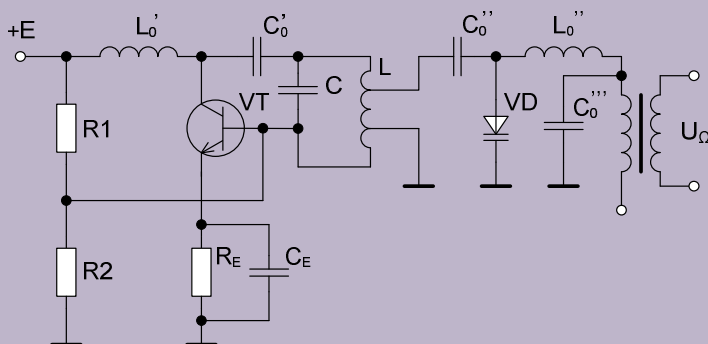


P. Leščevics, A. Galiņš

ELEKTRONIKA UN SAKARU TEHNIKA



Jelgava 2008

P. Leščevics, A. Galiņš

ELEKTRONIKA UN SAKARU TEHNIKA

Mācību līdzeklis lietišķajā elektronikā

Jelgava 2008



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

P.Leščevics, A.Galiņš. **Elektronika un sakaru tehnika:** mācību metodiskais līdzeklis. Jelgava: LLU, 2008. – 121 lpp.

Mācību līdzeklis paredzēts LLU pilna un nepilna laika pamatstudiju studentiem, lai tie varētu sekmīgi apgūt priekšmetus, kuros iekļauta elektronika vai sakaru tehnika.

Mācību līdzeklis sagatavots atbilstoši LLU lauksaimniecības enerģētikas, datorzinātnes-datorvadības un mašīnu projektēšanas un ražošanas studiju programmu bakalauru studiju priekšmetu „Lietišķā elektronika un sakaru tehnika”, „Elektrotehnika un elektronika” programmām. To varēs izmantot kā palīglīdzekli arī citi bakalauru studiju inženiertehnisko specialitāšu studenti, kuru programmās ir iekļauta elektronika, kā arī brīvās izvēles priekšmetu „Praktiskā elektronika” un „Mikroprocesoru vadības sistēmas” apguvei.

ISBN 978-9984-784-80-9

© Pēteris Leščevics, Ainārs Galiņš

© LLU Tehniskā fakultāte

SATURS

IEVADS	5
1. ELEKTRONISKĀS PARĀDĪBAS	7
1.1. Vispārīgas ziņas.....	7
1.2. Elektronu emisija.....	7
1.3. Elektriskā izlāde gāzēs	8
2. PUSVDĪTĀJU MATERIĀLI	10
2.1. Materiālu iedalījums.....	10
2.2. Cietvielu zonu teorija	11
2.3. Pamatpusvadītāji.....	14
2.4. Piejaukuma pusvadītāji.....	17
2.5. p-n pāreja	18
3. PUSVDĪTĀJU IERĪCES	21
3.1. Pusvadītāju diodes	21
3.1.1. Taisngriežu diodes	23
3.1.2. Impulsu diodes	23
3.1.3. Stabilitroni (Zēnera diodes)	23
3.1.4. Tuneļdiodes.....	25
3.1.5. Varikapi.....	25
3.1.6. Fotodiodes.....	26
3.1.7. Gaismas diodes	27
3.1.8. Gaismas diožu indikatoru	29
3.2. Bipolārie tranzistori	30
3.2.1. Tranzistoru uzbūve un darbības princips	30
3.2.2. Tranzistoru slēgumi	32
3.2.3. Par četrpoliem	35
3.2.4. Tranzistoru parametri.....	37
3.3. Unipolārie tranzistori.....	39
3.3.1. Sprostsliņņa tranzistori – lauka tranzistori.....	39
3.3.2. Lauktranzistori ar izolētu aizvaru	42
3.3.3. Strāvu stabilizējošās diodes	44
3.3.4. Vienpārejas tranzistori	45
3.3.5. Izolētas bāzes bipolārais tranzistors.....	46
3.4. Tiristori	47

3.4.1. Dinistori	47
3.4.2. Simetriskie dinistori	49
3.4.3. Trinistori.....	50
3.4.4. Simistori	51
4. PASTIPRINĀTĀJI	53
4.1. Vispārīgas ziņas.....	53
4.2. Tranzistora līdzstrāvas režīms	54
4.3. Tranzistora maiņstrāvas režīms	55
4.4. Decibeli.....	57
4.5. Atgriezeniskā saite.....	59
4.6. Atgriezeniskās saites slēgumu veidi.....	60
4.7. Operacionālie pastiprinātāji.....	62
4.7.1. Operacionālā pastiprinātāja uzbūve	62
4.7.2. Ideālā un reālā OP raksturīgākās īpašības.....	64
4.7.3. OP pamatslēgumu shēmas	65
4.7.4. Instrumentālais operacionālais pastiprinātājs (IOP)	76
5. ELEKTROSAKARU PAMATI	79
5.1. Sakaru teorijas jēdzieni.....	79
5.2. Modulācija	84
5.3. Signālu detektēšana	91
5.4. Signālu frekvences pārveidošana	95
5.5. Radiolīnijas.....	98
6. TELEFONA SAKARI	105
6.1. Telefona tīkli	105
6.2. Telefona aparāts.....	107
6.3. Abonenta kods	108
7. GSM STANDARTA MOBILO SAKARU ŠŪNU TĪKLA ORGANIZĀCIJA	110
7.1. Ievads.....	110
7.2. Mobilo skaru šūnu tīkla organizācijas principi	111
7.3. GSM standarta šūnu mobilo sakaru frekvenču diapazons	113
7.4. Frekvenču atkārtotas izmantošanas princips mobilo sakaru šūnu tīklos.....	116
7.5. Fizisko radio kanālu skaita novērtējums tīkla šūnā.....	120
LITERATŪRA	121

IEVADS

Elektronika ir zinātnes nozare, kas pēta dažādas fizikālās parādības, kurās piedalās elektriski lādētas daļiņas un elektronisko ierīču īpašības, parametrus, raksturlīknes, kā arī kompleksu elektronisko sistēmu īpašības. Elektronika aplūko dažādu elektronisko iekārtu un to sastāvā ietilpstošo elementu darbības principus, uzbūvi un izmantošanu.

Elektronikas galvenās nozares ir radioelektronika un rūpniecības elektronika. Radioelektronika ir zinātne par informācijas pārraidi un ir pamats informācijas apmaiņas sistēmām, bet rūpniecības elektronika – zinātne par dažādās tehnikas un informātikas jomās izmantotajām ierīcēm. Elektroniskās iekārtas izgatavo no dažādiem elektroniskiem elementiem (rezistoriem, kondensatoriem, induktivitātes spolēm, transformatoriem) un elektroniskajām ierīcēm (vakuuma, jonu un pusvadītāju, fotoelektriskajām u.c.).

Par mūsdienīgās elektronikas sākumu var uzskatīt deviņpadsmitā gadsimta deviņdesmitos gadus un divdesmito gadsimtu.

Svarīgākie elektronikas un sakaru tehnikas attīstības notikumi:

1872. gadā tiek radīta pirmā kvēlspuldze, uz kuras pamata T.Edisons atklāj elektrisko strāvu vakuumā.

1890. gadā E.Brenlijs atklāj, ka stikla caurulītē starp diviem sudraba elektrodiem saspiestas dzelzs skaidiņas augstfrekvences maiņstrāvas ietekmē saķep un to pretestība strauji samazinās. Bet 1894. gadā izmanto stikla caurulītē saspiestas dzelzs skaidiņas augstfrekvences elektromagnētisko svārstību reģistrēšanai un nosauc šo ierīci par kohereru.

1904. gadā A.Flemings izgudro elektronu lampu, bet 1906. gadā amerikāņu sakaru virsnieks H.H.Danvudijs izgatavo kristālisko detektoru, bet amerikānis G.V.Pikards izveido to no metāla vada un germānija kristāla, kuru patentē kā detektoru.

1905. gadā rūpniecisko strāvu iztaisnošanai tiek radītas gāzu izlādes ierīces – gazotroni.

1907. gadā Li. De Forests rada pirmo vakuuma triodi, bet B.L.Rozings uzlabo katoda elektronu-staru lampu.

1920. gadā Pitsburgā notika pirmā komerciālā radiopārraide.

1925. gadā sākas vara oksīda (kuproks) taisngriežu rūpnieciska ražošana.

1926. gadā Dž.Bērds organizē pirmo televīzijas pārraidi, bet pirmo elektronisko televīziju realizēja V.Zvorikins 1931. gadā, jo tika radītas televīzijas uztverošās staru lampas.

1930. gadā sākas selēna taisngriežu rūpnieciska ražošana un J.E.Lilienfelds patentē lauktranzistoru, kura rūpnieciskā ražošana tiek uzsākta pēc vairāk nekā divdesmit gadiem.

1946. gadā izgatavota pirmā skaitļojamā mašīna „Eniac”, kas sastāvēja no 18 000 radiolampām, bet 1951. gadā sāk ražot pirmās paaudzes elektroniskos skaitļotājus. Tie nepieredzēti strauji kāpina elektroniskās rūpniecības attīstību.

1947. gadā D.Bardins un V.Bratteins izgudroja pirmo pusvadītāju punkta tranzistoru, bet 1948. gadā V.Šoklijs izgudro virsmas tranzistoru.

1948. gadā sākas sakausēto virsmas tranzistoru rūpnieciska ražošana.

1951. gadā V.Šoklijs izveido četru slāņu pusvadītāju ierīces - tiristorus, uz kuru bāzes vēlāk sāk attīstīties lieljaudas pusvadītāju elementu tehnoloģija, bet 1952. gadā publicē p-n pārejas lauktranzistora darbības teorētisko pamatojumu.

1956. gadā japāņu fiziķis L.Esaki atklāj tuneļefektu germānijā un jau nākošajā gadā sākas to rūpnieciska ražošana.

1958. gadā Dž.Kilbijs izveido pirmo integrālo mikroshēmu, bet 1960. gadā sākas pusvadītāju integrālo mikroshēmu rūpnieciska ražošana.

1964. gadā sākas integrālo operācijpastiprinātāju rūpnieciska ražošana, bet 1971. gadā tiek izveidots pirmais mikroprocesors ar jauna tipa laukefeka (FET) lauktranzistoriem, bet 1972. gadā sākas mikroprocesoru un mikrokalkulatoru rūpnieciska ražošana.

Astoņdesmitajos un deviņdesmitajos gados tiek radīti šūnveida mobilie telefoni, globālais informācijas tīkls „Internet”, kā arī globālās pozicionēšanas sistēma GPS.

Mikroelektronika turpina attīstīties divos virzienos – analogajā un digitālajā. Paralēli mikroelektronikas virzienam attīstījās arī lieljaudas pusvadītāju elementu tehnoloģija. Būtisku ieguldījumu lieljaudas elektronikas attīstībā deva lielas jaudas MOSFET lauktranzistoru un izolēta aizvara bipolāro tranzistoru IGBT izveide.

Mācību grāmata paredzēta lietišķās elektronikas un sakaru tehnikas kursa apgūšanai. Tajā ietverti materiāli par elektronikas elementu uzbūvi, darbības principiem un galvenajiem to parametriem, kā arī par sakaru līdzekļiem to attīstību, uzbūvi un darbības principiem.

1. ELEKTRONISKĀS PARĀDĪBAS

1.1. Vispārīgas ziņas

Elektronisko parādību pamatā ir elektrons. Elektrons ir elektriski uzlādēta elementārdaļiņa, kurai piemīt negatīvs lādiņš $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ un kura masa $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Elektronu daudzums atomā atbilst ķīmisko elementu periodiskās sistēmas kārtas numuram. Elektroni veido elektronu čaulas un atrodas nepārtrauktā mijiedarbībā ar atoma kodolu un savstarpējā mijiedarbībā. Elektroni, kas atrodas atomu ārējās čaulās, ir vājāk saistīti ar kodolu, tādēļ šie elektroni citu atomu vai ārējās ietekmes dēļ var atrauties no atomiem un kļūt par brīvajiem elektroniem. Brīvie elektroni ar dažādu ātrumu un dažādos virzienos kustas vielā starp atomiem. Ja uz vielu iedarbojas ārējais elektriskais lauks, elektronu kustība iegūst noteiktu virzienu, veidojot elektrisko strāvu. Jo vairāk brīvo elektronu ir vielā, jo lielāka ir vielas vadītspēja. Cietās vielas iedala vadītājos, pusvadītājos un dielektriķos.

Ja elektriski neitrāls atoms zaudē vai pievieno elektronu, tad tas kļūst elektriski uzlādēts un pārvēršas par pozitīvu vai negatīvu jonu. Elektrona zaudēšanu vai pievienošanas procesu sauc par jonizāciju.

Ja elektroni saņem papildu ārēju enerģiju, tie tiek ierosināti un var iziet no vielas. Elektronu izeju no vielas sauc par elektronu emisiju.

1.2. Elektronu emisija

Atkarībā no tā, kādā veidā elektroni saņem ārējo papildu enerģiju, ir zināmi četri galvenie elektronu emisijas veidi:

- a) termoelektronu emisija, kad papildu enerģiju elektroni saņem termokatoda karsēšanas rezultātā;
- b) fotoelektronu emisija, kad uz fotokatodu iedarbojas elektromagnētiskais starojums - fotoni;
- c) sekundārā elektronu emisija, kad sekundāro elektronu katodu bombardē ar ātru elektronu vai jonu plūsmu;
- d) elektrostatiskā emisija, kad ļoti liels ārējais elektriskais lauks izrauj elektronus no katoda virsmas.

Termoelektronu emisija. Tā tiek izmantota vakuuma elektronu lampās, kur katoda karsēšanas rezultātā brīvie elektroni pārvar katoda virsmas potenciāla barjeru un izlido brīvajā telpā (vakuumā). Lai elektrons izlidotu no metāla, tam jāveic darbs, ko sauc par elektrona izejdarbu. To apzīmē ar W_0 un mēra elektronvoltos. Izejdarbs ir vienāds ar elektrona lādiņa e un potenciāla barjeras φ_0 reizinājumu:

$$W_0 = e \varphi_0 \quad (1.1)$$

Termoelektronu emisija galvenokārt ir atkarīga no katoda temperatūras, kuru ierobežo metālu kušanas temperatūra.

Fotoelektronu emisija. Saskaņā ar Einšteina teoriju gaismas staru enerģija nav nepārtraukta, bet sastāv no atsevišķām elektromagnētiskā starojuma (redzamā un neredzamā gaisma) porcijām – kvantiem, sauktiem arī par fotoniem. Kvantu enerģija ir $h\nu$, kur h – Planka konstante, ν – starojuma frekvence. Tāad elektromagnētiskais starojums (redzamā un neredzamā gaisma) ir atsevišķu enerģijas kvantu – fononu plūsma. Šādam starojumam krītot uz fotokatodu, fotoni atdod savu enerģiju elektroniem un ierosina tos. Tā rezultātā elektroni, kuru masa ir m_e , izlido no fotokatoda, veicot izejdarbu W_0 un iegūst sākotnēju ātrumu g_0 . Šo procesu matemātiski apraksta Einšteina vienādojums

$$h\nu = W_0 + \frac{m_e g_0^2}{2}. \quad (1.2)$$

Ja vakuumētā telpā pastāv paātrināošs elektriskais lauks, tad veidojas fotoelektriskā emisijas strāva.

Sekundārā elektronu emisija. Bombardējot sekundāro elektronu katodu ar primārajiem elektroniem, tie atdod savu kinētisko enerģiju elektroniem, kas atrodas pie katoda virsmas, un tie izlido ārā no katoda un sākas sekundāro elektronu emisija. Sekundāro elektronu emisiju raksturo sekundārās emisijas koeficients

$$\sigma = \frac{n_2}{n_1} = \frac{I_2}{I_1}, \quad (1.3)$$

kur n_1 - primāro elektronu skaits;

n_2 - sekundāro elektronu skaits;

I_1 - primāro elektronu strāva;

I_2 - sekundāro elektronu strāva.

Ja palielina sekundāro elektronu ātrumu, sākumā sekundāro elektronu emisija palielinās, bet turpinot palielināšanu tās pieaugums samazinās, jo ātrākie primārie elektroni iekļūst dziļāk vielā no kurienes izsistie elektroni nespēj izlidot ārā.

Elektrostatiskā elektronu emisija. Ja pie katoda virsmas palielina ārējā elektriskā lauka intensitāti lielāku par vielas potenciāla barjeru sākas elektrostatiskā elektronu emisija. Tā sākas, ja elektriskā intensitāte $E = 10^6$ V/cm, taču ievērojamu emisijas strāvu iegūst tikai tad ja $E \geq 10^8$ V/cm. Elektrostatiskās emisijas parādību izmanto dzīvsudraba ventiļos, piemēram, ignitronos, jo tajos pie dzīvsudraba katoda var iegūt pietiekoši lielu elektriskā lauka intensitāti.

1.3. Elektriskā izlāde gāzēs

Vajā elektriskā laukā gāzi var uzskatīt par dielektriķi, jo atoma kopējais elektriskais lādiņš vienāds ar nulli un strāva caur gāzi neplūst. Bet ir vairāki faktori, kas var izraisīt gāzes jonizāciju, piemēram, rentgena vai kosmiskais starojums,

gaismas plūsma, liesma utt. Tomēr jonu ierīču darbības pamatā izmanto tā saukto triecienjonizāciju. Triecienjonizācija ir process, kad ierīcē, kura pildīta ar gāzi un uz to iedarbojas elektriskais lauks, kas izraisa elektronu kustību uz pozitīvo, bet jonu - uz negatīvo elektrodu. Kustībā esošie elektroni un joni triecoties pret gāzes atomu, izsit no tā elektronus, tā radot jaunus pozitīvos jonus un brīvos elektronus.

Bez tam daļa elektronu un jonu, kuru iegūtais paātrinājums nav liels, rekombinējas. Elektronu un jonu rekombinācijas laikā atoms izdala enerģiju, kas izraisa gāzes mirdzēšanu noteiktā gaismas spektrā. Tādēļ katrai gāzei ir sava izstarotās gaismas krāsa. Šo procesu sauc par mirdzizlādi.

Ierīces, kuru darbības pamatā ir gāzu izlādes princips, sauc par jonu jeb gāzu izlādes ierīcēm.

2. PUSVDĪTĀJU MATERIĀLI

2.1. Materiālu iedalījums

Visas dabā sastopamās cietvielas, pēc to īpatnējās elektrovadītspējas, iedala dielektriķos, pusvadītājos un vadītājos. Pārskats par dielektriķu, pusvadītāju un vadītāju iedalījumu pēc to īpatnējās vadītspējas un to īpatnējās pretestības, apkopots 2.1. tabulā. Tabulā norādīti arī elektrotehnikā un elektronikā visbiežāk izmantotie materiāli.

Dielektriķa atoma ārējās elektronu čaulas elektroni, kurus sauc par valences elektroniem, ir cieši saistīti ar atoma kodolu, tāpēc to elektrovadītspēja ir ļoti maza un tos izmanto kā izolatorus.

Metāla atoma valences elektroni nav cieši saistīti ar atoma kodolu un tie var brīvi pārvietoties pa metāla kristālisko režģi, kuru veido nekustīgi joni. Metāls kopumā ir elektriski neitrāls, jo kristāliskajā režģī brīvo elektronu un jonu skaits ir vienāds.

Ja metālu ievieto elektriskā laukā, tas kļūst par vadītāju, jo elektriskā lauka spēku iedarbes rezultātā brīvie elektroni sāk pārvietoties virzienā, kas ir pretējs lauka virzienam. Vadītāja elektrisko pretestību izraisa brīvo elektronu sadursme ar kristālisko režģi. Jo lielāks brīvo elektronu kustības ātrums un daudzums, jo biežāk notiek sadursmes, jo lielāka vadītāja pretestība. Bez tam elektronam saduroties ar kristālisko režģi, tas atdod savu kinētisko enerģiju un metāls sasilst. Palielinoties metāla temperatūrai, palielinās elektronu siltumkustības ātrums un līdz ar to sadursmju skaits, rezultātā samazinās metāla vadītspēja.

Pusvadītāji ir tās vielas, kuru īpatnējās elektrovadītspējas skaitliskās vērtības atrodas starp dielektriķiem un vadītājiem. Tā kā pusvadītājos saites starp valences elektroniem ir vājākas nekā dielektriķiem, tad pusvadītāju elektrovadītspēja ir atkarīga arī no ārējiem apstākļiem: temperatūras, gaismas plūsmas, starojumiem u.c. Ārējie faktori palielina valences elektronu enerģiju un tie atraujoties no kristāliskā režģa, kļūst par brīvajiem lādiņnesējiem, kas, atšķirībā no metāliem, palielina vielas elektrovadītspēju.

2.1. tabula

Cietvielu iedalījums pēc to īpatnējās vadītspējas
un to īpatnējās pretestības

Apzīmējums	Īpatnējā pretestība ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Īpatnējā vadītspēja ($1/\Omega \cdot \text{cm}$)	Materiāls	
Dielektriķi	10^{20}	10^{-20}	dzintars	keramika, vizla
	10^{18}	10^{-18}	parafīns	
	10^{16}	10^{-16}	polistirols, ogleklis	
	10^{14}	10^{-14}	porcelāns	
	10^{12}	10^{-12}	polihlorvinils	
	10^{10}	10^{-10}	marmors	stikls
	10^8	10^{-8}		

Pusvadītāji	10^6	10^{-6}	silīcijs	selēns
	10^4	10^{-4}		germānijs
	10^2	10^{-2}		
	10^0	10^0		
	10^{-2}	10^2	indija arsenīds	
Vadītāji	10^{-4}	10^4	dzelzs	
	10^{-6}	10^6		varš,
	10^{-8}	10^8		sudrabs

2.2. Cietvielu zonu teorija

Lai varētu izskaidrot pusvadītāju darbību, vislabāk izmantot cietvielu zonu teoriju, kas dod iespēju uzskatāmi iepazīties ar enerģētiskiem procesiem dažādu cietvielu kristālos.

No fizikas ir zināms, ka atoms sastāv no kodola, kas atrodas centrā un ap to riņķojošiem elektroniem. Kodols sastāv no protoniem un neitroniem. Protoni ir elektriski pozitīvi lādētas daļiņas, bet elektronu elektriskais lādiņš ir negatīvs.

2.2. tabula

Ķīmisko elementu periodiskā sistēma

Periods	El-ņu čaula	Ķīmisko elementu grupas un to vērtības ()															
		1. (1)	El-ņu sk.	2. (2)	El-ņu sk.	3. (3)	El-ņu sk.	4. (4)	El-ņu sk.	5. (5)	El-ņu sk.	6. (6)	El-ņu sk.	7. (7)	El-ņu sk.	8. (0)	El-ņu sk.
I	1	H ¹ Ūdeņradis ₁														He ² Helijs ₂	
II		Li ³ Litījs ₂ K ₁		Be ⁴ Berilijs ₂		B ⁵ Bors ₂ 3		C ⁶ Ogleklis ₂ 4		N ⁷ Slāpeklis ₂ 5		O ⁸ Skābeklis ₂ 6		F ⁹ Fluors ₂ 7		Ne ¹⁰ Neons ₂ 8	
III		Na ¹¹ Nātrijs ₂		Mg ¹² Magnijs ₂		Al ¹³ Alumīnijs ₂		Si ¹⁴ Silīcijs ₂		P ¹⁵ Fosfors ₂		S ¹⁶ Sērs ₂		Cl ¹⁷ Hlors ₂		Ar ¹⁸ Argons ₂	
	K	8		8		8		8		8		8		8		8	
	L	1		2		3		4		5		6		7		8	
IV		K ¹⁹ Kālijs ₂		Ca ²⁰ Kalcījs ₂		Sc ²¹ Skandījs ₂		Ti ²² Titāns ₂		V ²³ Vanādijs ₂		Cr ²⁴ Hroms ₂		Mn ²⁵ Mangāns ₂			
	K	8		8		8		8		8		8		8			
	L	8		8		8		8		8		8		8			
	M	1		2		3		4		5		6		7			

	Cu ²⁹	Zn ³⁰	Ga ³¹	Ge ³²	As ³³	Se ³⁴	Br ³⁵	Kr ³⁶
	Varš	Cinks	Gallijs	Germānijs	Arsēns	Selēns	Broms	Kriptons
V	K	2	2	2	2	2	2	2
	L	8	8	8	8	8	8	8
	M	18	18	18	18	18	18	18
	N	1	2	3	4	5	7	8

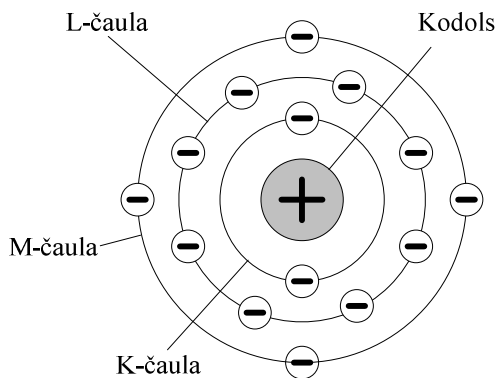
Atomā pozitīvi lādēto protonu skaits ir vienāds ar negatīvi lādēto elektronu skaitu un to elektriskie lādiņi ir vienādi, līdz ar to atoms kopumā elektriski ir neitrāls.

Elektroni riņķo ap kodolu izvietojoties noteiktās kārtās, kuras sauc par čaulām. Katrā čaulā esošie elektroni, ja to ir vairāk kā viens, riņķo noteiktās orbītās pa pāriem.

Vielas atoma sastāvu nosaka ķīmisko elementu periodiskā sistēma (2.2. tab.). Tajā norādīts protonu skaits, kas atbilst elementa kārtas skaitlim. Bez tam tajā doti arī elektronu čaulu apzīmējumi (K, L, M, N,) un elektronu skaits katrā čaulā.

Apskatīsim, elektronikā plaši lietota elementa, silīcija atoma uzbūvi (2.1. attēls). Ķīmisko elementu periodiskajā sistēmā silīcijs ieņem 14. vietu. Tam ir kodols ar 14 protoniem un 14 elektroni novietoti trīs elektronu čaulās: K čaulā 2 elektroni, L čaulā 8 elektroni, M čaulā 4 elektroni.

Elektrona enerģiju nosaka tās orbītas parametri, pa kuru tas riņķo. Pie tam, jo tālāk elektrons ir no kodola, jo lielāka ir tā enerģija. Saskaņā ar Pauli principu vienā sistēmā (atomā) nevar būt divi elektroni ar vienādu enerģiju. Tas nozīmē, ka arī tiem elektroniem, kas riņķo vienā orbītā enerģija nav pilnīgi vienāda.



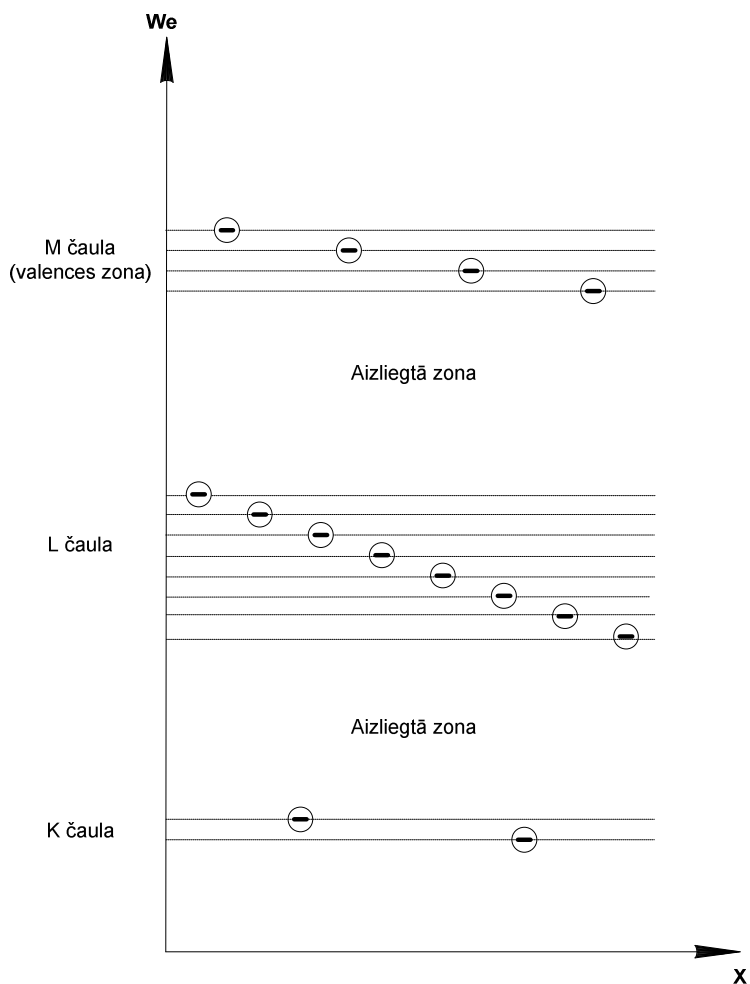
2.1. att. Silīcija atoma uzbūve

Silīcija atoma čaulām un to elektroniem atbilstošie enerģijas līmeņi parādīti 2.2. attēlā. Katras čaulas atļautie enerģētiskie līmeņi veido atļautās enerģētiskās zonas. Starp tām atrodas aizliegtās enerģētiskās zonas, kurās elektroni nevar atrasties. Ārējās elektronu čaulas enerģētisko zonu sauc par valences zonu.

Vielā notiekošajos ķīmiskajos un elektriskajos procesos parasti piedalās tikai valences zonas elektroni. Šajā sakarā elektronikā apskata tikai ar elektroniem piepildīto valences zonu un nākošo nepiepildīto atļauto zonu, kuru sauc

par vadītspējas zonu. Vadītspējas zonā nonākušie elektroni ir atrauti no atoma un var brīvi pārvietoties pa vielas kristālisko režģi. Ja kristālam pielikts elektriskais lauks, tad šie elektroni rada elektrisko strāvu.

Lai elektrons pārietu no valences zonas vadāmības zonā, tam jāsaņem no ārienes papildu enerģija, kuru sauc par atoma jonizācijas enerģiju. Elektrons enerģiju var saņemt siltuma veidā, paaugstinoties vielas temperatūrai, starojuma kvanta veidā, vai saduroties ar citu elementārdaļiņu.



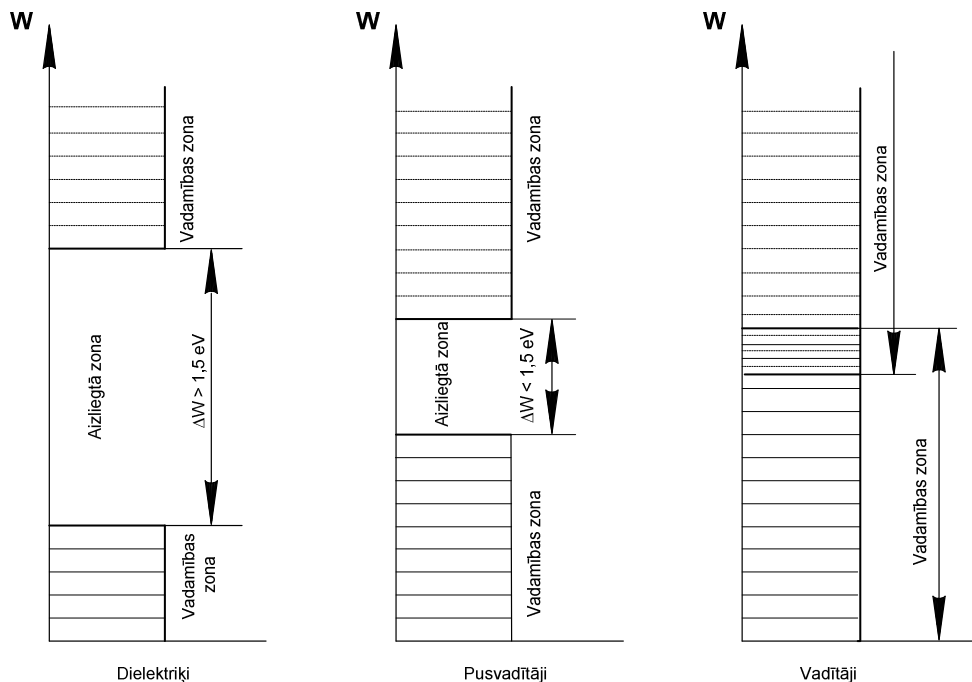
2.2. att. Silīcija atoma elektronu enerģijas līmeņi

Dielektriķa, pusvadītāja un vadītāja zonu diagrammas parādītas 2.3. attēlā. Šajās diagrammās parādītas tikai valences un vadītspējas zonas, starp kurām atrodas aizliegtā zona. Dielektriķiem aizliegtā zona ir visplatākā, un tāpēc, lai to varētu pārvarēt, valences elektronam nepieciešams saņemt lielu ārējo enerģiju. Pusvadītājiem aizliegtā zona ir šaurāka, tādēļ valences elektroniem vajadzīga mazāka enerģija tās pārvarēšanai. Vadītājiem aizliegtās zonas nav, bet valences zona pārklājas ar vadītspējas zonu. Tieši tādēļ visi metāli ir ar lielu vadītspēju.

Aizliegtās zonas platums ir skaitliski vienāds ar enerģiju, kas nepieciešama, lai elektrons no valences zonas nonāktu vadāmības zonā.

Cietvielu iedalījums dielektriķos un pusvadītājos ir nosacīts, jo pietiekami augstā temperatūrā dielektriķis kļūst par pusvadītāju, bet pietiekami zemā temperatūrā tīrs pusvadītājs kļūst par dielektriķi.

Viss augstāk minētais attiecas uz ķīmiski tīrām vielām ar ideālu kristālisko struktūru.



2.3. att. Zonu diagramma dielektriķiem, pusvadītājiem un vadītājiem

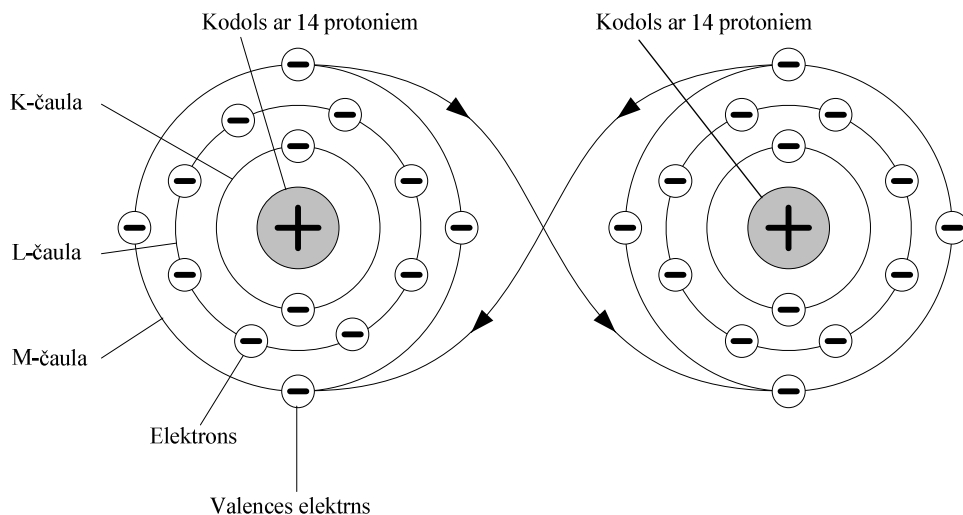
2.3. Pamatpusvadītāji

Pusvadītājiem raksturīga kristāliskā struktūra, kurā veidojas precīzs un likumsakarīgs atomu izvietojums telpā. Šādu kristālisko struktūru sauc par kristālisko režģi.

Pusvadītāji ir ķīmisko elementu periodiskās sistēmas 4. grupas elementi, piemēram, silīcijs un germānijs, kā arī tos veido 3. un 5. grupas elementu ķīmiski savienojumi, piemēram, gallija arsenīds (GaAs) un gallija fosfīts (GaP). Pusvadītāju ierīču ražošanā izmanto ļoti tīrus izejmateriālus, piemēram, silīcijam pieļaujams tika viens piejaukuma atoms uz 10 miljardiem silīcija atomu. Pusvadītāju ar šādu tīrības pakāpi ($10^{10} : 1$) sauc par pamatpusvadītāju vai īsāk par *i* tipa pusvadītāju (no angļu valodas vārda *intrinsic* – patiess).

Kristāliskajā režģī starp atomiem pastāv saites, kuras veido valences elektroni, kas atrodas mijiedarbībā ne tikai ar sava atoma, bet arī ar blakus esošā atoma kodolu. Silīcija un germānija kristālā divus blakus esošos atomus saista divi elektroni – pa vienam no katra atoma. Abi elektroni vienlaikus pieder abiem savstarpēji saistītiem

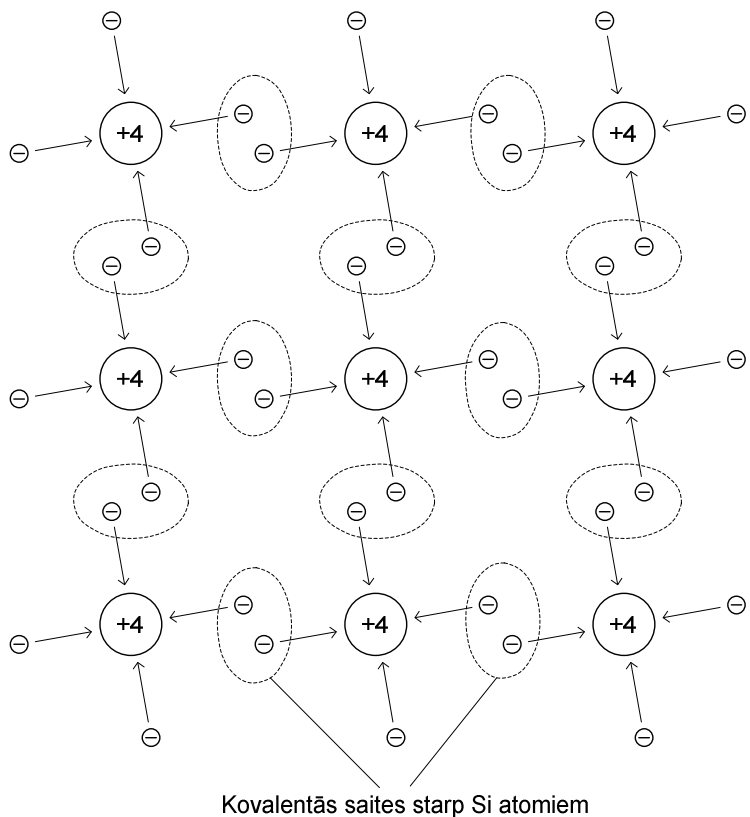
atomiem. Šādu divu atomu mijiedarbību sauc par kovalento saiti (2.4. att.). Tā kā katram Si atomam ir četri valences elektroni, tad tam veidojas četras kovalentās saites ar četriem blakus esošiem atomiem (2.5. att.). Līdz ar to katra atoma ārējā čaulā it kā ir astoņi elektroni, un tā kļūst par pilnīgi aizpildītu čaulu. Tas nozīmē, ka kristāliskajā režģī brīvo elektronu nav, tātad nav arī lādiņnesnēju.



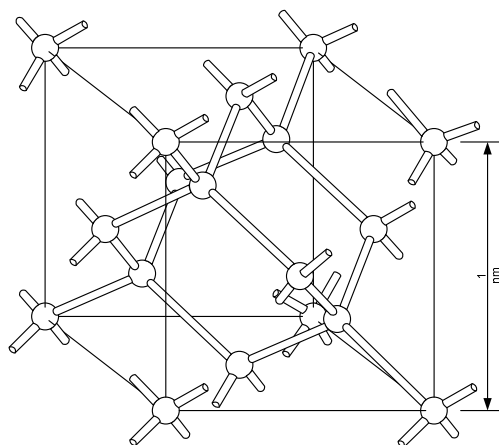
2.4. att. Atomu saites starp diviem Si atomiem

Dotajā 2.5. attēlā atomu saites, uzskatāmības labad, parādītas plaknē, bet faktiskais kristāliskā režģa telpiskais attēlojums parādīts 2.6. attēlā. Taču, pievadot šādam pusvadītājkristālam enerģiju siltuma vai gaismas veidā, atomi sāk haotiski svārstīties. Šīs svārstības sauc par atomu termisko paškustību. Palielinoties temperatūrai, režģa atomu haotisko svārstību amplitūdas palielinās un palielinās arī elektronu enerģijas. Svārstību rezultātā palielinās attālums starp atoma kodolu un valences elektroniem. Saite starp kodolu un elektroniem pavājinās. Tā rezultātā elektroni lielākajām enerģijām pāriet no valences zonas uz vadāmības zonu un kļūst par brīviem elektroniem. Ja šādam kristālam pieslēdz spriegumu, tad elektriskā lauka ietekmē kristālā ir iespējama strāvas plūsma.

Elektronam atraujoties no savas atoma, kristāliskajā režģī rodas brīva vieta, kurā trūkst negatīvā lādiņa. Tāpēc attiecīgajā atomā paliek nekompensēts pozitīvais lādiņš un tādēļ šo vietu sauc par "caurumu". Brīva elektrona un cauruma rašanos sauc par lādiņnesēju "ģenerāciju". Turpinot pievadīt enerģiju, nepārtraukti atbrīvojas elektroni. Haotiskās kustības rezultātā elektroni zaudē daļu savas enerģijas un nonākot caurumu elektriskā lauka ietekmes zonā, tie atgriežas atomu valences zonā. Šo procesu sauc par lādiņnesēja pāra „rekombināciju”. Pāru veidošanās un rekombinācija visu laiku ir līdzsvarā.



2.5. att. Silīcija atomu kovalentās saites

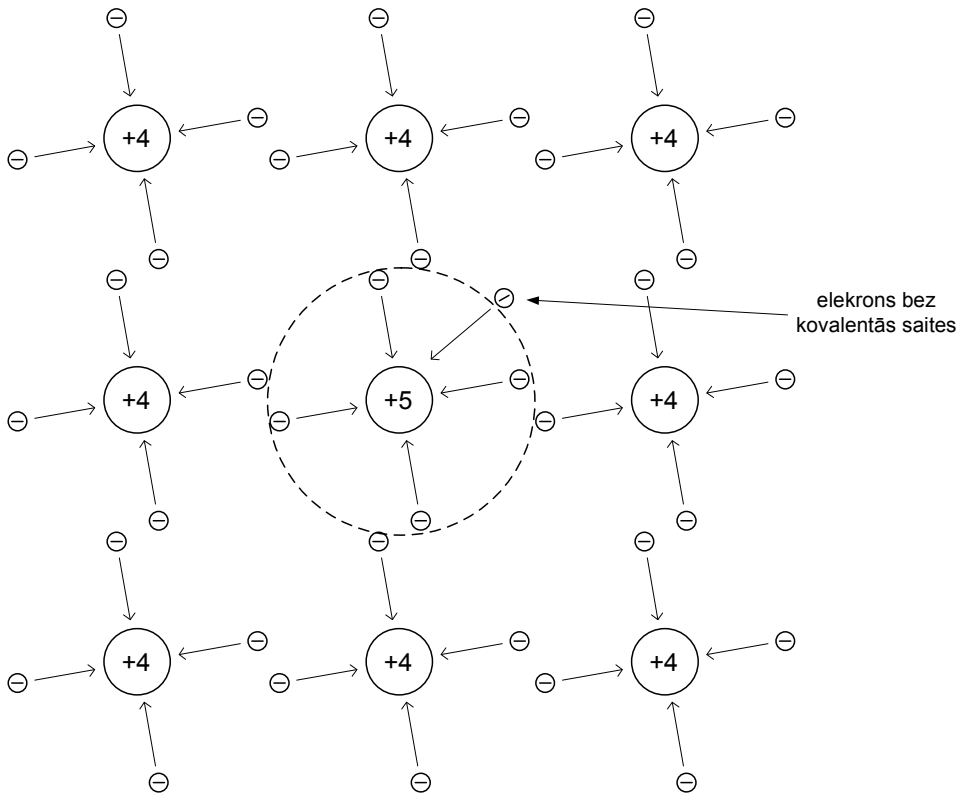


2.6. att. Silīcija kristālais režģis

Pieaugot temperatūrai, pusvadītāju materiāliem palielinās vadītspējas zonas brīvo elektronu skaits un līdz ar to, palielinās pusvadītāja vadītspēja. Šī ir pusvadītājiem raksturīga īpašība, kas tos atšķir no metāliem, jo tiem palielinoties temperatūrai, elektrovadītspēja samazinās. Pusvadītāja elektrisko vadītspēju, kas rodas termiskās pāru veidošanās procesā, sauc par „pašvadītspēju” vai “iekšējo vadītspēju”.

2.4. Piejaukuma pusvadītāji

Pusvadītāja elektrovadītspēja ir atkarīga no temperatūras un pusvadītājmateriāla. Taču to var ievērojami palielināt, neatkarīgi no temperatūras, ievadot kristālrežģī periodiskās sistēmas 5. grupas elementa ar pieciem valences elektroniem, piemēram, arsēnu (As), antimonu (Sb) vai bismutu (Bi). Piejaukuma atoma četri valences elektroni veido kovalentās saites ar pamatpusvadītāja atomiem, bet piektais elektrons ir saistīts tikai ar vienu atomu un tādēļ tas var vieglāk atbrīvoties no piejaukuma atoma (2.7. att.). Šāda tipa piejaukuma pusvadītāju, kurā ir liela brīvo elektronu koncentrācija, sauc par elektronu jeb n tipa pusvadītāju.

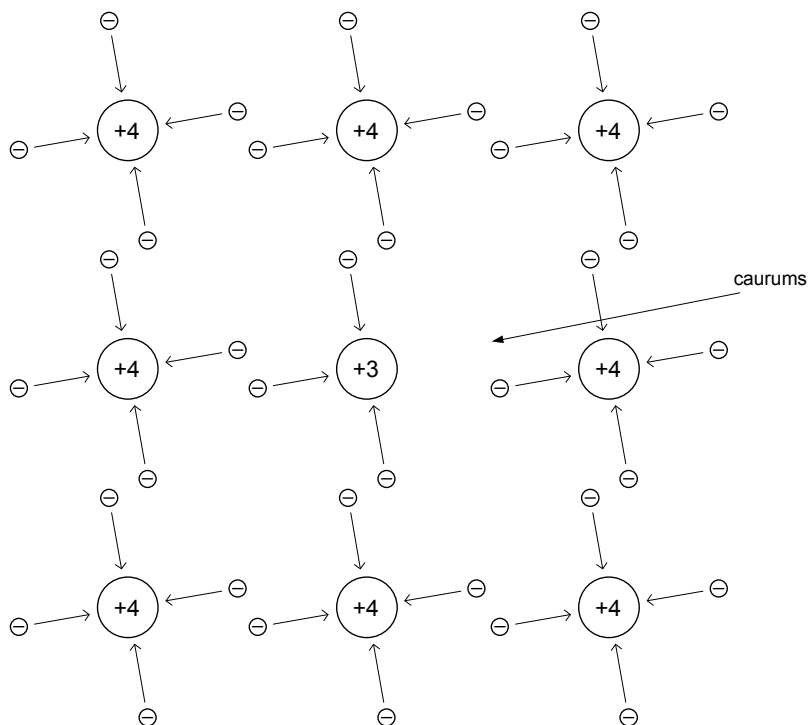


2.7. att. Pusvadītājs ar donorpiejaukuma atomu

Pusvadītāja elektrovadītspēju var palielināt arī, ja kristāliskajā režģī ievada periodiskās sistēmas 3. grupas elementus ar trim valences elektroniem, piemēram, boru (B), alumīniju (Al), galliju (Ga) vai indiju (In). Piejaukuma atoma trīs valences elektroni veido kovalentās saites ar pamatpusvadītāja atomiem, bet ceturtajai kovalentajai saitei pietrūkst viena elektrona. Tā rezultātā kristāliskajā režģī izveidojas caurums (2.8. att.). Šādu pusvadītāja materiālu apzīmē ar burtu p , bet attiecīgo

piejaukumu sauc par akceptoru (saņēmēju). Ja palielinās ārējais elektriskais lauks, tad blakus esošā pamatpusvadītāja atoma elektrons bez kovalentās saites var pāriet uz esošo caurumu un aizpildīt to, bet šajā gadījumā izveidojas jauns caurums atomā, no kura pārvietojās elektrons. Tā rezultātā piejaukuma atoms ir ieguvis vienu negatīvi lādētu elementārdaļiņu un kļuvis par negatīvu nekustīgu jonu, bet pamatpusvadītājā ir izveidojies brīvs pozitīvs lādiņnesējs - caurums, kurš var brīvi pārvietoties kristāla režģī.

Tādu piejaukuma atomu ievadīšanu tīra pusvadītāja kristālrežģī sauc par "leģēšanu".



2.8. att. Pusvadītājs ar akceptorpiejaukumu

2.5. p-n pāreja

Ja no n tipa un p tipa pusvadītājiem izveido monokristālu, tad abu pusvadītāju savienojuma vietā izveidojas p - n pāreja. Atomu termiskās paš kustības rezultātā p - n pārejā brīvie lādiņnesēji pārvietojas caur robežvirsmu. Šādā veidā elektroni no materiāla ar n piejaukumu nonāk apgabālā ar p piejaukumu, bet caurumi no materiāla ar p piejaukumu - n apgabālā. Šo procesu sauc par "difūziju".

Tā kā no n apgabala nākošie elektroni atrod pietiekami daudz brīvo caurumu p apgabālā, bet no p apgabala nākošie caurumi pietiekami daudz brīvo elektronu, tad

robežvirsmas tuvumā abās kristālu daļās notiek rekombinācija. Tas ir, abās robežvirsmas pusēs veidojas apgabals, kurā praktiski nav kustīgu lādiņnesēju (2.9. att.). Tādēļ šim apgabalam, ko sauc par "sprostslāni", ir ievērojami sliktāka vadītspēja nekā p un n apgabalos. Šāda sprostslāņa biezums ir apmēram 10^{-5} cm.

Visi raksturotie difūzijas, rekombinācijas un sprostslāņa veidošanās procesi notiek jau p - n pārejas izveides laikā.

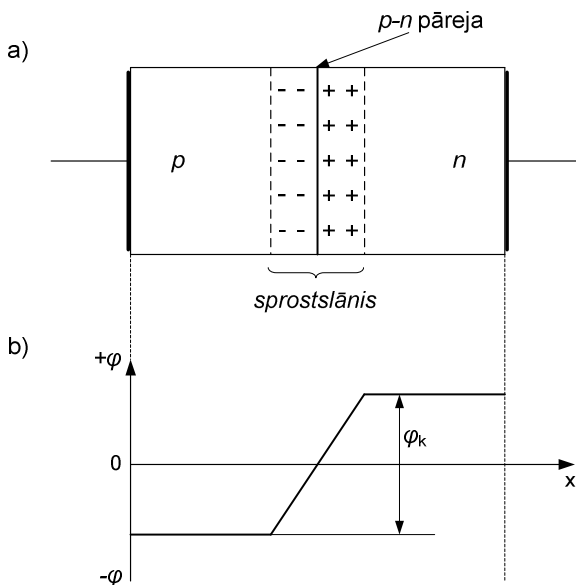
Pusvadītājmateriālos p un n , apskatot tos atsevišķi, protonu un elektronu skaits ir vienāds, tādēļ tie ir elektriski neitrāli. Arī pēc p - n struktūras izveidošanas, pusvadītājs, attiecībā pret izvadiem paliek neitrāls.

Taču, difūzijas laikā negatīvie lādiņnesēji, pārejot no elektriski neitrālā n kristāla uz elektriski neitrālo p kristālu, rada pozitīvos jonus sprostslāņa n tipa materiālā un negatīvos jonus sprostslāņa p tipa materiālā.

Tomēr elektriskais lauks, kas radies difūzijas procesā, nevar palielināties neierobežoti. Jo vairāk elektronu pāriet

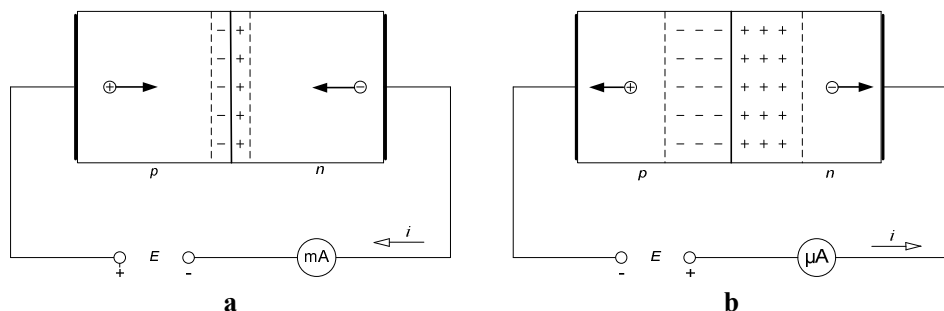
no n apgabala uz p apgabalu, jo lielāks kļūst p apgabala negatīvais elektriskais lauks. Tas kavē turpmāko elektronu difūziju. Līdzīgs process notiek arī ar caurumiem, kuri nāk no p tipa kristāla, jo n tipa kristālā pozitīvais elektriskais lauks kļūst aizvien lielāks. Tiklīdz elektriskais lauks ir sasniedzis noteiktu vērtību, turpmāka difūzija vairs nav iespējama, un iestājas līdzsvara stāvoklis. Elektriskā lauka potenciālu, kuru sasniedzot difūzija beidzas, sauc par "kontaktpotenciālu ϕ_k ". Tā kā kontaktpotenciāls rodas tikai uz sprostslāņa, tad no ārpuses to tieši izmērīt nevar. Taču to var noteikt netiešas mērīšanas ceļā, kompensējot ar tikpat lielu, bet pretēja virziena ārējo spriegumu. Šo kompensācijas spriegumu sauc par "caurlaides spriegumu". Kontaktpotenciāls lielā mērā ir atkarīgs no izmantotā pusvadītājmateriāla. Germānijam tas ir 0,3 V - 0,4 V, turpretim silīcijam 0,7 V - 0,8 V. Vidējie robežlielumi atkarīgi no piejaukuma koncentrācijas, kā arī no sprostslāņa temperatūras.

Ja pusvadītāja kristālam ar p - n pāreju pievieno ārējam sprieguma avotam tā, ka negatīvā spāile ir pie n materiāla, bet pozitīvā spāile pie p materiāla, tad pusvadītāja kristālā rodas elektriskais lauks, kura ietekmē brīvie elektroni no n tipa pusvadītāja un brīvie caurumi no p tipa pusvadītāja pārvietojas sprostslāņa virzienā. Turklāt tie iespēžas apgabalā, kas izveidojies difūzijas rezultātā un kurā nav lādiņnesēju. Tāpēc šī apgabala sākotnējais platums samazinās (2.10. att. a). Ja pievadītais spriegums ir



2.9. att. Pusvadītāju materiālu p - n savienojums (a) un kontaktpotenciāls (b)

vienāds vai lielāks par kontaktpotenciālu ϕ_k , tad sprostslānis izzūd. Līdz ar to pārejā pretestība ir maza, un no barošanas avota caur pusvadītāja kristālu var plūst strāva. Tātad, ja ārējā sprieguma avota negatīvā spāile ir pie n tipa materiāla, tad p - n pāreja darbojas caurlaides strāvas virzienā.



2.10. att. Sprostslāņa maiņa atkarībā no pieslēgtā sprieguma

Ja strāvas avota pozitīvā spāile ir pievienota pie pusvadītājkristāla p - n pārejas n tipa materiāla, bet negatīvā spāile pie p tipa materiāla, tad pusvadītāja kristālā rodas elektriskais lauks, kura ietekmē n tipa pusvadītāja brīvie elektroni virzās uz strāvas avota pozitīvo polu, bet p tipa pusvadītāja caurumi - uz negatīvo polu. Rezultātā brīvie lādiņnesēji virzās prom no p - n pārejas robežvirsmas un sprostslānis kļūst platāks (2.9. att. b) un strāvas plūsma caur kristālu nav iespējama.

Termiski izraisīto pašsvārstību rezultātā visā kristālā nemitīgi rodas elektronu-caurumu pāri un līdz ar to arī kustīgi caurumi n apgabalā, kā arī elektroni p apgabalā. Šos kustīgos lādiņnesējus sauc par minoritātes vai mazākuma lādiņnesējiem. Arī p apgabala elektroni un n apgabala caurumi kā mazākuma lādiņnesēji pieliktā sprieguma ietekmē ceļo caur p - n robežvirsmu, kas darbojas sproststrāvas virzienā, un rada vāju elektrisko strāvu, ko sauc par sproststrāvu. Sproststāvas stiprums lielā mērā atkarīgs no temperatūras. Istabas temperatūrā I_R germānijam ir aptuveni $10\ \mu\text{A}$ līdz $500\ \mu\text{A}$, bet I_R silīcijam aptuveni $5\ \text{nA}$ līdz $500\ \text{nA}$.

Tomēr spriegumu sproststrāvas virzienā nedrīkst palielināt neierobežoti. Ja elektriskā lauka iedarbība kļūst stiprāka nekā valences elektronu saites spēki, sāks plūst caursites strāva. Ja caursites strāvu neierobežo, tad tā sagrauj p - n pāreju vai pusvadītāja materiāla kristālisko struktūru.

Sproststrāvas virzienā p - n pārejai ir vēl viena īpašība, ko izmanto elektronikā. Tā kā sprostslāni nav lādiņnesēju, tad tas darbojas kā dielektriķis, kam abās pusēs atrodas pusvadītājs kā labs elektriskās strāvas vadītājs. Tāpēc sprostvirzienā vērsta p - n pāreja darbojas kā kondensators. Tomēr tam ir samērā neliela kapacitāte, ko sauc par "barjerkapacitāti". Tās lielums ir atkarīgs no pieliktā sprostsprieguma. Jo lielāks sprostspriegums, jo biežāks sprostslānis. Tā biezums ir vienāds ar attālumu starp kondensatora platēm. Tātad, palielinoties sprostspriegumam, barjerkapacitāte samazinās. Šo p - n pārejas īpašību izmanto varikapos.

3. PUSVDĪTĀJU IERĪCES

3.1. Pusvadītāju diodes

Par pusvadītāju diodi sauc pusvadītāju ierīci ar vienu pāreju un diviem izvadiem. Diode vada strāvu tikai vienā virzienā, bet pretējā virzienā var plūst tikai neliela spurostrāva.

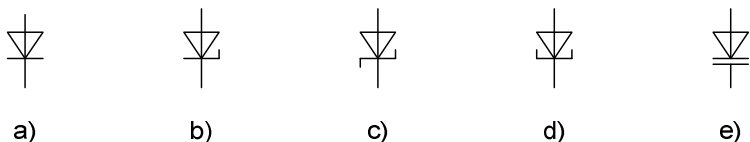
Ir dažāda veida pusvadītāju diodes - mazas jaudas diodes, impulsa diodes, taisngriežu diodes vidējas un lielas jaudas diodes. Mazas jaudas diodes un impulsa diodes piemērotas izmantošanai augstfrekvences un impulsu iekārtās. Tās tiek izgatavotas kā punkta diodes, kurām ir ļoti mazs pārejas laukuma izmērs, tas ir mazāks par sprotslāņa platumu, bet tas nozīmē, ka tām ir maza barjerkapacitāte. Augstfrekvences diožu darba strāvas ir robežās no dažiem līdz dažiem desmitiem miliampēriem. Impulsa diodēm impulsā darba strāvas vērtība sniedzas līdz vairākiem simtiem miliampēru, pie noteikuma, ka vidējā strāvas vērtība visā lietošanas laikā nepārsnieds dažus miliampērus.

Taisngriežu diodes tiek izgatavotas kā virsmas diodes, kurām pārejas laukuma izmēri ir ievērojami lielāki par sprotslāņa biezumu. Vidējās jaudas taisngriežu diožu darba strāvas ir robežās no dažiem simtiem miliampēru līdz desmit ampēriem. Lielas jaudas diodēm darba strāvas var būt līdz desmitiem tūkstošiem ampēru.

Lielākā daļa diožu šodien tiek izgatavotas pēc planārās tehnoloģijas, un tās var izmantot gan taisngriežu, gan impulsu slēguma shēmās. Turpretim tīkla taisngriežu lieljaudas diodes tiek izgatavotas ar citiem paņēmieniem.

Bez pusvadītāju diodēm taisngriešanai, augstfrekvences un impulsa iekārtām ir izveidotas arī citas pusvadītāju diodes ar speciālām īpašībām, piemēram, stabilitrons (Zēnera diode), varikap, Šotki diode, tuneļdiode, PIN-diode, fotodiode un gaismas diode.

Elektroniskajās shēmās pieņemtie pusvadītāju diožu shematiskie apzīmējumi doti 3.1. attēlā.



3.1. att. **Pusvadītāju diožu shematiskie apzīmējumi:**

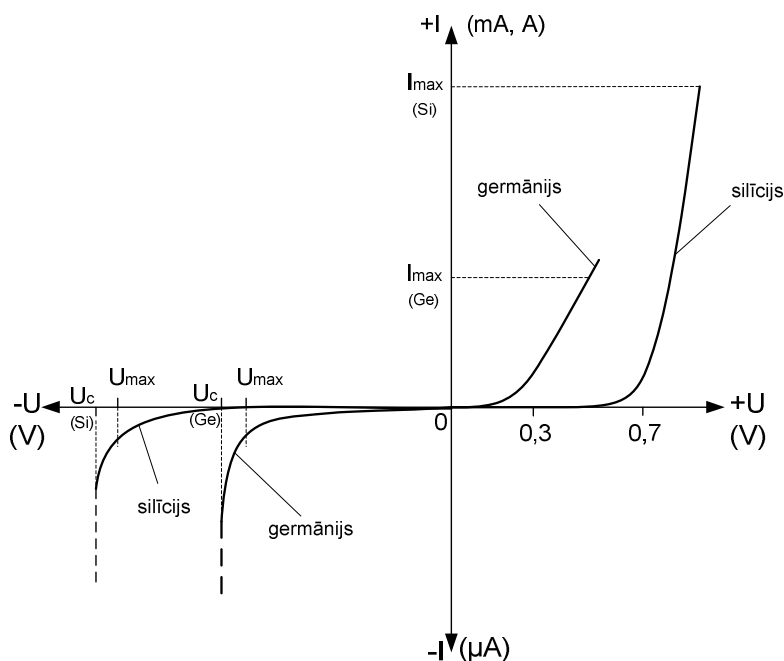
- a) taisngriežu diode, b) stabilitrons, c) simetriskais stabilitrons (arī Šotki diode),
d) tuneļdiode, e) varikap

Stabilitronu un simetrisko stabilitronu izmanto nemainīga līdzsprieguma uzturēšanai jeb stabilizācijai. Šotki diodes to speciālo īpašību dēļ izmanto kā ātrdarbīgus slēdžus. Tuneļdiodes izmanto supraugstu svārstību ģenerēšanai mikroviļņu diapazonā. Varikapus izmanto galvenokārt svārstību kontūru noskaņošanai. Šodien varikapus var atrast gandrīz visās sadzīves elektronikas ierīcēs.

Neatkarīgi no pusvadītāju diožu izgatavošanas tehnoloģijas un izmantošanas mērķa visām ir vairāki kopīgi parametri, kurus raksturo diodes raksturlīkne (3.2. att.). Dotajā attēlā parādītas germānija un silīcija diožu maksimāli pieļaujamie parametri. Par maksimāli pieļaujamiem parametriem sauc tādus, kuri nodrošina dotās diodes drošību konkrētos darba apstākļos un kuru lielumu nedrīkst pārsniegt jebkuros ekspluatācijas apstākļos.

Lai varētu uzskatāmi parādīt diožu parametrus vadāmības un sprosta virzienā, 3.2. attēlā grafikām izmantoti atšķirīgi mērogi. Vadāmības virzienā vidējās jaudas diodēm spriegums ir līdz vienam voltam un strāva atkarībā no diodes tipa robežās 50 mA līdz 10 A, bet sprosta virzienā spriegums atkarībā no diodes tipa ir robežās 40 V līdz 1500 V un sproststrāva nepārsniedz dažus μA .

Diodes vadāmības virzienā ievērojama strāvas plūsma caur to sākas tikai tad, kad caurlaides spriegums kļūst lielāks par tās kontaktpotenciālu. Šo minimālo caurlaides sprieguma vērtību sauc par sprostsprīgu un tas ir 0,3 V germānija diodei, bet silīcija – 0,7 V. Turpinot palielināt spriegumu, strauji pieaug diodes strāva. Šajā virzienā strāvas palielināšanu ierobežo maksimāli pieļaujamā strāva I_{max} . Diodes caurlaides maksimālās strāvas skaitlisko vērtību nosaka diodes p - n pārejas maksimālā temperatūra.



3.2. att. Pusvadītāju diožu raksturlīknes

Sprosta virzienā diodes maksimāli pieļaujamais parametrs ir U_{max} , kas vienmēr ir mazāks par caursites spriegumu. Tas ir tādēļ, ka sasniedzot kritisko robežu, tālāk strāva pieaug lavīnveidīgi un diodes kristāls tiek sagrauts.

Maksimāli pieļaujamais sprostspriegums $U_{\max}$ ir atkarīgs no pusvadītāja materiāla. Silīcija diodēm tas ir robežās no 80 V līdz 1500 V, bet germānija diodēm - no 40 V līdz 100 V.

3.1.1. Taisngriežu diodes

Taisngriežu diodes paredzētas galvenokārt zemfrekvences maiņsprieguma it īpaši tīkla sprieguma iztaisnošanai. Taisngriežu diožu pāreju laukumi var būt robežās no kvadrātmilimetra daļām līdz vairākiem kvadrātcentimetriem (lieljaudas diodēm). Paaugstinoties taisngriežamās maiņstrāvas frekvencei, pasliktinās diodes taisngriešanas īpašības – samazinās diodes vidējā taisngrieztā strāva. Visbiežāk tās izgatavo no silīcija, retāk no germānija. Silīcija diodēm maksimālais pieļaujamais sprosta spriegums sniedzas līdz 1500 V, bet germānija diodēm - līdz 400 V.

Taisngriežu diodes klasificē pēc maksimālā sprieguma un retāk pēc maksimālās strāvas.

Tiek izgatavoti taisngriežu diožu bloki, kuros vienā korpusā iemontētas un noteiktā elektriskā shēmā saslēgtas taisngriežu diožu kopas, un taisngriežu stabi, kuros iemontētas virknē savienotas diožu kopas.

3.1.2. Impulsu diodes

Impulsu diodes paredzētas izmantot radio, televīzijas un skaitļošanas iekārtu shēmās, kurās nepieciešams pārslēgšanās laiks, no vadošā stāvokļa nevadošā vai otrādi, ir 1 μ s vai mazāks. Lai iegūtu tik mazu pārslēgšanās laiku, tās izgatavo ar mazu pārejas laukumu, kā arī cenšas samazināt no emitera (katoda) bāzē (anodā) difundējošo lādiņnesēju dzīves laiku.

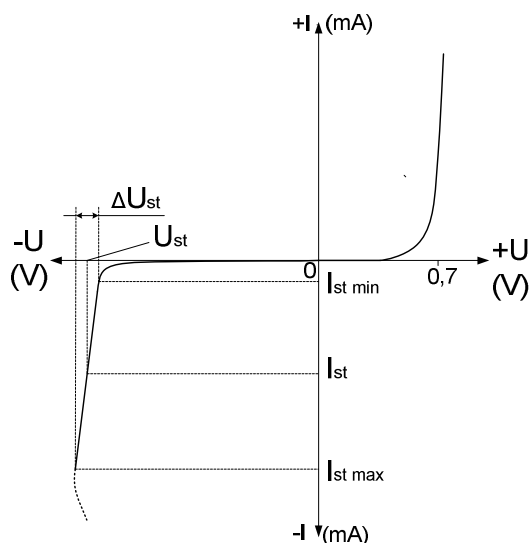
Impulsu diodēm bez parametriem un raksturlielņiem, kas minētas iepriekš, ir vēl šādi papildus parametri.

Diodes caurlaides sprieguma iestāšanās laiks. Tas ir laika intervāls no impulsa padošanas sākuma līdz laika momentam, kad caurlaides spriegums sasniedz 1,2 no stacionārās vērtības.

Diodes sprostopretestības atjaunošanās laiks. Tas ir laika intervāls, kurā diodes sproststrāva sasniedz stacionāro vērtību pēc diodes pārslēgšanās no caurlaides sprieguma uz sprostspriegumu.

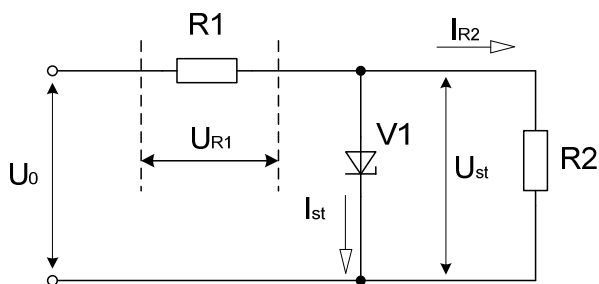
3.1.3. Stabilītroni (Zēnera diodes)

Par stabilītronu sauc pusvadītāju diodi ieslēgtu sprostvirzienā. Tās darbības zona ir izvietota raksturlielnes (3.3. att.) lineārajā daļā, kurā sprostspriegums gandrīz nav atkarīgs no strāvas. Stabilītronus visbiežāk izgatavo no n tipa silīcija, kuram iekausē akceptoru - alumīniju. Stabilītronu visplašāk lietotie parametri ir stabilizācijas spriegums U_{st} pie noteiktas stabilizācijas strāvas, minimālā un maksimālā stabilizācijas strāva, maksimālā izkliedes jauda un stabilizācijas sprieguma izmaiņa $\pm \Delta U_{st}$ maksimālās un minimālās stabilizācijas strāvas.



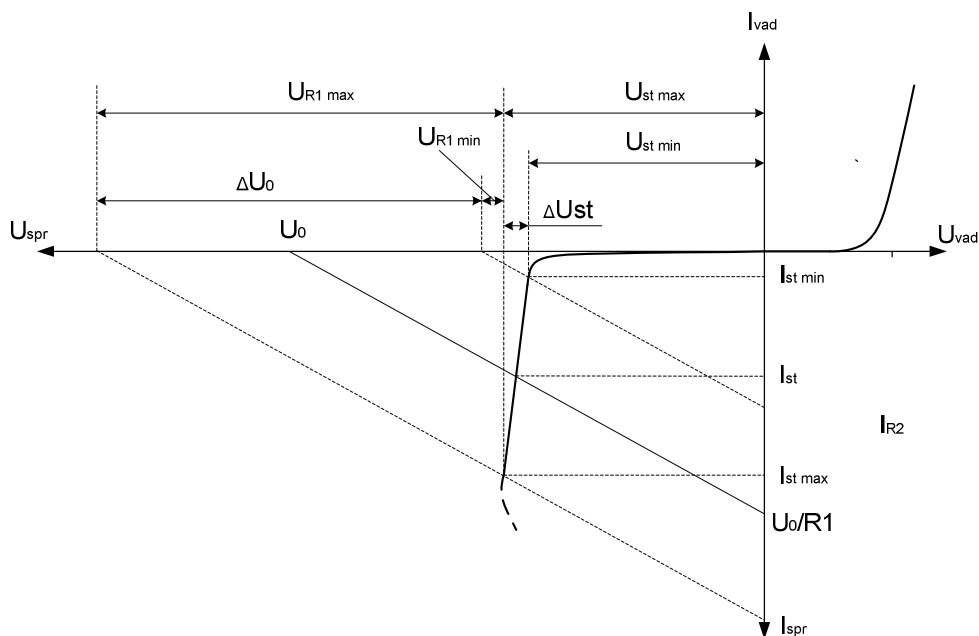
3.3. att. Pusvadītāju stabilitrona voltampēru raksturlīkne

Vienkārša sprieguma stabilizatora shēma dota 3.4. attēlā, bet stabilizatora raksturlīkne 3.5. attēlā. Līdzstrāvas barošanas avota spriegums U_0 svārstās robežās $\pm \frac{\Delta U_0}{2}$, bet stabilizētais spriegums U_{st} – robežās $\pm \frac{\Delta U_{st}}{2}$.



3.4. att. Sprieguma stabilizatora shēma

Ar stabilitronu un slodzes rezistoru R_2 virknē slēgtais rezistors R_1 ierobežo diodes strāvu un sprieguma svārstības robežās no $U_{R1 \min}$ līdz $U_{R1 \max}$, kuras nosaka ar slodzes taisnes (U_0 , U_0/R_1) palīdzību, velkot, paralēli palīgtaisnes caur stabiltrona raksturlīknes punktiem $I_{st \min}$ un $I_{st \max}$.



3.4. att. Sprieguma stabilizatora voltampēru raksturlīkne

3.1.4. Tunelēdiodes

Tunelēdiodes ir speciālas pusvadītāju diodes, kas veidotas no n un p tipa materiāliem ar ļoti lielu piejaukumu koncentrāciju (viens kristāla cm^{-3} satur 10^{19} piejaukuma atomu). Tādēļ p - n pāreja ir ļoti plāna. Tādā plānā p - n pārejā jau tad, kad spriegumi ir ļoti mazi, izveidojas lielas intensitātes elektriskais lauks, pateicoties kuram rodas tunelē efekts, tas ir, caur sprotslāni kā caur tuneli iziet elektroni, kuriem enerģija ir par mazu, lai pārvarētu potenciāla barjeru.

Tunelēdiodes lieto dažādās impulsu ģeneratoru shēmās un augstu frekvenču ģeneratoros.

3.1.5. Varikapi

Par varikapu sauc sprostvirzienā ieslēgtu diodi, kuras pārejas kapacitāte ir atkarīga no sprotslāņa platuma. Tā kā sprotslāņa platums ir atkarīgs no pieliktā sprieguma, tad šāda diode var strādāt kā elektriski stūrējama kapacitāte.

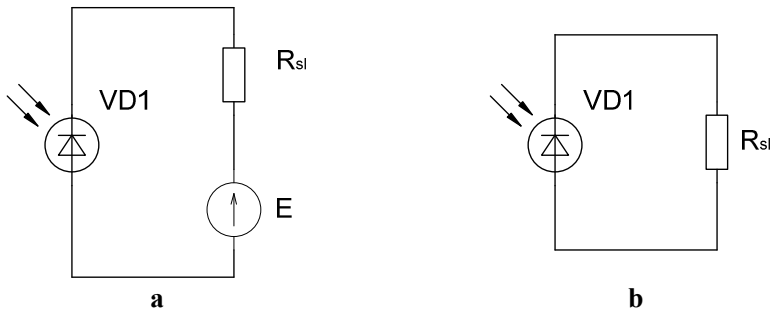
Varikapus klasificē pēc kapacitātes un papildus pēc maksimāli pieļaujamā sprieguma. Par varikapiem dažreiz izmanto silīcija stabilitronus. Sprostvirzienā ieslēgtas diodes, kas darbināmas kā elektriski stūrējamas kapacitātes supraugstā frekvenču diapazonā, sauc par parametriskajām diodēm.

3.1.6. Fotodiodes

Par fotodiodi sauc pusvadītāju ierīci ar p - n pāreju un, kurai izveidota optiska lēca, kas koncertē gaismas plūsmu pārejas slāņu tuvumā. Ja pusvadītājus pārejas slāņa tuvumā apgaismo, tad gaismas enerģijas ietekmē sākas kristāla atomu jonizācija. Parādās lādiņnesēji – elektroni un caurumi. Kontaktpotenciāla ietekmē elektroni pārvietojas uz n tipa pusvadītāja slāni, bet caurumi uz p tipa pusvadītāja slāni. Katrā no slāņiem palielinās vairākuma lādiņnesēju koncentrācija, tādēļ starp šiem slāņiem rodas potenciālu starpība, kuru var uzskatīt par EDS avotu. Pievienojot šiem slāņiem ārēju ķēdi, tajā plūst strāva. Šādu fotodiodes darba režīmu sauc par fotoģenerācijas režīmu (3.5. att. b), tas ir, fotodiode gaismas enerģiju pārveido elektriskajā enerģijā. Par pusvadītāju materiāliem fotodiodēs izmanto silīciju, germāniju, selēnu, sudraba sulfīdu un tallija sulfīdu. Fotoģenerācijas režīmā fotodiodes izmanto saules baterijās, lai saules staru enerģiju elektriskajā.

Rūpnieciski ražota saules elementa nominālais spriegums ir ap 0,5 V. Lai iegūtu augstāku spriegumu, veido saules elementu blokus - baterijas ar nominālo spriegumu 16,5 . . . 17 V, kuros tie savienoti virknē. Rūpnieciski saules elementu baterijas ražo ar sekojošām jaudām: 5, 10, 20, 51, 75 un 102 W. Labāko saules elementu lietderības sniedzas līdz 0,4.

Latvijā saulainā vasaras dienā saules radiācija sniedzas līdz 1000 W/m^2 , bet mākoņainā tā var būt ap 200 W/m^2 .



3.5. att. Fotodiodes izmantošana fotopārveidošanas un fotoģenerācijas režīmā

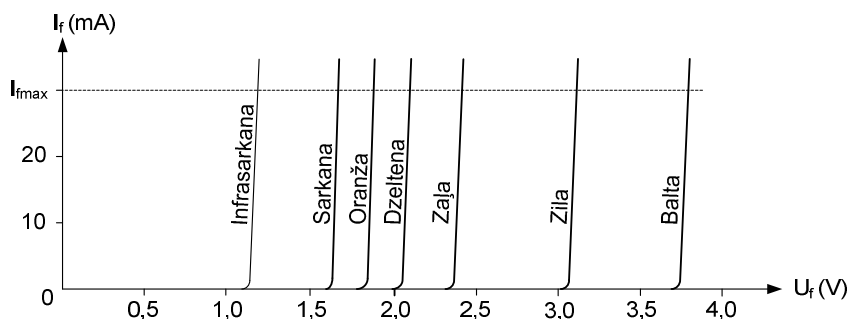
Fotodiodi plaši izmanto fotopārveidošanas režīmā, kad tās ārējā ķēdē ieslēdz atsevišķu barošanas avotu (3.5. att. a). Tā pozitīvo elektrodu pievieno n tipa pusvadītāja slānim, bet negatīvo p tipa pusvadītāja slānim. Tas nozīmē, ka barošanas avots ieslēgts sprostvirzienā un caur diodi plūst neliela sproststrāva, kuru sauc par tumsas strāvu. Apgaismojot fotodiodi, cauri n - p pārejai sāk pārvietoties liels daudzums mazākumlādiņnesēju un līdz ar to stipri pieaug strāva fotodiodes ārējā ķēdē. Šīs strāvas lielums ir atkarīgs no ārējā barošanas avota sprieguma un gaismas plūsmas lieluma. Fotodiodes, kas paredzētas lietot fotopārveidošanas režīmā izgatavo no silīcija un germānija.

Fotopārveidošanas režīmā fotodiodes ir ļoti ātrdarbīgas un tām ir liela fotojutība, kas sniedzas līdz 20 mA/lm.

Fotodiodes galvenais trūkums ir fotostrāvas atkarība no temperatūras.

3.1.7. Gaismas diodes

Gaismas diodes ir gaismu emitējošs pusvadītājs, kurā elektriskā enerģija tiek pārveidota starojuma enerģijā. Gaismas diodes sauc arī par luminiscentām diodēm vai LED (*Light Emitting Diode*). Šīs diodes izmanto vadāmības virzienā, kurā elektronam pārejot no augstāka enerģijas līmeņa uz zemāku tiek izstarota gaisma. Izstarotās gaismas spektrs (krāsa) ir atkarīgs no izejmateriāla. Dažādu krāsu gaismas diožu voltampēru raksturlīknes parādītas 3.6. attēlā.

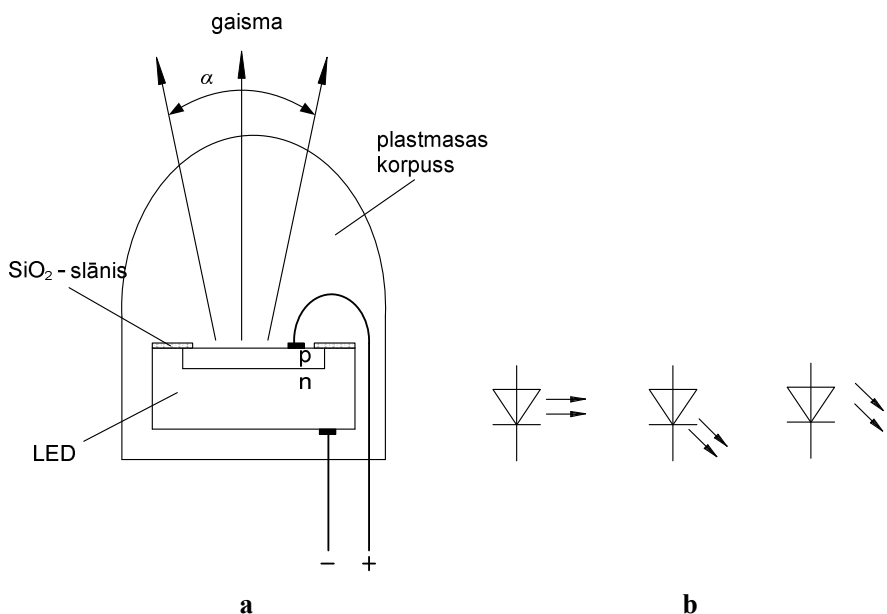


3.6. att. Dažādu krāsu gaismas diožu voltampēru raksturlīknes

Līdzīgi citām diodēm, arī gaismas diodes izveidotas no diviem pusvadītāja materiāliem *n-p*, starp kuriem veidojas sprostsplānis. Atšķirībā no pārējām diodēm, tām *n* slānis ir plāns un ar ļoti lielu leģētības pakāpi, turpretī *p* slānis ir daudz biezāks un satur ievērojami mazāk piejaukuma atomu. Tādā veidā panāk, ka, diodei darbojoties caurlaides virzienā, strāvu caur sprostsplāni veido elektroni. Tā kā caur sprostsplāni izgājušie elektroni nonāk *p* materiālā, kur to ir daudz vairāk nekā caurumu, elektroni rekombinējas ar caurumiem. Rekombinācijas rezultātā atbrīvojas enerģija, kas atkarībā no izejmateriāla, tiek izstarota kā noteiktas krāsas redzamā gaisma.

Gaismas diodes galvenokārt izgatavo caurspīdīgā plastmasas korpusā, kurš var būt arī iekrāsots un darbojas kā gaismas filtrs. Tās konstrukcija un visbiežāk lietotie grafiskie apzīmējumi doti 3.7. attēlā.

Izstarotās gaismas viļņa garums ir apgriezti proporcionāls aizliegtās zonas platumam. Platas aizliegtās zonas dēļ gaismas diodēm tiešais sprieguma kritums U_F ir lielāks un var pārsniegt 6 voltus.



3.7. att. Gaismas diodes konstrukcija (a) un visbiežāk lietotie grafiskie apzīmējumi (b)

Ražo arī divu gaismu diodes, sarkano un zaļo vienā korpusā ar trīs izvadiem. No šīm gaismas diodēm var iegūt trīs krāsas, ieslēgta sarkanā, ieslēgta zaļā un ieslēgtas abas diodes dod dzelteno krāsu, kuras toni var mainīt izmainot strāvu attiecību caur sarkano un zaļo gaismas diodi. Ražo arī divas inversi paralēli savienotas gaismas diodes vienā korpusā ar diviem izvadiem kuru krāsa ir atkarīga no pieliktā sprieguma polaritātes. Ražo arī gaismas diodes ar korpusā iebūvētiem rezistoriem, kuras paredzētas tiešai pieslēgšanai pie 5 V vai 12 V sprieguma, kā arī mirgojošās gaismas diodes ar iebūvētu multivibratoru.

Kā redzams no gaismas diožu voltampēru raksturlīknēm, tās var arī izmantot Zēnera diožu vietā mazu stabilizētu spriegumu iegūšanai.

Gaismas diožu galvenie parametri

λ - izstarotā elektromagnētiskā viļņa garums, (0,3...1,2 μm);

I_V - izstarotās gaismas stiprums svecēs pie dotās strāvas I_F (0,15...15 000 mcd);

$I_{F\text{MAX}}$ - maksimāli pieļaujamā strāva caur diodi (10... 1500 mA);

α - starojuma leņķis, kurā starojuma līmenis samazinās līdz 0,5 no maksimālā (3...90°);

U_F - tiešais spriegums uz diodes pie dotās strāvas (1,1...6,84 V);

$U_{R\text{MAX}}$ - maksimāli pieļaujamais reversais spriegums (1,5... 5 V);

t_R - izstarotā impulsa pieaugšanas laiks no līmeņa 0,1...0,9 (10...2400 ns).

3.1.8. Gaismas diožu indikatori

Rūpnieciski izgatavo gaismas diožu indikatorus, kuri paredzēti ciparu, burtu un dažādu speciālu simbolu indicēšanai. Plašu pielietojumu guvuši trīs indikatoru veidi:

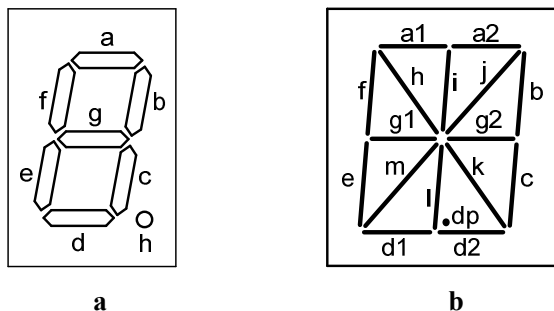
- zīmju veidojošie no 7 vai 16 segmentiem (3.8. att.);
- zīmju veidojošie no $5 \times 7 = 35$ vai $8 \times 8 = 64$ punktiem (3.10. att.);
- lineārās skalas indikatori.

Zīmju veidojošos septiņu segmentu indikatorus ražo ar ciparu augstumu 2,5...310 mm, tie ļauj indicēt visus ciparus 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 un dažus lielos un mazos burtus A, b, C, t < L E, F, G, H, I, J, L, n, o, P, r, t, U, u, Y, Y, II, 3, kā arī dažas citas zīmes.

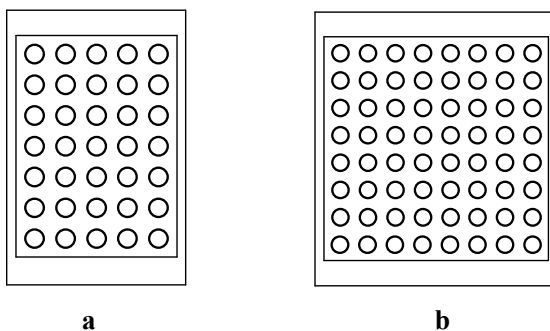
Zīmju veidojošos sešpadsmit segmentu indikatorus lieto reti. Ja vajag attēlot tekstu, tad lieto zīmju sintezējošos indikatorus no 8×8 punktiem. Šos indikatorus var salikt blakus ciešā rindā tā, ka spraugas starp indikatoriem praktiski nav redzamas, bet tas ļauj attēlot nelielus tekstus, piemēram, tramvajos, trolejbusos un autobusos – maršruta gala punkta vai nākošās pieturas nosaukumu.

Pēdējā laikā vispopulārākie ir septiņu segmentu indikatoru ar cipara augstumu 14,2 mm, kurus izgatavo kā ar kopēju anodu, tā arī ar kopēju katodu un vienu, diviem, trim vai četriem cipariem vienā korpusā.

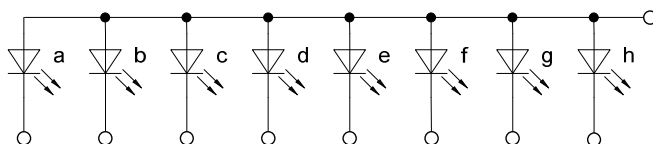
Izdevīgāk ir izmantot gaismas diožu septiņu segmentu indikatorus ar kopēju anodu, jo tos vieglāk vadīt tieši no ciparu loģikas integrālajām mikroshēmām. Septiņu segmentu gaismas diožu indikatora shēma dota 3.10. attēlā. Astotā diode izgaismo punktu.



3.8. att. Septiņu (a) un sešpadsmit (b) segmentu gaismas diožu indikatori



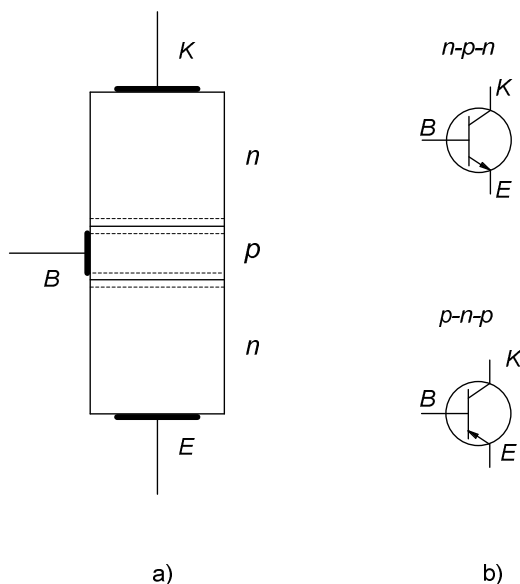
3.9. att. Gaismas diožu indikatori ar trīsdesmit pieciem (a) un sešdesmit četriem (b) punktiem



3.10. att. Kopējā anoda septiņu segmentu gaismas diožu indikatora shēma

3.2. Bipolārie tranzistori

3.2.1. Tranzistoru uzbūve un darbības princips

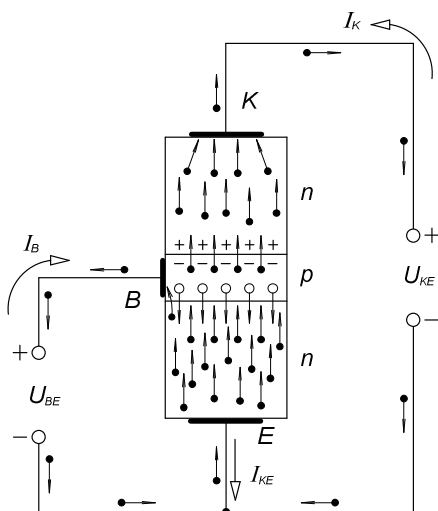


3.11. att. Tranzistora vienkāršota uzbūve un grafiskie apzīmējumi

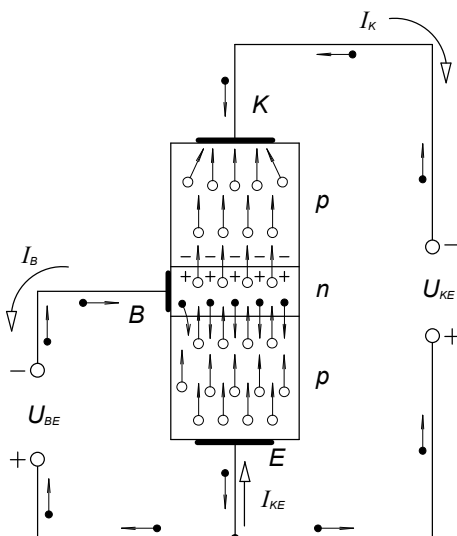
Tranzistori ir pusvadītāju ierīces, kuras lieto elektrisko signālu pastiprināšanai un kurām ir vismaz trīs izvadi. Bipolāro tranzistoru (turpmāk tranzistoru) veido no trīs pusvadītāju slāņiem, starp kuriem veidojas divas $n-p$ pārejas. Vienkāršota $n-p-n$ tranzistora uzbūve parādīta 3.11. attēlā a, bet $n-p-n$ un $p-n-p$ tranzistoru grafiskie apzīmējumi shēmās parādīti 3.11. att. b. Tranzistora augšējo daļu sauc par kolektoru, vidējo par bāzi, bet apakšējo par emiteru. Pāreju starp kolektoru un bāzi sauc par kolektora pāreju, bet pāreju starp bāzi un emiteru par emitera pāreju. Galvenās atšķirības starp $n-p-n$ un $p-n-p$ tranzistoriem ir barošanas sprieguma polaritāte un strāvu virzieni elektrodu ķēdēs. Bultiņa tranzistora grafiskajā apzīmējumā norāda strāvas virzienu emitera ķēdē. Katrā

elektrodā plūstošo strāvu apzīmē ar elektrodam atbilstošu indeksu: kolektora strāvu – I_K , bāzes strāvu – I_B un emitera strāvu – I_E . Starpelektrodu spriegumu apzīmēšanai lieto divus indeksus: U_{KE} , U_{KB} un U_{BE} . Norādot spriegumus U_{BE} un U_{CE} , pēdējais burts vienmēr apzīmē kopējo elektrodu. Shematiski $n-p-n$ un $p-n-p$ tranzistoru uzbūve ar divām $p-n$ pārejām parādīta 3.12. un 3.13. attēlos. Tranzistoru barošanai sprieguma avoti pieslēgti starp bāzi un emiteru tā, ka apakšējā $p-n$ pāreja darbojas caurlaides strāvas virzienā, bet starp kolektoru un emiteru tā, ka augšējā $p-n$ pāreja darbojas sprosta virzienā. Abos attēlos parādīti strāvu virzieni un elektrisko lādiņu t.i., elektronu un caurumu, kustības virzieni.

Pateicoties pieslēgtajam spriegumam, apakšējā $p-n$ pāreja ir vadāmības virzienā, bet augšējā – sproststrāvas virzienā. Tāpēc vidējā un augšējā slānī izveidojas barjera. Tā sniedzas gandrīz visa vidējā slāņa platumā. Šis slānis ir ļoti šaurs, un tam ir tikai daži lādiņnesēji.



3.12. att. *n-p-n* tranzistoru darbība



3.13. att. *p-n-p* tranzistoru darbība

Lādiņnesēji nāk no apakšējā slāņa, tādēļ to sauc par emiteru (emittere (lat.) - izstarot). Augšējais slānis savāc visus lādiņnesējus, kas izplūda caur bāzi, un to sauc par kolektoru (collector (lat.) - savācējs). Vidējais slānis nosaukts par bāzi, tāpēc, ka tranzistoru attīstības stadijā vidējais slānis tika uzklāts uz metāla pamata, kas vienlaicīgi kalpoja par pusvadītāja pamatu, bet kolektora un emitera slāņus uzlika uz vidējā, izvietojot tos blakus.

Sakarā ar to, ka apakšējā *p-n* pāreja ir polarizēta vadāmības strāvas virzienā, no emitera slāņa nākošie lādiņnesēji pārplūdina vidējo sprostsplāni. Tas tiek daļēji noārdīts, un tā pretestība samazinās. Tāpēc no emitera nākošie lādiņnesēji caur noārdīto sprostsplāni var iespieties kolektora slānī un aizplūst uz barošanas avotu.

Starp tranzistora strāvām pastāv sakarība

$$I_E = I_K + I_B. \quad (3.1)$$

Praktiski bāzes strāva ir tikai daži procenti vai procentu daļas no kolektora strāvas, tātad $I_B \ll I_K$ un

$$I_K \approx I_E. \quad (3.2.)$$

Arī starpelektrodu spriegumus saista vienkārša sakarība

$$U_{KE} = U_{KB} + U_{BE}. \quad (3.3)$$

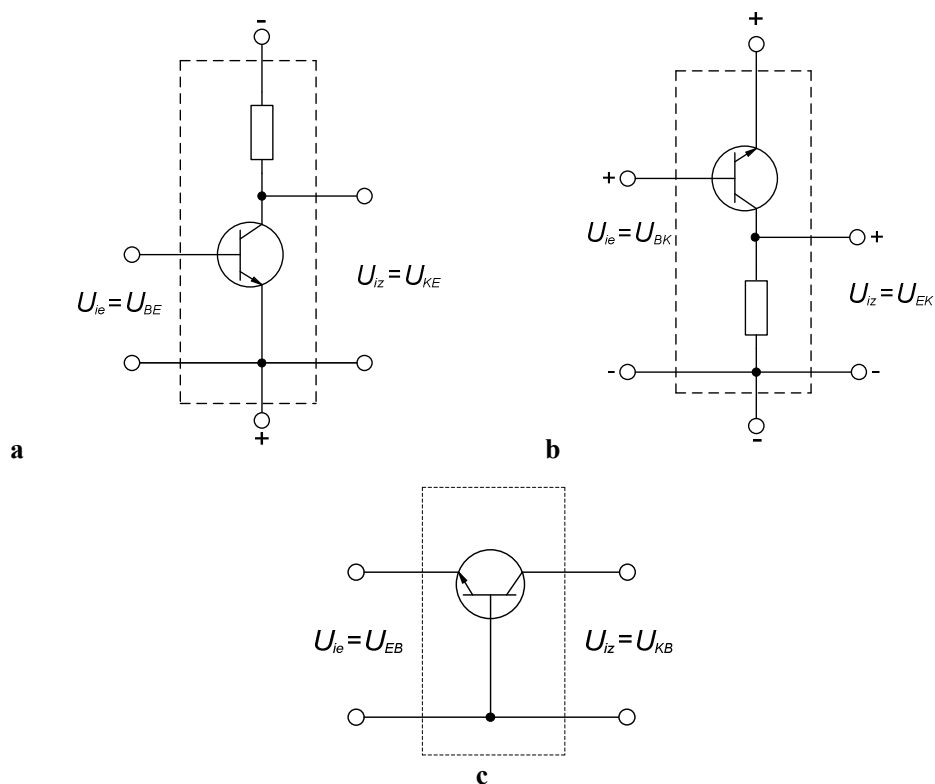
Parasti $U_{BE} \ll U_{KB}$, tādēļ

$$U_{KE} \approx U_{KB}. \quad (3.4)$$

Caur bāzi plūstošā bāzes strāva I_B ir ievērojami mazāka nekā caur noārdīto sprostsplāni plūstošā kolektora strāva I_K . Ja, piemēram, tranzistora pastiprinājums ir 100, tad pie bāzes strāvas $I_B = 50 \mu\text{A}$, kolektora strāva I_K būs ap 5 mA. Bet ja I_B paaugstina, piemēram, līdz $100 \mu\text{A}$, tad no emitera sprostsplānī nonāk vairāk lādiņnesēju un sprostsplānis tiek noārdīts vairāk, līdz ar to kolektora strāva I_K palielinās apmēram līdz 10 mA. Samazinot I_B , sprostsplāņa pretestība palielinās, bet kolektora strāva I_K samazinās. Bāzes strāva I_B un kolektora strāva I_K plašā intervālā ir proporcionālas. Tātad, tranzistoram ar mazu bāzes strāvas I_B izmaiņu var iegūt daudz lielāku kolektora strāvas I_K izmaiņu. Šo sakarību sauc par tranzistora strāvas pastiprinājumu β .

3.2.2. Tranzistoru slēgumi

Pastiprinātājam vienmēr ir divi ieejas un divi izejas izvadi un attēlojot šādu paspīrinātāju kā funkcionālu bloku to sauc par četrpolu. Bet tranzistoriem ir tikai trīs izvadi. Tāpēc, ja tranzistoru izmanto par pastiprinātāju, tad viens no tā elektrodiem kalpo gan kā ieejas, gan izejas izvads. Līdz ar to tranzistorus var izmantot trīs dažādos slēgumos - kopemitera, kopbāzes un kopkolektora (3.14. att.).



3.14. att. Tranzistoru slēgumu shēmas

Šos trīs slēgumus sauc par tranzistora pamatslēgumiem. Elektrodu līdzspriegumus mēra attiecībā pret kopējo elektrodu un apzīmē ar diviem indeksiem, pie tam otrais indekss vienmēr ir kopīgais elektrods.

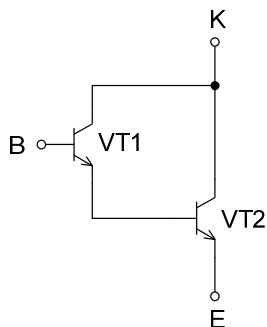
Kopemitera slēgumam (3.14. att. a) ir maza ieejas pretestība un liels pastiprinājuma koeficients. Kopemitera slēgumu parasti izmanto par standarta slēgumu zemfrekvences un augstfrekvences pastiprinātājos, jo tam ir liels sprieguma, strāvas un līdz ar to arī jaudas pastiprinājums.

Kopkolektora slēgumam (3.14. att. b) ir liela omiskā ieejas pretestība un zema omiskā izejas pretestība, bet sprieguma pastiprinājums ir mazāks par vienu. Kopkolektora slēgumu izmanto zemfrekvences režīmā, lai pastiprinātāja ieeju salāgotu ar signāla avota izejas pretestību. Tādēļ tas piemērots kā ieejas slēgums daudzpakāpju pastiprinātāju shēmās un lielas jaudas sprieguma stabilizatoros, jo tas tikai nedaudz noslogo ieejas signāla avotu. Kopkolektora slēgumu sauc arī par emitera atkārtotāju.

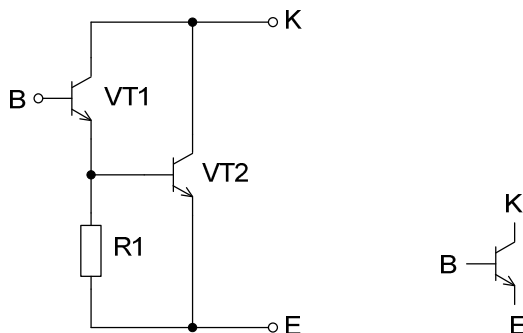
Kopbāzes slēgumu (3.14. att. c) izmanto gandrīz vienīgi augstas un superaugstas frekvences shēmās. Kopbāzes slēgumam strāvas pastiprinājuma koeficients ir mazāks par vienu. Slēguma galvenā priekšrocība ir tā, ka tam ir vismazākā pārejas kapacitāte. Tādēļ tos vēl izmanto kā atsaistošos elementus augstfrekvences pastiprinātājos un frekvenču pārveidotājos.

Darlingtona shēma. Lielākas jaudas tranzistoriem ir mazs strāvas pastiprinājuma koeficients β . Lai palielinātu tranzistora strāvas pastiprinājuma koeficientu, izmanto speciālu tranzistoru slēgumu, kuru sauc par Darlingtona slēguma shēmu (3.15. att.). Šajā slēgumā izmantoti divi speciāli savienoti tranzistori VT1 un VT2, kuru kolektori savstarpēji savienoti. Tā kā tranzistora VT1 emitters savienots tieši ar tranzistora VT2 bāzi, tad šā slēguma kopējais pastiprinājuma koeficients β ir vienāds ar abu tranzistoru pastiprinājuma koeficientu β_1 un β_2 reizinājumu.

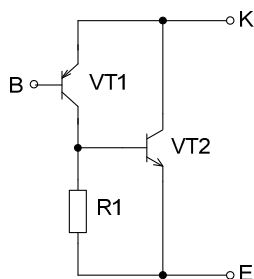
Darlingtona slēguma shēmu (3.16. att.) un komplementāro Darlingtona slēguma shēmu (3.17. att.) ražo rūpnieciski. Abu slēguma shēmas un to grafiskie apzīmējumi parādīti 3.15. attēlā. Lai stabilizētu tranzistoru darbību temperatūras diapazonā, slēgumā ievietots rezistors R1. Tas nedaudz samazina slēguma kopējo pastiprinājuma koeficientu.



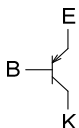
3.15. att. Tranzistoru savienojums Darlingtona slēguma shēmā



3.16. att. Darlingtona slēguma shēma un tās grafiskais apzīmējums shēmās



3.17. att. Komplementārā Darlingtona slēguma shēma un tās grafiskais apzīmējums shēmās



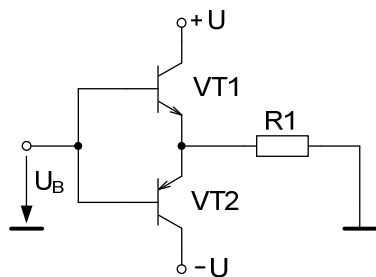
Komplementārā Darlingtona slēguma funkciju nosaka tranzistors $VT1$.

Darlingtona slēgumā saslēgtus tranzistorus kopā ar vienu vai diviem bāze-emitera šuntējošiem rezistoriem ražo rūpnieciski (2N6035, 2N6038, TIP132, TIP137, 2T825, KT827).

Darlingtona slēguma shēmas lieto jaudas pastiprinātāju izejas pakāpēs. Slēguma trūkums ir tas, ka sprieguma kritums uz tā ir par 0,7 . . . 1,0 V lielāks kā uz viena atvērta tranzistora.

Komplementārais emitera atkārtotājs. Lielas jaudas pastiprinātāju

un operacionālo pastiprinātāju izejas pakāpei izmanto speciālu tranzistoru slēgumu, kuru sauc par komplementāru emitera atkārtotāju. Šāda pastiprināšanas pakāpe parādīta 3.18. attēlā. Tajā izmantoti divi tranzistori $VT1$ un $VT2$, no kuriem pirmais ir $n-p-n$ tipa, bet otrais - $p-n-p$. Abu tranzistoru bāzes savienotas kopā un veido pastiprinātājpakāpes ieeju. Apvienoti arī abu tranzistoru emiteri un veido pakāpes izeju. Izejā tiek ieslēgts slodzes rezistors $R1$, kura pretestība ir ļoti maza. Tā pretestības lielumam ir jābūt tādā, lai sprieguma kritums uz tā būtu nedaudz mazāks par bāzes spriegumu U_B . Tas nepieciešams, lai nodrošinātu pastiprinātājpakāpes darbību.



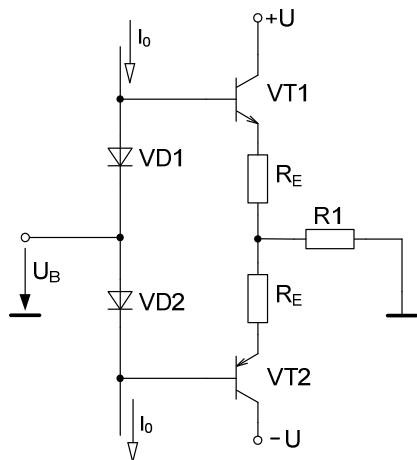
3.18. att. Komplementārā emitera atkārtotāja shēma

Ja bāzes spriegums $U_B > 0$, tad strāva plūst caur tranzistora $VT1$ bāzi un atver tā kolektors - emitera pāreju. Līdz ar to tā bāzes un kolektora strāvas tālāk plūst caur slodzes rezistoru $R1$.

Bet, ja bāzes spriegums $U_B < 0$, tad strāva plūst caur tranzistora $VT2$ bāzi un atver tā kolektors - emitera pāreju. Arī šajā gadījumā tranzistora $VT2$ bāzes un kolektora strāva plūst caur rezistoru $R1$, tikai pretējā virzienā.

Tā kā komplementārajam emitera atkārtotājam tranzistoriem ir jābūt ar vienādiem parametriem tad abos, augstāk apskatītajos gadījumos, pakāpes strāvas pastiprinājums ir vienāds dotā tranzistora pastiprinājuma koeficientu β .

Jāatzīmē, ka apskatītajam slēgumam ieejā ir izteikta nejutības zona, ko izraisa



3.19. att. Kompensēta komplementārā emitera atkārtotāja shēma

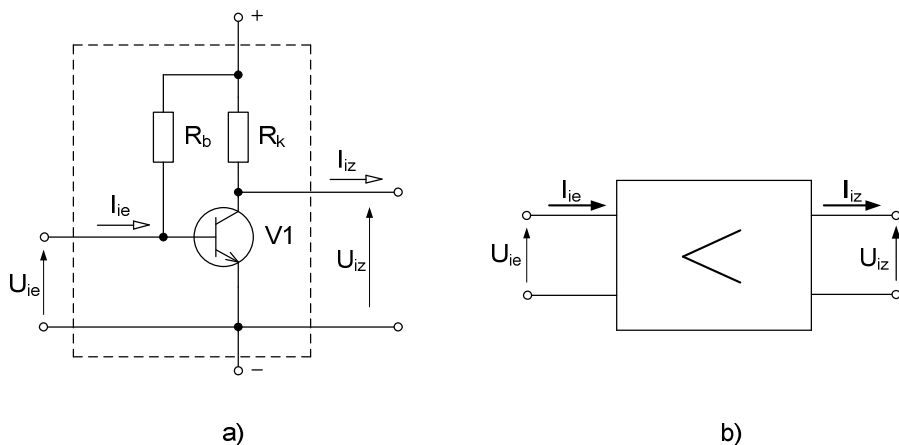
pārejas bāze – emitera sprieguma kritums – aptuveni 0,7 V. Lai novērst šo trūkumu, pakāpes vadības ķēdē ieslēdz nejutības zonu kompensējošu spriegumu 0,7 V.

Lai novērstu augstāk minēto trūkumu, ir izveidota shēma – kompensēts komplementārais emitera atkārtotājs (3.19. att.). Tajā abu tranzistoru bāzes ķēdēs ieslēgtas diodes $VD1$ un $VD2$, kuru sprotslāni atverošais spriegums ir 0,7 V, kompensē bāze – emitera pāreju spriegumus.

Papildus, lai novērstu diožu sprieguma krituma ietekmi uz ieejas spriegumu, emiteru ķēdēs ir ieslēgti rezistori R_E ar nelielu pretestību.

3.2.3. Par četrpoliem

Elektrisko signālu pastiprināšanai izmanto speciālas ierīces, kuras sauc par pastiprinātājiem. Kā piemēru apskatīsim tranzistora pastiprinātāju (3.20. att. a), kuram ir divi ieejas, divi izejas un divi barošanas izvadi. Ja neņem vērā barošanas izvadus, tad šo pastiprinātāju var uzskatīt par četrpolu, kuru grafiski attēlo kā četrstūri ar četriem izvadiem (3.20. att. b) un tā analīzei parasti izmanto četrpolu teoriju. Četrpola ieejas spailēm pievada pastiprināmo signālu, bet izejas spailēm pieslēdz slodzi. Četrpolu teorijā tā ieejā plūstošo strāvu un spriegumu apzīmē ar indeksu 1 (U_1, I_1) bet izejā – ar 2 (U_2, I_2).



3.20. att. Tranzistora pastiprinātāja shēma un četrpola grafiskais apzīmējums

Dotos lielumus pieņemot par argumentiem un apzīmējot tos ar x , bet meklējamajos lielumus pieņemot par funkcijām un apzīmējot ar y , varam vispārīgā veidā uzrakstīt sakarību

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \varphi(x_1, x_2), \\ y_2 &= f(x_1, x_2), \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Ja argumentu x_1 un x_2 vērtības iegūst nelielas izmaiņas Δx_1 un Δx_2 tad funkciju pieaugumus Δy_1 un Δy_2 var atrast izmantojot Teilora rindu. Atmetot otrās un augstāku pakāpju locekļus kā ļoti mazus, iegūstam vienādojumus, kas izsaka funkcijas φ un f

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_1 &\approx \frac{\partial y_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y_1}{\partial x_2} \Delta x_2, \\ \Delta y_2 &\approx \frac{\partial y_2}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y_2}{\partial x_2} \Delta x_2, \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Par neatkarīgajiem mainīgajiem lielumiem (x_1 un x_2) var pieņemt jebkuru no četriem četrpola parametriem. Līdz ar to izraudzītajai parametru grupai iespējami seši vienādojumu pāri:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \varphi_1(I_1, I_2), \\ U_2 &= f_1(I_1, I_2); \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \varphi_2(U_1, U_2), \\ I_2 &= f_2(U_1, U_2); \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \varphi_3(U_2, I_1), \\ I_2 &= f_3(U_2, I_1); \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= \varphi_4(U_1, I_2), \\ I_1 &= f_4(U_1, I_2); \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \varphi_5(U_2, I_2), \\ I_1 &= f_5(U_2, I_2); \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= \varphi_6(U_1, I_1), \\ I_2 &= f_6(U_1, I_1). \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Izmantojot izteiksmi (2) nosaka funkcijas φ un f

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_1 &\approx \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial U_1}{\partial I_2} \Delta I_2, \\ \Delta U_2 &\approx \frac{\partial U_2}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial U_2}{\partial I_2} \Delta I_2, \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

Parciālie atvasinājumi ir lineāru sistēmu vienādojumu koeficienti. Izvēloties koeficientiem attiecīgus apzīmējumus, var uzrakstīt sešus četrpola vienādojumu pārus:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_1 &= z_{11}\Delta I_1 + z_{12}\Delta I_2, \\ \Delta U_2 &= z_{21}\Delta I_1 + z_{22}\Delta I_2; \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_1 &= y_{11}\Delta U_1 + y_{12}\Delta U_2, \\ \Delta I_2 &= y_{21}\Delta U_1 + y_{22}\Delta U_2; \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_1 &= h_{11}\Delta I_1 + h_{12}\Delta U_2, \\ \Delta I_2 &= h_{21}\Delta I_1 + h_{22}\Delta U_2; \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_1 &= g_{11}\Delta U_1 + g_{12}\Delta I_2, \\ \Delta U_2 &= g_{21}\Delta U_1 + g_{22}\Delta I_2; \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_1 &= a_{11}\Delta U_2 + a_{12}\Delta I_2, \\ \Delta U_2 &= g_{21}\Delta U_2 + a_{22}\Delta I_2; \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_1 &= b_{11}\Delta U_1 + b_{12}\Delta I_1, \\ \Delta I_2 &= b_{21}\Delta U_1 + b_{22}\Delta I_1. \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

Koeficienti z , y , h , g , a , b ir diferenciālie parametri, kuri raksturo četrpolu attiecīgajā darba punktā. Ar indeksiem, kas sastāv no cipariem 1 un 2 norāda uz parametra būtību. Cipars 1 apzīmē lielumu ieejā, cipars 2 lielumu izejā, indeksi 11 un 22 ieejas un izejas parametrus - sakarību starp strāvu un spriegumu, bet 12 un 21 atgriezenisko un tiešo pārvadi.

3.2.4. Tranzistoru parametri

Tranzistoriem izšķir parametrus, kas raksturo pašu tranzistoru, un tranzistora kā četrpola parametrus, kas pilnīgi raksturo tranzistoru attiecīgajā slēgumā.

Parametri, kas raksturo pašu tranzistoru galvenokārt ir robežvērtības, tādas kā maksimāli pieļaujamais līdzspriegums starp kolektoru un emiteru $U_{KE \max}$, maksimāli pieļaujamā kolektora līdzstrāva $I_{K \max}$, maksimāli pieļaujamais līdzspriegums starp

bāzi un emiteru $U_{BE \max}$, maksimāli pieļaujamā bāzes strāva $I_{B \max}$, maksimāli pieļaujamā kolektora izkliedes jauda $P_{\max}$, tranzistora pāreju maksimāli pieļaujamā $t_{\max}^{\rho}$ un statiskais strāvas pastiprinājuma koeficients kopemitera slēgumā β , bet kopbāzesslēgumā α .

Tranzistoriem, kas paredzēti impulsa iekārtām tiek uzrādīta maksimālā strāva impulsā $I_{\max \text{ imp}}$, kā arī impulsa pārslēgšanās laiks τ . Augstfrekvences tranzistoriem tiek uzrādītas maksimālā darba frekvence un pāreju kapacitātes.

Pastiprinātāju aprēķinos lieto pirmās trīs četrpolu vienādojumu sistēmas, z , y , h .

Ar parametriem z un y tiek noteikti pastiprinātāja parametri tukšgaitas un īsslēguma režīmos, bet h parametrus nosaka ja viens no argumentiem ir konstants.

Ja $U_2 = \text{const}$, tad $\Delta U_2 = 0$ un no vienādojumiem (3.16) atrodam, ka:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \bigg|_{U_2 = \text{const}} \quad (3.20)$$

kas ir četrpola diferenciālā ieejas pretestība;

$$h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \bigg|_{U_2 = \text{const}} \quad (3.21)$$

kas ir četrpola strāvas pārvades koeficients.

Ja $I_1 = \text{const}$, tad $\Delta I_1 = 0$ un no vienādojumiem (3.16) izriet, ka

$$h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \bigg|_{I_1 = \text{const}} \quad (3.22)$$

kas ir četrpola atgriezeniskās saites koeficients;

$$h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \bigg|_{I_1 = \text{const}} \quad (3.23)$$

kas ir četrpola izejas diferenciālā vadītspēja.

Tā kā tranzistors ir nelineārs elements tā voltampēru raksturlīknes ir nelineāras.

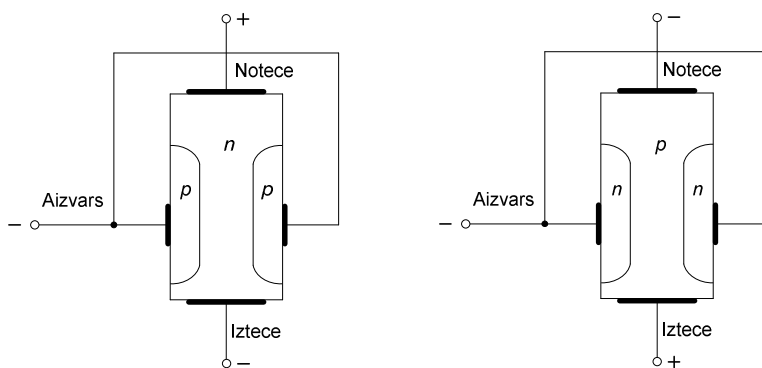
Tranzistora pastiprinātāju aprēķinos galvenokārt izmanto tranzistora ieejas un izejas raksturlīknes, kuras tiek uzrādītas ražotāju tehniskajās pasēs.

3.3. Unipolārie tranzistori

Atšķirībā no bipolārā tranzistora, kur tā darbībā piedalās abu polaritāšu lādiņnesēji, unipolārā tranzistora darbība pamatojas uz vienas polaritātes lādiņnesēju kustību. Pie unipolāriem tranzistoriem pieskaitāmi lauka tranzistori (angliski FET – field effect transistor) ar n - p pāreju, kurus sauc arī par sprostslāņa lauka tranzistoriem, lauka tranzistori ar izolētu aizvaru (MOSFET - Metal - Oxide – Semiconductor FET) un vienpārejas tranzistori, kurus sauc arī par divbāzu tranzistoriem.

3.3.1. Sprostslāņa tranzistori – lauka tranzistori

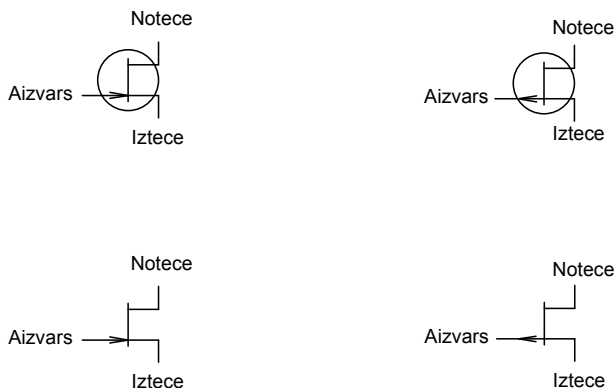
Lauka tranzistora uzbūve un darbība. Lauka tranzistoru izgatavo no vāji leģēta vai nu no n tipa vai p tipa silīcija monokristāla stienīša paralēlskalda formā un to sauc par *kanālu*. Kanāla galos atrodas barjeru nesaturošas kontakta virsmas, tā apakšējo galu sauc par *izteci*, bet augšējo par *notece*. Stienīša platākajās pretējās sānu virsmās izveidoti divi stipri leģēta p vai n tipa apgabali, kuri ir savstarpēji savienoti. Tādējādi rodas divas nesimetriskas p - n pārejas, kas atrodas viena pret otru. Kopējo izvadu sauc par *aizvaru*. Lauka tranzistora uzbūve parādīta 3.21. attēlā.



3.21. att. Silīcija lauka tranzistora uzbūve ar n un p kanālu

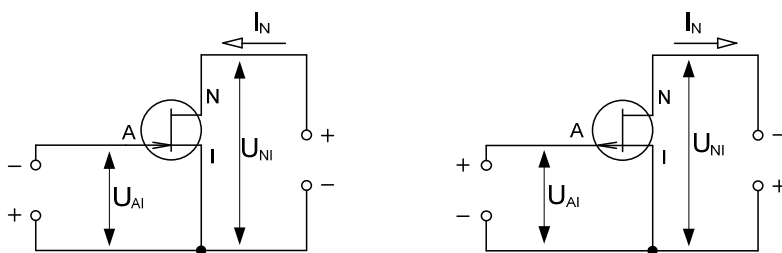
Ja pamata kristāls ir izveidots no n tipa pusvadītāja materiāla, tad runa ir par n tipa kanālu. Savukārt ja kanāls izveidots no p tipa pusvadītāja materiāla, tad runa ir par p tipa kanālu. Līdz ar to n tipa kanālā strāvas vadību nodrošina elektroni, bet p tipa kanālā caurumi.

Standartizētie abu lauka tranzistoru grafiskie apzīmējumi shēmās attēloti 3.22. attēlā, bet to pieslēgšana shēmā parādīta 3.23. attēlā. Bulta pie aizvara ievada abos gadījumos apzīmē pāreju no p slāņa uz n slāni.



3.22. att. Sproslāņa lauka tranzistora ar n un p kanālu grafiskais apzīmējums

MOSFET tranzistori galvenokārt tiek iedalīti pašsprostojošā un pašvadošā tipa tranzistoros. Pašvadošiem lauka tranzistoriem pie $U_{AI} = 0V$ kanāls ir vadīt spējīgs. Pamatojoties uz darbības veidu, tos sauc arī par zuduma tipa tranzistoriem (angl. *depletion type*). Turpretim pašsprostojošajiem tranzistoriem kanāls pie aizvara sprieguma $U_{AI} = 0V$ ir nobloķēts, un tajā nevar plūst noteces strāva I_N . Pašsprostojošie lauka tranzistori tiek saukti arī kā piesātinājuma tipa tranzistori (angl. *enhancement type*). Tā kā strāvas plūsmai nepieciešamais kanāls var būt gan no n silīcija, gan arī no p silīcija, tad MOSFET lauka tranzistoriem ir četri dažādi tipi.



3.23. att. Sproslāņa lauka tranzistora ar n un p kanālu pieslēgšana barošanas avotiem

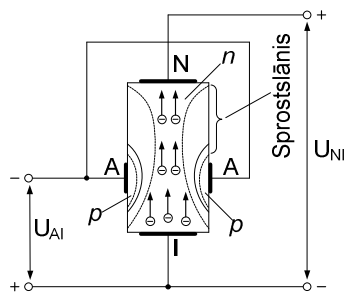
Ja pie izteces un noteces izvadiem pievieno spriegumu U_{IN} , tad caur n silīcija kristālu plūst elektronu plūsma I_N . 3.24. attēlā ir parādīts n kanāls, kur pie dotās notece – iztece sprieguma polaritātes, elektroni caur n silīcija kristālu plūst no izteces izvada uz noteces izvadu.

Ja pie aizvara izvada, atbilstoši 3.24. attēlam, pieliek negatīvu aizvars-iztece spriegumu $-U_{AI}$, abas $p-n$ pārejas tiek virzītas pretējā sproslāņa virzienā. Tādējādi n silīcijā un p silīcijā palielinās barjerzonas un līdz ar to starp šīm sprosta virzienā

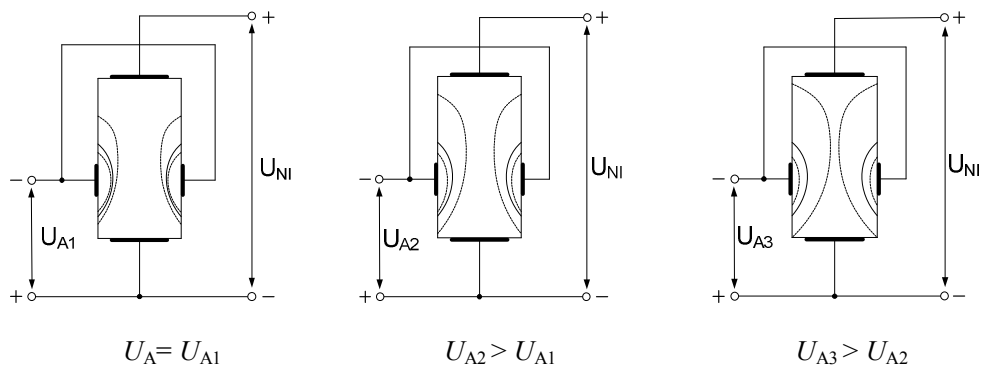
polarizētajām $p-n$ pārejām samazinās strāva, jo samazinās n kanāla strāvu vadošais šķēsgriezums (3.25. att.).

Sprostslāņa platuma izmaiņa rodas no potenciāla kanālā un pievadītā potenciāla uz aizvara izvada. Tādēļ izteces elektroda tuvumā strāvas kanāla eja ir visplatākā, bet noteces virzienā tā arvien vairāk sašaurinās.

Jo lielāks ir pievienotais negatīvais aizvars-iztece spriegums $-U_{AI}$, jo vairāk kanālā izplešas sprostslnānis, un tā rezultātā strāvu vadošais šķēsgriezums kanālā kļūst mazāks. Tātad kanāla vadošās daļas pretestība R_{IN} starp izteci un noteci n kanāla lauka tranzistoros ir atkarīga no negatīvā aizvars-iztece sprieguma $-U_{AI}$ lieluma. Sprostslāņi kanālā neizplešas vienādā formā, to var redzēt 3.24. attēlā. Noteces izvada virzienā notiek ķīļveida sašaurināšanās, jo sprieguma atšķirības starp aizvaru un noteci arvien vairāk palielinās. Tādējādi ar negatīvu aizvara spriegumu ir iespējams plašā diapazonā izmainīt strāvas kanāla pretestību. Ja U_{AI} kļūst tik liels, ka sprostslnāņi saskaras, tad kanāls tiek aizvērts, un strāvas plūsma tiek pārtraukta, rezultātā noteces strāva I_N ir vienāda ar nulli. Tā kā sprosta virzienā pieslēgtā $p-n$ pārejā plūst ļoti maza sproststrāva, tad noteces strāvas vadīšana ar $-U_{AI}$ notiek gandrīz bez jaudas patēriņa.



3.24. att. Elektrisko lādiņu plūsma n kanālā



3.25. att. Lauka tranzistora kanāla vadošās daļas atkarība no aizvaram pievadītā sprieguma U_{AI}

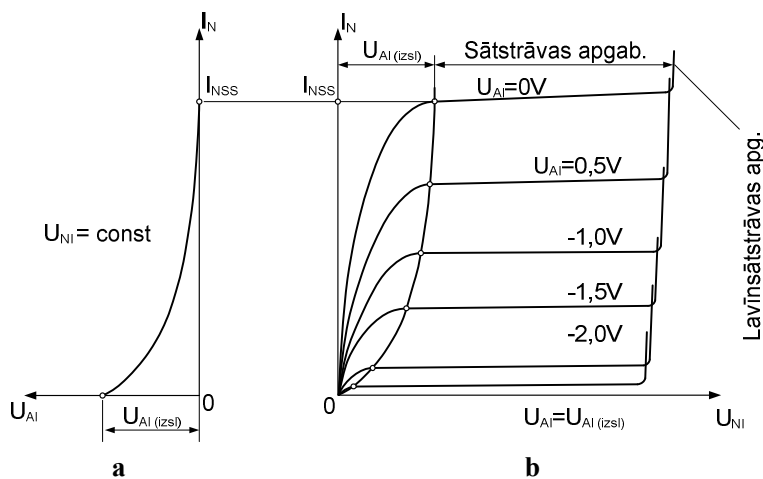
Lauka tranzistora parametri. Lauka tranzistoriem tāpat kā bipolārajiem tranzistoriem izmanto parametrus, kas nodrošina tā darbības drošumu konkrētos darba apstākļos un kurus nedrīkst pārsniegt jebkuros ekspluatācijas apstākļos, sauc par robežvērtībām vai maksimāli pieļaujamajiem parametriem.

Maksimāli pieļaujamie parametri ir:

- maksimāli pieļaujamais spriegums starp izteci un noteci - U_{INmax} ;
- maksimāli pieļaujamais spriegums starp aizvaru un izteci - U_{AImax} ;
- maksimāli pieļaujamais spriegums starp aizvaru un noteci - U_{ANmax} ;

- maksimāli pieļaujamā kanāla strāva - I_{Nmax} ;
- maksimāli pieļaujamā aizvara strāva - I_{Amax} ;
- maksimālo zudumu jauda - P_{max} ;
- maksimāli pieļaujamā darba temperatūra - t_{max}^0 .

Vēl lauka tranzistoriem tiek uzrādītas arī ieejas kapacitāte pārejai aizvars-iztece C_{AI} , atgriezeniskā kapacitāte pārejai aizvars-notece C_{AN} un izejas kapacitāte kanālam C_{NI} .



3.26. att. Lauka tranzistora pārvades raksturlīkne un izejas raksturlīkņu saime

Raksturlīknes. Lauka tranzistoru shēmu aprēķinos parasti izmanto to pārvades un izejas raksturlīknes. Lauka tranzistora pārvades raksturlīkne rāda, kā mainās tranzistora izejas strāva I_N atkarībā no ieejas sprieguma U_{AI} , ja izejas spriegums ir nemainīgs (3.26. att. a). Savukārt izejas raksturlīknes parāda, kā mainās izejas strāva I_N atkarībā no kanālam pievadītā sprieguma U_{NI} , ja aizvara spriegums ir nemainīgs $U_{AI} = const$. Parasti tiek dotas izejas raksturlīknes pie vairākām nemainīgām aizvara sprieguma vērtībām, bet sauc tās par izejas raksturlīkņu saimi (3.26. att. b).

3.3.2. Lauktranzistori ar izolētu aizvaru

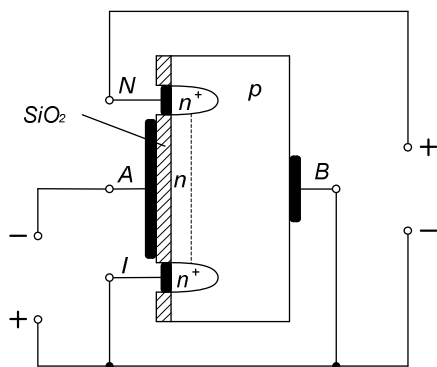
Uzbūve un darbības veids. Lauka tranzistoru ar izolētu aizvaru pieņemts saukt par MOSFET (Metal - Oxide - Semiconductor FET) tranzistoru. Šos tranzistorus izgatavo ar n tipa kanālu un ar p tipa kanālu. MOSFET tranzistoru ar iebūvētu n tipa kanālu izgatavo, ņemot vāji leģētu p tipa silīcija plāksnīti, ko sauc par substrātu. Šai plāksnītei ar jonu implantācijas vai difūzijas paņēmieni izveido divus stipri leģētus n^+ apgabalus. Šie apgabali veido izteci I un noteci N . Starp izteci un noteci izveido ļoti plānu vāji leģētu n tipa kārtiņu. Tad silīcija plāksnītes virsmai uzklāj dielektriķi -

silīcija dioksīda (SiO_2) kārtiņu, uz kuras uzklāj metāla kārtiņu, kas kalpos par aizvaru *A*. Tad metāla kārtiņai un silīcija dioksīdam izkodina divus caurumus izteces un noteces izvadiem (3.27. att.). Izgatavo arī lauka tranzistorus, kuriem SiO_2 vietā ievieto citu dielektriķi.

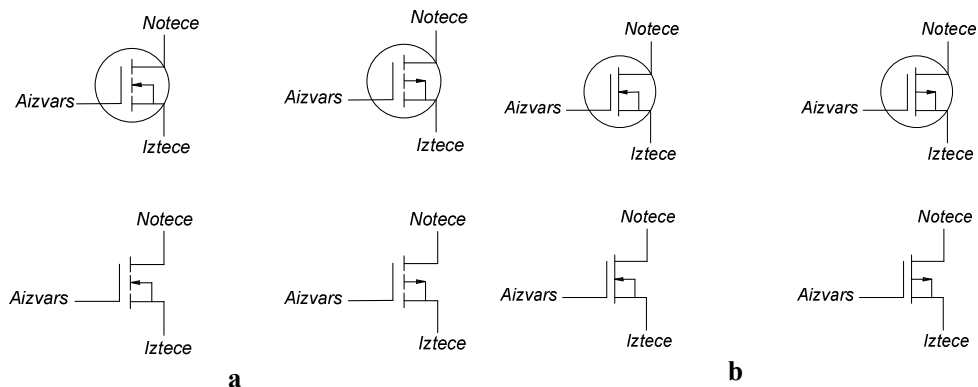
MOSFET lauka tranzistoru izvadiem izmanto tos pašus apzīmējumus, ko sprostsļāņa tranzistoriem, proti - iztece (*I*), notece (*N*) un aizvars (*A*). Tomēr šiem tranzistoriem ir vēl viens izvads, ko mēdz apzīmēt kā substrāta izvadu (*B*). Šis substrāts (masa) kopā ar kanāla pusvadītāja materiālu veido p-n pāreju, kas var kalpot kā otrais vadības elektrods. Tādā gadījumā tas, tāpat kā pārējie elektrodi, atrodas ārpus korpusa. Tomēr virknei tranzistoru modeļu šis izvads atrodas korpusā un ir tieši savienots ar izteces izvadu.

Shēmās lietotie grafiskie simboli pašvadošam MOSFET lauka tranzistoram ar *n* kanālu un *p* kanālu redzami 3.28. attēlā.

Tranzistoram ar *n* kanālu bultiņa norāda uz kanāla līniju, bet ar *p* kanālu bultiņa ir virzienā prom no kanāla līnijas. Atkarībā no lauka tranzistora izgatavošanas tehnoloģijas tos iedala tranzistoros ar inducētu kanālu, kuru kanāls attēlots ar pārtrauktu līniju (3.28. att. a) un tranzistoros ar iebūvētu kanālu, kuru kanāls attēlots nepārtrauktu līniju (3.28. att. b). Lauka tranzistorus ar nepārtraukto kanāla līniju sauc arī par pašvadošiem lauka tranzistoriem.



3.27. att. MOSFET tranzistora ar *n* kanālu uzbūve



3.28. att. MOSFET lauka tranzistoru ar inducētu kanālu grafiskie simboli

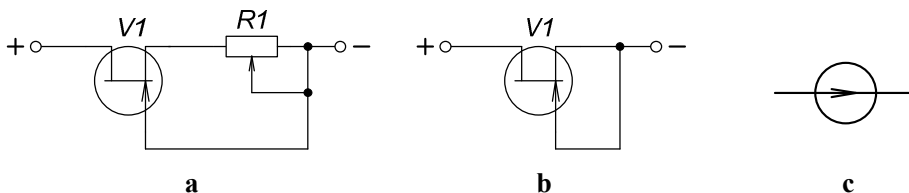
Ja aizvaram pielikts pozitīvs spriegums, tad kanāls tiek bagātināts ar elektroniem, tā vadītspēja palielinās un noteces strāva pieaug. Turpretī negatīvs aizvara spriegums kanālu tukšina, un noteces strāva samazinās.

Ja ieejā ir īsslēgums (U_{AI}), aizvara potenciāls kļūst vienāds ar izteces potenciālu un, palielinoties noteces spriegumam U_{NI} , kanālā plūstošā strāva rada kanālā sprieguma kritumu. Iztece un aizvars kļūst negatīvāki par pārēju kanāla daļu, un kanāla augšējā daļa tiek tukšināta – iestājas sātstrāva. Pārējās raksturlīknes atkarībā no ieejas sprieguma U_{AI} polaritātes pārvietojas uz augšu vai leju.

Lauka tranzistoru ekspluatācijas īpatnības. Strādājot ar MOSFET tranzistoriem, ir jāveic speciāli pasākumi attiecībā pret elektrostatiskajiem lādiņiem, kuri berzes un elektrostatiskās indukcijas dēļ rodas uz strādājošo rokām, instrumentiem, galdiem un citur. Tā kā MOSFET tranzistoru ieejas pretestība ir ļoti liela, tad lādiņi nevar noplūst no aizvara un tāpēc tie uzlādē ieejas kapacitāti C_{AI} līdz tik lieliem spriegumiem, ka tiek caursista ļoti plānā SiO_2 kārtiņa, un tranzistors iziet no ierindas. Lai tas nenotiktu, ir jāveic šādi pasākumi. Tranzistora korpusa izvadu pievieno elektriskajai shēmai vispirms, bet atvieno - pēdējo. Lodēšanas laikā starp tranzistora izvadiem izveido īsslēgumu, kuru likvidē tikai pirms barošanas sprieguma pieslēgšanas. Lai nerastos statiskie lādiņi, nepieciešams izvairīties no dažādu sintētisko materiālu klātbūtnes, piemēram, strādājošiem jāvalkā kokvilnas vai vilnas apģērbs un virsvalks, galdu, krēslu un grīdu virsmas pārklāj ar vadošu kārtiņu vai materiālu un šo virsmu sazēmē. Tāpat jāsaņem zemsprieguma lodāmura uzgalis, visi darba rīki un aparātu korpusi, kā arī strādājošiem jāvalkā sazēmētas rokassprādes.

3.3.3. Strāvu stabilizējošās diodes

Lauka tranzistorus ar $p-n$ pārēju un iebūvētu kanālu izmanto arī kā strāvas stabilizatoru. Lai izveidotu strāvas stabilizatoru, lauka tranzistora izteces ķēdē ieslēdz maināmu rezistoru un aizvaru savieno ar izteces barošanas spaili (3.29. att. a). Grafiskais attēls, kuru lieto zīmējot shēmas dots 3.29. attēlā c.



3.29. att. Regulējams strāvas stabilizators (a), strāvu stabilizējošās diodes iekšējā shēma (b) un strāvu stabilizējošās diodes grafiskais simbols

Ražo arī speciālas strāvu stabilizējošās diodes, kurām ir tikai divi izvadi, kas būtībā ir lauka tranzistors ar $p-n$ pārēju un kuram aizvars tieši savienots ar izteci (3.23. att. b). Šādas diodes grafiskais simbols parādīts 3.29. attēlā c.

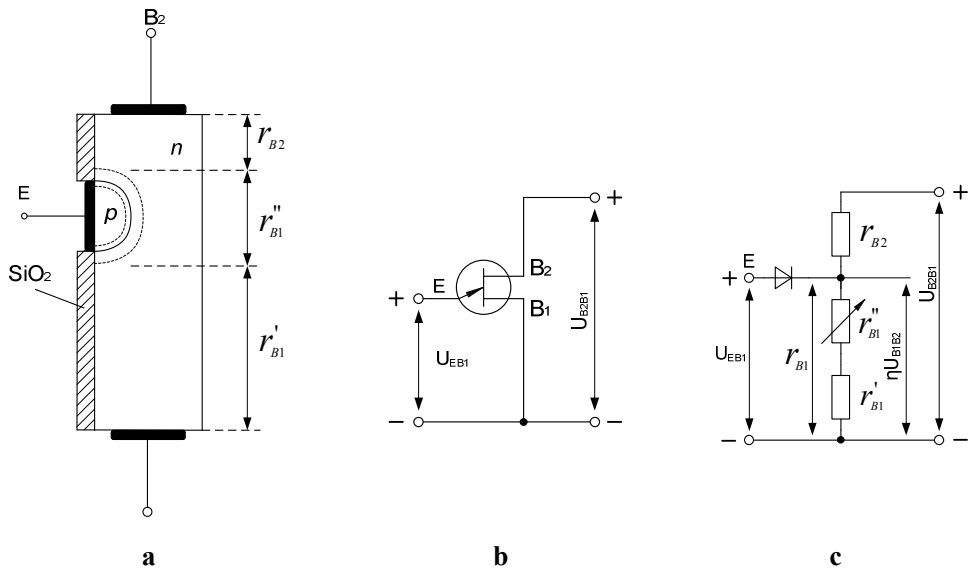
Strāvu stabilizējošo diožu galvenie parametri:

- I_p - stabilizācijas strāva pie sprieguma 10 V (0,1 ... 15 mA);
- U_T - strāvu stabilizējošās diodes maksimālais darba spriegums (50 ... 100 V);
- U_L - minimālais diodes spriegums pie slodzes strāvas $I_L = 0,8 I_p$ (1 ... 10 V);

Z_T - minimālā dinamiskā impedances pie $U_T = 25 \text{ V}$ (0,235 . . . 25 M Ω);
 Z_K - minimālā dinamiskā impedances pie $U_K = 6 \text{ V}$ (0,012 . . . 2,75 M Ω).

3.3.4. Vienpārejas tranzistori

Vienpārejas tranzistors, saukts arī par divbāzu tranzistoru, sastāv no vāji leģēta silīcija monokristāla plāksnītes, kuras gali veido divas bāzes B_1 un B_2 . Bāzei B_2 tuvākajā plāksnītes galā ar planāro tehnoloģiju izveido stipri leģētu emiteru E (3.30. att. a). Vienpārejas tranzistora starpbāzu pretestība r_{B1B2} tiek mērīta, kad emitters atvienots. Lai starpbāzu pretestībā izkļiedētos pēc iespējas mazāka jauda, tai jābūt augstomīgai. Emitera pāreja sadala starpbāzu pretestību divās daļās (3.30. att. c). Pirmās bāzes pretestība r_{B1} ir kristāla pretestība starp bāzi B_1 un emiteru E . Pieņemam, ka tā sastāv no nemainīgās daļas r'_{B1} un mainīgās r''_{B1} , kuras lielums atkarīgs no ieejas sprieguma U_{EB1} . Otrās bāzes pretestība r_{B2} ir kristāla pretestība starp B_2 un emiteru E .



3.30 att. Vienpārejas tranzistora: a) uzbūve, b) grafiskais attēls un c) vienkāršota ekvivalentā shēma

Starp abām bāzēm pieslēdz starpbāzu spriegumu U_{B1B2} , kas tranzistoros ar p tipa emiteru attiecībā pret kopējo izvadu ir pozitīvs, bet tranzistoros ar n tipa emiteru – negatīvs. Tranzistoram cauri plūstošā strāva sadala starpbāzu spriegumu U_{B1B2} divās daļās proporcionāli kristāla pretestībām r_{B1} un r_{B2} .

Sprieguma kritums pretestībā r_{B1} ir η -tā daļa no starpbāzu sprieguma, un to aprēķina pēc sprieguma dalītāja formulas

$$\eta U_{B_1 B_2} = \frac{r_{B_1}}{r_{B_1} + r_{B_2}} U_{B_1 B_2} \quad (3.24)$$

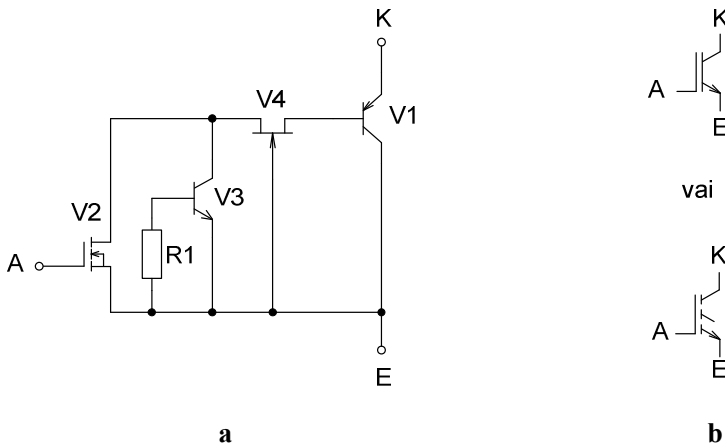
kur $\eta < 1$.

Strāvas virzienu emitera izvadā un p - n pārejā nosaka ieejas sprieguma U_{EB_1} un sprieguma $\eta U_{B_1 B_2}$ attiecība. Ja $U_{EB_1} < \eta U_{B_1 B_2}$, tad p - n pārejā plūst sproststrāva. Ja $U_{EB_1} > \eta U_{B_1 B_2}$ tad pārejā plūst caurlaides strāva un no emitera E un bāzi B_1 difundē caurumi, kas samazina pretestību r_{B_1}'' . Tā kā bāzes pretestība r_{B_1}'' samazināšanās ir straujāka par emitera strāvas pieaugumu, tad ieejas spriegums U_{EB_1} samazinās un ieejas voltampēru raksturlīknē parādās posms ar negatīvu dinamisko pretestību.

3.3.5. Izolētas bāzes bipolārais tranzistors

Jaunākais tranzistoru realizācijas veids ir izolētas bāzes bipolārais tranzistors, kurā apvienots p - n - p bipolārais tranzistors un tā bāzes ķēdi veidojošs MOSFET tranzistors. Līdz ar to bipolārā tranzistora bāzes ķēde galvaniski ir atsaistīta no vadības signāla ķēdes, un tādēļ šādu tranzistoru sauc par bipolāru tranzistoru ar izolētu bāzi IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Tranzistora uzbūve un grafiskais apzīmējums parādīti 3.31. attēlā, bet izejas raksturlīknes – 3.32. attēlā.

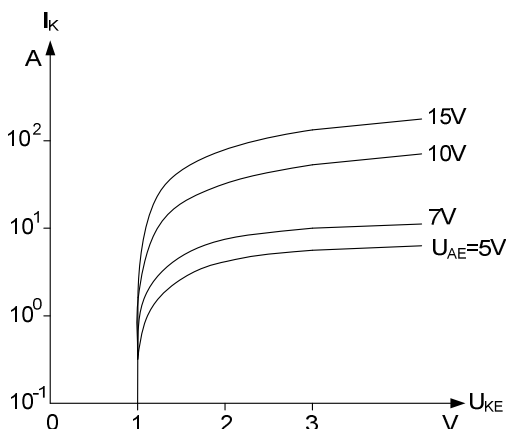
Kā redzams 3.31. attēlā a, izolētas bāzes bipolārā tranzistora izejā tiek izmantots bipolārais tranzistors p - n - p tipa, taču attēlā b grafiskajā apzīmējumā bipolārais tranzistors tiek zīmēts kā n - p - n tipa, jo to var ieslēgt, padodot uz vadības elektrodu A pozitīvas polaritātes spriegumu attiecībā pret izejas izvadu E , līdzīgi kā n - p - n bipolāro tranzistoru.



3.31. att. Izolētas bāzes bipolāra tranzistora uzbūve un grafiskais apzīmējums

Izolētas bāzes bipolāra tranzistori paredzēti izmantošanai lielu strāvu iekārtās – impulsu iekārtās un galvenokārt invertoros, līdzstrāvas pārveidošanai maiņstrāvā. Šo tranzistoru galvenās priekšrocības ir:

- tranzistoram atrodies pilnīgi atvērtā stāvoklī mazs sprieguma kritums kolektors – emitters ķēdē;
- ļoti liela jutība, jo caur MOSFET tranzistora aizvaru neplūst strāva, bet tas nozīmē, ka vadību praktiski realizē tikai ar potenciālu;
- ļoti ātrdarbīgs.



3.32. att. Izolētas bāzes bipolāra tranzistora raksturlīknes

Izolētas bāzes bipolāro tranzistoru galvenie parametri:

U_{CEMAX} - maksimālais spriegums starp kolektoru un emiteri (120 ... 1400 V);

I_C , I_{CMAX} - maksimālā kolektora strāva (6 ... 1200 A);

I_{CM} - maksimālā kolektora impulsa strāva (52 ... 3200 A);

U_{CES} - piesātinājuma spriegums starp kolektoru un emiteri (1,25 ... 4,0 V);

U_{GE} - maksimālais spriegums starp aizvaru un emiteri (± 20 ... ± 30 V);

U_{GET} - sliekšņa spriegums starp aizvaru un emiteri (2,5 ... 6 V);

C_{ISS} - ieejas kapacitāte, pie dotā U_{CE} , U_{GE} (100 ... 20 000 pF);

$R_{\theta JC}$ - siltumpretestība starp p-n pāreju un korpusu (0,008 ... 2 °C/W).

Pie parametru simboliem lietotie indeksi atbilst tranzistoru izgatavotāju instrukcijās lietotajiem, kur C nozīmē kolektors, G - aizvars, E – emitters.

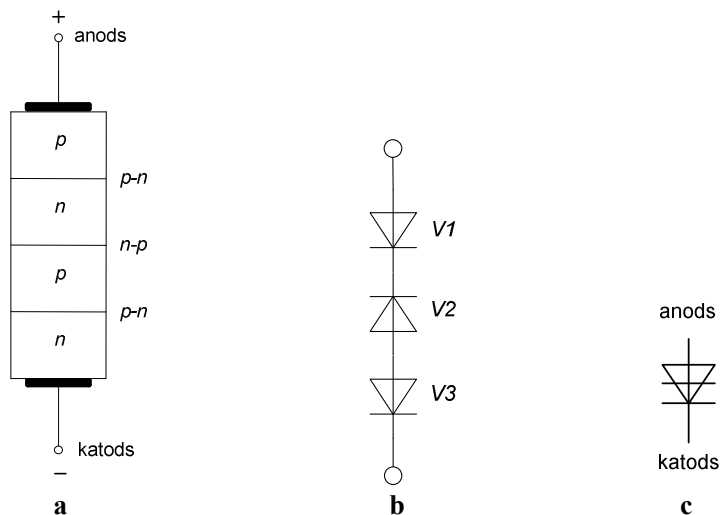
3.4. Tiristori

Vairākslāņu pusvadītāju ierīcēm, kas paredzētas elektrisko ķēžu ieslēgšanai vai izslēgšanai, kopējs nosaukums ir tiristori. Šādām ierīcēm ir trīs vai vairākas p-n pārejas un ātrdarbīga ieslēgšanās vai pārslēgšanās. Pāreju no aizvērtā stāvokļa uz atvērtu sauc par tiristora ieslēgšanos, bet no atvērtā uz aizvērtu stāvokli - par izslēgšanos. Vairākslāņu pusvadītāju ierīces ir dinistori, simetriskie dinistori, tiristori un simistori.

3.4.1. Dinistori

Par dinistoru sauc tiristoru ar diviem izvadiem. To veido no silīcija kristāla ar četriem slāņiem, kur katram slānim ir atšķirīga leģētības pakāpe. Starp slāņiem

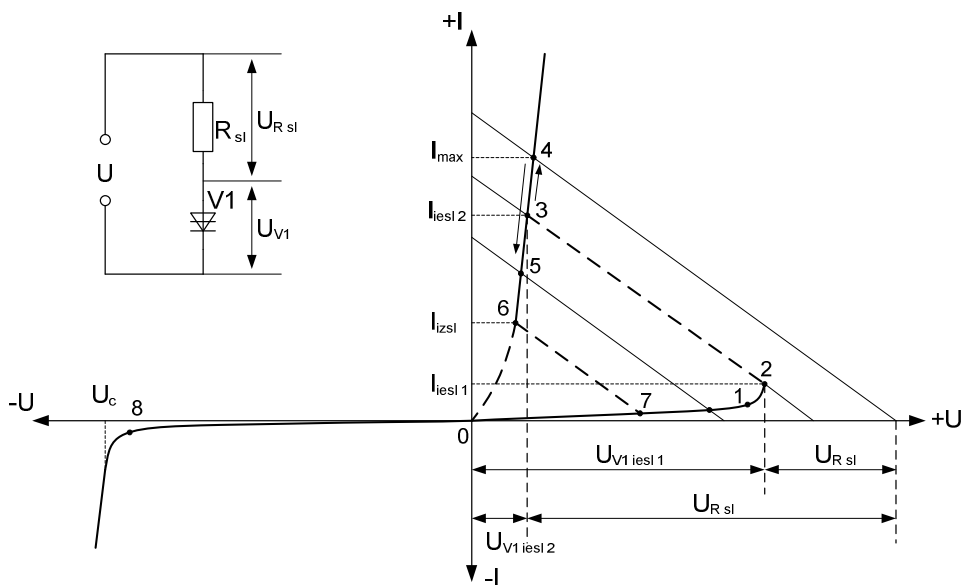
veidojas trīs nesimetriskas p - n pārejas. Dinistora uzbūve, ekvivalentā shēma un tā grafiskais apzīmējums shēmās parādīti 3.33. attēlā.



3.33. att. **Dinistora uzbūve, ekvivalentā shēma un tā grafiskais apzīmējums**

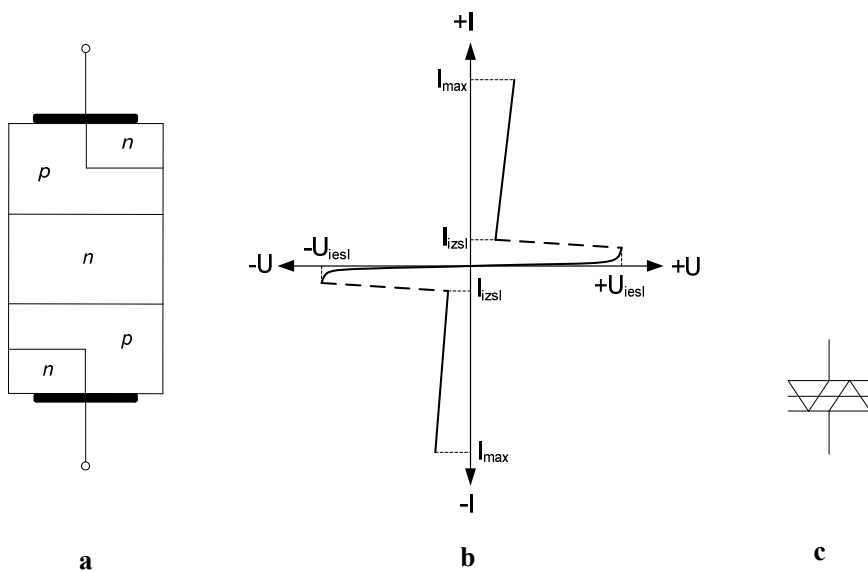
Pieslēdzot dinistora anodam pozitīvu spriegumu un katodam negatīvu spriegumu, augšējā pāreja p - n ieslēgta caurlaides virzienā, vidējā n - p - sprosta virzienā, bet apakšējā p - n - caurlaides virzienā. Ja dinistora anodam pieslēdz negatīvu spriegumu un katodam - pozitīvu, tad abas p - n pārejas ir ieslēgtas sprosta virzienā, bet vidējā pāreja n - p vadāmības virzienā.

Dinistora voltampēru raksturlīkne un tās uzņemšanas shēma parādīta 3.34. attēlā. Mainot avota spriegumu U , mainās strāva un spriegumi uz shēmas elementiem R_{sl} un $V1$. Tā kā slodzes rezistorā un dinistorā plūst viena un tā pati strāva, tad dinistora voltampēru raksturlīknei un slodzes taisnei jābūt kopīgam darba punktam, kurš pārvietojas pa dinistora voltampēru raksturlīkni reizē ar slodzes līniju. Spriegumam U palielinoties, slodzes līnija attālinās no koordinātu sākuma punkta 0 un darba punkts pārvietojas sekojoši: 0-1-2 un tad lēcienveidīgi uz 3-4. Spriegumam samazinoties darba punkts pārvietojas pretējā virzienā: 4-5-6 un tad notiek dinistora izslēgšanās t.i., darba punkts lēcienveidīgi pārvietojas 6-7. Turpinot samazināt spriegumu darba punkts pārvietojas 7-0. Izmainot sprieguma U polaritāti darba punkts pārvietojas pretējā virzienā 0-8, tas ir līdz pieļaujamam spriegumam sprosta virzienā. Eksploataācijas drošuma apsvērumu dēļ, tehniskajā dokumentācijā darba spriegumu dinistoriem uzrāda nedaudz mazāku par caursītes spriegumu.



3.34. att. Dinistora voltampēru raksturlikne

3.4.2. Simetriskie dinistori



3.35. att. Simetriskā dinistora voltampēru raksturlikne, uzbūve un grafiskais apzīmējums

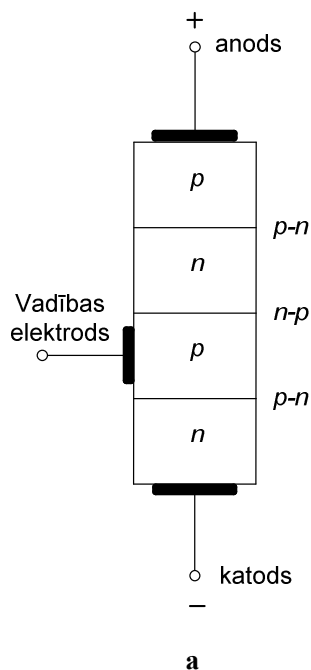
Simistora darbība atbilst divu pretēji vērstu dinistoru paralēlam slēgumam. Ar to panāk, ka simetriskais dinistors, sasniedzot ieslēgšanās spriegumus $+U_{iesl}$ un $-U_{iesl}$, ieslēdzas gan vadāmības, gan sprosta virzienā. Tātad simetriskie dinistori ieslēdzas neatkarīgi no pievadītā sprieguma polaritātes. Simetriskā dinistora uzbūve, raksturlīkne un grafiskais apzīmējums shēmās parādīti 3.35. attēlā. Grafikas I un III kvadrantā raksturlīkne ir gandrīz simetriska.

Simetriskos dinistorus izmanto simistoru vadības ķēdēs, jo tie paredzēti to ieslēgšanai. Praktiski tā ir vienīgā simetrisko dinistoru izmantošanas iespēja.

3.4.3. Trinistori

Trinistori ir elektroniski jaudas slēdži, kurus izmanto elektriskās jaudas ierīcēs un elektropiedziņas tehnikā kā elektroniskus signālu regulatorus. Tos sauc par vadāmiem ventiļiem un atkarībā no izmantošanas jomas izgatavo mazām un lielām strāvām, kā arī dažādiem spriegumiem.

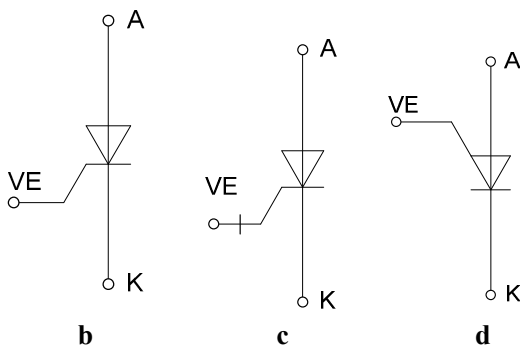
Trinistoram atšķirībā no dinistora ir trīs izvadi. Trinistora uzbūve un tā grafiskie apzīmējumi shēmās parādīti 3.36. attēlā.



Pavisam ir trīs veidu trinistori:

- no katoda puses stūrējamie (3.36. att. b);
- no anoda puses stūrējamie (3.36. att. d);
- ar vadības strāvu aizveramie (3.36. att. c).

Trešo izvadu, kurš pievienots otrajam vai trešajam slānim, sauc par vadības elektrodu (VE). No katoda puses stūrējamam trinistoram vadības elektrods pievienots pusvadītāja slānim, kas atrodas virs apakšējā slāņa.

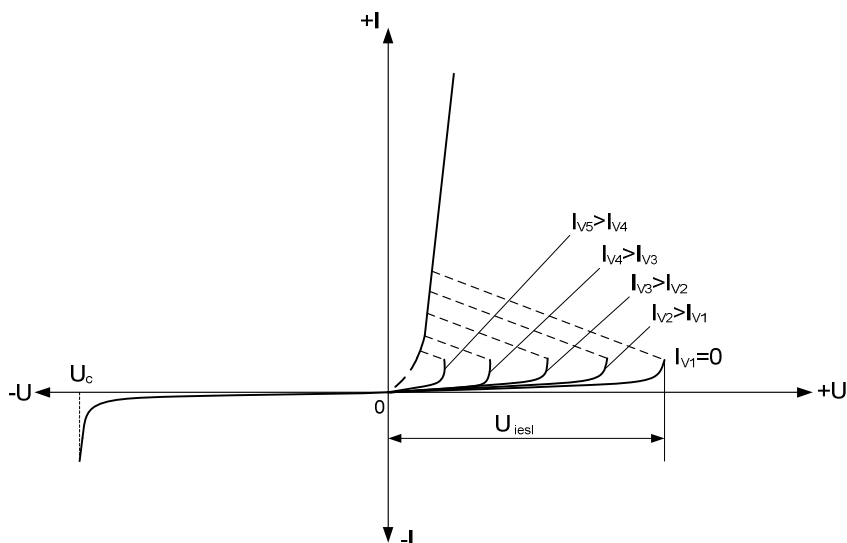


3.36. att. Trinistora uzbūve un grafiskais apzīmējums

Palielinot stūrējošā elektrodā strāvu, kas plūst caur tiristora apakšējo pāreju $p-n$, palielinās lādiņnesēju daudzums abos apakšējos pusvadītāja slāņos (3.36. att. a). Lādiņnesēju koncentrācijas palielināšanās stūrējošā elektrodā pusvadītāja slānī samazina vidējās $n-p$ pārejas sprostsplāņa platumu, kas savukārt samazina caursites

sprieguma līmeni pie kura sākas lavīnveida strāvas pieaugums trīnistorā, ko sauc par pārslēgšanās.

Trīnistora voltampēru raksturlīkņu saime parādīta 3.37. attēlā. Punktu uz trīnistora raksturlīknes, kurā sākas lavīnveida process, sauc par pārslēgšanās punktu, bet caurlaides spriegumu, pie kura notiek pārslēgšanās, sauc par pārslēgšanās spriegumu U_{iesl} . Palielinot stūrējošā elektroda strāvu, pārslēgšanās spriegums samazinās.



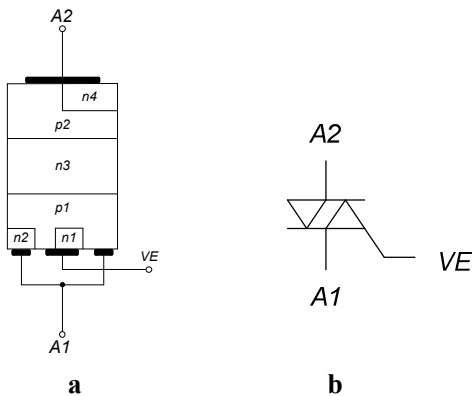
3.37. att. Trīnistora voltampēru raksturlīkne

Strāvu caur trīnistoru nevar izmainīt vai pārtraukt ar stūrējošo elektrodu. Strāvu trīnistorā var izmainīt, tikai mainot anoda spriegumu, bet izslēgt samazinot spriegumu līdz tā strāva kļūst mazāka par minimālo vērtību, kas nepieciešama trīnistora noturēšanai atvērtā stāvoklī, vai pārtraucot strāvas ķēdi.

3.4.4. Simistori

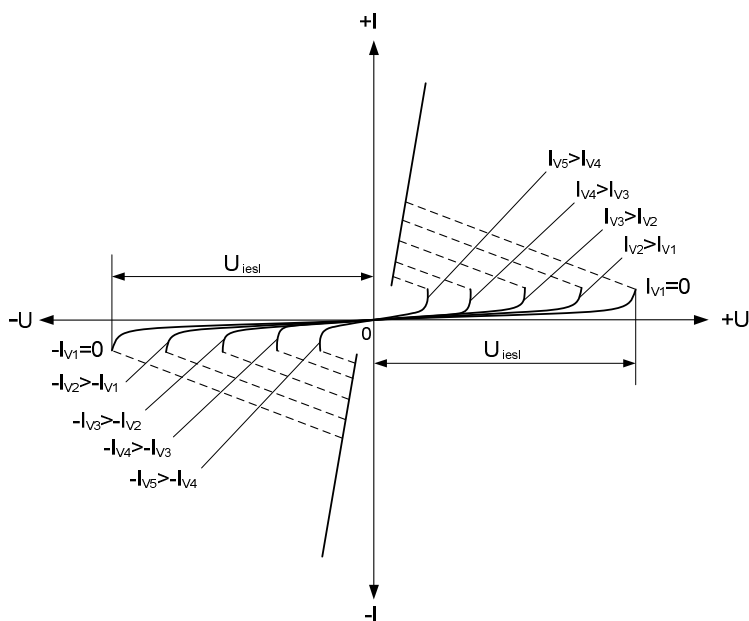
Simistorus sauc arī par triakiem un tie paredzēti darbam maiņstrāvas ķēdēs. Šis nosaukums atvasināts no apzīmējuma angļu valodā „triode alternating current switch”, kas latviski nozīmē - triode maiņstrāvas slēdzis. Simistora uzbūve un tā grafiskais apzīmējums shēmās parādīts 3.38. attēlā. Simistors darbojas kā divi pretēji vērsti trīnistori, kuri savienoti paralēli. Ja anods $A2$ ir pozitīvs attiecībā pret $A1$, tad pēc simistora ieslēgšanās strāva plūst no $A2$ caur slāņiem $p2-n3-p1-n2$ uz $A1$. Bet, ja pozitīvs ir anods $A1$ attiecībā pret $A2$, tad pēc simistora ieslēgšanās strāva plūst no $A1$ caur slāņiem $p1-n3-p2-n4$ uz $A2$. Tā kā simistoram ir tikai viens vadības elektrods, tad, lai simistoru varētu ieslēgt gan vienā, gan otrā virzienā, tā anoda $A1$ izvads

savienots ar slāņiem $n2$ un $p1$, anoda $A2$ izvads savienots ar slāņiem $n4$ un $p2$ un arī vadības elektrods ir savienots ar diviem slāņiem $n1$ un $p1$.



3.38. att. Simistora uzbūve un grafiskais apzīmējums

Voltampēru raksturlīknes parādītas 3.39. attēlā. Tā kā simistors abos virzienos darbojas vienādi, tad tā raksturlīknes izvietojas simetriski I un III kvadrantā. Tās ir vienādas tikai pretēji vērstas, pie kam pozitīvā virzienā simistora vadības strāva pozitīva, bet pretējā virzienā negatīva. Ieslēgts simistors, tāpat kā trīnīstors, izslēdzas tikai tad, ja strāva tajā samazinās zem kritiskās vērtības, pie kuras pārtraucas vidējo pusvadītāju slāņu caursīte.

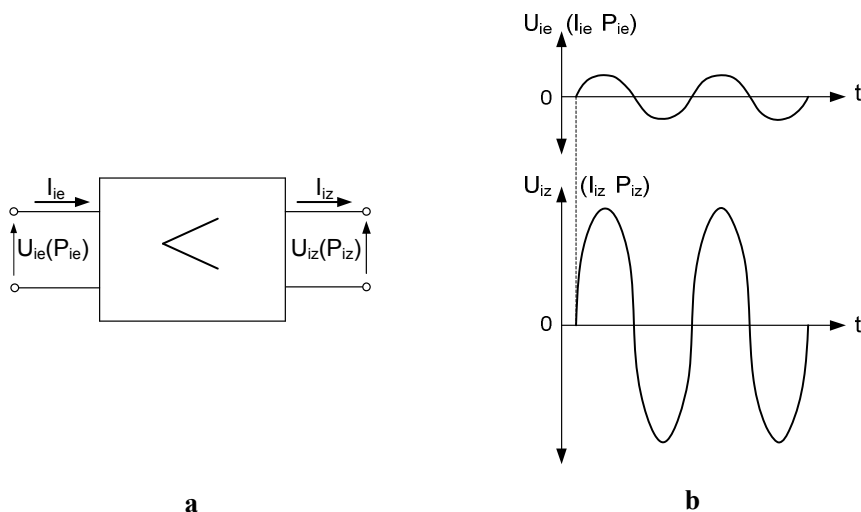


3.39. att. Simistora voltampēru raksturlīkne

4. PASTIPRINĀTĀJI

4.1. Vispārīgas ziņas

Elektriskā signāla pastiprinātājs vispārīgā gadījumā ir četrpols, bet pastiprināšanas būtība ir skaitliski lielāka parametra (sprieguma, strāvas vai jaudas) iegūšana šī četrpola izejā nekā ieejā, pie tam izejas signāla maiņa laikā atbilst ieejas signāla maiņai (4.1. att.)



4.1. att. Pastiprinātāja funkcionālā shēma un signālu oscilogrammas

Lai gan elektriskie parametri (spriegums, strāva un jauda) ir organiski saistīti kopīgā enerģētiskā procesā, tomēr atkarībā no tā, kurš no tiem ņemts par pamatparametru, pastiprinātājus iedala sprieguma, strāvas un jaudas pastiprinātājos.

Pēc pastiprināmā signāla formas pastiprinātājus iedala līdzstrāvas, maiņstrāvas, impulsa un operacionālos pastiprinātājos. Maiņstrāvas pastiprinātājus savukārt iedala zemfrekvences, platjoslas un augstfrekvences pastiprinātājos. Lai iegūtu pietiekami lielu pastiprinājumu, parasti lieto daudzpakāpju pastiprinātājus, kas var sastāvēt kā no viena tipa pakāpēm, tā arī no dažāda tipa pakāpēm. Parasti šādos daudzpakāpju pastiprinātājos ir priekšpastiprinātāja pakāpes, sprieguma vai strāvas pastiprinātāji, un jaudas pastiprināšanas pakāpes. Pastiprinātāja sprieguma pastiprinājuma koeficients ir izejas sprieguma attiecība pret ieejas spriegumu. Analogiski strāvas pastiprinājuma koeficients ir

$$K_U = \frac{U_{iz}}{U_{ie}}. \quad (4.1)$$

Analogi strāvas pastiprinājuma koeficients ir

$$K_I = \frac{I_{iz}}{I_{ie}}, \quad (4.2)$$

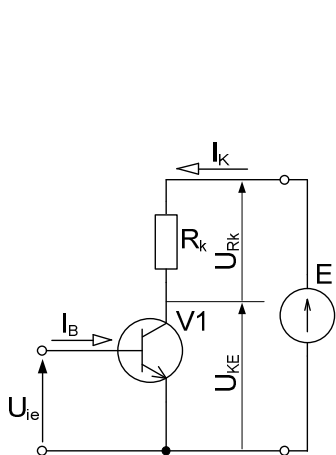
bet jaudas pastiprinājuma koeficients ir

$$K_P = \frac{P_{iz}}{P_{ie}} = \frac{U_{iz}^2 R_{iz}}{U_{ie}^2 R_{ie}}, \quad (4.3)$$

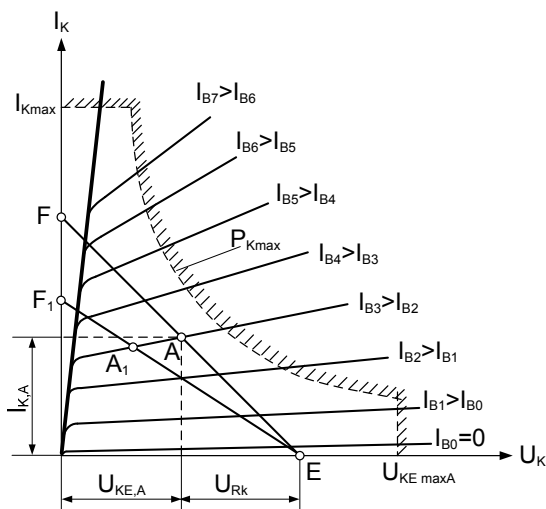
kur R_{ie} - pastiprinātāja ieejas pretestība;

R_{iz} - pastiprinātāja izejas pretestība.

4.2. Tranzistora līdzstrāvas režīms



4.2. att. Tranzistors līdzstrāvas pastiprinātājs



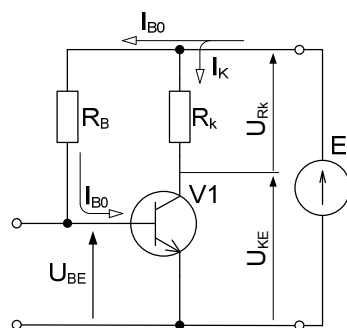
4.3. att. Līdzstrāvas pastiprinātāja raksturlīkņu saime ar slodzes taisni

Lai izveidotu pastiprinātāju, izmantojot tranzistoru, ir pareizi jāizvēlas tranzistora līdzstrāvas režīms. Režīma un parametru izvēlei izveido shēmu (4.2. att.) un tad, izmantojot tranzistora izejas raksturlīkņu saimi, nosaka nepieciešamos parametrus (4.3. att.). Vispirms atrod slodzes taisni, kas savieno punktu E ar punktu F . Punktu E atrod, pieņemot, ka tranzistors slēgts un tā iekšējā pretestība tiecas uz bezgalību ($I_K \approx 0$), bet punktu F - tranzistors ir pilnīgi atvērts un tā iekšējā pretestība tiecas uz nulli ($U_K \approx 0$). Tranzistora līdzstrāvas režīmu raksturo tā darba punkts A , kura atrašanās vietu uz slodzes taisnes nosaka barošanas avota spriegums E un rezistors R_K . Ja R_K ir nemainīgs, tad darba punkta A koordinātes nosaka bāzes strāva I_B un barošanas avota

spriegums E . Mainoties spriegumam E , slodzes līnija pārvietojas paralēli pati sev, bet darba punkts pārvietojas pa slodzes līniju uz augšu vai leju atkarībā no tā, vai bāzes strāva I_B pieaug vai samazinās. Tranzistora slodzes pretestība R_K nosaka slodzes līnijas slīpumu, piemēram, ja R_K samazina, tad slodzes taisnes augšējais gals pārvietojas uz punktu F_1 . Līdz ar to darba punkts pārvietojas uz punktu A . Tranzistora ieejas un izejas ķēžu barošanai neizdevīgi lietot divus barošanas avotus. Tādēļ parasti tranzistora barošanai izmanto vienu barošanas avotu, kas ir kopīgs kolektora un bāzes ķēdēm (4.4. att.).

Lai kopemitera slēgumā iegūtu nelielu bāzes strāvu I_{B0} , tad virknē ar bāzes izvadu slēdz bāzes rezistoru R_B .

Darba punkta vietu izejas voltampēru raksturlīknēs izvēlas tā, lai mainoties bāzes strāvai, tas nenonāktu pārāk tuvu vai nepārsniegtu tranzistora maksimāli pieļaujamos parametrus. Liela signāla pastiprinātājiem tranzistora darba punktu izvēlas tuvāk slodzes līnijas viduspunktam, bet maza signāla pastiprinātājiem tranzistora darba punktu cenšas nobīdīt pēc iespējas zemāk, lai kolektora strāva I_K būtu iespējami zemu.

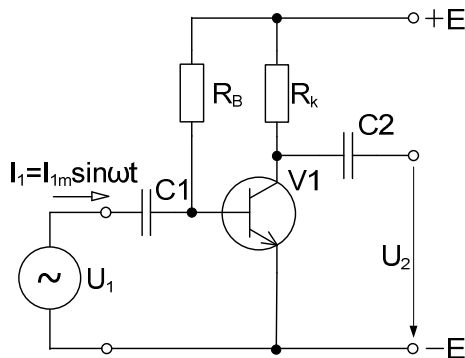


4.4. att. Darba punkta izvēle ar bāzes rezistoru

4.3. Tranzistora maiņstrāvas režīms

Visvienkāršākā maiņstrāvas pastiprinātāja shēma parādīta 4.5. attēlā. Pastiprinātājam pieslēgts sinusoidālas maiņstrāvas avots. Tranzistora ieejā plūst bāzes strāva I_{B0} pastiprināmās maiņstrāvas summārā strāva, kas 4.6. attēlā parādīta kā mainīga bāzes strāva. Mainīgā bāzes strāva tranzistora darba punktu pārvieto no punkta A uz A' , atpakaļ uz A uz A'' utt. Tā rezultātā kolektora strāva mainās no $I_{K0} - I_{K_m}$ līdz $I_{K0} + I_{K_m}$, bet kolektora spriegums no $U_{KE,0} - U_{2m}$ līdz $U_{KE,0} + U_{2m}$. Tranzistora ieejā un izejā pieslēgtie kondensatori C_1 un C_2 atsaista mainīgo līdzstrāvu no maiņstrāvas komponentes $U_1 = U_{1m} \sin \omega t$.

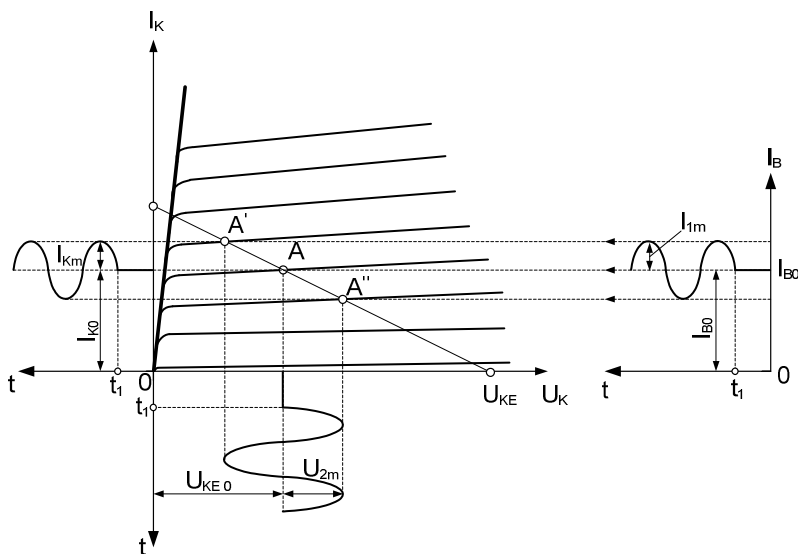
Pastiprināmās strāvas radītais ieejas spriegums U_1 sakrīt fāzē ar strāvu I_1 , bet ir pretējā fāzē ar pastiprināto maiņspriegumu U_2 , kur U_1 , I_1 un U_2 ir maiņstrāvas atbilstošās efektīvās vērtības. Lauka tranzistoru ļoti lielās ieejas pretestības dēļ to ieejai vienmēr pieslēdz sprieguma avotu ar spriegumu $U_1 = U_{1m} \sin \omega t$. Lauka tranzistoriem ar $p-n$ pāreju vai MOP tranzistoriem ar iebūvētu kanālu darba punkta iestatīšanai izmanto paņēmienus, kas parādīti 4.7. un 4.8. attēlos.



4.5. att. Maiņstrāvas pastiprinātāja shēma

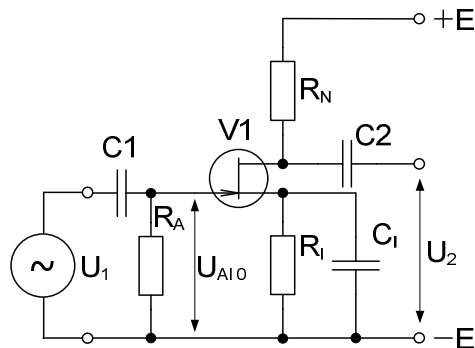
Darba punkta stāvokli nosaka automātiski aizvara priekšspriegums U_{AI0} (4.7. att. a) un tas ir vienāds ar noteces strāvas radīto sprieguma kritumu izteces rezistorā R_S

$$U_{AI} = I_N R_I. \quad (4.4)$$



4.6. att. Pastiprinātāja darbības grafiskā analīze

Šis sprieguma kritums summējas ar aizvara rezistoram R_A pievadīto ieejas spriegumu U_1 un veido pulsējošu spriegumu starp tranzistora $V1$ aizvaru un izteci.



4.7. att. Maiņstrāvas pastiprinātājs ar lauka tranzistoru

Noteces strāvas maiņstrāvas komponentei, plūstot caur izteces rezistoru R_I , tajā rodas maiņsprieguma kritums, kas attiecībā pret tranzistora ieeju ir pretējā fāzē ar ieejas maiņspriegumu, bet tas samazina pastiprinājumu. Šīs parādības novēršanai paralēli rezistoram R_I pieslēgts kondensators C_I kura kapacitātes lielumu viszemākajai pastiprināmajai maiņstrāvas frekvencei f nosaka nevienādība

$$\frac{1}{2} (2\pi f C_I) \leq 0,1 R_I.$$

Tad pulsējošās noteces strāvas I_N

līdzstrāvas komponente plūst tikai caur rezistoru R_I , bet maiņstrāvas – galvenokārt caur kondensatoru C_1 .

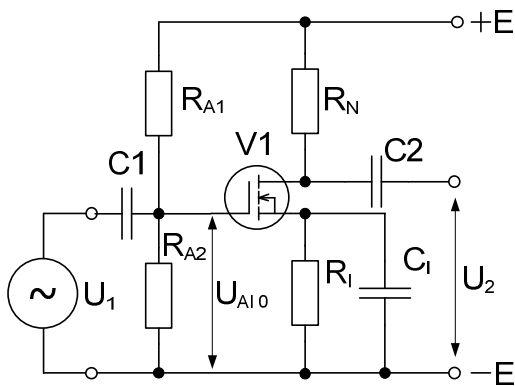
MOP lauka tranzistoriem ar inducētu kanālu aizvara spriegums vienmēr lielāks par sliekšņa spriegumu un darba punktu nosaka nevienādība

$$|U_{AI0}| \leq |U_{AI}| + |U_{Im}|. \quad (4.6)$$

Tā kā inducētajā kanālā strāva plūst tikai tad, kad aizvaram pievadīts priekšspriegums, priekšspriegumu nevar iegūt ar izteces rezistoru R_I un darba punkta iestatīšanai izmanto sprieguma dalītāju R_{A1} un R_{A2} (skat. 4.8. att.).

Ieejas un izejas kondensatori C_1 un C_2 atdala līdzstrāvas un maiņstrāvas komponentes.

Lai aizvaram paralēli pieslēgtie rezistori R_{A1} un R_{A2} būtiski nesamazinātu lauka tranzistoru lielās ieejas pretestības, tad tos izvēlas robežās $1 \dots 3 \text{ M}\Omega$.



4.8. att. **Mainstrāvas pastiprinātājs ar MOP lauktranzistoru**

4.4. Decibeli

Elektronisko pastiprinātāju jaudas, sprieguma un strāvas pastiprinājuma raksturošanai lieto specifisku, akustikā lietotu mērvienību - decibels, kuru apzīmē kā dB. Akustikā šo mērvienību lieto, lai raksturotu skaņas intensitāti, skaņas spiedienu, skaļumu, kā arī trokšņu līmeņa un skaņas kropļojumu novērtēšanai.

Decibels ir specifiska vienība ar kuras palīdzību izsaka pastiprinātāja divu jaudu P_2 un P_1 attiecības decimālogaritmu $N_{(B)}$ ko sauc par belu un apzīmē ar simbolu B . Bels ir ļoti liela vienība

$$N_{(B)} = \lg \frac{P_2}{P_1}. \quad (4.7)$$

Piemēram, ja $P_2 / P_1 = 100$, tad $\lg 100 = 2$, bet pie $P_2 / P_1 = 1000$, $\lg 1000 = 3$. Tas nozīmē, ka jebkura jaudu attiecība 100 līdz 1000 iekļausies viena belu robežās no 2B līdz 3B. Tāpēc praksē lieto desmit reizes mazāku vienību – decibelu (dB):

$$N_{(dB)} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}. \quad (4.8)$$

Tā kā vislielākā dzirdamās skaņas spiediena (sāpju sliekšņa) attiecība pret vismazāko dzirdamo skaņas spiedienu (dzirdamības sliekšni) ir $10^{13} : 1 = 10^{13}$. Šī skaitļa logaritms ir 13. Līdz ar to cilvēka auss dinamiskais diapazons ir 13 B vai 130 dB.

Skaņas jaudas palielināšanos no 1W līdz 2W auss jūt vienmēr, bet izmaiņu no 50W līdz 51W vairs nejūt. Turpretī skaņas jaudas izmaiņu par vienu decibelu auss var konstatēt pie jebkuras sākuma jaudas. Tātad var teikt, ka auss izšķiršanas spēja ir 1dB, dzirdamības sliekšnis - 0dB un sāpju sliekšnis 130dB.

Lai noteiktu kādai jaudu attiecībai atbilst viens decibels, veiksīm sekojošu aprēķinu:

$$1dB = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}; \quad \lg \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{10}; \quad \frac{P_2}{P_1} = 10^{\frac{1}{10}} = \sqrt[10]{10} \approx 1,259;$$

$$1dB = 10 \lg 1,259,$$

tātad 1dB atbilst jaudas pieaugumam 1,259 reizes, tas ir aptuveni par 26%.

Pastiprinātāja elektrisko jaudu var noteikt izmantojot izteiksmi:

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}, \quad (4.9)$$

tad, izmantojot izteiksmi (4.8), kurā ievietojam $P_2 = U_2^2/R_2$, bet $P_1 = U_1^2/R_1$ atrodam:

$$\begin{aligned} N_{(dB)} &= 10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 10 \lg \left(\frac{U_2^2}{R_2} : \frac{U_1^2}{R_1} \right) = 10 \lg \left(\frac{U_2^2}{U_1^2} \cdot \frac{R_1}{R_2} \right) = \\ &= 10 \lg \frac{U_2}{U_1} + 10 \lg \frac{U_2}{U_1} - 10 \lg \frac{R_2}{R_1} = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} - 10 \lg \frac{R_2}{R_1} \end{aligned} \quad (4.10)$$

vai arī

$$N_{(dB)} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 10 \lg \left(\frac{I_2^2 \cdot R_2}{I_1^2 \cdot R_1} \right) = 10 \lg \frac{I_2}{I_1} + 10 \lg \frac{I_2}{I_1} + 10 \lg \frac{R_2}{R_1} = 20 \lg \frac{I_2}{I_1} + 10 \lg \frac{R_2}{R_1}. \quad (4.11)$$

Ja izteiksmēs (4.10) un (4.11) rezistoru R_1 , R_2 pretestība ir vienāda, vai mērījumi veikti uz vienas un tās pašas pretestības, tad

$$10 \lg \frac{R_2}{R_1} = 10 \lg 1 = 0$$

un izmantojot šo sakarību iegūstam vienādojumu:

$$N_{(dB)} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} + 20 \lg \frac{I_2}{I_1}. \quad (4.12)$$

Tas nozīmē, ka decibelos var izteikt divu jaudu, divu spriegumu vai divu strāvu attiecību. Pastiprinātāji, kuriem $U_2 > U_1$, $I_2 > I_1$ un $P_2 > P_1$, pastiprinājums decibelos ir pozitīvs, bet pastiprinātājiem, kuriem $U_2 < U_1$, $I_2 < I_1$ un $P_2 < P_1$ pastiprinājums decibelos ir negatīvs.

Decibelos var izteikt ne tikai divu lielumu attiecību, bet arī šo lielumu absolūtās vērtības. Šai nolūkā ir jāizvēlas mēramā lieluma nulles līmenis. Vadu sakaru tehnikā par jaudas nulles līmeni ir pieņemta jauda $P_0 = 1 \text{ mW}$, kas izdalās rezistorā ar pretestību 600Ω . Izmantojot šo jaudu atrodam sprieguma nulles līmeni

$$U_0 = \sqrt{P_0 \cdot 600} = \sqrt{10^{-3} \cdot 600} \approx 0,775 \text{ V},$$

un strāvas nulles līmeni

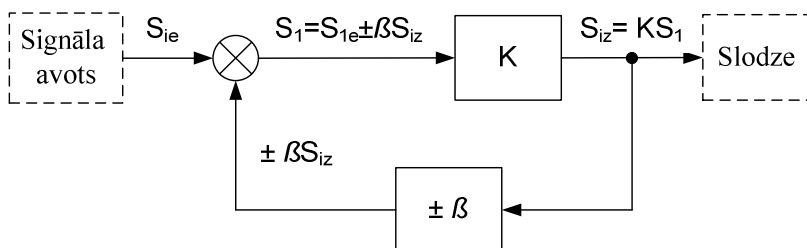
$$I_0 = \sqrt{\frac{P_0}{600}} = \sqrt{\frac{10^{-3}}{600}} \approx 1,29 \text{ mA}.$$

Visu jaudu, spriegumu un strāvu līmeņi, kas ir augstāki par nulles līmeni ir pozitīvi, bet kas ir zemāki – negatīvi.

4.5. Atgriezeniskā saite

Pastiprinātāju darbības kvalitātes uzlabošanai lieto atgriezenisko saiti, t.i. daļu izejas signāla pievada pastiprinātāja ieejai. Atgriezeniskā saite ir ceļš, pa kuru daļa pastiprinātāja izejas enerģijas atgriežas tā ieejā. Šāda pastiprinātāja funkcionālā shēma parādīta 4.9. attēlā. Atgriezeniskās saites ķēdi raksturo atgriezeniskās saites koeficients β , kas rāda, kāda daļa no izejas signāla S_{iz} tiek pievadīta pastiprinātāja ieejai, un tādēļ $\beta \leq 1$. Atgriezeniskā saite var būt pozitīva vai negatīva. Negatīvo atgriezenisko saiti sauc arī par pretsaiti, bet pozitīvo atgriezenisko saiti par līdzsaiti. Pozitīvas atgriezeniskās saites gadījumā daļu izejas signāla pievada pastiprinātāja ieejai fāzē ar ieejas signālu, tādējādi palielinot pastiprinājumu. Signāla vērtību pastiprinātāja izejā izsaka vienādojums

$$S_{iz} = KS_1 = K(S_{ie} + \beta S_{iz}) = KS_{ie} + K\beta S_{iz}. \quad (4.13)$$



4.9. att. Pastiprinātājs ar atgriezenisko saiti

Vienkāršojot izteiksmi atrodam

$$S_{iz}(1 - \beta K) = K S_{ie} \text{ vai } S_{iz} = \frac{K S_{ie}}{(1 - \beta K)}.$$

No vienādojuma (4.13) varam noteikt pārvades (pastiprinājuma) koeficientu pastiprinātājam ar atgriezenisko saiti $K_{as} = S_{iz}/S_{ie}$ vienādojums

$$K_{as} = \frac{S_{iz}}{S_{ie}} = \frac{K}{(1 - \beta K)}. \quad (4.14)$$

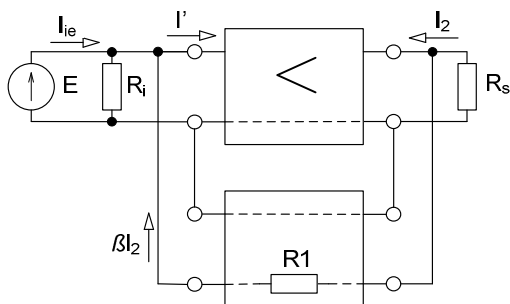
Parasti līdzsaiti izmanto, lai palielinātu pastiprinājuma koeficientu un gadījumos ja līdzsaitei $\beta K \rightarrow 0$, tad arī saucējs tuvojas nullei un $K_{as} \rightarrow \infty$, bet tas nozīmē, ka jebkurš mazs signāls tiek pastiprināts bezgalīgi un pastiprinātājs pārvēršas par svārstību ģeneratoru.

Negatīvas atgriezeniskās saites gadījumā atrodam, ka pastiprinātāja pārvades koeficients ir

$$K_{as} = \frac{S_{iz}}{S_{ie}} = \frac{K}{(1 + \beta K)}. \quad (4.15)$$

No izteiksmes (4.15) redzam, ka negatīvā atgriezeniskā saite samazina pastiprinājumu $1 + \beta K$ reizes. Tikpat reižu samazinās nelineārie kropļojumi un frekvenču kropļojumi. Ja atgriezenisko saiti veido tikai ar rezistoru, tad atgriezeniskās saites koeficients ir nemainīgs, bet ja tās veidošanā izmanto kondensatorus vai induktivitātes, tad koeficients kļūst atkarīgs no frekvences. Otrā īpašību plaši izmanto veidojot speciālus platjoslas vai šaurjoslas pastiprinātājus.

4.6. Atgriezeniskās saites slēgumu veidi



4.10. att. Atgriezeniskās saites slēgums
paralēlais – paralēlais

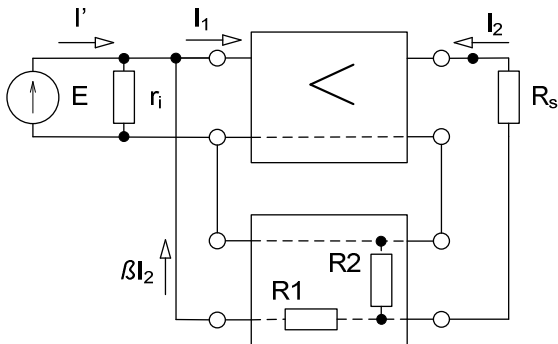
Pastiprinātāju ar negatīvu atgriezenisko saiti var attēlot ar diviem četrpoliem; viens ir invertējošs pastiprinātājs, otrs pretsaites četrpols. Pretsaites slēguma veidu apzīmē ar diviem vārdiem, no kuriem pirmais raksturo abu četrpolu ieeju savstarpējo slēgumu, bet otrais raksturo to izeju savstarpējo slēgumu. Kā pirmo apskatīsim pastiprinātāju ar negatīvu atgriezenisko saiti, kurā izmantots *paralēlā - paralēlā* slēgums (skat. 4.10. att.). Pastiprinātājam saslēgtas paralēli abu četrpolu ieejas

un izejas. Šajā slēgumā no ieejas strāvas I_{ie} jāatņem pretējā fāzē esošā atgriezeniskās

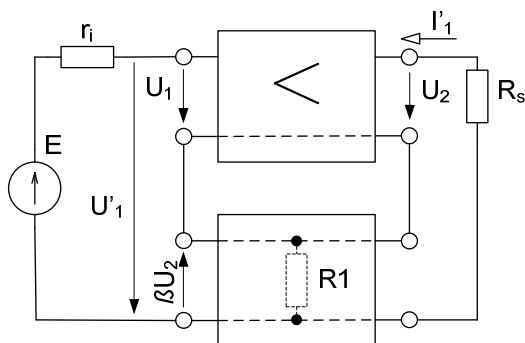
saites strāva βI_{iz} , kā rezultātā samazinās pastiprinātāja strāvas pastiprinājuma koeficients, bet sprieguma pastiprinājuma koeficients nemainās.

Pastiprinātājs ar atgriezenisko saiti, kurā izmantots *paralēlais - virknes* slēgums (4.11. att.). Pastiprinātājam saslēgtas paralēli abu četrpolu ieejas, bet abu četrpolu izejas slēgtas virknē. Paralēli - virknes slēgumā no ieejas strāvas I_{ie} jāatņem pretfāzē esošā atgriezeniskās saites strāva βI_{iz} , kā rezultātā samazinās pastiprinātāja strāvas pastiprinājuma koeficients, bet sprieguma pastiprinājuma koeficients paliek nemainīgs.

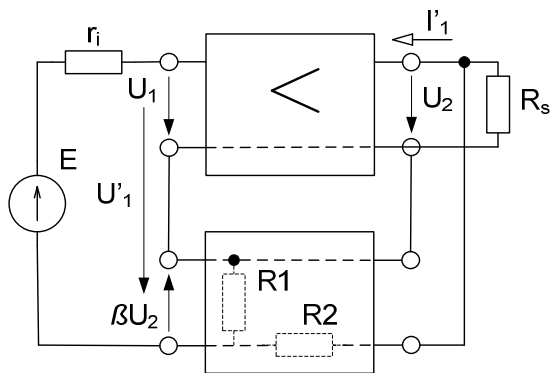
Pastiprinātājs ar atgriezenisko saiti *virknes - virknes* slēgumā parādīts 4.12. attēlā. Tas nozīmē, ka virknē slēgtas abu četrpolu ieejas un izejas. Pastiprinātājam virknē slēgtajām ieejai un izejai palielinās pastiprinātāja ieejas un izejas iekšējās pretestības, bet spriegumam U_{ie} jāpieskaita pretfāzē esošais atgriezeniskās saites spriegums βU_{iz} , kā rezultātā samazinās spriegums U' un līdz ar to arī pastiprinātāja pastiprinājuma koeficients, bet strāvas pastiprinājuma koeficients paliek nemainīgs. Pastiprinātājam ar atgriezenisko saiti, kurā izmantots *virknes - paralēlais* slēgums (4.13. att.), paralēli saslēgtas abu četrpolu ieejas, bet abu četrpolu izejas saslēgtas virknē. Tā kā virknes slēgumā spriegumi summējas, tad ieejas spriegumam U_{ie} jāpieskaita pretfāzē esošais spriegums βU_{iz} , kā rezultātā samazinās spriegums U' un sprieguma pastiprinājuma koeficients, bet strāvas pastiprinājuma koeficients nemainās.



4.11. att. Atgriezeniskās saites *paralēlais - virknes* slēgums



4.12. att. Atgriezeniskās saites *virknes - virknes* slēgums

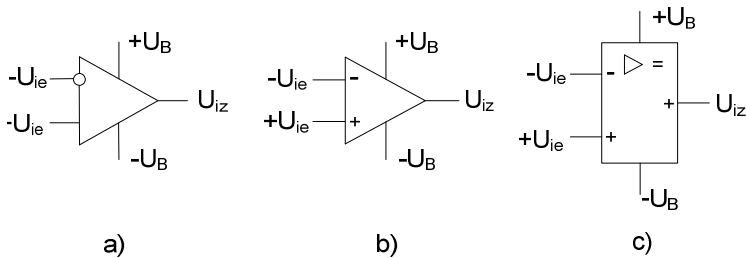


4.13. att. Atgriezeniskās saites *virknes - paralēlais* slēgums

4.7. Operacionālie pastiprinātāji

4.7.1. Operacionālā pastiprinātāja uzbūve

Operacionālais pastiprinātājs (OP) ir daudzpakāpju līdzstrāvas pastiprinātājs ar diferenciālu ieeju. OP izgatavo kā integrālās mikroshēmas. Operacionālo pastiprinātāju attēlošanai shēmās lieto grafiskus simbolus, kuri doti 4.14. attēlā. Pastiprinātājam ir divas ieejas – tiešā ieeja (U_{ie1}) un inversā ieeja (U_{ie2}), divi barošanas avoti ($+U_B$, $-U_B$) un viena izeja (U_{iz}).



4.14. att. Operacionālā pastiprinātāja grafiskais simbols

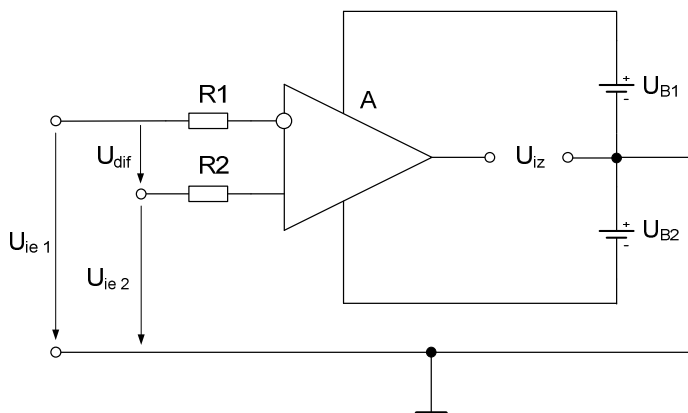
Kā redzams 4.15. attēlā, abu avotu kopējais savienojuma punkts kalpo par pastiprinātāju sistēmas kopējo punktu, jo visi OP izejas un ieejas signāli tiek attiecināti uz šo kopējo vadu. Spriegumu U_{ie1} un U_{ie2} diferenciāli apzīmē kā diferenciālo ieejas spriegumu U_{dif} . Operacionālais pastiprinātājs pastiprina tikai šo diferenciālo spriegumu U_{dif} , kuru nosaka vienādojums:

$$U_{dif} = U_{ie1} - U_{ie2}. \quad (4.16)$$

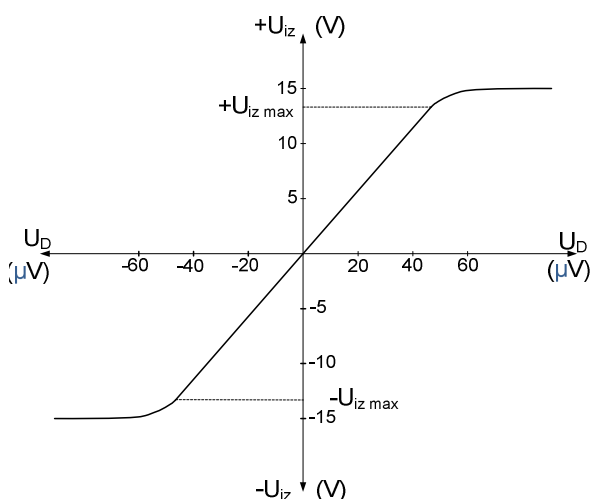
Diferenciālais ieejas spriegums U_{dif} ir iespējams gan pozitīvs, gan arī negatīvs. Līdz ar to, pie simetriska OP barošanas sprieguma, arī izejas spriegums U_{iz} var būt pozitīvs vai negatīvs. Bez tam OP izejas spriegums U_{iz} ir proporcionāls tā divu ieeju U_{ie1} un U_{ie2} starpībai:

$$U_{iz} = K(U_{ie1} - U_{ie2}). \quad (4.17)$$

Operāciju pastiprinātāja pārvades raksturlīkne parādīta 4.16. attēlā. Redzam, ka noteiktā diapazonā OP strādā lineāri, bet sakarā ar lielo sprieguma pastiprinājumu jau pie maziem ieejas spriegumiem nonāk piesātinājumā.



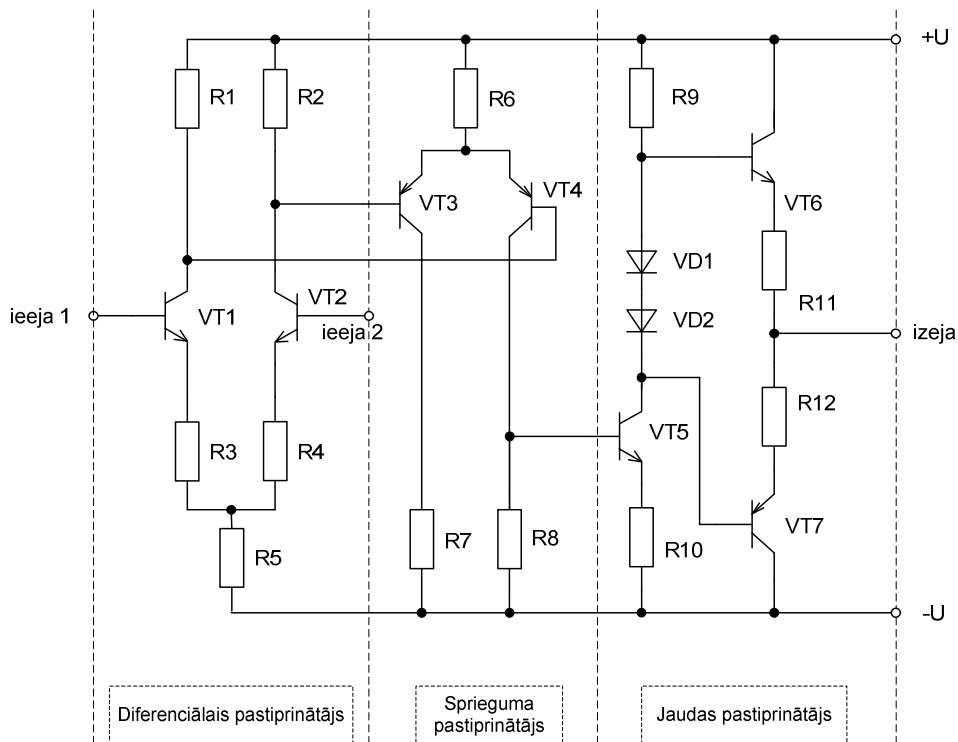
4.15. att. Operacionālā pastiprinātāja pieslēguma shēma



4.16. att. Operacionālā pastiprinātāja izejas raksturlikne

Apskatīsim vienkāršotu operacionālā pastiprinātāja shēmu, kura dota 4.17. attēlā. Ieejas kaskāde izveidota kā simetriskais diferenciālais pastiprinātājs ar diviem tranzistoriem VT1 un VT2. Diferenciālā pastiprinātāja izejas signāls tiek padots uz sprieguma pastiprinātāju, tranzistori VT3, VT4., kurš arī ir izveidots kā nesimetriskais diferenciālais pastiprinātājs. Izejas kaskādi veido saskaņojošais tranzistors VT5 un komplementārais emitera atkārtotājs, kuru veido tranzistori VT6 un VT7.

Abas diferenciālo pastiprinātāju kaskādes nodrošina nepieciešamo sprieguma pastiprinājumu, bet izejas kaskāde nodrošina jaudas pastiprinājumu.

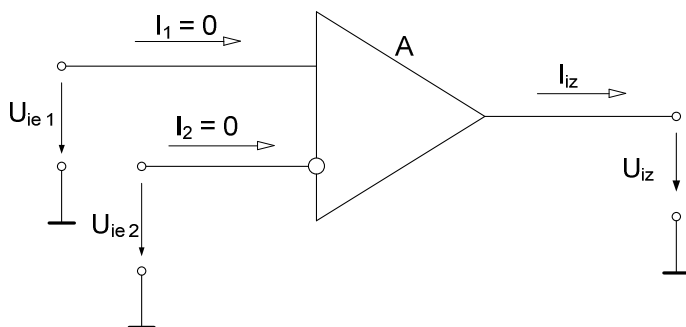


4.17. att. OP vienkāršota iekšējā elektroniskā shēma

4.7.2. Ideālā un reālā OP raksturīgākās īpašības

Ideālu operacionālo pastiprinātāju (4.18. att.) apraksta vienādojums (4.17), kur lielumu K sauc par pastiprinājuma koeficientu. Pastiprināšanas koeficientu K precīzi nosaka frekvenču īpašības, kuras nav atkarīgas no signāla līmeņa, laika un temperatūras, kā arī nemainās no ierīces uz ierīci. Bez tam jābūt izpildītam nosacījumam: $U_{iz} = 0$, ja $U_{ie1} = U_{ie2}$ neatkarīgi no tā cik lieli tie būtu.

Reālā OP pastiprinājums K ir funkcija, kura atkarīga no signāla līmeņa, laika, temperatūras un barošanas avota sprieguma, kā arī mainās no iekārtas uz iekārtu – dažkārt saukts kā piecu lielumu faktors. Bez tam reālam operacionālajam pastiprinātājam ieejās ir nobīdes spriegums (parasti daži milivolti), kurš pieskaitāms pie $U_{ie1} - U_{ie2}$ un var būt atšķirīgs katrai konkrētai ierīcei.



4.18. att. Ideāls operacionālais pastiprinātājs

Ideāla un reāla operacionālo pastiprinātāju raksturīgāko īpašību salīdzinājums dots 4.1. tabulā. Kā redzams no tabulas, vairums no reālā OP parametriem tuvinās ideāla OP parametriem.

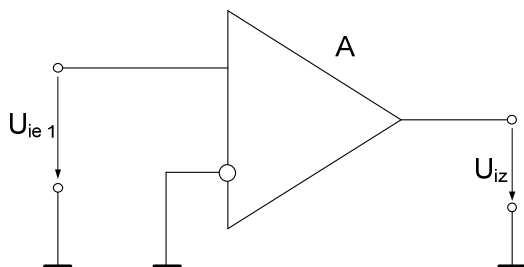
4.1. tabula

Operacionālo pastiprinātāju raksturīgāko īpašību salīdzinājums

Parametri	Ideāls OP	Reāls OP
Sprieguma pastiprināšanas koeficients K	$\rightarrow \infty$	$20 \cdot 10^3 \dots 200 \cdot 10^3$
Ieejas pretestība R_{ie} , Ω	$\rightarrow \infty$	$10^5 \dots 10^{15}$
Izejas pretestība R_{iz} , Ω	$\rightarrow 0$	$30 \dots 2000$
Caurlaides frekvenču josla, Hz	$0 \dots \infty$	$0 \dots 10^7$
Izejas spriegums, ja $U_{ie1} = U_{ie2}$, V	0	≈ 0
Temperatūras ietekme $\Delta U = f \text{ } ^\circ\text{C}$	nav	$-50 \text{ } ^\circ\text{C} \dots +75 \text{ } ^\circ\text{C}$ nav vērā ņemama

4.7.3. OP pamatslēgumu shēmas

Ideāls OP ir universāls pastiprinātājs, kuru var izmantot dažādu elektronisku ierīču izveidē. Tādēļ apskatīsim slēgumu veidus, kādus var izveidot ar OP.

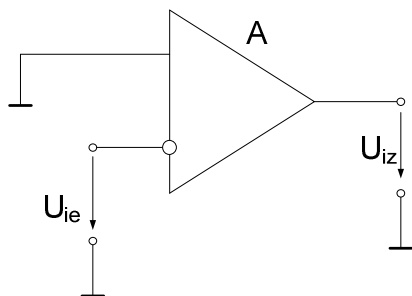


4.19. att. Neinvertējošs pastiprinātājs

4.7.3.1. Neinvertējošs pastiprinātājs

Ideālu operacionālo pastiprinātāju var izmantot kā neinvertējošu pastiprinātāju (4.19. att.), kur ieejas spriegums U_{ie1} ir pievadīts tiešās ieejas spaiļei. Izejas spriegumu nosaka izmantojot vienādojumu

$$U_{iz} = K U_{ie}. \quad (4.18)$$

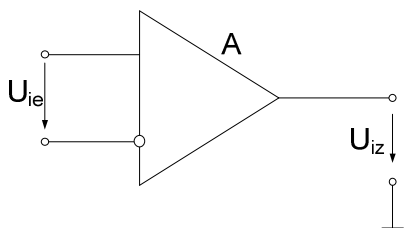


4.20. att. Invertējošs pastiprinātājs

4.7.3.2. Invertējošs pastiprinātājs

Ideāls operacionālais pastiprinātājs kā invertējošs pastiprinātājs redzams 4.20. attēlā, kuram ieejas spriegums U_{ie} pievadīts OP inversajās ieejas spaiļei. Izejas spriegumu nosaka izmantojot vienādojumu

$$U_{iz} = -K U_{ie} \quad (4.19)$$



4.21. att. Diferenciālais pastiprinātājs

4.7.3.3. Diferenciālais pastiprinātājs

Ideālu OP var izveidot kā diferenciālo pastiprinātāju ar mainīgu (peldošu) ieeju, kurš redzams 4.21. attēlā un kuram sakarība starp izejas un ieeju lielumiem izsaka vienādojums (4.17).

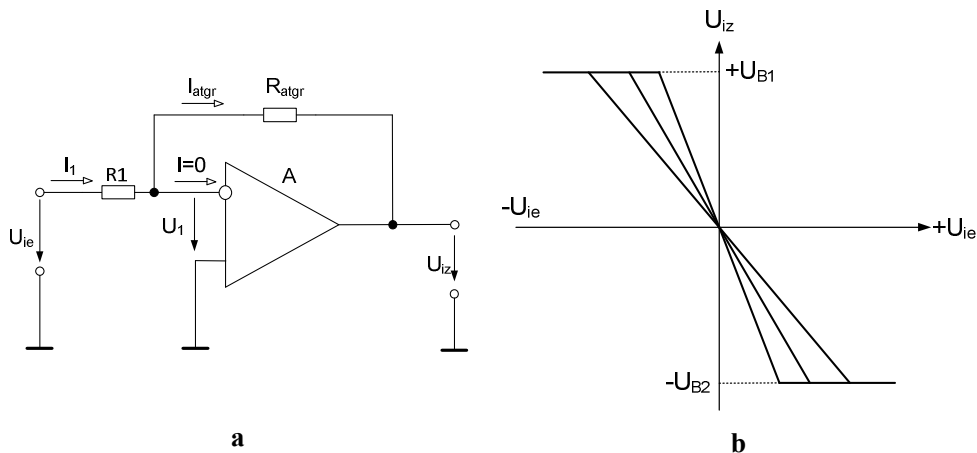
4.7.3.4. OP ar atgriezenisko saiti

Lietojot operacionālo pastiprinātāju tā īpašības var būtiski uzlabot, ja lieto piemērotu atgriezenisko saiti. Atgriezeniskā saite uzlabo stabilitāti, samazina traucējošos signālus, palielina darbības ātrumu un frekvenču joslas platumu, samazina nelinearitāti. Galvenā uzmanība būs veltīta negatīvai atgriezeniskai saitei (4.22. un 4.23. att.), tas ir gadījumam, kad daļa izejas signāla tiek pievadīta invertējošās ieejas spaiļei.

Invertējošam pastiprinātājam ar atgriezenisko saiti ieejas signāls caur rezistoru R_1 pievadīts invertējošajai ieejai un neinvertējošā ieeja sazēmēta, bet izeja caur rezistoru R_{atgr} savienota ar invertējošo ieeju. Ņemot vērā, ka OP ieejas pretestība ir bezgalīgi

liela, pastiprinātāja invertējošās ieejas strāva ir vienāda ar nulli, bet tas nozīmē, ka ieejas strāva I_1 plūst tikai caur rezistoru R_1 . Tādā gadījumā ieejas strāva

$$I_1 = \frac{U_{ie}}{R_1}, \quad (4.20)$$



4.22. att. Invertējošs pastiprinātājs ar atgriezenisko saiti

un šī strāva plūst tikai caur R_{atgr} . Atbilstoši Kirchofa likumam

$$U_{iz} + U_{Ratgr} - U_1 = 0$$

vai

$$U_{iz} = -U_{Ratgr} \quad (4.21)$$

bet U_{Ratgr} nosaka strāva I_1 , kas plūst caur R_{atgr} , tas ir

$$U_{iz} = -I_1 R_{atgr} = -U_{ie} \frac{R_{atgr}}{R_1}. \quad (4.22)$$

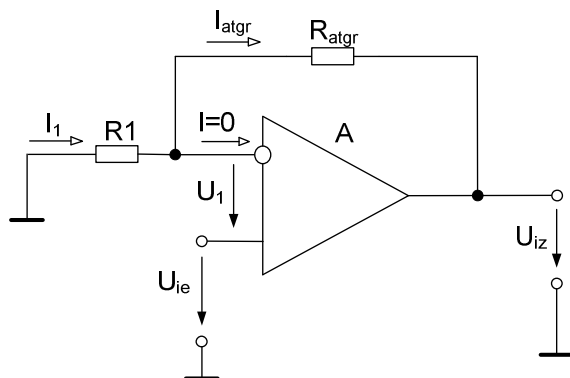
Šajā izteiksmē redzam, ka sakarību U_{iz} un U_{ie} nosaka rezistoru R_{atgr} un R_1 pretestību attiecība, tātad tā faktiski ir pastiprinājuma koeficients K . Tas ir spēkā, kamēr izejas sprieguma vērtība ir mazāka par barošanas spriegumu. Kā redzams no grafikas (4.22. att. b), jo lielāks pastiprinājums, jo mazāks ir U_{ie} izmaiņu diapazons, pie kura izejas spriegums U_{iz} mainās lineāri apgabalā no $+U_{B1}$ līdz $-U_{B2}$.

Neinvertējošam pastiprinātājam ar atgriezenisko saiti spriegums starp invertējošo un neinvertējošo ieeju vienāds ar nulli, tad spriegums uz dalītāja R_1 - R_{atgr} rezistora R_1 ir vienāds ar U_1 . No izejas puses šo spriegumu var noteikt ar vienādojumu

$$U_1 = U_{iz} \frac{R_1}{R_1 + R_{atgr}}. \quad (4.23)$$

Izmantojot izteiksmi (4.8) var noteikt neinvertējošā pastiprinātāja pastiprinājuma koeficientu

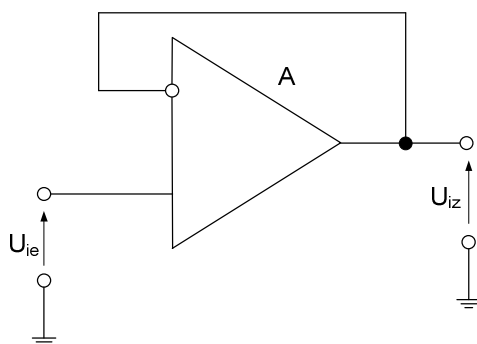
$$K = \frac{U_{iz}}{U_{ie}} = \frac{R + R_{atgr}}{R_1} \quad (4.24)$$



4.23. att. Neinvertējošs pastiprinātājs ar negatīvu atgriezenisko saiti

Ļoti svarīgi ir tas, ka neinvertējošā OP ieejas pretestība $r_{ie} = KU_1$ ir ļoti liela. Tās vērtība ir $10^{10} \dots 10^{13} \Omega$.

4.7.3.5. Sprieguma atkārtotājs



4.24. att. Sprieguma atkārtotājs

Ja ar vāju signālu jānodrošina samērā lielu slodzes strāvu, tad OP izveido kā sprieguma atkārtotāju. Sprieguma atkārtotājā izeju savieno tieši ar invertējošo ieeju, bet signālu pievada neinvertējošajai ieejai (4.24. att.).

Tādā gadījumā $U_{iz} = U_{ie}$, pie kam mainoties sprieguma U_{ie} polaritātei, mainās arī U_{iz} polaritāte.

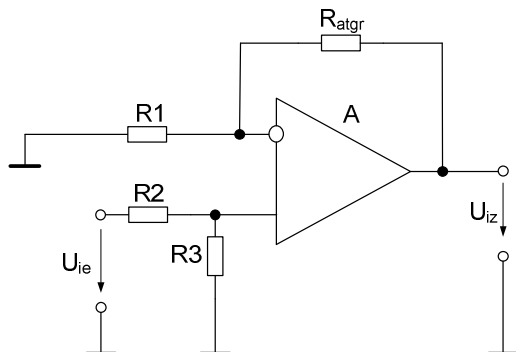
Gadījumā, ja nav nepieciešams nodrošināt ļoti lielu ieejas pretestību, tad sprieguma atkārtotāju izveido kā neinvertējošu pastiprinātāju ar

sprieguma dalītāju ieejā (4.25. att.). Pastiprinātāja izejas spriegumu nosaka vienādojums

$$U_{iz} = \frac{R_1}{R_2 + R_3} \cdot \frac{R_{atgr} + R_1}{R_1} U_{ie} . \quad (4.25)$$

Ja tiek izpildīts nosacījums, $R_1 = R_3$ un $R_{atgr} = R_2$, tad sprieguma pastiprinājums $K_u = 0$, un $U_{iz} = U_{ie}$.

Obligāti jāievēro nosacījums, ka pastiprinātāja neinvertējošās ieejas potenciāls nedrīkst pārsniegt barošanas spriegumu.



4.25. att. Neinvertējošais OP ar sprieguma dalītāju ieejā

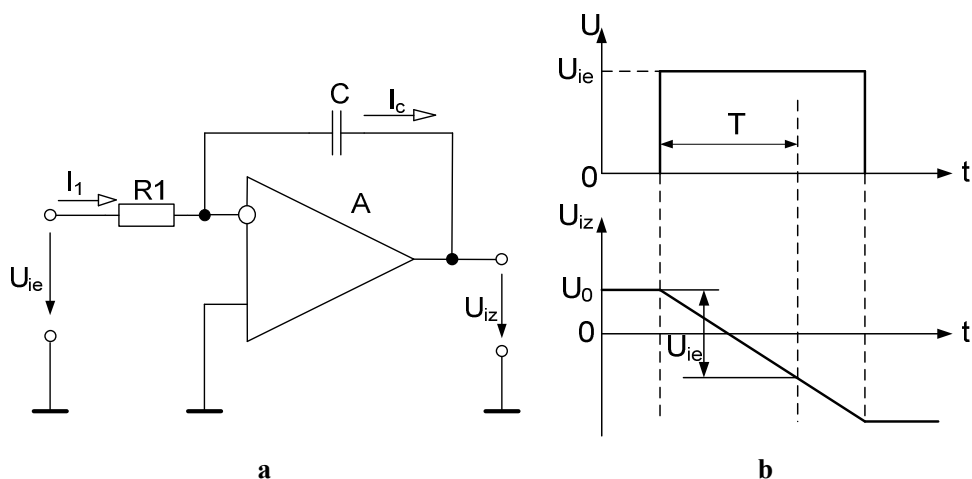
4.7.3.6. Integrators

Integrators ir operacionālais pastiprinātājs, kura atgriezenisko saiti veido caur kondensatoru C (4.26. att.). Integratoru apraksta sekojoši vienādojumi:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U_{ie}}{R_1} , \\ I_c &= -\frac{dU_{iz}}{dt} . \end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

Ņemot vērā, ka $I_1 = I_c$, atrodam, ka

$$\frac{U_{ie}}{R_1} = -C \frac{dU_{iz}}{dt} . \quad (4.27)$$



4.26. att. Integratora shēma (a) un sprieguma diagramma (b)

Pārveidojot izteiksmi (7.12) $\frac{aU_{iz}}{dt} = -\frac{U_{ie}}{R_1C}$ iegūstam

$$U_{iz} = -\frac{1}{T} \int U_{ie} dt + U_0, \quad (4.28)$$

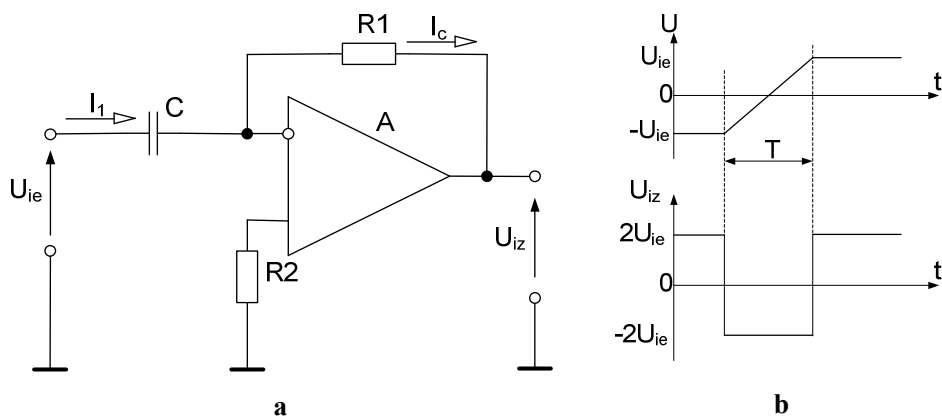
kur $T = R_1C$ - integrēšanas laika konstante;

U_0 - sākotnējā sprieguma vērtība.

Ja integratora ieejas spriegums $U_{ie} = 0$, tad izejas spriegums nemainās. Bet ja ieejas signāls ir laikā nemainīgs un vienāds ar U_{ie} (4.22. att. b), tad intervālā $t = T$ izejas spriegums mainās par U_{ie} lielumu.

4.7.3.7. Diferenciators

Ierīci ar kuru var izpildīt diferenciēšanas operācijas sauc par diferenciatoru. To izveido, izmantojot operacionālo pastiprinātāju, kura ieejā ieslēgts kondensators C (4.27. att.).



4.27. att. Diferenciatora shēma (a) un sprieguma diagramma (b)

Vienādojumu sistēma, kas apraksta diferenciatoru ir:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= C \frac{dU_{ie}}{dt}, \\ I_2 &= -\frac{U_{iz}}{R_2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.29)$$

Ņemot vērā to, ka $I_1 = I_2$, iegūstam izejas sprieguma izteiksmi

$$U_{iz} = -R_2 C \frac{dU_{ie}}{dt} = -T \frac{dU_{ie}}{dt}, \quad (4.30)$$

kur $T = R_2 C$ - diferencēšanas laika konstante.

4.7.3.8. Summators

Ierīci, ar kuras palīdzību var veikt vairāku elektrisko signālu mēroga summēšanu, sauc par summatoru. Par summatoru izmanto operacionālo pastiprinātāju ar atgriezenisko saiti, kura ieeju veido n rezistori (4.28. att.). Ja visi rezistori, ieskaitot atgriezenisko saiti ir ar vienādu pretestību ($R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_{atgr}$), tad izejas spriegums ir ieejas spriegumu summa.

Pēc Kirhoha likuma

$$-I_{atgr} = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Tā kā

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2} \text{ utt.,}$$

tad izejas spriegumu izsaka vienādojums

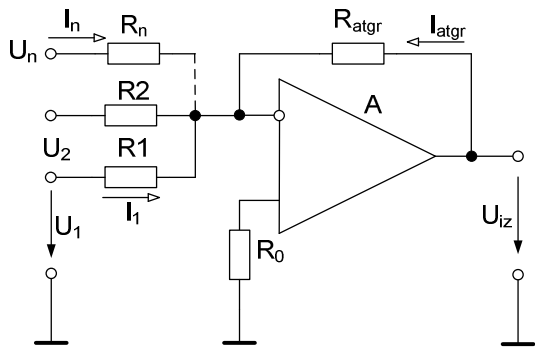
$$U_{iz} = -\left(\frac{R_{atgr}}{R_1} U_1 + \frac{R_{atgr}}{R_2} U_2 + \dots + \frac{R_{atgr}}{R_n} U_n\right), \quad (4.31)$$

bet, tā kā visi rezistori ir ar vienādu pretestību, tad

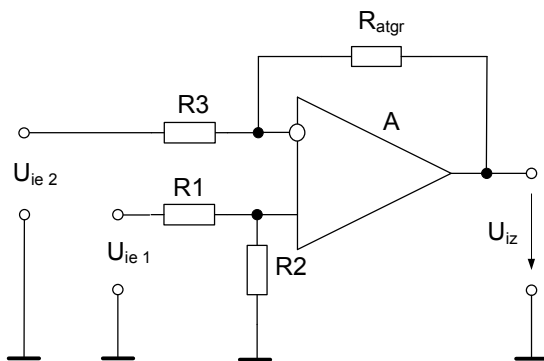
$$U_{iz} = -(U_1 + U_2 + \dots + U_n) \frac{R_{atgr}}{R_{ie\Sigma}}. \quad (4.32)$$

4.7.3.9. Atskaitīšanas ierīce

Pieņemsim, ka mēs gribam parādīt izejas spriegumu, kas ir vienāds ar matemātisku starpību starp diviem ieejas spriegumiem. Tādu operāciju var izpildīt lietojot operacionālo pastiprinātāju ar paņēmieni, kur signāli ir pievadīti caur atbilstošu rezistoru savienojumu invertējošajai un neinvertējošajai ieejai (4.29. att.).



4.28. att. Summatora shēma



4.29. att. Atskaitīšanas ierīces shēma

Ar superpozīcijas metodi mēs varam noteikt šīs elektriskās ķēdes izeju spriegumus katrai ieejai atsevišķi. Vispirms pieņemsim, ka inversā ieeja U_{ie2} ir sazemēta, tad spriegums ko rada ieejai U_{ie1} pievadītais signāls ir

$$U^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ie1}, \quad (4.33)$$

bet, ievērtējot atgriezeniskās saites ietekmi, pilns izejas spriegums ir

$$U_{iz}^+ = \frac{R_3 + R_{atgr}}{R_3} U^+ = \left(\frac{R_3 + R_{atgr}}{R_3} \right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) U_{ie1}. \quad (4.34)$$

Tad pieņemam, ka sazemēta ir ieeja U_{ie1} , un iegūstam izteiksmi

$$U_{iz}^- = \frac{-R_{atgr}}{R_3} U_{ie2}. \quad (4.35)$$

Tālāk atrodam rezultējošo izejas signālu gadījumam, ja ir abi ieejas signāli, tad to nosaka vienādojums

$$U_{iz} = U_{iz}^+ + U_{iz}^- = \left(\frac{R_3 + R_{atgr}}{R_3} \right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) U_{ie1} - \left(\frac{R_{atgr}}{R_3} \right) U_{ie2}. \quad (4.36)$$

No izteiksmes (4.36) redzam, ka izejas signāls ir proporcionāls ir vienāds pastiprināto ieejas signālu starpību. Līdz ar to iegūstam

$$U_{iz} = A(U_{iz1} - U_{iz2}), \quad (4.37)$$

kur A ir konstants lielums, tad izvēlamies rezistoru pretestības ievērojot nosacījumu

$$R1 = R3 = R \text{ un } R2 = R_{atgr} = A R.$$

Ievietojot šīs vērtības vienādojumā (4.36) iegūsim

$$U_{iz} = \left(\frac{R + AR}{R} \right) \left(\frac{AR}{R + AR} \right) U_{ie1} - \frac{AR}{R} U_{ie2} = \frac{AR}{R} U_{ie1} - \frac{AR}{R} U_{ie2} = A(U_{ie1} - U_{ie2}). \quad (4.38)$$

Tad sakarība starp izejas lielumu un ieejas signāliem būs proporcionāls abu ieeju signālu mērogu starpībai.

Vispārējā gadījumā atskaitīto operacionālo pastiprinātāju raksturo vienādojums

$$U_{iz} = a_1 U_{ie1} - a_2 U_{ie2}, \quad (4.39)$$

kur koeficienti $a_1 = \left(1 + \frac{R_{atgr}}{R_3}\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)$ un $a_2 = \frac{R_{atgr}}{R_3}$.

4.7.3.10. Aproximējošie pastiprinātāji

Lai varētu iegūt nelineāru sakarību starp OP ieejas un izejas spriegumiem izmanto aproksimējošos pastiprinātājus. Nelinearitāti izejas raksturlīknē panāk ar stabilitroniem, kurus pievieno paralēli atgriezeniskās saites rezistoram R_{atgr} (4.30. att. a, b). Lai iegūtu simetriskas raksturlīknes abos kvadrantos, stabilitronus $V1$, $V2$ un $V3$, $V4$ savieno pretslēgumā.

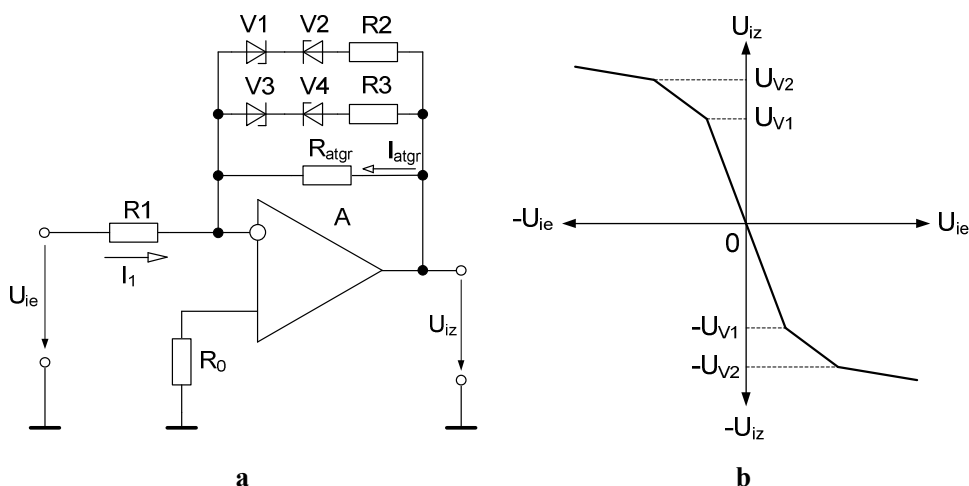
Stabilizācijas spriegums stabilitroniem $V1$ un $V2$ ir vienāds (U_{V1}), arī $V3$ un $V4$ stabilizācijas spriegums ir vienāds (U_{V2}).

Ja izejas spriegums ir mazāks par stabilitrona $V1$ stabilizācijas spriegumu, tad atgriezeniskā saite realizējas caur R_{atgr} un izejas spriegums

$$U_{iz} = -U_{ie} \frac{R_{atgr}}{R_1}. \quad (4.40)$$

Kad izejas spriegums kļūst lielāks par stabilitrona $V1$ stabilizācijas spriegumu, tad diodes $V1$ un $V2$ sāk vadīt strāvu

$$I_{V1} = \frac{\pm U_{iz} - U_{V1}}{R_2}. \quad (4.41)$$



4.30. att. Aproximējošā pastiprinātāja shēma (a) un raksturlīknes (b)

Šajā gadījumā caur R_{atgr} plūstošā strāva samazinās attiecībā pret I_1 par stabilitrona strāvas daļu

$$I_{Ratgr} = \frac{U_{ie}}{R_1} + \frac{U_{iz} \pm U_{V1}}{R_2}. \quad (4.42)$$

Līdz ar to, turpinot palielināt ieejas spriegumu, izejas sprieguma pieaugums samazinās. Šo procesu apraksta vienādojums

$$U_{iz} = \frac{-U_{ie} \frac{R_{atgr} \cdot R_1}{R_1} \pm U_{V1} R_{atgr}}{R_{atgr} + R_2}. \quad (4.43)$$

Kad izejas spriegums kļūst lielāks par stabilitrona $V3$ stabilizācijas spriegumu, tad arī diodes $V3$ un $V4$ sāk vadīt strāvu un caur R_{atgr} plūstošā strāva attiecībā pret I_1 samazinās vēl vairāk

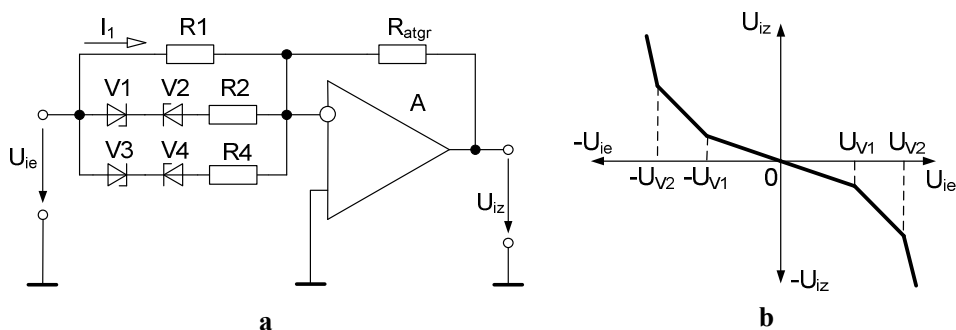
$$I_{Ratgr} = \frac{U_{ie}}{R_1} + \frac{U_{iz} \pm U_{V1}}{R_2} + \frac{U_{iz} \pm U_{V2}}{R_3}. \quad (4.44)$$

Rezultējošā izejas sprieguma atkarība no ieejas sprieguma parādīta 4.30. attēlā b.

Otrā tipa aproksimējošu pastiprinātāju var izveidot, ja stabilitronus ievieto OP ieejas ķēdē (4.31. att. a). Stabilitronus $V1$, $V2$ un $V3$, $V4$ pieslēdz paralēli ieejas rezistoram $R1$. Palielinot ieejas spriegumu U_{ie} , līdz tas sasniedz stabilitrona $V1$ stabilizācijas spriegumu, caur to sāk plūst strāva

$$I = \frac{U_{ie}}{R_1} + \frac{U_{ie} \pm U_{V1}}{R_2}, \quad (4.45)$$

bet tas nozīmē, ka ieejas spriegumam turpinot palielināties izejas spriegums pieaugs ātrāk. Tad, kad sāks vadīt arī $V3$, izejas spriegums palielināsies vēl vairāk. Sakarība starp izejas un ieejas spriegumiem dota 4.31. attēlā b.



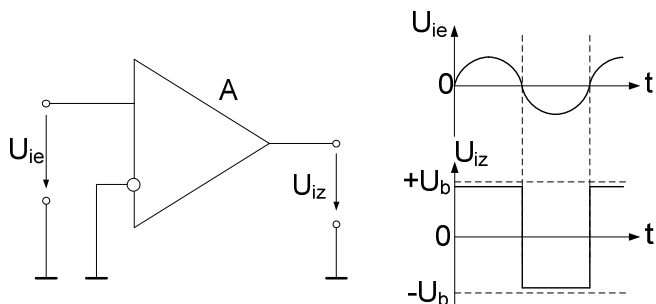
4.31. att. Otrā tipa aproksimējošā pastiprinātāja shēma (a) un raksturlīknes (b)

4.7.3.11. Komparators

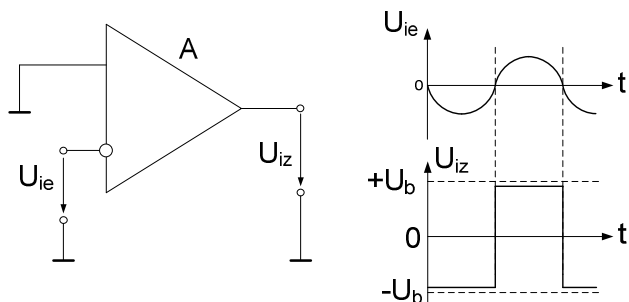
Tā ir elektroniska ierīce, kas veic divu ieejas signālu salīdzināšanu. Komparatora slēgumu shēmas un to spriegumu diagrammas parādītas 4.32. attēlā.

Pirmās divas shēmas domātas ieejas sprieguma salīdzināšanai ar nulles līmeni (4.32. att. a un b). Pirmajā gadījumā (a) izejas spriegums U_{iz} sakrīt fāzē ar ieejas spriegumu U_{ie} . Pie tam U_{ie} tiek salīdzināts ar nulles spriegumu. Tā kā pastiprinātājam nav tiešās atgriezeniskās saites, tā pastiprināšanas koeficients ir bezgalīgi liels. Bet tas nozīmē, ka pastiprinātājs strādā sātstrāvas režīmā.

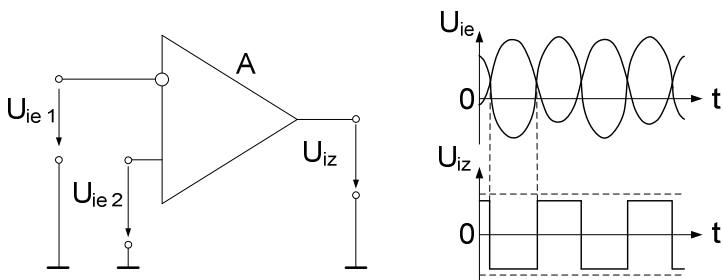
a)



b)



c)



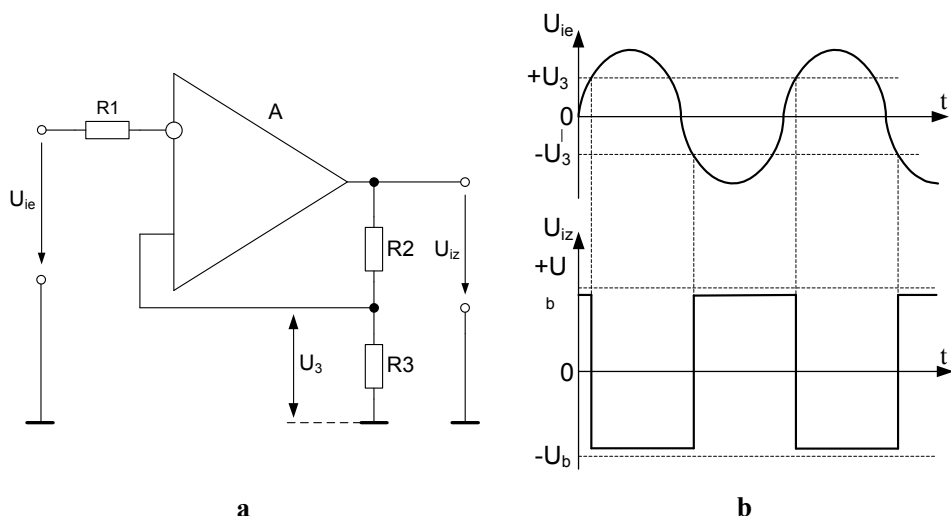
4.32. att. Komparatoru slēgumu shēmas un spriegumu diagrammas

Ja kontrolējamā sprieguma avots pieslēgts pie invertējošās ieejas (4.32. att. b), tad izejas spriegums nobīdīts pretfāzē. Pie shēmām esošās grafikas parāda, kad un kā

mainās ieejas un izejas spriegumi. Pie tam, ja $U_{ie} > 0$, tad $U_{iz} = |U_{piesāt}|$, kur $U_{piesāt}$ ir pastiprinātāja piesātinājuma spriegums, kurš ir tuvs barošanas spriegumam.

Abas aplūkotās shēmas (4.32. att. a un b) sauc par nulles indikatoriem. Ja ieejas signālus U_{ie1} un U_{ie2} pievada abām OP ieejām (4.32. att. c), tad realizējas divu spriegumu salīdzināšana (komparācija).

Bez apskatītajiem variantiem, vēl izmanto komparatoru shēmas ar pozitīvu atgriezenisko saiti (4.33. att.), kas realizē izejas signāla pārslēgšanu pie dažādiem ieejas signāla līmeņiem.



4.33. att. Komparator ar atgriezenisko saiti (a) un spriegumu diagramma (b)

4.7.4. Instrumentālais operacionālais pastiprinātājs (IOP)

Ar diferenciālo operacionālo pastiprinātāju palīdzību izveidotu pastiprinātāju, kurš pastiprina signāla starpību, sauc par instrumentālo pastiprinātāju.

Instrumentālais pastiprinātājs ir OP ar diferenciālu ieeju, kuram iespējams mainīt ieejas signālu starpības pastiprinājumu. Tas sastāv no trim OP, kur pirmie divi OP ir savstarpēji saistīti neinvertējoši pastiprinātāji, bet trešais – diferenciālais pastiprinātājs ar atgriezenisko saiti (4.34. att.). Parasti to ieejas pretestība starp abām diferenciālās ieejas spailēm ir $10^9 \Omega$ un vairāk. Līdz ar to ieejas strāva ir ļoti maza, parasti no 1 nA līdz 50 nA, bet izejas pretestība ļoti zema – pie zemām frekvencēm tikai daži miliomi.

Apskatīsim IOP pirmo kaskādi – pastiprinātāju ar diferenciālu ieeju un diferenciālu izeju, kas izveidots no diviem neinvertējošiem diferenciāliem OP, kura shēma dota 4.34. attēlā.

Robežās, kad sprieguma starpība starp pastiprinātāja $A1$ tiešo un invertējošo ieeju ir vienāda ar nulli un arī starp pastiprinātāja $A2$ tiešo un invertējošo ieeju ir vienāda ar

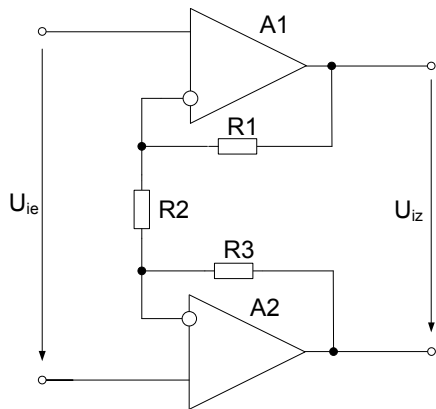
nulli, var uzskatīt, ka operacionālo pastiprinātāju pastiprinājums K_1 un K_2 tiecas uz bezgalību. Bet tādā gadījumā spriegums uz rezistora R_2 ir proporcionāls ieejas U_{ie} spriegumam un izejas spriegumu U_{iz} var noteikt izmantojot izteiksmi

$$U_{iz} = U_{ie} \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2}, \quad (4.46)$$

kur praksē rezistorus R_1 un R_3 izvēlas ar vienādu pretestību.

Tādam pastiprinātājam ar diferenciālu ieeju un izeju ieeja ir peldoša ar augstu iekšējo pretestību un atšķirībā no diferenciālā OP, kurš dots attēlā 4.21., tā pastiprinājums ir atkarīgs tikai no rezistoru pretestības vērtībām.

No pirmās pastiprinātāja kaskādes (A_1 , A_2) diferenciālās izejas signāls tiek padots uz otro kaskādi - diferenciālo OP ar negatīvu atgriezenisko saiti A_3 . Ja šim pastiprinātājam rezistoru attiecība atbilst nosacījumam $R_6/R_5 = R_{atgr}/R_4$ un tā operacionālo pastiprinātāju A_1 , A_2 un A_3 pastiprinājuma koeficienti K_1 , K_2 un K_3 tiecas uz bezgalību, tad kopējo instrumentālā pastiprinātāja pastiprinājumu nosaka vienādojums

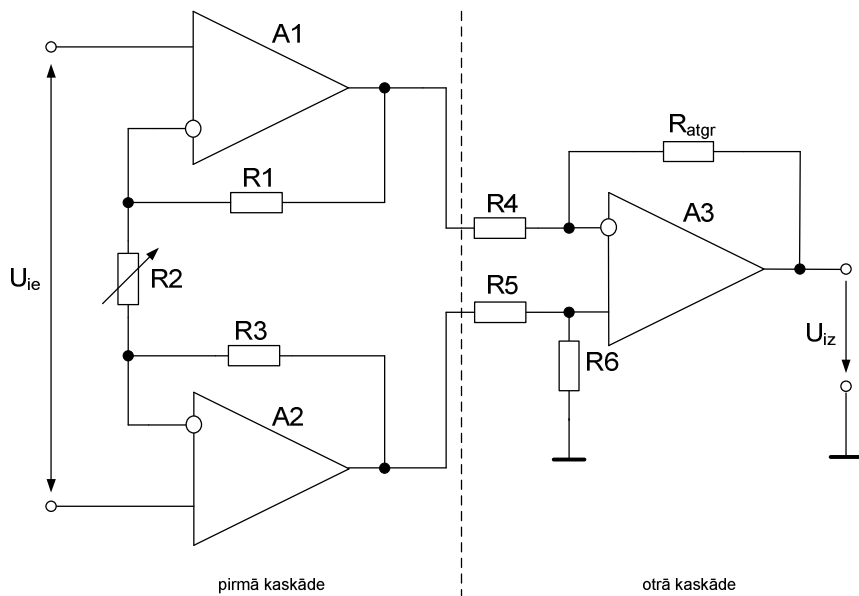


4.34. att. Pastiprinātājs ar diferenciālu ieeju un diferenciālu izeju

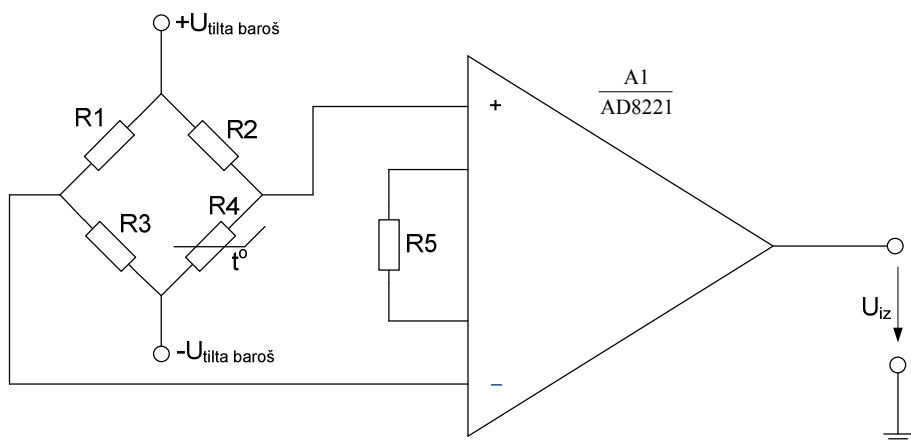
$$K_{IOP} = \frac{U_{iz}}{U_{ie}} = - \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2} \frac{R_{atgr}}{R_4}. \quad (4.47)$$

Instrumentālajam pastiprinātājam ir peldošā diferenciālā ieeja ar augstu ieejas pretestību un tā pastiprinājumu galvenokārt nosaka tikai pretestību vērtības. Tomēr atšķirībā no pastiprinātāja ar diferenciālo ieeju un diferenciālo izeju instrumentālajam pastiprinātājam ir tikai viena izeja. Bez tam, salīdzinājumā ar pirmo kaskādi, ir principiāla priekšrocība - tam lielāks kopējais pastiprinājums un mazāks nobīdes sprieguma pastiprinājums, kā arī ar rezistora R_2 palīdzību var mainīt pastiprinājuma koeficientu.

Instrumentālos pastiprinātājus izmanto mērīšanas iekārtās, kurās mērāmais lielums ir ļoti mazs signāls, piemēram, tiltveida mērīšanas pārveidotāja differences signālu pastiprināšanai (4.35. att.), tenzometrisko mērīšanas pārveidotāju izejas signālu pastiprināšanai, termopāra TEDS pastiprināšanai u.c. Vēl instrumentālos pastiprinātājus plaši izmanto kardiosignālu un dažādu biopotenciālu mērīšanai.



4.35. att. Instrumentālais operacionālais pastiprinātājs



4.36. att. Temperatūras mērīšanas shēma izmantojot instrumentālo pastiprinātāju

5. ELEKTROSAKARU PAMATI

5.1. Sakaru teorijas jēdzieni

Sakaru uzdevums ir pārraidīt informāciju starp atsevišķiem sabiedrības locekļiem un to grupām. Izmantojot informācijas apmaiņas sistēmu, katrs sabiedrības loceklis vai to grupa sazinoties saņem vai arī sniedz *informāciju* par kaut ko. Latīņu valodā vārds «informatio» nozīmē izskaidrojumu, izklāstu, skaidrojumu. Informācijas apmaiņas sistēma cilvēku sabiedrībā ir tik tālu attīstījusies, ka tajā jau kopš cilvēces pastāvēšanas sākumiem, vienlaikus ar dabiskajiem informācijas apmaiņas līdzekļiem, plaši izmanto arī mākslīgos. Attīstot un pilnveidojot mākslīgos informācijas pārraides un apmaiņas līdzekļus, cilvēks šodien ir izveidojis bagātīgu tehnisko līdzekļu arsenālu.

Pasaulē sakarus realizē ar dažādas fizikālas dabas signāliem: skaņas, elektriskajiem, gaismas u.c. Sakarus realizē ar sakaru sistēmu. Sakaru sistēma sastāv no raidītāja un uztvērēja, kas savstarpēji saistīti ar sakaru kanālu. Sakaru kanāls ir fizikāla vide, pa kuru pārraida signālu. Sākotnēji par sakaru kanālu izmantoja divvadu līniju, tagad bezvadu sakaros par sakaru kanālu izmanto telpu, kurā no raidītāja uz uztvērēju izplatās elektromagnētiskie viļņi.

Sakaru sistēmas darbojas tādējādi, ka uz raidītāju tiek padots sūtītāja ziņojums. Sūtītājs var būt cilvēks, automātiska iekārta, mērīšanas pārveidotājs - devējs utt., tātad jebkurš ziņojumu avots. Ziņojums ir informācijas kopa, kas jāpārraida saņēmējam. Tātad ziņojums ir pārraides objekts. Tā, piemēram, pārraidot telegrammu, ziņojums ir tās teksts, bet, sarunājoties pa telefonu, ziņojumā ietilpst ne tikai sarunas frāzes, bet arī intonācija, ritms un tamlīdzīgas runas īpašības. Raidītājs pārveido ziņojumu atbilstošā elektriskajā (vai kāda cita veida) signālā, kuru pa sakaru kanālu pārraida uz uztvērēju. Šo pārveidošanu var sadalīt vairākos etapos: 1) ziņojuma pārveidošana pārraidāmos lielumos (piemēram, mikrofons skaņas spiediena izmaiņas pārveido elektriskās strāvas izmaiņās), 2) kodēšana (var arī nekodēt), 3) modulācija. Tādējādi no raidītāja sakaru kanālā nonāk signāls, kas satur pilnīgu ziņojuma informāciju. Sakaru kanāla otrā galā atrodas uztvērējs, kas signālu atkal pārveido ziņojumā.

Vienu un to pašu informāciju var pārraidīt izmantojot dažādas sakaru sistēmas. Ļoti svarīgi ir to pārraidīt pa tādu sistēmu, kas nodrošina viskvalitatīvāko un ātrāko pārraidi. Par sakaru sistēmas nozīmīgāko raksturlielumu jāuzskata t. s. sakaru sistēmas caurlaides spēja - informācijas daudzums, ko laika vienībā var pārraidīt pa doto sistēmu, nodrošinot vajadzīgo pārraides precizitātes pakāpi. Pārraides precizitātes pakāpe ir ļoti svarīgs faktors, jo, piemēram, ātri runājot pa telefonu, iegūst sliktu runas saprotamību. Tātad sakaru sistēmas īpatnība ir tā, ka, palielinot pārraides ātrumu jeb sakaru sistēmas caurlaides spēju, pasliktinās pārraides precizitātes pakāpe - kvalitāte. Tādēļ jau pirmajām sakaru sistēmām radās problēma, kā vienlaikus palielināt sistēmas caurlaides spēju un pārraides kvalitāti.

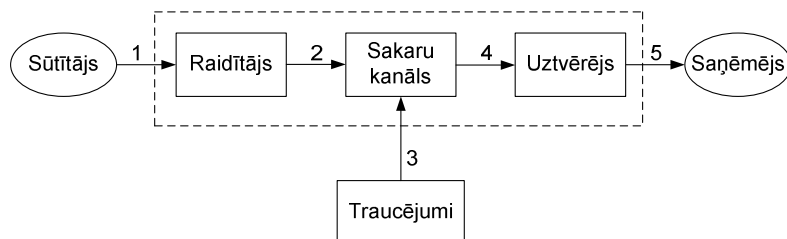
Reālos apstākļos informācija, ko pārraidītājs sūtītājs, atšķiras no informācijas, ko uztvēris saņēmējs. Tas notiek tādēļ, ka uz signālu gan sakaru kanālā, gan raidītājā un uztvērējā iedarbojas traucējumi. Pēc fizikālās dabas traucējumi ir analogi signālam un dažādā veidā tam uzklājas. Traucējumi ne tikai rodas pašā sistēmā, bet arī iekļūst tajā no ārienes.

Ļoti svarīgi, lai sakaru sistēma spētu pretoties kaitīgajai traucējumu iedarbībai uz lietderīgo signālu, t. i., lai sakaru sistēma būtu traucējumnoturīga. Jācenšas sakaru sistēmas realizēt ar iespējami augstāku traucējumnoturību.

Sakaru sistēmu caurlaides spēja un traucējumnoturība atrodas savstarpējā pretrunā: paaugstinot vai pazeminot vienu, pazeminās vai paaugstinās otra. Tādēļ praksē lietderīgi šo jautājumu risināt kompromisa ceļā - iegūt maksimālo sistēmas caurlaides spēju, vienlaikus nodrošinot nepieciešamo traucējumnoturību.

Sakaru sistēmas blokshēma parādīta 5.1. attēlā, kurā pieņemts, ka visu traucējumu avots ir kopīgs un tie uz signālu iedarbojas sakaru kanālā.

Pēc fizikālas dabas sūtītāji, t. i., ziņojumu avoti, var būt visdažādākie, tādēļ arī pārraidāmā informācija ir ļoti dažāda. Visas daudzveidīgās informācijas var klasificēt divās grupās - nepārtrauktajā un diskrētā informācija. Nepārtraukta informācija ir, piemēram, telefona saruna, kur skaņas spiediens uz mikrofona membrānu mainās nepārtraukti. Raksturīgs diskrētās informācijas piemērs ir teksts, ko pārraida pa telegrāfu, jo šeit informāciju veido atsevišķu burtu virkne, bet signālu - punktu, svītru un paužu secība.



5.1. att. **Sakaru sistēmas blokshēma:**

1 – pārraidāmā informācija; 2 – signāls; 3 – traucējumi;
4 – signāls pluss traucējumi; 5 – uztveramā informācija

Pārraidāmā informācija parasti ir neelektriski lielumi: skaņa ir spiediena maiņa laikā, teksts - simbolu kopa (burti, cipari, pieturzīmes), kustošs attēls - apgaismojuma maiņa laikā u. tml. Pa sakaru kanāliem visbiežāk pārraida tikai informācijas elektriskos attēlus - signālus, tādēļ, pārraidot informāciju, tā jāpārveido signālā. Vispirms informāciju pārveido elektriskā signālā. Šādi pārveidotāji ir mikrofons, pārraidot runu vai mūziku, fotoelements, pārraidot attēlus, u. c. Šo iekārtu izejā elektriska sprieguma vai strāvas atsevišķi parametri atbilst informācijas elementiem.

Pa jebkura tipa sakaru līniju dažādi elektriskie lielumi izplatās ar dažādu efektivitāti. Tā, piemēram, pa sakaru kanālu, kuru veido vadi vai kabelis, visefektīvāk izplatās līdzspriegums vai arī zemfrekvences maiņspriegums, bet pa radiokanālu - tikai augstfrekvences elektromagnētiskās svārstības. Tādēļ, lai izveidotu signālu, jābūt t. s. nesējam, kas labi izplatās pa attiecīgo sakaru kanālu. Par nesēju vadu un kabeļu kanālos izmanto līdzstrāvu vai maiņstrāvu, radiokanālos - elektromagnētiskos viļņus. Nesēja īpašības raksturo tā parametri, piemēram, līdzstrāvu raksturo tās virziens un lielums, bet maiņstrāvu un elektromagnētiskās svārstības - amplitūda, frekvence un

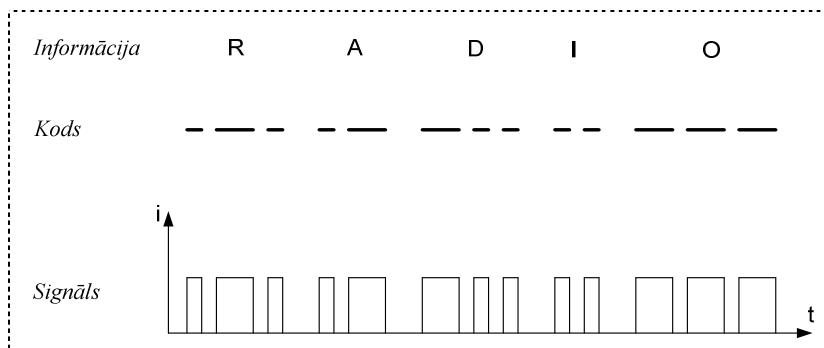
fāze. Kamēr nesēja parametri paliek konstanti, tas nekādu ziņojumu nevar pārnest, izņemot to, ka raidītājs ieslēgts un sagatavots informācijas pārraidei.

Otrs etaps informācijas pārveidošanai signālā ir ziņojuma elektriskā procesa uzklāšana nesējam. Šim nolūkam vienu no nesēja parametriem maina tā, lai katra no iespējamām informācijām viennozīmīgi izteiktos šī maināmā parametra vērtībā. Šo procesu sauc par modulāciju. Nesēju, kura parametrus modulē, t. i., maina atbilstoši informācijai, sauc par signālu. Tā, piemēram, mainot radoraidītāja nesējfrekvences svārstību amplitūdu, iegūst modulētas amplitūdas signālu, mainot frekvenci vai fāzi, - attiecīgi modulētas frekvences vai fāzes signālu. Modulēto signālu pēc tam radoraidītāja antena izstaro apkārtējā vidē, un tas izplatās uz radiouztvērēju antenām.

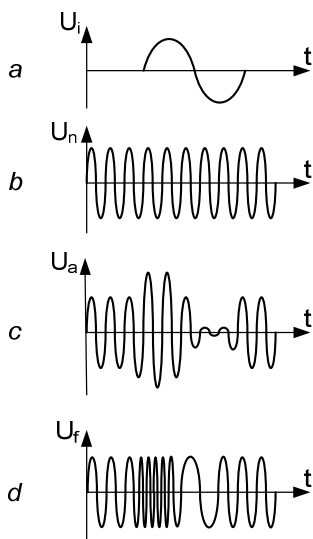
Modulāciju var realizēt, informācijai iedarbojoties tieši uz nesēja parametriem vai arī atbilstoši noteiktam kodam. Jebkuru ziņojumu var pārraidīt ar simbolu virkni, kur jebkuru simbolu savukārt veido dažādu koda elementu kombinācija. Par koda elementiem sauc dažādus elementārus signālus. Elementārajiem signāliem jābūt tādiem, lai uztverošā iekārta varētu pareizi atšķirt elementāros signālus citu no cita. Šai gadījumā ziņojumu var uzskatīt kā elementāru signālu kombināciju virkni.

Pārraidāmai informācijai katram burtam, ciparam vai palīgzīmei atbilstoši kodam viennozīmīgi piesaista noteiktu signālu, ko veido koda elementu kombinācija. Jāpiebilst, ka, piemēram, vienu un to pašu teksta burtu var pārraidīt ar dažādiem signāliem atkarībā no izraudzītā koda. Izmantojot pārraidei Morzes kodu, katram burtam vai ciparam atbilst ilgstošu un īslaicīgu elektrisku impulsveidīgu signālu (svītru un punktu) kombinācijas, turpretim, izmantojot vienmērīgo Bodo kodu, tiem pašiem burtiem vai cipariem atbilst vienāda ilguma, bet dažādi kombinēti elektriski impulsi.

Tātad vispārīgā gadījumā, atkarībā no tā, vai pirms modulācijas informācijas elektrisko attēlu kodē, vai ne, vienas un tās pašas informācijas attēlošanai var iegūt dažādus signālus. Līdz ar to starp abiem minētajiem etapiem, kas nepieciešami informācijas pārvēršanai signālā, var ievietot arī kodēšanas etapu. Tā, piemēram, ja pa radiokanālu jāpārraida kaut kāds teksts, katru teksta burtu vispirms pārveido koda nosacītā kombinācijā (ja pārraidei izmanto Morzes kodu, tas ir punktu un svītru kombinācijā). Pārveidojumu diagramma attēlota 5.2. attēlā.



5.2. att. Informācijas kodēšana un pārveidošana signālā



5.3. att. **Modulācijas oscilogrammas:**

- a – informācija; b – nesējfrekvence;
c – amplitūdas modulācija;
d – frekvenču modulācija;

Šo teksta pārveidošanu kodētos elektriskos sūtījumos veic operators vai nu tieši, vai arī ar kaut kādu iekārtu (piemēram, telegrāfa aparātu). Radiosakaru gadījumā par nesēju izmanto augstfrekvences svārstības, kuru frekvenci sauc par nesējfrekvenci. Lai izveidotu signālu, nesējs jāmodulē ar kodētu vai nekodētu elektriskā procesā pārveidotu ziņojumu, t. i., jāmaina nesēja parametri atbilstoši ziņojumam vai tā koda kombinācijām. Var izmantot kā amplitūdas, tā arī frekvences vai fāzes modulāciju. Šādu modulētu signālu oscilogrammas redzamas 5.3. attēlā.

Par nesēju var izmantot arī impulsu virkni. Modulējot tos pēc amplitūdas, ilguma un sekošanas frekvences, iegūst dažāda veida impulsu modulāciju.

Signālu raksturo tā galvenie parametri: ilgums, spektra platums un jaudas dinamiskais diapazons. Signāla pārraidei vienmēr tiek dots galīgs un noteikts laika intervāls. Tādēļ signālu, kas pārnēs noteiktu informāciju, raksturo ar tā ilgumu T_s , ko mēra sekundēs. Nesēja modulācijas dēļ signālam vienmēr rodas noteikts frekvenču spektrs ar platumu F_s , ko mēra hercos. Signāla spektra platums ir atkarīgs no modulācijas veida.

Jebkura fizikāli realizējama iekārta, kas pārveido ziņojumus signālos, var radīt tikai signālus ar ierobežotām tā jaudas maiņām. Apakšējo robežu nosaka traucējumu vidējā jauda P_t sakaru kanālā, jo signāla minimālajai vidējai jaudai vienmēr jābūt lielākai par P_t . Augšējo robežu nosaka signāla maksimālā vidējā jauda, ko iespējams pārraidīt pa kanālu. Tādējādi signālu var vēl raksturot ar jaudas dinamisko diapazonu

$$H_s = \log_2 \frac{P_s}{P_t}, \quad (5.1)$$

kur H_s - jaudas dinamiskais diapazons;

P_s - signāla vidējā jauda;

P_t - traucējumu vidējā jauda.

Ar šiem trim parametriem var raksturot galvenās signāla īpašības, kas nepieciešamas tā pārraidei pa sakaru kanālu. Ērtības labad signālu dažreiz raksturo ar tā tilpumu

$$V_s = H_s F_s T_s. \quad (5.2)$$

Dažādu sakaru veidu frekvenču spektru platumi apkopoti 5-1. tabulā.

Jebkura signāla pārraidei ir nepieciešams atbilstošs sakaru kanāls, kuru raksturo ar pamatparametriem, kas līdzīgi signālu parametriem. Sakaru kanāls efektīvi pārvada tikai ierobežota spektra platuma F_k signālus, pie tam pieļaujamais jaudas dinamiskais diapazons ir H_k . Skaidrs arī, ka informācijas pārraidei sakaru kanālu sūtītājs var izmantot tikai noteiktu laika sprīdi T_k . Tādēļ līdzīgi kā signālu sakaru kanālā var raksturot ar lielumu ko sauc par kanāla tilpumu

$$V_k = H_k F_k T_k. \quad (5.3)$$

5.1. tabula

Dažādu sakaru veidu frekvenču spektru platumi

Sakaru veids	F_s (Hz)
Telegrāfs ar Morzes kodu	400
Telegrāfs ar Bodo kodu	40
Fototelegrāfs	3000
Telefons	4000
Televīzija	$6 \cdot 10^6$
Impulsu pārraide	10^6

Acīmredzams nosacījums, lai signālu ar tilpumu V_s varētu pārraidīt pa kanālu ar tilpumu V_k , ir

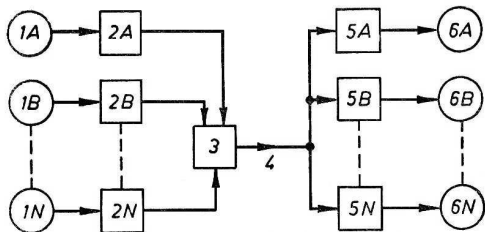
$$V_k \geq V_s \text{ jeb } H_k F_k T_k \geq H_s F_s T_s. \quad (5.4)$$

No šīm formulām izriet, ka, lai signālu salāgotu ar kanālu, signāla parametri jāmaina tā, lai tā tilpums saglabātos. Palielinot signāla pārraides ilgumu T_s , var samazināt frekvenču spektra platumu F_s utt.

Apvienojot vairākus sakaru kanālus, izveidojas daudzkanālu sakaru līnija. Par daudzkanālu sakariem sauc vairāku korespondentu pāru (sūtītāju un saņēmēju) sakarus pa kopīgu sakaru līniju, pie tam katram korespondentu pārim izdalīts atsevišķs sakaru kanāls. Daudzkanālu sakaru līnijām ir lielas ekonomiskas priekšrocības salīdzinājumā ar vienkanāla līnijām, jo vienas N kanālu sakaru līnijas pašizmaksa ir daudz mazāka par N vienkanāla līniju kopējo pašizmaksu.

Daudzkanālu sakaru sistēmas vispārīgā shēma dota 5.4. attēlā. Visu N kanālu signālus summē un pārraida pa vienu daudzkanālu sakaru līniju. Līnijas uztverošajā galā signāli atkal jāatdala cits no cita atbilstoši noteiktajiem sūtītājiem (kanāliem), t. i., katrai uztverošajai iekārtai no signālu summas jāizdala tikai tie signāli, kas atbilst divu attiecīgo korespondentu ziņojumiem. Jābūt nodrošinātai arī pilnīgi neatkarīgai sūtītāju ziņojumu pārraidei, lai katram sūtītājam būtu iespējams pārraidīt savu ziņojumu neatkarīgi no tā, vai notiek signālu pārraide pa citiem kanāliem. No minētā izriet, ka daudzkanālu sakaros ļoti nozīmīga ir

dažādu sūtītāju signālu izdalīšana pēc ziņojumu pārraides pa kopīgu sakaru līniju. Šo uztverošo iekārtu īpašību sauc par selektivitāti.



5.4. att. Daudzkanālu sakaru sistēmas vispārīgā shēma:

1A ... 1N - sūtītāji, 2A ... 2N - raidītāji, 3 - summators, 4 - sakaru līnija, 5A ... 5N - uztvērēji, 6A ... 6N - saņēmēji.

Visizplatītākie ir divi daudzkanālu sakaru līnijas kanālu sadales pamatgadījumi - kanālu frekvenčdale jeb frekvenču transponēšana un kanālu laikdale.

Frekvenču transponēšanas gadījumā atsevišķu kanālu frekvenču spektrus transponē augstāko frekvenču virzienā tā, lai tie novietotos viens otram blakus. Visu šo frekvenču spektru summa pa daudzkanālu sakaru līniju tiek pārraidīta un uztverta līnijas galā. Katrs uztvērējs ar filtru izdala tikai tam vajadzīgo spektru, kuru

transponē (šoreiz zemāko frekvenču virzienā) novietojot spektru tā agrākajā vietā.

Laikdales gadījumā atsevišķu kanālu frekvenču spektrus transponē augstāko frekvenču virzienā tā, lai tie novietotos cits citam blakus. Visu šo frekvenču spektru summa pa daudzkanālu sakaru līniju tiek pārraidīta uz uztverošo līnijas galu. Katrs uztvērējs ar filtru izdala tikai tam vajadzīgo spektru, kuru atkal transponē (šoreiz zemāko frekvenču virzienā), novietojot spektru tā agrākajā vietā.

Kanālu laikdales gadījumā katram signālam ļauj pēc kārtas īsu laika sprīdi izmantot visus līnijas kanālus, t. i., visu kanālu frekvenču spektru summu. Te izmanto galvenokārt impulsu modulāciju. Noteiktā laika momentā līnijai tiek pieslēgts noteikts raidītājs. Uztvērējā, pareizi sagrupējot signālus pēc laika, izdala atsevišķu sūtītāju ziņojumus.

5.2. Modulācija

Amplitūdas modulācija.

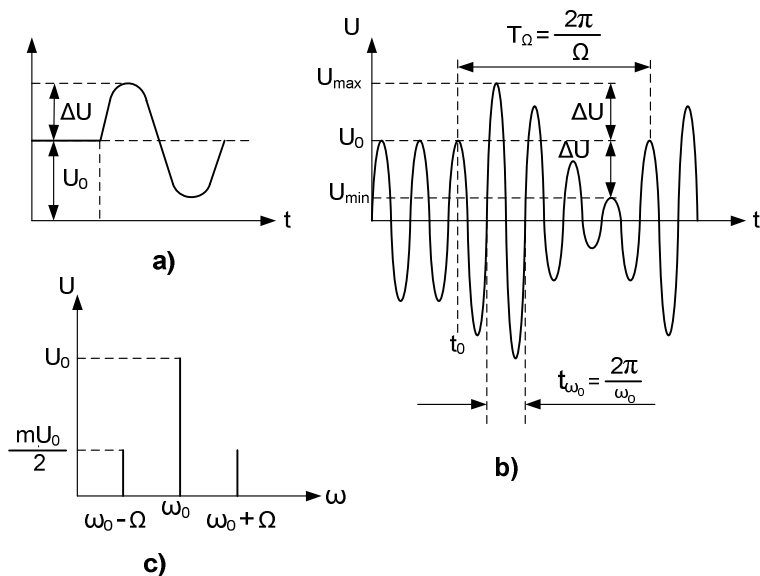
Visvienkāršākā amplitūdas modulācija ir tad, ja nesējfrekvences ω_0 signāla amplitūda mainās pēc sinusoidāla likuma ar frekvenci $\Omega \ll \omega_0$ un sākumfāzi $\varphi = 0$. Nesēja funkcionālā izteiksme ir

$$U = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (5.5)$$

bet modulējošo spriegumu U_m (5.5. att. a) var izteikt šādi:

$$U_m = U_0 + \Delta U \cos \Omega t, \quad (5.6)$$

kur U_0 - līdzsprieguma komponente;
 ΔU - maiņsprieguma komponentes amplitūda.



5.5. att. Ar sinusoīdu modulētas amplitūdas signāls un tā amplitūdu spektrs:

a – modulējošais signāls; b – modulētais signāls; c – amplitūdu spektrs

Ievietojot (5.6) formulā (5.5), iegūst modulēta sprieguma (5.5. zīm. b) momentāno vērtību modulācija sākas laika momentā t_0

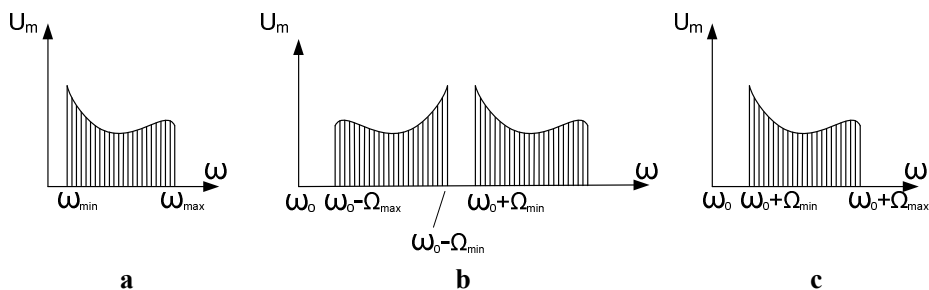
$$U = (U_0 + \Delta U \cos \Omega t) \sin(\omega_0 t + \varphi) = (U_0 (1 + m \cos \Omega t) \sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (5.7)$$

kur $m = \Delta U / U_0$ - amplitūdas modulācijas koeficients,

Ω - modulācijas frekvence,

ω_0 - nesējfrekvence,

U_0 - nesējfrekvences amplitūda.



5.6. att. Modulējoša un modulētā signāla amplitūdu spektri:

a - modulējošā signāla spektrs; b - modulētā signāla spektrs; c - viensāņjoslas modulētā signāla spektrs

Formulā (5.7) izdarot trigonometrisku pārveidojumu

$$U = U_0(1 + m \cos \Omega t) \sin(\omega_0 t + \varphi) = \\ = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) + \frac{mU_0}{2} [(\omega_0 + \Omega)t + \varphi] + \frac{mU_0}{2} \sin[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi], \quad (5.8)$$

iegūst trīs sinusfunkciju summu. Tādēļ var uzskatīt, ka ar sinusoīdu modulētā svārstība ir nesējfrekvences ω_0 sprieguma (ar amplitūdu U_0) un divu sānfrekvenču $\omega_0 \pm \Omega$ spriegumu (ar amplitūdām $mU_0/2$) summa (5.5. att. c).

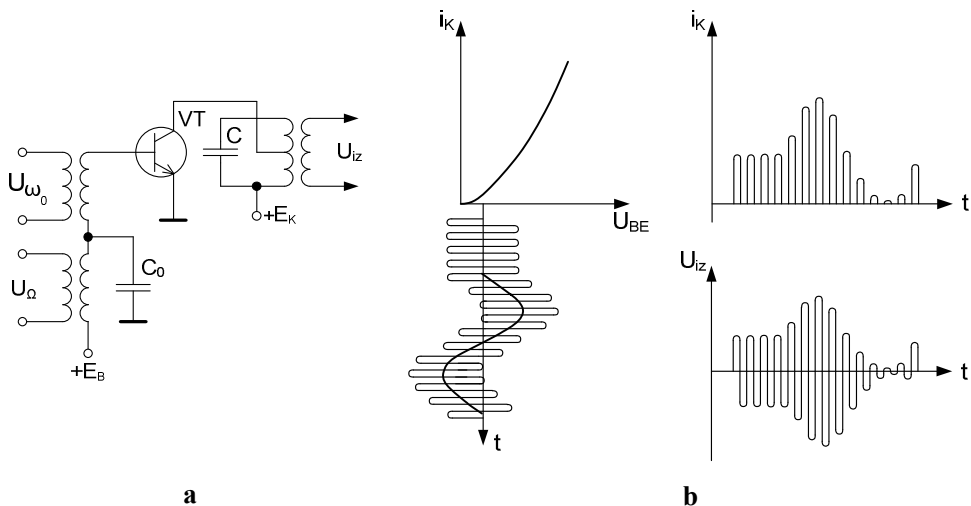
Ja modulējošā signāla frekvence mainās joslā no $\Omega_{\max}$ līdz $\Omega_{\min}$, divu sānfrekvenču vietā ir divas sānjoslas (5.6. att. a un b) un viss modulētā signāla amplitūdu spektrs aizņem frekvenču joslu $\Delta \omega = 2 \Omega_{\max}$.

Modulētas amplitūdas signāla spektra joslu var samazināt nedaudz vairāk nekā uz pusi, ja nomāc vienu sānjoslu un nesējfrekvenci (5.6. att. c). Šai gadījumā pa sakaru kanālu nav jāpārvada nelietderīgā nesēja jauda. Šādu modulāciju sauc par *viensānjoslas modulāciju*. Tās trūkums - sarežģīta detektēšana.

Amplitūdas modulatori. Shēmu pamatā ir rezonanses jaudas pastiprinātājs, kam svārstību kontūrs ieslēgts tranzistora kolektora ķēdē un noskaņots rezonansē ar nesējfrekvenci ω_0 , ko pievada pastiprinātāja ieejā. Modulējošo signālu U_Ω pastiprinātājam var pievadīt dažādi - gan bāzes, gan kolektora, gan emitera ķēdei. Atkarībā no tā, kurā ķēdē ievada modulējošo spriegumu, modulatoru attiecīgi sauc par bāzes modulatoru, kolektora modulatoru vai emitera modulatoru. Iespējamās arī kombinētās modulācijas shēmas, kurās modulējošo spriegumu vienlaikus pievada tranzistora bāzes un kolektora ķēdēm. Visās modulatoru shēmās jābūt ievērotam vienotam principam: barošanas spriegumam, modulējošam spriegumam un nesējfrekvences spriegumam, ko pievada attiecīgajiem elektrodiem, vienmēr jābūt slēgtiem virknē.

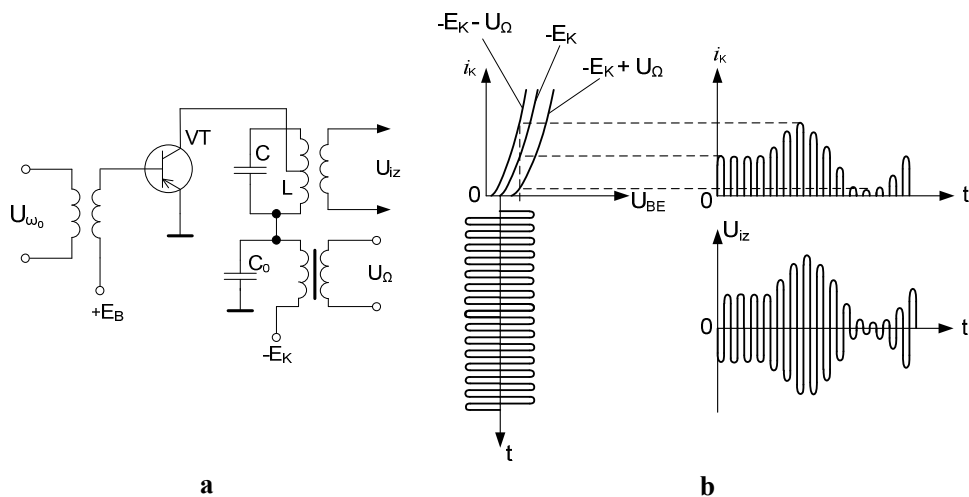
Bāzes modulatora shēma parādīta 5.7. attēlā a, bet 5.7. attēlā b - tā spriegumu un strāvu laika diagrammas. Tranzistora bāzei pievada nesējfrekvences spriegumu U_ω (no pašierosmes augstfrekvences ģeneratora) un modulējošo spriegumu U_Ω . Zemfrekvences transformatora tinumu, kas ieslēgts modulatora bāzes ķēdē, šuntē kondensators C_0 , kam piemīt maza pretestība nesējfrekvencei, bet liela pretestība - modulējošai frekvencei. Priekšsprieguma E_B avots bāzes ķēdē nodrošina pastiprinātāja darbību B klases režīmā. Kolektora ķēdē esošais svārstību kontūrs LC noskaņots rezonansē ar frekvenci ω_0 .

Shēmas darbības principa izskaidrošanai var izmantot tranzistora kopemitera slēguma pārejas raksturlielni $i_K = f(U_{BE})$. Tā kā $\omega_0 \gg \Omega$, tuvināti var uzskatīt, ka modulējošais spriegums U_Ω it kā maina priekšsprieguma vērtību (treknā $U_{BE} = f(t)$ līkne). Tādējādi nesējfrekvences «laika ass» izliecas atbilstoši modulējošam spriegumam. Kontūrs kolektora ķēdē izdala nesēj frekvenci un sānjoslas, ko aizvada induktīvi.



5.7. att. **Bāzes modulators:**
 a – shēma; b – spriegumu un strāvu laika diagrammas

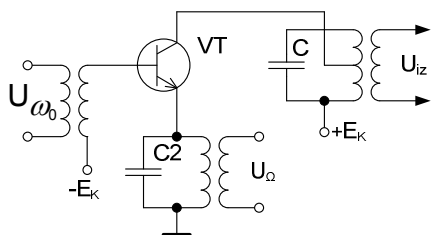
Pie shēmas priekšrocībām pieder iespēja iegūt pietiekami lielu modulācijas koeficientu m , pie tam modulējošā signāla spriegums un jauda ir samērā mazi.



5.8. att. **Kolektora modulators:**
 a – shēma; b – spriegumu un strāvu - laika diagrammas

Shēmas trūkums ir mazs kolektora ķēdes lietderības koeficients nesējfrekvences režīmā un maza modulācijas koeficienta gadījumā, tādēļ kolektora izkliedes jauda ir samērā liela. Bez tam, kad $m > 0,6 \dots 0,7$, parādās ievērojami kropļojumi.

Kolektora modulatora shēma parādīta 5.8. attēlā *a*, bet 5.8. attēlā *b* - tā spriegumu un strāvu laika diagrammas. Atšķirībā no bāzes modulatora modulējošo spriegumu kolektora modulatoram ievada tranzistora kolektora ķēdē. Shēmas darbības principa izskaidrošanai var izmantot tranzistora kopemitera slēguma pārejas raksturlīkņu $i_K = f(U_{BE})$ saimi ar parametru U_{KE} . Šai gadījumā tuvināti var uzskatīt, ka modulējošais spriegums U_Ω maina kolektora barošanas avota spriegumu robežās no $-E_K + U_\Omega$ līdz $-E_K - U_\Omega$. Kaut arī atsevišķo raksturlīkņu savstarpējā nobīde ir samērā niecīga, sakarā ar līkņu lielo stāvumu kolektora strāvu aptverošā raksturlīkne mainās ievērojami. Pārējais notiek tāpat kā bāzes modulatorā. Shēmu raksturo labi enerģētiskie rādītāji, taču tai piemīt arī trūkumi - liela vajadzīgā modulējošā signāla jauda un ievērojami kropļojumi liela modulācijas koeficienta gadījumā.



5.9. att. **Emitera modulators**

Emitera modulatora (5.9. att.) darbības princips ir diezgan tuvs kolektora modulatora darbības principam. Emitera modulatoram ar modulējošo signālu stūrē tranzistora emitera strāvas lielumu, tā rezultātā iegūstot kolektora strāvu aptverošu raksturlīkni. Šai shēmai ir tikpat zemi enerģētiskie rādītāji kā bāzes modulatoram un vajadzīga liela modulējošā signāla jauda. Savukārt kropļojumi, sevišķi tad, ja $m > 0,7 \dots 0,75$, ir ievērojami mazāki nekā bāzes modulatoram.

Frekvences un fāzes modulācija.

Frekvences modulācijā sinusoidālā sprieguma (5-5) frekvence ω ir laika funkcija. Vienkāršākajā gadījumā

$$\omega = \omega_0 + a\Delta U \cos \Omega t = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t, \quad (5.9)$$

kur ω_0 - modulējamo svārstību vidējā frekvence (ja modulācijas nav);

a - proporcionalitātes koeficients;

ΔU un Ω - modulējošā sprieguma amplitūda un frekvence;

$\Delta\omega = a\Delta U$ - frekvences deviācija - modulēto svārstību leņķiskās frekvences novirze no vidējā lieluma ω_0 , kas proporcionāla tikai modulējošā sprieguma amplitūdai ΔU .

Ja formulu (5.5) pārraksta citādā formā

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi) = U_m \sin \alpha, \quad (5.10)$$

fāzi, a var izteikt šādi:

$$\alpha = \int_0^t \omega dt + \varphi = \int_0^t (\omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t) dt + \varphi =$$

$$= \omega_0 t + \frac{\Delta\Omega}{\Omega} \sin \Omega t + \varphi. \quad (5.11)$$

Lielumu

$$\frac{\Delta\Omega}{\Omega} = m_f \quad (5.12)$$

sauc par frekvences modulācijas indeksu.

Spriegums ar modulētu frekvenci tāpat izsakāms šādi:

$$U = U_m \sin (\omega t + m_f \sin \Omega t + \varphi). \quad (5.13)$$

Ja sākumfāze ir nulle ($\varphi = 0$), formula (5.13) kļūst vienkāršāka:

$$U = U_m \sin (\omega t + m_f \sin \Omega t). \quad (5.14)$$

Saskaņā ar Beseļa funkciju teoriju formula (5.14) ir ekvivalenta sinusoidālu svārstību summai:

$$U = U_m \{ J_0(m_f) \sin \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} [J_n(m_f) \sin(\omega_0 + n\Omega)t + (-1)^n J_n(m_f) \sin(\omega_0 - n\Omega)t] \}, \quad (5.15)$$

kur $J_0(m_f)$ un $J_n(m_f)$ - pirmā veida nulltās un n-tas kārtas Beseļa funkcija, kuras arguments ir frekvences modulācijas indekss m_f .

Formula (5.15) rāda, ka ar sinusoidālas formas signālu modulētas frekvences svārstību spektrs sastāv no nesējfrekvences un bezgalīga skaita tai simetrisku sānfrekvenču. Ta kā Beseļa funkciju vērtības, palielinoties kārtai, ļoti strauji samazinās, praktiski pieņem, ka sānfrekvenču skaits ir $2n = 2(m_f + 1)$, t. i., Beseļa funkcijas augstākā kārtā ir $n = m_f + 1$.

Fāzes modulācija

Fāzes modulācijā sinusoidālā sprieguma (5.5) fāze ir laika funkcija. Vienkāršākajā gadījumā

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi \sin \Omega t, \quad (5.16)$$

kur φ_0 - modulējamo svārstību sākumfāze;

$\Delta\varphi = m_\varphi$ - fāzes modulācijas indekss.

Tāpat spriegumu ar modulētu fāzi var izteikt šādi:

$$u = U_m \sin (\omega t + \varphi_0 + \Delta\varphi \sin \Omega t) = U_m \sin (\omega t + \varphi_0 + m_\varphi \sin \Omega t). \quad (5.17)$$

Kā redzams, formula (5.17) ārēji līdzīga formulai (5.13). Tas liecina par frekvences un fāzes modulācijas lielo līdzību.

Fāzes modulācijā indekss $\Delta\varphi = m_\varphi$ nav atkarīgs no modulācijas frekvences, bet frekvences modulācijas gadījumā tās indekss $m_f = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$ ir atkarīgs no modulācijas frekvences apgriezti proporcionāls tai. Lai fāzes modulāciju pārvērstu frekvences modulācijā, jāpanāk m_φ atkarība no frekvences Ω .

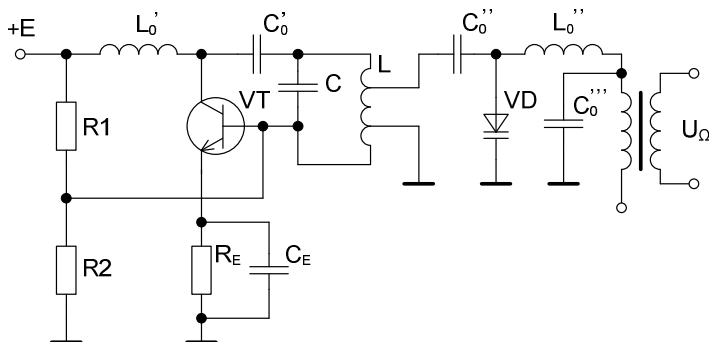
Praksē galvenokārt lieto frekvences modulāciju, kura ļauj ievērojami samazināt traucējumu iedarbi uz signālu sakaru kanālā.

Frekvences modulatori

Visplašāk lietotie elementi frekvences modulācijas iegūšanai ir varikaps un reaktīvais tranzistors, kuri maina pašsvārstību ģenerators svārstību kontūra kapacitātes C vērtību. Tā rezultātā kontūra rezonanses frekvence mainās saskaņā ar modulējošā sprieguma parametru izmaiņām.

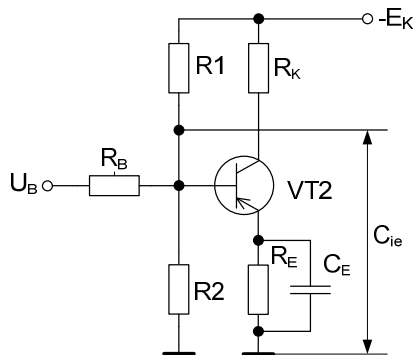
Kā zināms, varikapiem $p-n$ pārejas kapacitāte ir ievērojami atkarīga no sprostvirzienā pieslēgtā līdzsprieguma vērtības. Ieslēdzot varikapu pašerosmes ģenerators svārstību kontūrā un ar modulējošo signālu mainot varikapam pieslēgto sprostsprriegumu, panāk ģenerētā signāla frekvences maiņu, kas proporcionāla modulējošā signāla amplitūdai.

Šāda frekvences modulatora shēma redzama 5.10. attēlā. Induktīvā trīspunktu slēguma pašerosmes ģenerators kontūram cauri pārejas kondensatoram C''_0 pieslēgts varikaps VD . Uz varikapu caur augstfrekvenci bloķējošai spolei L''_0 padod virknē slēgtus spriegumus - līdzspriegumu E_0 (no avota) un modulējošo spriegumu U_Ω . Ar E_0 varikapam iestata vidējo kapacitāti, kad $U_\Omega = 0$. Modulējošā sprieguma iedarbības rezultātā mainās varikapa pārejas kapacitāte un līdz ar to arī ģenerators svārstību kontūra rezonanses frekvence.



5.10. att. Varikapa frekvences modulators

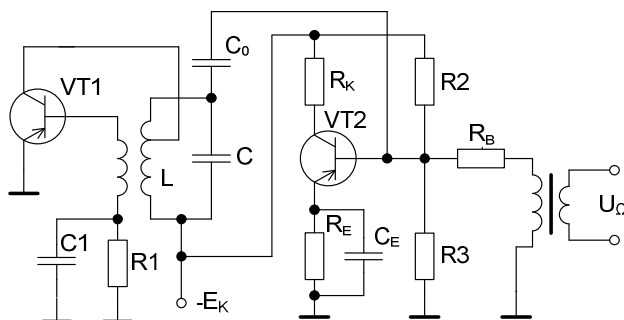
Reaktīvā tranzistors shēmas (5.11. att.) ieejas kapacitāte ir



5.11. att. **Reaktīvais tranzistors**

Reaktīvā tranzistora $VT2$ ieejas kapacitāte, ko maina modulējošais spriegums U_{Ω} , cauri pārejas kondensatoram C_0 pieslēgta pašerosmes ģenerators kontūram un modulācijas ritmā maina tā rezonanses frekvenci.

Eksistē arī daži citi paņēmieni frekvences modulācijas iegūšanai.



5.12. zīm. **Reaktīvā tranzistora frekvences modulators**

5.3. Signālu detektēšana

Detektori (tos dažreiz sauc arī par demodulatoriem) no modulēta signāla izdala modulējošo spriegumu. Detektoru pamatā ir nelineārs četrpolis.

Amplitūdas detektori. Šie detektori detektē modulētas amplitūdas signālu. Četrpolos par nelineāriem elementiem izmanto, diodes un tranzistorus.

Nozīmīgākais amplitūdas detektora parametrs ir sprieguma pārvades koeficients

$$K_d = \frac{U_{\Omega}}{mU_{\omega}}, \quad (5.19)$$

kur U_{Ω} - modulējošā sprieguma amplitūda;
 m - amplitūdas modulācijas koeficients;

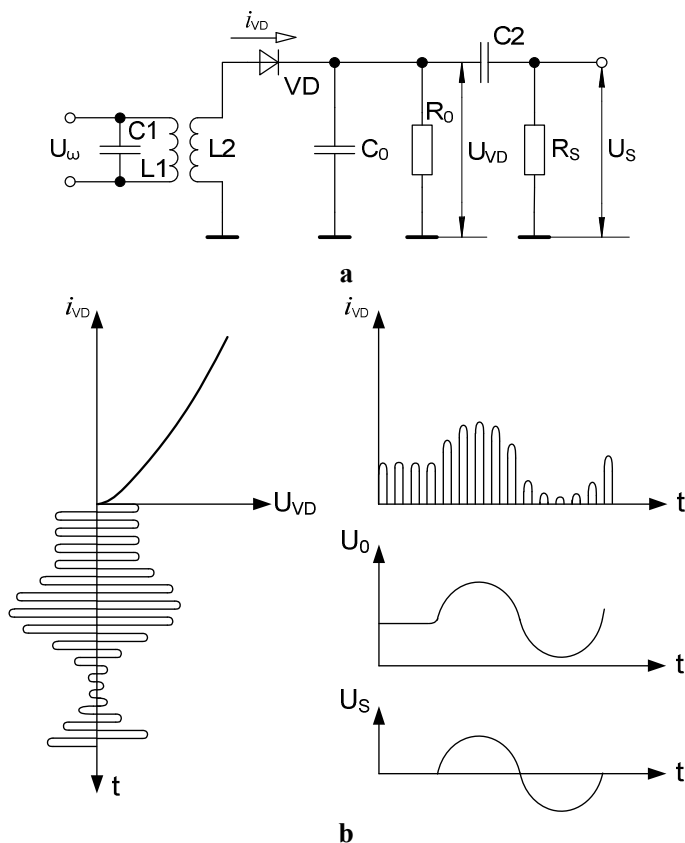
U_o - nesējfrekvences sprieguma amplitūda.

Visplašāk lieto virknes diodes detektorus (5.13. att. a). Tie labi detektē lielas amplitūdas signālus, nav bīstamas pārslodzes un rada nelielus nelineāros kropļojumus.

Modulētais signālu detektora ieejā parasti pievada caur saistītiem kontūriem $L1$ $C1$ un $L2$. Modulētais spriegums diodes ķēdē rada pulsējošu strāvu i_{VD} (5.13. att. b). Diodei caurplūstošā modulētā signāla amplitūda, kurai jābūt pietiekami lielai, lai izmantotu diodes voltampēru raksturlīknes $i_d = f(U_{VD})$ lineāro daļu, mainās ar modulācijas frekvenci Ω .

Ja izvēlas $\frac{1}{\omega C_0} \ll R_0 \ll \frac{1}{\Omega_{\max} C_0}$, diodes strāvas zemfrekvences komponente noslēdzas caur rezistoru R_o , bet augstfrekvences komponente – caur kondensatoru C_o . Lai no detektētā zemfrekvences signāla atdalītu līdzsprieguma komponenti, starp slodzes rezistoru R_S un detektoru slēdz pārejas kondensatoru $C2$, kuru izvēlas pēc nosacījuma $\frac{1}{\Omega C_1} \ll R_S$.

Lai detektēšana notiktu bez kropļojumiem, jābūt $U_\Omega \geq 1$ V. Diodes detektoriem sprieguma pārvades koeficients $K_d \approx 1$.



5.13. att. **Diodes detektors:**

a – shēma; b – spriegumu un strāvu laika diagrammas

Lai vienlaikus ar detektēšanu realizētu arī detektētā signāla pastiprināšanu, t. i., iegūtu $K_d > 1$, izmanto tranzistorus. Shēmas veido gan kopemitera, gan kopbāzes, gan kopkolektora slēgumos. Praktiski visbiežāk lieto kopemitera

$$C2 \geq \frac{5 \dots 10}{\Omega_{\min} R_2}.$$

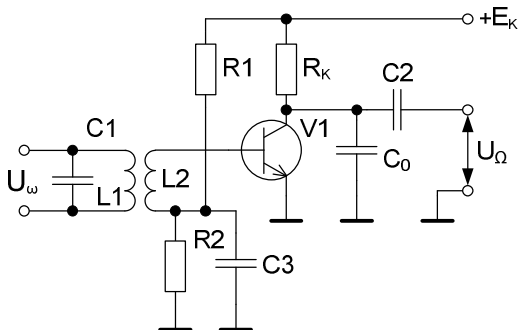
Taisngrieža funkcijas shēmā izpilda tranzistora emitera pāreja, bet slodzes rezistora funkcijas - rezistors R_k , uz kuru krīt detektētā un pastiprinātā sprieguma zemfrekvences komponente. Augstfrekvences komponente noslēdzas caur kondensatoru C_0 . Detektēto spriegumu noņem no slodzes rezistora caur pārejas kondensatoru $C2$.

Frekvences detektori.

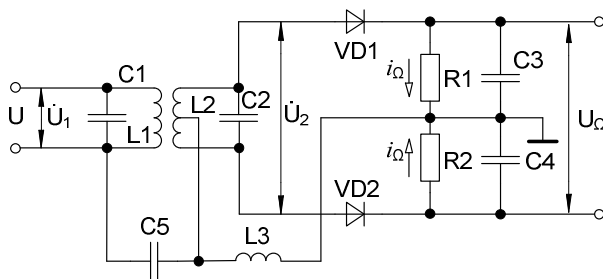
Frekvences detektoru uzdevums ir detektēt modulētas frekvences svārstības. Shēmu uzbūves pamatā ir diodes. Visplašāk lieto divu veidu frekvences detektorus – diskriminatorus un attiecību detektorus. Šajās shēmās signāla frekvences maiņa pārveidojas atbilstošā amplitūdas maiņā, ko detektē ar parastu amplitūdas detektoru.

Diskriminatora shēma parādīta 5.15. attēlā. Tās pamatā ir divtaktu taisngriezis, kuru veido diodes $VD1$ un $VD2$, un divi noskaņoti kontūri $L1C1$ un $L2C2$. Abus kontūras noskaņo rezonansē ar vidējo frekvenci ω_0 . Detektēto spriegumu U_Ω noņem no detektora slodzes, ko veido virknē slēgti rezistori $R1$ un $R2$. Pa šiem rezistoriem pretējos virzienos plūst abu diožu detektētā strāva. Drosele $L3$ noslēdz diožu līdzstrāvas ķēdes, kā arī atsaista diožu izejas no kontūra $L2C2$ augstfrekvences strāvām. Bloķējošie kondensatori $C4$ rada niecīgu pretestību vidējas frekvences strāvām, tādēļ diožu katodos nav augstfrekvences komponentes (attiecībā pret zemējumu). Kondensators $C5$ atdala kontūras $L1C1$, un $L2C2$ (līdzstrāvas komponentei).

Viegli pārlicināties, ka katras diodes anodam tiek pievadīta kontūra $L1C1$ pilna maiņsprieguma (caur $C5$) un kontūra $L2C2$ maiņsprieguma puses summa. Kontūra $L1C1$ pilnais maiņspriegums attiecībā pret kontūra $L2C2$ maiņspriegumu pusēm ir nobīdīts fāzē. No saistīto kontūru teorijas var viegli pierādīt, ka spriegumu

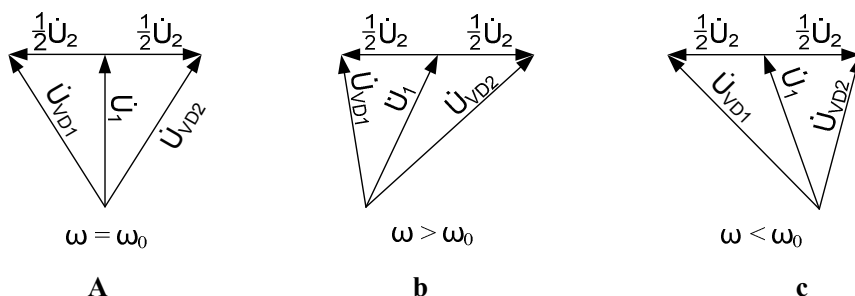


5.14. att. Tranzistora kopemitera detektors



5.15. att. Diskriminators

vektoru diagrammām ir 5.16. attēlā redzamais veids, kur, $\dot{U}_1$ un $\dot{U}_2$ - diožu anodspriegumi, $\dot{U}_1$ un $\dot{U}_2$ - spriegumi uz attiecīgajiem kontūriem. Rezonanses gadījumā (kad modulācijas nav, t. i., $\omega = \omega_0$) vektoru diagrammai ir 5.16. attēlā *a* attēlotais veids. Tā kā fāzes leņķis starp $\dot{U}_1$ un $\dot{U}_2$ ir $\varphi = \frac{\pi}{2}$, simetriskai shēmai $\dot{U}_1$ un $\dot{U}_2$ ir vienādi pēc amplitūdas. Līdz ar to vienādas ir arī detektētās strāvas i_Ω un šo strāvu radītie sprieguma kritumi uz vienādajiem slodzes rezistoriem R . Tā kā šie spriegumi ir pretfāzē (strāvas i_Ω plūst pretējos virzienos), detektētais spriegums U_Ω shēmas izejā ir nulle.

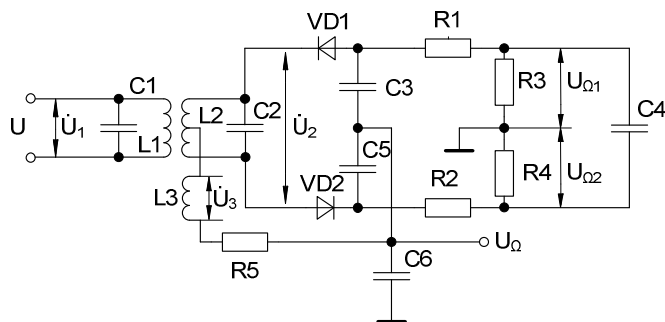


5.16. att. **Diskriminatora vektoru diagrammas:**
a - modulācijas nav; *b* un *c* - modulācija ieslēgta

Ieslēdzot modulāciju ($\omega \neq \omega_0$), fāzes leņķis starp spriegumiem $\dot{U}_1$ un $\dot{U}_2$ kļūst $\varphi \neq \frac{\pi}{2}$ un $\dot{U}_{VD1} \neq \dot{U}_{VD2}$. Tātad detektētie spriegumi uz rezistoriem $R3$ un $R4$ vairs nav vienādi (5.16. att. *b* un *c*), tādēļ arī detektētais izejas spriegums $U_\Omega \neq 0$. Jo vairāk ω atšķiras no ω_0 , jo vairāk U_Ω atšķiras no nulles. Tātad shēmas darbības rezultātā iegūst zemfrekvences spriegumu.

Līdzīga aplūkotajai shēmai ir attiecību detektora shēma (5.17. att.). Spriegums uz katras diodes sastāv no kontūra $L2C2$ sprieguma puses $\frac{1}{2} \dot{U}_2$ un papildu tinuma $L3$ sprieguma $\dot{U}_3$ summas. Mainot tinuma $L3$ vijumu skaitu, var iegūt tādu spriegumu $\dot{U}_3$, ka maksimāli tiek nomākta parazītiskā amplitūdas modulācija.

Detektēto spriegumu $U_{\Omega 1}$ un $U_{\Omega 2}$ vērtību attiecība uz slodzes rezistoriem $R3$ un $R4$ ir proporcionāla spriegumu vērtību attiecībai uz diodēm, jo detektēto spriegumu summa $U_{\Omega 1} + U_{\Omega 2}$ gandrīz nav atkarīga no samērā ātrām signāla amplitūdas maiņām, t. i., no amplitūdas modulācijas. Jāatceras, ka amplitūdas modulāciju ierobežo spriegums uz kondensatora $C4$. Tā kapacitāte ir ļoti liela (vairāki mikrofaradi), tādēļ spriegums uz slodzes rezistoriem $R3$ un $R4$ laikā mainās maz.



5.17. att. Attiecību detektors

Ja signālam nav parazītiskās amplitūdas modulācijas, $U_{\Omega 1} + U_{\Omega 2} = \text{const}$ un $C4$ neietekmē detektora darbību. Ja signālam ir parazītiskā amplitūdas modulācija, $U_{\Omega 1} + U_{\Omega 2}$ cenšas pieaugt vai samazināties, tā rezultātā mainās strāva caur $C4$. Bet šī strāva plūst arī cauri diodēm, tādēļ, tai pieaugot vai samazinoties, svārstību kontūrs $L2C2$ tiek vairāk vai mazāk slogots, kas savukārt rada $\dot{U}_2$ samazināšanos vai palielināšanos. Tātad te zināmā mērā rodas pretsaites efekts.

Rezistori $R1$ un $R2$, kas ir it kā daļa no slodzes rezistoriem $R3$ un $R4$, iznesti ārpus $C4$ stabilizējošās darbības sfēras, lai ar $R1$ un $R2$ varētu simetrizēt shēmu. Kondensatori $C3$ un $C5$ izpilda tādas pašas funkcijas kā $C5$ diskriminatorā - cauri tiem noslēdzas vidējas frekvences strāvas.

Rezistors $R5$ nogludina diožu strāvu galotnes, ja signāla līmeņi ir lieli, bet kondensators $C6$ rada vidējas frekvences strāvām īsslēgumu ar zemējumu.

Attiecību detektora pozitīvās īpašības ir augsta jutība, liels pastiprinājuma koeficients un labi nomāc parazītiskās amplitūdas modulācijas.

5.4. Signālu frekvences pārveidošana

Pie signālu frekvences pārveidošanas pieder frekvences transponēšana, daudzkāršošana un dalīšana.

Par *frekvences transponēšanu* (jaukšanu) sauc vienas frekvences vai vesela frekvenču spektra signālu pārvietošanu citā frekvenču spektra daļā. Shēmas, kas realizē šo procesu, sauc par frekvences transponētājiem, jaucējiem vai pārveidotājiem. To pamatā ir nelineārs četrpols. Lai realizētu transponēšanu, vajadzīgs vēl otrs noteiktas un konstantas frekvences ω_0 avots (ģenerators). Iedarbojoties uz nelineāru ķēdi ar transponējamās frekvences ω_t un konstantas frekvences ω_0 signāliem, četrpola izejā parādās signāls, kas satur abu frekvenču dažādu harmonisko kombinācijas $n\omega_0 \pm k\omega_t$, kur n un k - jebkurš vesels skaitlis. Vienkāršākajā gadījumā transponēto frekvenci ω iegūst, ja $k = n = 1$, t.i. $\omega = \omega_0 \pm \omega_t$.

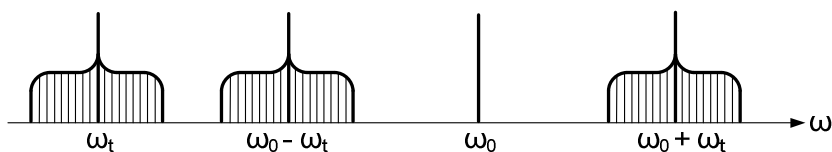
Transponēšana uzskatāmi parādīta 5.18. attēlā, kur signāls ar pamatfrekvenci ω_t tiek pārvietots augstāko frekvenču virzienā.

Par signāla frekvences daudzkāŗšošanu sauc šī signāla frekvences palielināšanu veselu skaitu reiŗu. Tātad, ja frekvences daudzkāŗšoŗāja ieejā ir signāls ar frekvenci ω , izejā parādās signāls ar frekvenci $n\omega$, kur $n = 1, 2, 3, 4, \dots$.

Par signāla frekvences dalīŗšanu sauc šī signāla frekvences samazināšanu veselu skaitu reiŗu.

Frekvences transponēŗtāji (jaucēŗji). Kā jau minēts, frekvences transponēŗtāju pamatā ir nelineārs četrpols. Tā voltampēru raksturlīkni $i = f(u)$ var aprakstīt ar pakāŗpu rindu:

$$I = f(u) = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3 + \dots + a_n u^n. \quad (5.20)$$



5.18. att. **Frekvences transponēŗšanas princips**

Ja pieņem, ka uz šādu nelineāru četrpolu iedarbojas divi virknē slēgti kosinusoidāli spriegumi

$$u = U_0 \cos \omega_0 t + U_t \cos \omega_t t, \quad (5.21)$$

tad, ierobeŗojoties ar trim pirmajiem rindas locekļiem, strāva ir

$$\begin{aligned} i &= a_0 + a_1 U_0 \cos \omega_0 t + a_1 U_t \cos \omega_t t + a_2 (U_0 \cos \omega_0 t + \\ &+ U_t \cos \omega_t t)^2 + \dots = a_0 + a_1 U_0 \cos \omega_0 t + a_1 U_t \cos \omega_t t + \\ &+ a_2 (U_0^2 \cos^2 \omega_0 t + 2a_2 U_0 \cdot U_t \cos \omega_0 t \cos \omega_t t + \\ &a_2 U_t^2 \cos^2 \omega_t t + \dots = a_0 + a_1 U_0 \cos \omega_0 t + a_1 U_t \cos \omega_t t + \\ &+ a_2 U_0^2 \cos^2 \omega_0 t + a_2 U_0 \cdot U_t \cos (\omega_0 + \omega_t)t + \\ &+ a_2 U_0 \cdot U_t \cos (\omega_0 - \omega_t)t + a_2 U_t^2 \cos^2 \omega_t t + \dots \end{aligned} \quad (5.22)$$

No formulas (5.22) redzams, ka strāva nelineāra četrpola izejā satur harmoniskās ar frekvencēm ω_0 , ω_t , $\omega_0 + \omega_t$, $\omega_0 - \omega_t$ u.c. Jaucēŗju izejās parasti izdala harmoniskās ar frekvencēm $\omega_0 + \omega_t$, vai $\omega_0 - \omega_t$, rezonansē ar vienu no tām noskaņo svāŗstību kontūru.

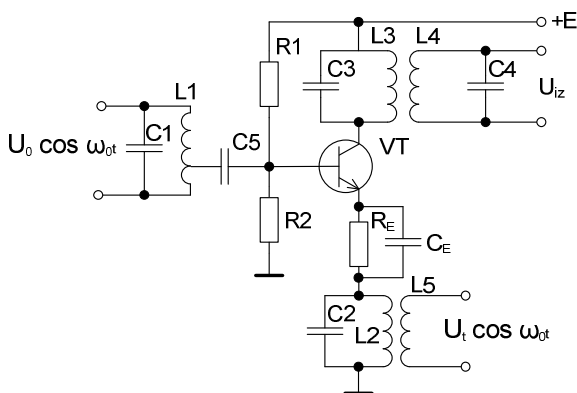
Jaucēŗjos parasti izmanto tranzistoru statiskās raksturlīknes $I_K = \varphi(u_{BE})$ sākuma nelineāro daļu. Abus signālus ievada vai nu vienā tranzistora elektroda ķēdē, vai arī divās elektrodu ķēdēs. Jaucēŗja shēma parādīŗta 5.19. attēlā, kurā redzam, ka vienu no signāliem ievada tranzistora bāzes, bet otru - emitera ķēdē.

Signālu $U_0 \cos \omega_0 t$ ievada no kontūra $L1C1$ tieši bāzes ķēdē cauri pārejas kondensatoram $C5$. Rezistori $R1$ un $R2$ ieregulē bāzes režīmu, bet elementi R_E un C_E rada automātisko nobīdi. Signālu $U_t \cos \omega_t t$ emitera ķēdē ievada inductīvi (kontūri $L5$ un $L2C2$). Transistoram kolektora slodzi rada kontūrs $L3C3$, kas noskaņots rezonansē ar harmonisko $\omega_0 + \omega_t$ vai $\omega_0 - \omega_t$. Izejas spriegumu no šī kontūra noņem inductīvi (kontūrs $L4C4$).

Frekvences daudzkāršotāji.

Frekvenču daudzkāršošanai praksē parasti lieto B vai C klases pastiprinātāju, kuram izejas signāls ir stipri kropļots attiecībā pret ieejas signālu. Par pastiprinātāja slodzi izmanto rezonanses kontūru, kas noskaņots uz vienu no signāla augstākajām harmoniskajām.

Frekvences dalītāji. Visplašāk pielieto t.s. reģeneratīvo frekvences dalītāju. Tā blokshēma redzama 5.20. attēlā. Jaucēja pakāpei 1

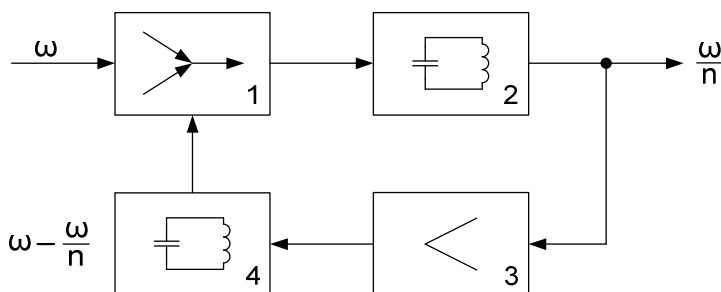


5.19. att. **Frekvenču jaucējs**

pievada dalāmo frekvenci ω un frekvenci $\omega - \frac{\omega}{n}$. Rezonanses sistēma (kontūrs) 2

jaucēja izejā noskaņota rezonansē ar frekvenci $\omega - \omega + \frac{\omega}{n} = \frac{\omega}{n}$. Daļu no dalītās frekvences signāla pastiprina nelineārs pastiprinātājs 3, kura izejā rezonanses sistēma

(kontūrs) noskaņota uz harmonisko $\omega - \frac{\omega}{n}$. Šīs frekvences signālu tad arī caur kontūru 4 pievada vienai no jaucēja ieejām. Dalītās frekvences signālu noņem no jaucēja rezonanses sistēmas 2. Shēma sāk darboties, tikko tai pievada dalāmo frekvenci ω . Rezonanses sistēmu kontūriem jābūt ar augstu labumu, lai nomāktu nevajadzīgās blakus harmoniskās svārstības.



5.20. att. **Reģeneratīvais frekvences dalītājs:**

1 - jaucējs, 2 un 4 - rezonanses kontūri, 3 - pastiprinātājs

5.5. Radiolīnijas

Šajā nodaļā sīkāk iepazīsimies ar dažāda veida radiolīniju uzbūvi un lietošanu sakaru sistēmās. Ņemot par uzskatāmu piemēru: gaismas izstarošanu, izplatīšanos un uztveršanu (gaisma taču arī ir elektromagnētiskais starojums), *nevērstas darbības radiolīnija* būs tāda līnija, kura, līdzīgi kā elektriskā spuldze, staro vienmērīgi uz visām pusēm. Gaismu uztver visi priekšmeti neatkarīgi no tā, vai tie gaismas enerģiju pēc tam kaut kā pārveido, kā tas notiek fotoelementos, vai ne. Daļa priekšmetu gaismu atstaro, daži pat ļoti labi, piemēram, metāla priekšmeti ar gludām virsmām. Ja spuldzi novieto paraboliska spoguļa fokusā, tad gaisma, kas krīt uz spoguļa virsmas, tiek sakopota šaurā kūlī un virzīta noteiktā virzienā. Šādā veidā tālu esošus priekšmetus var izgaismot tikpat labi, it kā elektriskā spuldze būtu turpat blakus. Tā ir uzbūvēts prožektors, kura raidīto gaismas kūlī var uzskatīt par *vērstas darbības radiofonijas* piemēru.

Visām elektromagnētisko viļņu izstarošanas un uztveršanas ierīcēm, tajā skaitā arī gaismas avotiem un gaismas uztvērējiem ir vairāki parametri, kas raksturo šo ierīču raidīšanas un uztveršanas spējas dažādos virzienos. Vienu no šiem parametriem sauc par vērsuma diagrammu. Antenām tā raksturo elektromagnētiskā lauka intensitātes izmaiņas dažādos starojuma virzienos. Intensitāte šajā gadījumā tiek izteikta bezdimensiju vienībās, pieņemot maksimālo vērtību par 1. Vērsuma diagramma uzskatāmi parāda, kādos virzienos elektromagnētiskā enerģija tiek izstarota vairāk, kādos - mazāk.

Pilnīgāku priekšstatu par antenas starošanas raksturu dažādos virzienos dod *telpiskā vērsuma diagramma*, taču tās izveidošanai nepieciešams veikt ļoti daudz mērījumu. Tāpēc parasti aprobežojas ar vērsuma diagrammu mērīšanu divās perpendikulārās plaknēs. Diagrammas maksimums uztvērējantennai nozīmē, ka šī maksimuma virzienā tai ir vislielākā jutība.

Radiolīnijās raidošā un uztverošā antena parasti ir novietota tā, lai to vērsuma diagrammu maksimumi būtu vērsti viens pretī otram. Tas nozīmē, ka raidošā antena uztverošās antenas virzienā izstaro elektromagnētisko lauku ar vislielāko intensitāti, bet uztverošai antennai raidošās antenas virzienā ir vislielākā jutība. Lai antenas īpašības kādā noteiktā, visbiežāk vērsuma diagrammas maksimuma virzienā raksturotu iespējami īsi ar vienu skaitli, izmanto lielumu, ko sauc par antenas pastiprinājuma koeficientu šajā virzienā. Šis koeficients raksturo, cik reizes lielāku lauka intensitāti dotajā virziena rada mērāmā antena salīdzinājumā ar lauku, kas rastos, ja visu antennai pievadīto jaudu izstarotu telpā visos virzienos vienmērīgi. Antenu, kura spēj tā starot, sauc par izotropu. Pastiprinājuma koeficients antenas virziendarbības diagrammas minimuma virzienā ir mazāks par 1; maksimuma virzienā dažām antenām tas sasniedz simtus un pat tūkstošus. Antenu pastiprinājuma koeficientu dažkārt izsaka decibelos:

$$G = 10 \lg \frac{P_a}{P_i},$$

kur G - dotās antenas pastiprinājuma koeficients noteiktā virziena, dB;

P_a - antenas izstarota jauda šajā virziena, W; P_i - izotropās antenas izstarotā jauda šajā virzienā, W.

Jaudas mērījumi jeb aprēķini tiek veikti vienādā attālumā no abām antenām.

Dažāda veida radiolīnijas raksturo vide, kur izplatās elektromagnētiskie viļņi, antenas, kas šos viļņus ierosina un uztver, kā arī raidošā un uztverošā aparātūra. Sīkāk apskatīsim radiolīniju antenas un radioviļņu izplatīšanās vidi.

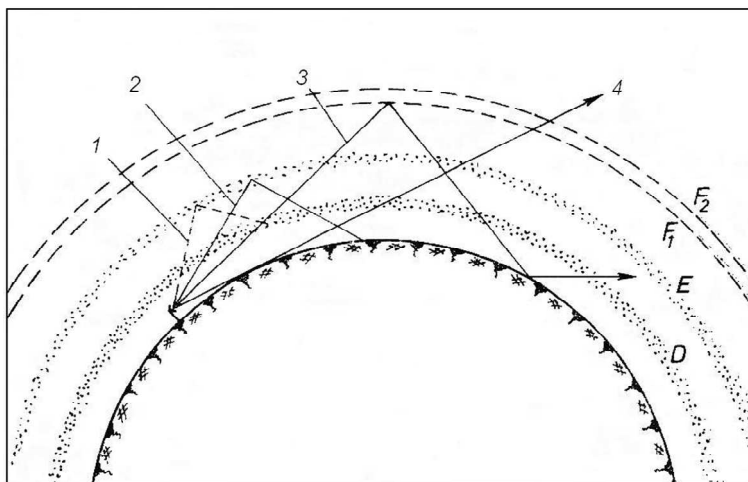
Nevērstas darbības radiolīnijās tipiski piemēri var būt radiofonija un televīzija. Radiofonijā par raidošo antenu izmanto vertikālos nesimetriskos vibratorus. To telpiskā vērsuma diagramma atgādina horizontālu toroīdu. Palielinot antenas augstumu, vērsuma diagrammu var it kā «saplacināt», «izstiept» horizontālā virzienā. Praktiski tas nozīmē, ka uztveršanas punktā elektromagnētiskā lauka intensitāte pieaug un signāla kvalitāte uzlabojas, ja raidītāja jauda ir nemainīga. Galvenā izstarotās enerģijas daļa tiek vērsta tajos virzienos, kuros, var atrasties uztvērējantena. Lai palielinātu teritoriju, kurā uztveršanas apstākļi ir apmierinoši, vajadzētu būvēt ļoti augstas antenas. Taču pārāk augstas antenas izmaksā dārgi, tāpēc parasti būvē tādas antenas, lai to augstums nepārsniegtu vairākus simtus metru. Vertikāla stieņa veidā izveidotai uztvērējantenei ir toroidālas formas vērsuma diagramma, tāpēc varam uztvert jebkuru staciju neatkarīgi no tā, kurā virzienā tā atrodas. Magnētantena ir veidota savādāk. Tās vērsuma diagrammai arī ir toroidāla forma, tikai pati diagramma ir pagriezta uz sāniem par 90° un tās jutības minimums atrodas magnētantenass virzienā. Tāpēc pārnēsājami uztvērēji ir jāgroza tā, lai magnētantenass būtu vērsta perpendikulāri uztveramajai stacijai. Stacionāros uztvērējos izveido grozāmu magnētantenu.

Garā, vidējo un īso viļņu izplatīšanās ap zemeslodi ir ļoti dažāda. Garie viļņi izplatoties apliec zemeslodi, to izplatīšanās ir samērā maz atkarīga no diennakts un gadalaikiem. Garā viļņu raidstaciju dzirdamība praktiski ir atkarīga tikai no attāluma līdz raidītājam un tā jaudas. Vidējo un īso viļņu izplatīšanās ir atkarīga no jonizētajiem slāņiem, kas aptver zemeslodi 80... 300 km augstumā. Šo slāņu īpašības mainās atkarībā no diennakts un gadalaika, kā arī no Saules aktivitātes (5.21. att.).

Vidējos viļņus dienā slāpē viszemāk: esošais slānis D , tāpēc vidējo viļņu raidstacijas dienā ir dzirdamas slikti. Iestājoties naktij, dzirdamība ievērojami uzlabojas, jo nakti slānis D izzūd. Vidējie viļņi slikti apliec zemeslodi, tāpēc dzirdamības robeža tiem ir 500...800 km, raidītāja jaudas palielināšana nedod nekādu efektu. Vistālāk uztvert var īsviļņu raidstacijas. Šie radioviļņi pietiekoši labi atstarojas no jonizētajiem slāņiem E , F_1 un F_2 , kā arī no zemes virsmas, tāpēc, vairāk kārt atstarojoties, tie var apliekt zemeslodi un uztveršanas vietā var nonākt pat no otras - raidītājiem pretējās puses. Šādas īso viļņu īpašības ļauj organizēt sakarus ļoti lielos attālumos, izmantojot mazjaudas raidītājus. Taču īso viļņu izplatīšanās ir atkarīga no jonizēto slāņu stāvokļiem. Tāpēc īsviļņu sakari nav stabili un droši. Var rasties tādi radioviļņu izplatīšanās apstākļi, kad sakari īsviļņu diapazonā praktiski nav iespējami, sevišķi polārajos apgabalos, kur radioviļņu izplatīšanos ietekmē Saules aktivitātes izmaiņas.

Metru un decimetru diapazonu radioviļņi, kuros izmanto televīzijā, no jonosfēras neatstarojas, tāpēc tos var uztvert tikai tiešas redzamības robežās. Tāpēc arī raidītāju antenas tiek novietotas lielā augstumā, uztvērējantenas īpašnieki arī cenšas pacelt iespējami augstāk virs namu jumtiem. Tā kā raidītāja atrašanās virziens parasti ir zināms, uztveršanai var izmantot sarežģītākas konstrukcijas antenas ar izteiktu vērsuma diagrammu. Antenu novieto tā, lai vērsuma diagrammas maksimums būtu

telecentra virzienā. Izplatītāko televīzijas uztvērējantenu pastiprināšanas koeficients var mainīties robežās no 2 līdz 4 un pat vairāk. Pastiprinājuma koeficients ir atkarīgs no antenas tipa, bet plaši izplatītām daudzelementu antenām - no elementu skaita. Jo antenai vairāk elementu, jo lielāks tās pastiprinājuma koeficients. Tāpēc arī tālu no telecentra uzstādāmās antenas kļūst sarežģītākas, tām ir lielāks elementu skaits. Taču, pieaugot elementu skaitam, antenas signālu caurlaides joslas platums samazinās, tādēļ ar vienu antenu var uztvert tikai vienu televīzijas programmu.



5.21. att. **Radioviļņu atstarošanās no dažādiem, jonosfēras slāņiem ap zemeslodi:**

- 1 – vidējo viļņu atstarošanās no slāņa E un rimšana slānī D dienā; 2 – vidējo viļņu izplatīšanās naktī; 3 – īsviļņu atstarošanās no slāņiem F_1 jeb F_2 un no zemes; 4 – ultraīsviļņu izplatīšanās cauri visiem jonizētajiem slāņiem

Lai varētu vienlaikus uztvert vairākas programmas, uz viena kopējā masta var novietot divas vai trīs antenas - katru savam kanālam. Ir arī gadījumi, sevišķi lielākos attālumos no telecentra, kad uz kopējā masta novieto vairākas antenas vienam un tam pašam kanālam, tādējādi palielinot antenu kopējo pastiprinājuma koeficientu.

Nelielos attālumos (līdz 20...30 km no telecentra), kur uztveršanas apstākļi ir labvēlīgāki, lieto tā saucamās platjoslas antenas. Ar vienu šādu antenu var uztvert vairākus televīzijas kanālus. Dzīvokļos, kuri atrodas tuvu telecentram, lieto arī dažāda tipa saliekamas konstrukcijas istabas antenas. Tās parasti novieto virs televizora jeb tā tuvumā.

Televīzijas uztveršanas apstākļi ievērojami sarežģītās modernajos daudzstāvu māju masīvos. Lai katrai mājai uz jumta neslietos antenu «mežs», plaši lieto tā saucamās kolektīvās antenas. Viena kolektīvā antena apkalpo lielu skaitu dzīvokļu. Tās uztvertais signāls tiek pastiprināts, sadalīts un ar koaksiālā kabeļa starpniecību ievadīts katrā dzīvoklī.

Dzelzsbetona konstrukcijas un mūra sienas atstaro un vājina; radioviļņus, tāpēc daudzstāvu māju aizsegā uztvert televīzijas signālu nevar. No šādas mājas atstarotais

signāls var nonākt antenā kopā ar tieši uztverto signālu pat tad, ja māja atrodas aiz uztverošās antenas jeb sāpus. Tā uz televizora ekrāna rodas attēla dubultošanās un pat daudzkārkšošanās. Rodas arī citāda veida traucējumi, kurus parasti ir ļoti grūti, gandrīz pat neiespējami novērst.

Tāpēc lielās pilsētās arvien plašāk izplatās tā saucamā kabeļu televīzija, kas nodrošina televīzijas signālu pievadīšanu mājām un dzīvokļiem centralizēti.

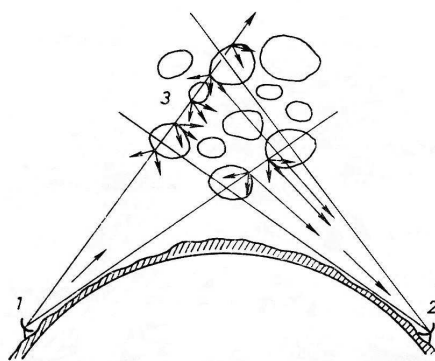
Maza darbības attāluma mazjaudas radiolīnijas plaši lieto dažādās tautsaimniecības nozarēs. Tās strādā ultraīsviļņu un decimetru diapazonos, raidītāju jauda parasti nepārsniedz dažus vatus.

Sakari var būt organizēti pēc radiālā principa, kad galvenā stacija var izsaukt jebkuru no tai pakļautajām stacijām, bet tās savukārt - tikai savu galveno staciju; savā starpā var strādāt arī vairākas līdzvērtīgas stacijas.

Lauku rajonos līdzenās vietās sakaru attālums var sniegties vairākos desmitos kilometru. Lai šo attālumu palielinātu, galvenās, radiostācijas antenu parasti novieto iespējami augstāk virs namu jumtiem. Pilsētās, kā arī nelīdzenos lauku apvidos, sakaru attālums samazinās, dažreiz pat līdz 1 km un mazāk. Tas notiek tāpēc, ka šajās sistēmās izmantojamie radioviļņi tiek absorbēti pilsētas namu dzelzsbetona konstrukcijās, koku lapotnēs, tie interferē uz dažādām metāla konstrukcijām, veidojot zonas ar vājinātu intensitāti. Par antenām šeit parasti izmanto dažāda garuma stieņus un vadus nesimetriska vibrators režīmā. Ideālos apstākļos šādām antenām ir toroīda formas vērsuma diagrammas veids, taču dažādu tuvumā esošu metāla elementu, kā arī paša cilvēka ķermeņa ietekmē vērsuma diagramma var deformēties, veidojot dziļus minimumus. Tāpēc arī uztveršanas apstākļi bieži vien ir atkarīgi no uztvērējantenas orientācijas attiecībā pret galveno radiostaciju un no tā, vai antena atrodas šaurā ielā, aiz augstiem namiem vai klajākā vietā.

Radiolīnijas dažādiem dienesta un militāra rakstura sakariem, arī radiotransporta sakariem sākumā veidoja pēc nevērstas darbības radiolīniju principiem, jo sakariem izmantoja īso viļņu diapazonu, bet šajā īso viļņu diapazonā, antenu lielo izmēru dēļ, ir grūti izveidot antenas ar šauru vērsuma diagrammu un lielu pastiprināšanas koeficientu. Taču ātri tika apgūti ultraīsviļņu un decimetru diapazoni, kuros antenu izmēri ir mazāki un vieglāk ir izveidot vērstas darbības antenas. Ultraīsviļņus, kā arī decimetru un centimetru diapazonu viļņus jonosfēra neatstaro, tāpēc sakarus varēja organizēt tikai tiešas redzamības robežās. Lai izveidotu garākas radiolīnijas, bija jāmeklē kāds objekts jeb vide, kas šos viļņus atstarotu jeb vismaz izkliedētu.

Troposfēras radiolīnijās par šādu izkliedējošu vidi kļuva troposfērā esošās nehomogenitātes: ūdens, tvaiki, mākoņi, putekļi utt. Radiolīnijas antenas ar lielu

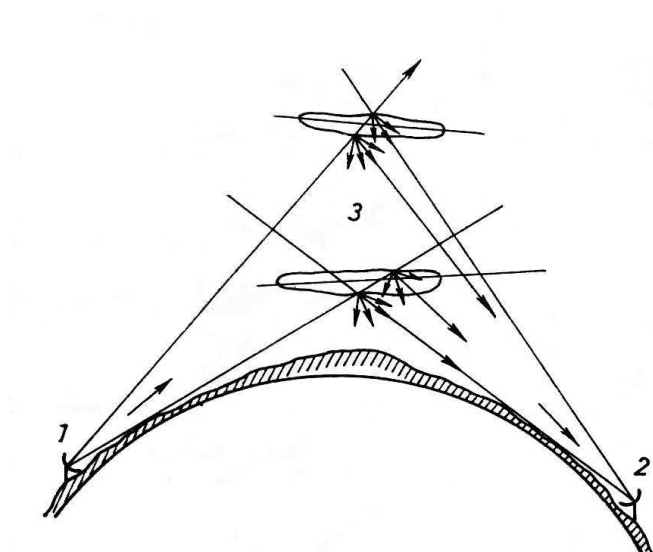


5.22. att. **Troposfēras radiolīnijas shēma:**

1 un 2 – raidantenas un uztvērējantenas;

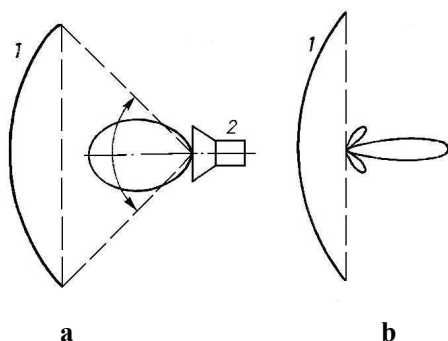
3 – troposfēras apgabals, kas izkliedē radioviļņus

pastiprināšanas koeficientu un šauru dotās vērsma diagrammas maksimumu tika vērstas viena otras virzienā, ar maksimumiem nedaudz virs horizonta (5.22. att.). Šādā veidā varēja noorganizēt radiolīniju vairāku simtu kilometru attālumā. Taču šādām radiolīnijām piemita vairāki nopietni trūkumi: sarežģītas un dārgas antenas, raidītāja liela jauda un šaura pārraidāmo frekvenču josla, tāpēc arī šīs radiolīnijas netika plaši ieviestas.



5.23. att. Shēma radiolīnijai caur meteorītu pēdām:
1 un 2 – antenas; 3 – jonosfēras apgabals, kur parādās meteorīti

diapazona radioviļņi no šādām meteorītu pēdām atstarojas tikpat labi kā no metāla priekšmetiem (5.23. att.). Tā kā meteorītu pēdas atrodas 50... 100 km augstumā, tad vienlaikus tās var «redzēt» divas antenas, kas atrodas 500... 800 km attālumā viena no otras.



5.24. att. Paraboliskās antenas konstrukcija:
a – paraboliskās antenas shematiskā uzbūve;
b – paraboliskās antenas vērsma diagrammas veids horizontālā plaknē; 1 – paraboliskā metāla virsma;
2 – ruporveida apstarotājs.

Vēl viens sekmīgs radiolīnijas realizācijas mēģinājums saistīts ar meteorītu pēdu izmantošanu radiosignālu atstarošanai. Zemes atmosfērā diennakts laikā nokļūst vairāki tūkstoši meteorītu. Sastopoties ar Zemes atmosfēras pretestību, tie sakarst, iztvaiko un sadeg, atstājot aiz sevis spožu svītru, kas sastāv no plazmas ar lielu elektronu koncentrāciju. Šādās meteorītu pēdās liela elektronu koncentrācija saglabājas ilgāku laiku – vairākas sekundes. Decimetru

sakaru sistēma ar radiolīnijas starpniecību, izmantojot meteorītu pēdas, tika izveidota ASV ar nosaukumu «Žanete». Taču tā bija paredzēta tikai telegrāfa sakariem, jo meteorītu pēdas nepastāv ilgi un parādās neregulāri. Īšajos sakaru pastāvēšanas brīžos pa šo radiolīniju varēja noraidīt lielu informācijas daudzumu abos virzienos, tāpēc šī sistēma bija rentabla un kādu laiku to sekmīgi izmantoja.

Radioreleju līnijas sastāv

no atsevišķām retranslācijas stacijām, kas novietotas 40 ... 50 km. attālumā cita no citas tiešas redzamības robežās uz 50.... 70 m augstiem torņiem. Šīs radiolīnijas darbojas decimetru un centimetru diapazonā, pa tām var pārraidīt vairākas televīzijas programmas un vairākus simtus, bet nepieciešamības gadījumā pat tūkstošus telefona sarunu. Radioreleju līnijās izmanto vairāku veidu antenas. Bieži lieto *paraboliskās antenas*, kuras sastāv no paraboliska metāla reflektora, kura fokusā novietota vienkāršākas konstrukcijas antena - tā saucamais apstarotājs, kas vienlaikus izstaro un uztver radioviļņus ar dažādām frekvencēm (5.24. att.).

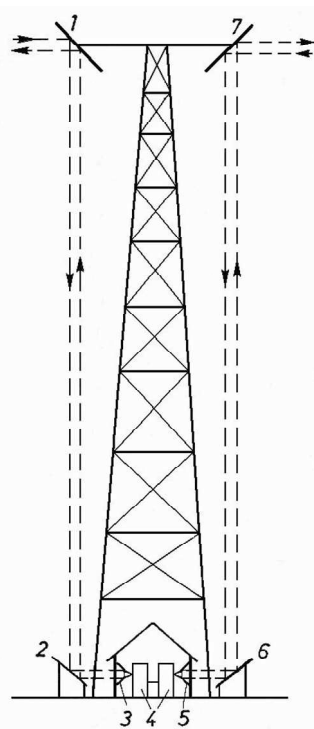
Paraboliskās antenas torņos parasti neuzstāda, bet tās izmanto kopā ar tā saucamajām *periskopiskajām antenām*, kuras darbojas pēc optiskā periskopa principa (5.25. att.). Periskopisko antenu priekšrocība ir tā, ka sarežģītās un smagās paraboliskās antenas atrodas uz zemes slēgtā telpā, antenu barošanas trakts ir ļoti īss, ar maziem zudumiem. Atstarojošie spoguļi, ko uzstāda torņos, ir vienkārši un mehāniski izturīgi, tiem nepieciešama minimāla apkope.

Dažās radioreleju līnijās izmanto tā saucamās *ruporparaboliskās antenas* (5.26. att.). Šāda antena sastāv no parabolas fragmenta, kas no trim pusēm ierobežots ar rupora sienām, bet uz ceturto pusi izstaro šauru radioviļņu kūli.

Ruporparaboliskai antenai enerģija tiek pievadīta pa viļņvadu, kas savieno šo antenu ar pastiprināšanas iekārtu. Tā kā uztvērējus un raidītājus novieto lielā attālumā no antenas, viļņvadu trakts ir diezgan garš; tas ir galvenais šīs antenas trūkums. Pēdējā laikā būvē radioreleju stacijas, kurās aparatūra atrodas torņos netālu no antenām.

Mēģinājumi izmantot mākslīgos Zemes pavadoņus sakaru nodibināšanai lielos attālumos sākās drīz pēc pirmo pavadoņu palaišanas. Pirmajās sakaru sistēmās pavadoņi tika izmantoti tikai kā kosmosā pacelti metāla priekšmeti, kas izkļiedēja uz tiem krītošos radioviļņus tā, lai daļa no tiem nokļūtu uz Zemes. Taču šādām sistēmām bija nepieciešami jaudīgi raidītāji, jutīgi uztvērēji un lielas antenas ar komplicētām vadības iekārtām.

Jauns posms mākslīgo Zemes pavadoņu jeb satelītlīniju attīstībā: sākās līdz ar aktīvu retranslācijas staciju ievadīšanu orbītās ap zemeslodi. Uz speciāli šim nolūkam būvētiem mākslīgajiem Zemes pavadoņiem, kuri virzās pa noteiktām orbītām, atrodas paraboliskās antenas ar lielu pastiprinājuma koeficientu, jutīgi uztvērēji, signālu pārveidošanas iekārtas un raidītāji. Uztveršana un raidīšana notiek ar vienu un to pašu antenu dažādās frekvenču joslās. Tā kā kļūva iespējama signāla retranslācija, uz zemes

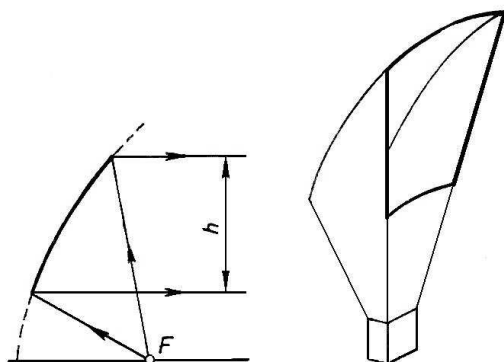


5.25. att. Periskopiskās radioreleju līnijas antenas izveidojums:

1, 2, 6 un 7 – plakanie reflektori; 3 un 5 – paraboliskās antenas; 4 – pastiprinātāji

uzbūvētajos speciālos sakaru kompleksos varēja izmantot mazākas, tātad arī lētākas un vienkāršākas antenas un vienkāršāku pastiprināšanas aparāturu. Ļoti lielu sakaru attālumu pārvarēšanai izveidoja satelītlinijas, izmantojot tā saucamos stacionāros mākslīgos Zemes pavadonius kā retranslatorus. Pavadonis riņķo ap Zemi apmēram 36 000 km augstumā tā, lai apriņķošanas periods būtu tieši viena diennakts.

Raugoties no zemes, tas šķiet nekustīgs. Šādai retranslācijas sistēmai ir būtiskas priekšrocības, tā darbojas nepārtraukti, nevis cikliski, arī antenas uz Zemes var novietot nekustīgi. Taču šādas sistēmas realizācijai vēl ir daži tehniska rakstura šķēršļi, pie kuru pārvarēšanas patlaban tiek aktīvi strādāts. Satelītlinijām svarīga loma ir nākotnes, sakaru sistēmās.



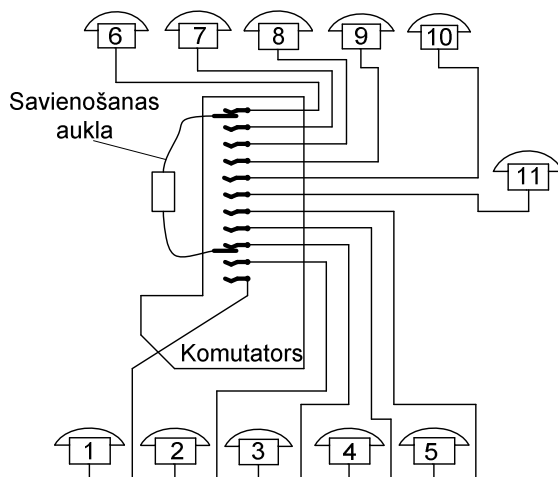
5.26. att. **Ruporparaboliska antena:**

a – antenas uzbūves princips; b – antenas ārējais izskats; F – parabolas fokusa punkts; h – antenas atvēruma augstums

6. TELEFONA SAKARI

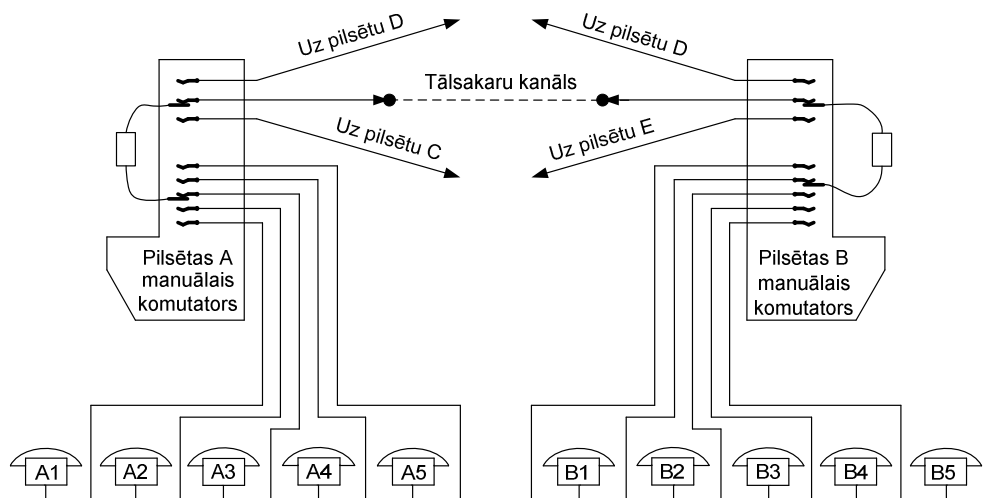
6.1. Telefona tīkli

Elektrisko sakaru tīkla izveidošanas sākuma periodā telefona abonentus savienoja telefonistes, tagad šī procedūra ir automatizēta - to veic automātiskas komutācijas iekārtas. Tās savai darbībai nepieciešamās komandas attiecīgu elektrisku signālu veidā saņem no abonenta vai arī īpašos gadījumos no attiecīgiem automātiem. Agrāk abonents tuvākās telefona centrālās telefonistei nosauca pilsētu un tās abonenta aparāta numuru. Pēc šīm ziņām jā sastāda telefona sarunas trakts. Telefoniste griezās pie tālākā sakaru mezgla telefonistes un pieprasīja pieslēgt telefona kanālam savas pilsētas pieprasīto abonentu. Tādējādi abas telefonistes sagatavoja pārraides traktu un pēc tam nodeva to abu abonentu rīcībā. Daudz sarežģītāks bija gadījums, kad starp sakaru mezgliem, kuru starpā jā sagatavo telefona trakts, nebija tiešu sakaru; tādā gadījumā sakaru nodrošināšanai tika iesaista tranzīta mezgla telefoniste, ar kuras komutatora starpniecību to paveica. Sastādot savienojumu ļoti lielos attālumos, var rasties nepieciešamība pēc vairākiem tranzīta mezgliem. Katram komutācijas centram jānodrošina gan tiešās trakta saslēgšanas, gan arī tranzīta funkcijas. Abonentu savienošanas princips, pēc kāda telefonistes no komutatora nodrošina trakta saslēgšanu telefona sarunai vienas pilsētas, apdzīvotas vietas vai iestādes robežās parādīts 6.1. attēlā.



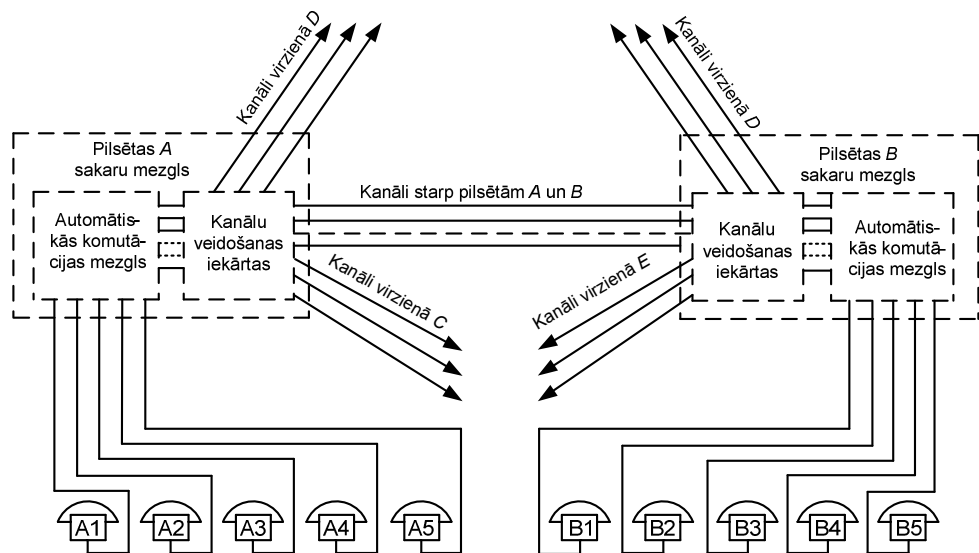
6.1. att. Divu telefona abonentu (pirmā un devītā) savienošanas princips, izmantojot auklu komutatoru.

Savukārt, 6.2. attēlā parādīts, kā ar manuālo komutatoru starpniecību sastādīts sarunas trakts starp pilsētas A abonentu A3 un pilsētas B abonentu B2.



6.2. att. Savienojuma sastādīšanas princips starp pilsētas A abonentu un pilsētas B abonentu, izmantojot pilsētu manuālos komutatorus

Sakaru veidošanas shēma, izmantojot automātisko komutāciju dota 6.3. attēlā. Komutācijas elementi var būt tik dažādā izpildījumā un ar tik sarežģītām shēmām, ka komutēta trakta shēmu parādīt ir grūti, attēlā ir parādīti tikai komutācijas centri vispārīgā veidā, pie tam uzskatāmības labad pieņemot, ka komutējamo telefona aparātu skaits ir visai neliels.



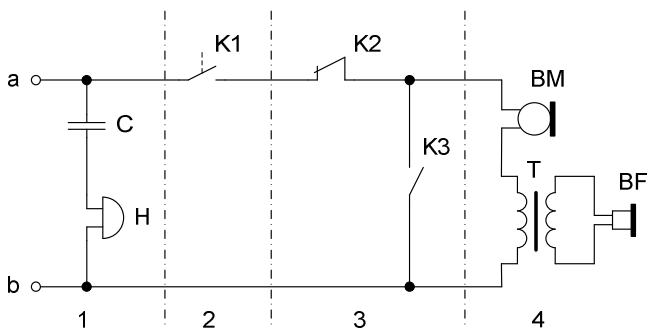
6.3. att. Starppilsētu sakaru veidošana ar automātisko komutāciju

Automātisko telefona sakaru sistēmā katra telefona aparāta neatņemama sastāvdaļa ir ciparripa. Ar šādu aparātu ir iespējams sastādīt savienojumu, automātiski uzgriežot attiecīgu abonenta numuru. Modernajā automātisko telefona sakaru sistēmā telefona aparātā ciparripa aizvietota ar ciparu tastatūru. Automātiskā telefona sakaru tīkla darbības principi plašāk ir aprakstīti J.Ločmeļa grāmatā «Automātiskie elektrosakari».

6.2. Telefona aparāts

Telefona aparāta vienkāršota shēma parādīta 6.4. attēlā. Shēma sadalīta 4 funkcionālās daļās: 1 - izsaukuma saņemšanas iekārta, 2 - sviras kontakts, kuru saslēdzot (paceļot telefona klausuli) līnijai pieslēdz ciparripu, 3 - ciparripas kontaktūra, 4 - sarunas iekārta. Ja klausule ir nolikta uz telefona aparāta, kontakts *K1* ir pārtraukts. Līnijai caur kondensatoru *C* ir pieslēgts tikai zvans *H*.

Zvanu var iedarbināt no līnijas pienākošā zvana maiņstrāva. Paceļot klausuli, kontakts *K1* saslēdzas, un caur kontaktu *K2*, mikrofonu *BM* un transformatora *T* primāro tinumu noslēdzas līdzstrāvas ķēde. Telefona aparāts ar paceltu klausuli ir sagatavots vai nu numura sastādīšanas signāla noraidīšanai, vai arī sarunai. Ja vēlamies



6.4. att. Automātiskā telefona aparāta shēma

sastādīt savienojumu, tad paceļam klausuli un griežam ciparripu. Tiklīdz ciparripa ir izkustināta no sava sākotnējā stāvokļa, tiek saslēgts kontakts *K3*. Tādējādi līdzstrāva plūst pa jaunu ceļu. Tā nenoslēdzas caur mikrofonu *BM* un transformatora tinumu, bet plūst pa mazākās pretestības ceļu - caur *K3*. *K2* ir pārtraucējkontakts, kas pārtrauc līdzstrāvas ķēdi noteiktu skaitu reizu atkarībā no tā, kādu ciparu griežam. Līdzstrāvas ķēdes pārtraukumu skaits vienlaikus ir komanda, kura telefona centrālē nosaka, kā ir jānostājas meklētāja sistēmai. Kad telefona aparāta ciparripa beidz griezties, *K2* saslēdzas, bet *K3* tiek pārtraukts. Telefona aparāts ir sagatavots sarunai, vai arī var izdarīt nākošo numura uzņemšanas ciklu (griezt ciparripu), un, ja numurs ir pilnībā sastādīts, gaidīt izsaukuma signālu un pēc tam sākt sarunu.

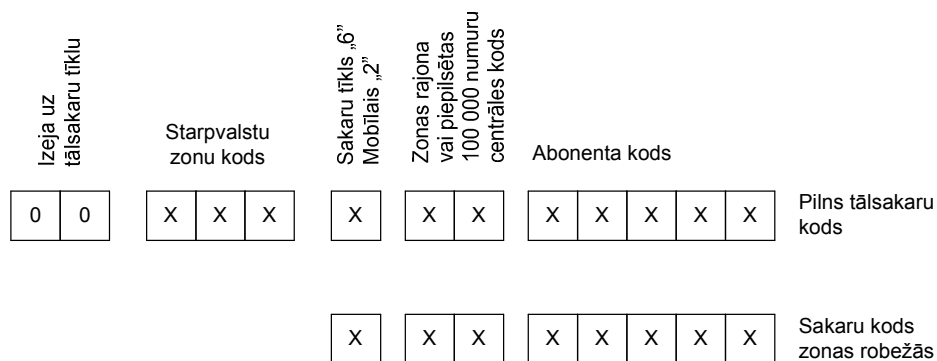
Mūsdienās aprakstīto telefona aparātu aizstāj tastatūrās telefona aparāts. Tas ne vien ir ērtāks lietošanai, bet nodrošina telefona lietotājus ar dažiem papildu pakalpojumiem, piemēram, saīsināta izsaukamā abonenta koda sastādīšanu, atkārtot pēdējā izsaukamā abonenta numuru u.c.

Abonenta meklēšanas process telefona tīklā ir visai sarežģīts. Tajā var piedalīties vairākas telefona centrāles. Savienojuma sastādīšanas procesam ir sekojošs: 1 - paceļot

klausuli, tuvākās telefona centrāles priekšmeklēšanas iekārtas sameklē abonentu un to pieslēdz meklēšanas sistēmai; 2 - uzgriežot ar ciparripu pirmo ciparu vai ciparu grupu, tiek noteikts, vai savienojums notiks šīs pašas centrāles robežās, vai arī izies uz zonas iekšējo, vai starpzonu tīklu; 3 - pēc tam kad ar ciparu vai ciparu grupas starpniecību ir noteikta meklētā abonenta atrašanās vieta, pēdējā ciparu grupa fiksē pašu abonentu. Kad numura uzņemšana ir beigusies, abonenta numurs ir noteikts, tas saņem no telefona centrāles izsaukumu - zvana strāvu. Ja izrādās, ka meklētais abonents jau ir stājies sakaros un runā ar citu, tad meklēšanas pēdējā pakāpe fiksē abonenta līnijas aizņemtību un ieslēdz pretējā virzienā aizņemtības signālu.

6.3. Abonenta kods

Telefona tīkla uzbūves princips nosaka numerācijas sistēmu. Visā mūsu valsts teritorijā ir spēkā *vienota numerācijas sistēma*, kas atbilst vispār pieņemtajai numerāciju sistēmai visā pasaulē. Pilnīgi automatizētā mūsu zemes sakaru tīklā pieņemta vienpadsmit ciparu numerācija. Pasaulē visi tīkli sadalīti zonās. Lielās valstīs kopējo tīklu veido noteikts daudzums zonu un katrai no tām ir savs trīs ciparu kods. Numura pirmie trīs cipari nosaka zonu, nākošais cipars (6 vai 2) nosaka tīklu - stacionārais vai mobilais, tālāk sekojošie divi cipari - lauku rajonu vai arī tādu pilsētas sakaru mezglu, kurš apkalpo 100 000 abonentu. Pēdējie pieci cipari nosaka abonenta numuru. Latvijas telefona tīklu veido viena zona un tās kods ir „371”. Numerācijas princips parādīts 6.5. attēlā. Lai automātiski sastādītu savienojumu ar abonentu starpzonālajā sakaru tīklā, vispirms jāuzgriež koda cipars «00». Līdz ar to abonents ir pieslēdzies sev tuvākai automātisko tālsakaru telefona centrālei.



6.5. att. Abonentu numerācijas princips automātiskā telefonu sakaru tīklā

Tālāk sekojošie trīs cipari nosaka starpvalstu zonas kodu, nākošais cipars nosaka sakaru tīklu – Lattelekom „6”, mobilais „2”, tālāk sekojošie divi cipari nosaka zonas

rajona vai piepilsētas 100 000 numuru centrāles kodu, bet pēdējie pieci cipari nosaka rajona abonentu. Zonas robežas var definēt arī pēc numerācijas principa; tādā gadījumā saka, ka zona ir tāda teritorija, kuru aptver telefona tīkls ar astoņu ciparu koda grupu.

Telefona sakaru tīklā par pārraidāmās informācijas apjoma mēru, var uzskatīt sarunas ilgumu. Tas arī nosaka, cik ilgi abonentu pāris savām vajadzībām ir aizņēmis trakta grupu iekārtas (savienošanas ierīces un līnijas vai kanālus). Izejot ar savienojumu ārpus sava rajona, savienošanā piedalās arī zonas centrālais sakaru mezgls. Sarunas laika uzskaiti veic īpašas zonas sakaru mezgla laika skaitīšanas un sarunas reģistrācijas automātiskās iekārtas. Šīs iekārtas reģistrē izsaucošā abonenta numuru un laiku, cik ilgi ir notikusi saruna. Šos datus ievada skaitļošanas mašīnā un iegūst rēķinu par telefona tīkla izmantošanu. Apmaksa par tālsarunām ir izveidotas īpašas tarifu zonas. Katras zonas robežās ir vienota apmaksa par kanāla izmantošanas laika vienību.

7. GSM STANDARTA MOBILO SAKARU ŠŪNU TĪKLA ORGANIZĀCIJA

7.1. Ievads

Sakaru sistēmas pamata uzdevums ir jebkura veida informācijas pārraide uz jebkuru vietu reālā laika mērogā. Katram signāla veidam (telefons, radio, televīzija, datorsistēmu tīkls utt.) ir savas raksturīgas īpatnības, izvirzītas pārraides sistēmai. Telefona sakaru sistēmās šim uzdevumam (līdz mobilo sakaru sistēmu izveidei) par pārraides kanālu izmantoja sakaru vadu un kabeļu līnijas, bet par komutācijas sistēmām - automātiskās telefonu centrāles (ATC). Šajos stacionārajos telefonu tīklos abonents ir cieši saistīts ar abonenta līniju un ATC.

Abonenta pārvietošanās ievērojamā attālumā noved pie tā, ka abonents paliek bez sakariem. Izstrādātie un ieviestie abonentu termināli ar radio pagarinātājiem nodrošina sakarus, atkarībā no raidītāja jaudas un uztvērēja jutības, tikai līdz dažu simtu metru vai dažu kilometru rādiusā no stacionārā telefona aparāta. Šis stacionārā telefonu tīkla trūkums tiek novērsts, nomainot kabeļu abonentu līnijas ar mobilo sakaru tīkla bezvadu radio kanāliem. Tādā veidā šūnu mobilo sakaru tīklu galvenā atšķirīgā īpašība no stacionārajām telefona līnijām, ir radio kanālu izmantošana mobilajiem abonentiem, kuri pārvietojas ievērojamos attālumos, saglabājot divpusēju (dupleksu) darba režīmu pa radio kanālu starp mobilo abonementu un informācijas saņēmēju, tajā skaitā arī ar stacionārā telefona tīkla abonentu.

Strauja šūnu mobilo sakaru attīstība sākās pagājušā gadsimta astoņdesmitajos gados. Katras valsts mobilo sakaru iekārtu sistēmas tika izstrādātas un izmantotas nacionālo robežu ietvaros un tādēļ tās savstarpēji nebija savienojamas gan aparatūras, gan sniegto pakalpojumu jomā. Līdz ar to tām bija diezgan ierobežots noieta tirgus, bet tas radīja nepieciešamību izveidot vienotu visas Eiropas mobilo sakaru standartu. Šajā sakarā 1982. gadā radās CEPT (*Conference of European Posts and Telegraphs*) ar mērķi izpētīt un izstrādāt visas Eiropas kopējās pielietošanas šūnu mobilo sakaru sistēmas. Tika izveidota darba grupa, kura izstrādāja mobilo sakaru sistēmu GSM (*Global System for Mobile communication*).

Komerčiālos pakalpojumus GSM sāka piedāvāt 1991. gada vidū. Sakarā ar datoru tehnikas un radiosistēmu tehnoloģiju uzlabošanos, GSM sāka ātri attīstīties, pilnveidoties un paplašināt savu pakalpojumu klāstu. 1993. gadā jau funkcionēja 36 GSM tīkli 22 valstīs un vēl 25 valstis izvēlējās GSM virzienu vai izvirzīja jautājumu par šāda lēmuma pieņemšanu. Neskatoties uz to, ka GSM sistēma bija standartizēta Eiropā, tā tomēr pēc savas būtības bija ne tikai Eiropas standarts [13, 14], GSM sistēma tika ieviesta Tuvējo un Tālo Austrumu zemēs, Austrālijā, Dienvidamerikā un Āfrikā. 1994. gada sākumā GSM sistēmas abonentu skaits visā pasaulē sasniedza 1,3 miljonus lietotāju, bet 1995. gadā to jau bija vairāk par 5 miljoniem. 1995. gadā GSM sistēmas otrajā fāzē (GSM2 - GSM 900/1800) tika rekomendēts fiksēt un uzstādīt papildus pakalpojumus (īsiņu pakalpojumi tika uzlaboti, pilnveidota radio pieeja un ieviesta SIM karte). 1999. gada beigās GSM tīklu skaits pasaulē sasniedza 344 tīklus 127 valstīs, bet GSM lietotāju skaits bija 250 miljoni. 2002. gadā lietotāju skaits

pārsniedz jau 500 miljonus. Pašlaik rūpnieciski attīstītajās valstīs ar mobilo sakaru tehniskajiem līdzekļiem ir nodrošināti ap 50% iedzīvotāju.

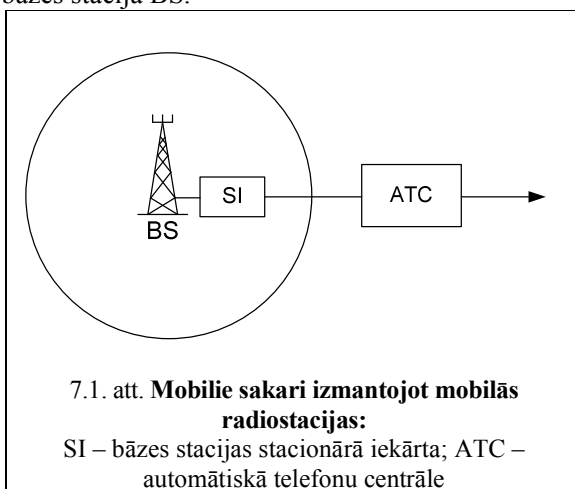
Vispār mobilo sakaru sistēma ir sarežģīta un elastīga radio tehniska sistēma, kas pieļauj lielu daudzveidību gan konfigurācijas variēšanā, gan arī izpildošo funkciju komplektēšanā. Šāda sistēma nodrošina gan runas, gan arī cita veida informācijas, piemēram, faksimilos paziņojumus un datoru datu pārraidi, pie tam pārraidi veicot, iespējams realizēt dubleksos telefonu sakarus, daudzpusu telefonu sakarus - sauktos par konferencsakariem, runas pastu u.c. Mobilajā sistēmā organizējot parastu divpusēju telefona sarunu, jau sākot no izsaukuma, paredzēti autopiezvana, izsaukuma gaidīšanas, izsaukuma pāradresēšanas u.c. režīmi.

7.2. Mobilo sakaru šūnu tīkla organizācijas principi

Pirmie mobilie telefonu sakari ar automātisku komutāciju un savienojumu maršrutizāciju tika izstrādāti un ieviesti dzīvē pagājušā gadsimta 60. gados. Tajā automātisko mobilo telefonu sakaru tīklu attīstības etapā abonentu pieslēgšanos pie stacionārā telefona tīkla veica viena bāzes stacija BS.

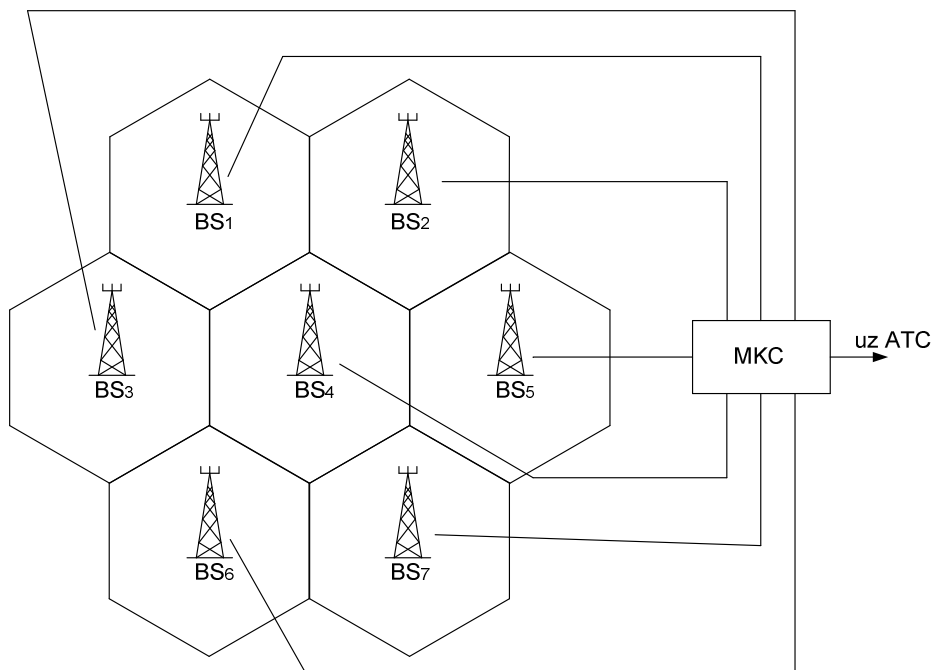
Tā laika mobilie abonenti, pārvietojoties telpā ap bāzes staciju nodibināja sakarus ar to pa radiokanāliem, izmantojot to rīcībā esošās mobilās radio stacijas - MS ar noteiktu tās maksimālo darbības rādiusu. Šāda sakaru sistēma parādīta 7.1. attēlā. Tālāk bāzes stacija pieslēdz mobilo abonementus pie stacionārā telefona tīkla. Šādam vienkāršākajam mobilo sakaru tīklam bija ievērojami trūkumi:

- sakaru kvalitāte bija atkarīga no attāluma starp mobilo un bāzes staciju, tādēļ lai saglabātu augstu radio sakaru kvalitāti, bija nepieciešams izmantot, atkarībā no attāluma, radiostacijas ar regulējamu raidītāju izejas jaudu plašā diapazonā, kas tajā laikā bija pietiekami sarežģīti realizējams;
- ierobežots pieslēdzamo mobilo staciju skaits sakarā ar ierobežoto radio kanālu skaitu, jo bija ierobežots izdalīto darba frekvenču skaits.



Mobilo sakaru tīklu attīstības procesā šie trūkumi tika novērsti ar vienas jaudīgas bāzes stacijas nomaiņu pret vairākām bāzes stacijām, kurām ir mazākas jaudas raidītāji un savas individuālās apkalpošanas zonas (7.2. attēls). Šādas bāzes stacijas apkalpes zonu sauc par šūnu, kuru shematiskā veidā attēlo kā vienāda lieluma pareizu sešstūri, līdzīgu bišu šūnai un tādēļ mobilo sakaru tīkls tika nosaukts par šūnu tīklu, jo tas tiek

veidots kā šūnu kopums. Katras šūnas centrā atrodas bāzes stacija, kura apkalpo visas mobilās stacijas šūnas ietvaros.



7.2. att. Šūnu tīkls

Realizējot šādu tīklu, rodas tehniska problēma - kā pārslēgt kustošo objekta MS no vienas šūnas uz citu. Šīs problēmas risināšanai mobilo sakaru šūnu tīklā paredzēts mobilo staciju komutāciju centrs MKC, kurš nodrošina pārvietojošā mobilā abonenta uzstādītā sarunas trakta pārcelšanu no vienas šūnas uz citu, kā arī stacionārā telefona tīkla abonentu pārslēgšanu uz konkrētu bāzes staciju, kuras darbības zonā atrodas dotais mobilais abonents. No sakaru aspekta skatoties, mobilā stacija var atrasties gan brīvā, gan aizņemtā stāvoklī, tādēļ rodas nepieciešamība to kontrolēt. Jāatzīmē, ka 7.2. attēlā redzamajā tīklā, stacionārais telefonu tīkls tiek atbrīvots no izsaukumu apkalpošanas, kuri pienāk no viena mobilā abonenta otram. Šādi savienojumi tiek uzstādīti caur mobilo staciju komutāciju centru. Mūsdienīgā mobilo sakaru šūnu tīklā parasti funkcionē vairāki mobilo staciju komutācijas centri, kuros katrā no tiem iekļautas vairākas bāzes stacijas.

Apskatīsim mobilo sakaru teritorijas dalīšanu šūnās. Teritorijas sadalīšanai šūnās pastāv divas metodes:

- pirmā pamatojas uz dotajā sakaru sistēmā izplatīto radio signālu statistisko raksturojumu mērīšanu;
- otrā pamatojas uz katrā konkrētā rajonā izplatīto radio signālu parametru mērīšanu vai aprēķināšanu.

Pirmo metodi realizējot, visa apkalpojamā teritorija tiek sadalīta vienādas formas šūnās, un ar statistiskās radio tehnikas metodēm, tiek noteikti to pieļaujamie izmēri un attālums starp šūnām, kuru ietvaros tiek izpildīti pieļaujamie savstarpējās ietekmes noteikumi.

Lai iegūtu optimālu teritorijas sadalīšanu, šūnām var tikt izmantoti tikai trīs ģeometriskās figūras - trijstūris, kvadrāts un regulārs sešstūris. Vislabāk der sešstūris, jo, ja antenu ar apla vērsuma diagrammu uzstāda tā centrā, tad tiks nodrošināti sakari gandrīz visos šūnu iecirkņos. Īstenībā šūnas nekad nav precīzas ģeometriskas figūras formā. Reāli šūnu robežām ir neregulāra forma, kura ir atkarīga no viļņu izplatīšanās un rimšanas, t.i., no vietas reljefa, augu valsts rakstura un blīvuma, ceļņu daudzuma un daudziem citiem faktoriem. Vēl vairāk, šūnu robežas vispār nav iespējams precīzi noteikt, jo mobilās stacijas apkalpes robežas no vienas šūnas uz blakus esošo šūnu var zināmā mērā nobīdīties atkarībā no mobilās stacijas kustības virziena. Tieši tāpat arī bāzes stacijas stāvoklis var tikai apmēram sakrist ar šūnas centru, kuru, starp citu, nav nemaz tik viegli noteikt, īpaši, ja šūnai nav pareiza forma. Ja tomēr bāzes stacijās tiek izmantotas vērstās antenas, tad bāzes stacijas reālos gadījumos var atrasties arī uz šūnu robežām.

Izmantojot pirmo metodi teritorijas dalīšanai šūnās, attālumi starp šūnām, kurās tiek izmantoti vienādi darba kanāli, parasti iznāk lielāki par pieprasīto intervālu - lai samazinātu savstarpējos traucējumus. Otrā metode teritorijas dalīšanai šūnās ir labāka, jo šajā gadījumā šūnu sistēmas parametrus izmēra vai aprēķina noteiktam minimālam bāzu staciju skaitam, lai nodrošinātu apmierinošu abonentu apkalpošanu visā teritorijā. Vēl ir jāizskata vērsto antenu, pasīvo retranslatoru, jaukto centrālo staciju izmantošanas iespējas lielu slodžu momentos un jānosaka optimālo bāzes stacijas atrašanās vietu, ņemot vērā apkārtnes reljefu un citus faktorus, kuri ietekmē radio viļņu izplatīšanās apstākļus.

7.3. GSM standarta šūnu mobilo sakaru frekvenču diapazons

Atbilstoši Starptautiskajiem noteikumiem par darba frekvences iedalīšanu, standarta GSM 900/1800/1900 mobilo sakaru sistēmām iedalīti frekvenču diapazoni, kuri doti 7.1. tabulā.

No 7.1. tabulas izriet:

- būtisks izdalīto frekvenču joslu ierobežojums, nosaka nelielu izmantojamo frekvenču kanālu skaitu, kas izsauc saprotamu cenšanos pēc visracionālākās izdalīto frekvenču joslas izmantošanas un attiecīgi arī pēc mobilo sakaru sistēmu ietilpības palielināšanas;
- šūnu mobilo sakaru GSM standarta frekvenču joslas atrodas radio viļņu decimetru diapazonā, kurā difrakcijas parādības šīm frekvencēm darbojas vāji, bet absorbcija hidrometeoroloģiskā (lietū, sniegā, miglā utt.) un molekulārā praktiski nenotiek.

Izveidojot mobilos sakarus pilsētas apstākļos, virsmas pārklājuma un dažādu traucēkļu klātbūtne (augu valsts, apbūve), radīs atstarojošos signālus, kuri interferēs savstarpēji un ar pamata signālu. Šo parādību sauc par signālu daudzstaru izplatīšanos. Atstarošanās no pārklājuma virsmas, notiekoša pie noteiktiem apstākļiem, noved pie tā, ka uztveramā signāla jauda ir nevis apgriezti proporcionāli attāluma ($1/r^2$) otrajai pakāpei starp raidītāju un uztvērēju, kā tas notiek izplatoties brīvā telpā, bet gan apgriezti proporcionāli šī attāluma ceturtajai pakāpei (t.i., $\sim 1/r^4$).

7.1. tabula

GSM standarts	Frekvences MHz		Viļņu garumi cm	
	Virzienā MS → BS	Virzienā BS → MS	Virzienā MS → BS	Virzienā BS → MS
GSM 900	890-915	935 - 960	32,8 - 33,7	31,2-32,1
GSM1800	1710-1785	1805 - 1880	16,8-17,6	16,0-16,6
GSM 1900	1850-1910	1930 - 1990	15,7-16,2	15,1-15,6

Vairāku signālu interference, kuri izgājuši dažādus ceļus, izsauc rezultējošā signāla īpatnēju periodisku vājināšanos - fedingu (*fading*). Parādību, kuras ietekmē, mobilai stacijai pārvietojoties, uztverošā signāla intensitāte ievērojami izmainās. Bez tam rodas kropļojums, ko izsauc vairāku pēc intensitātes samērīgu, vienam no otra laikā aizkavētu signālu pārklāšanās, bet tas var novest pie uztveramās informācijas kļūdām. Un beidzot - radio viļņu daudzstaru izplatīšanās sarežģītā aina ievērojami apgrūtina radio signālu aprēķināšanu, attālinoties no bāzes stacijas, taču šāds aprēķins ir nepieciešams mobilo sakaru šūnu sistēmas projektēšanas korekcijai.

Jāatzīmē, ka, atbilstoši GSM 900/1800/1900 standartam:

- 1) nobīde starp frekvencēm virzienā mobilā stacija - bāzes stacija un virzienā bāzes stacija - mobilā stacija (7.3. attēls) ir:

GSM 900 standartam: $935 - 890 = 960 - 915 = 45$ MHz;

GSM 1800 standartam: $1805 - 1710 = 1880 - 1785 = 95$ MHz;

GSM 1900 standartam: $1930 - 1850 = 1990 - 1910 = 80$ MHz;

- 2) uztveršanai/ pārraidīšanai atvēlētās frekvences joslas platums:

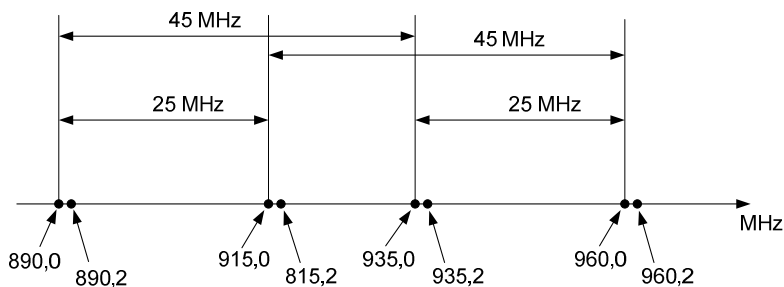
GSM 900 standartam: $960 - 935 = 915 - 890 = 25$ MHz;

GSM 1800 standartam: $1785 - 1710 = 1880 - 1805 = 75$ MHz;

GSM 1900 standartam: $1910 - 1850 = 1990 - 1930 = 60$ MHz;

- 3) duplexo runas kanālu nobīde 900 MHz frekvencē

GSM 900 standartam: 200 kHz (7.4. attēls);



7.3. att. **Frekvenču sadalījums virzienā mobilā stacija - bāzes stacija
un virzienā bāzes stacija - mobilā stacija**

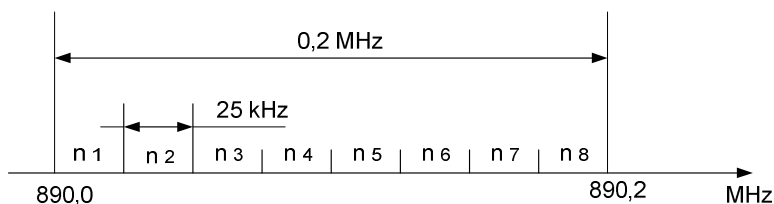
- 4) duplekso runas kanālu nobīde 900 MHz frekvencē - frekvences joslas ekvivalents viena lietotāja runas kanālam:

GSM 900 standartam: 25 kHz ;

GSM 1800/1900 standartiem: 12,5 kHz ;

- 5) lietotāja runas radio kanālu skaits duplexajā radiokanālā

GSM standartam: $200 / 25 = 8$ kanāli (7.4. attēls);

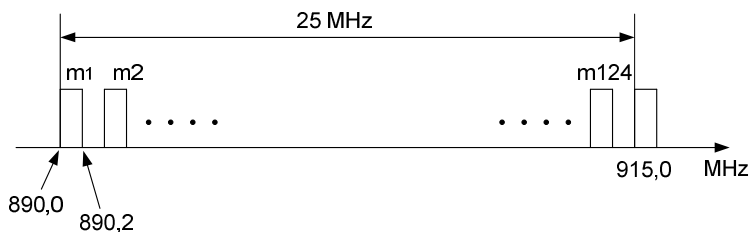


7.4. att. **Lietotāja runas kanālu skaits duplexajā radiokanālā
GSM standartam**

- 6) uztveršanai/pārraidīšanai atvēlētajā 25MHz platajā frekvences joslā
GSM 900 standartam atrodas $(25/0,2) - 1 = 124$ duplexie runas kanāli (7.5. attēls);
- 7) lietotāja runas radio kanālu kopējais skaits
GSM standartam: $124 \times 8 = 992$ kanāli.

Kā jau tas tika apskatīts iepriekš, mobilo sakaru šūnu tīklos katrā no šūnām ir savs bāzes stacijas raidītājs ar noteiktu darba frekvenču diapazonu un ierobežotu sakaru kanālu skaitu, tā izejas jauda $P \leq 50$ W. Teorētiski šādus raidītājus varētu izmantot arī blakus šūnās, ja tikai praksē šūnas dažādu iemeslu (piemēram, izmainoties radio viļņu izplatīšanās apstākļiem) dēļ nepārklātos, t.i., vienas un tās

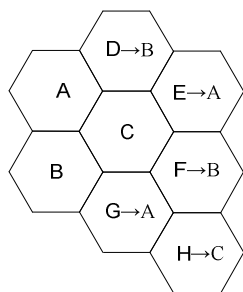
pašas frekvences (kanāli) varētu tikt atkārtoti izmantotas dažādās šūnās, ja savstarpējo traucējumu ietekme starp mobilajiem abonentiem būtu neievērojama, taču praksē abonentu mobilo staciju (kurām ir vienādas darba frekvences) savstarpējo ietekmi nepieciešams samazināt un tieši tādēļ tika izstrādāta frekvenču atkārtotās izmantošanas koncepcija.



7.5. att. Duplekso runas kanālu izvietojums 25 MHz frekvenču joslā

7.4. Frekvenču atkārtotās izmantošanas princips mobilo sakaru šūnu tīklos

Piemēram, katrā 7.2. attēlā redzamajā šūnā tika pielietota noteikta skaita n frekvenču kanālu grupa. Un tā - frekvenču atkārtota izmantošanas būtība ir tā, ka blakus esošajās šūnās tiek izmantotas dažādas frekvenču grupas, kuras atkārtojas pēc nedaudzām šūnām. Lai saprastu frekvences atkārtotās izmantošanas principa būtību, apskatīsim dažus šūnu tīklu uzbūves modeļus:



7.6. att. Šūnu struktūra, kas sastāv no trīs frekvenču grupām

1) pieņemsim, ka šūnā A (7.6. attēls) tiek izmantotas dažas frekvenču grupas no visa GSM frekvenču diapazona, kurš iedalīts mobilo sakaru šūnu sistēmai (piemēram, diapazona viena desmitdaļa - $\delta_A = 1/10$). Tādā gadījumā blakus šūnā B tiks izmantota diapazona otra desmitā daļa $\delta_B = 1/10$, jo divu jaukto šūnu kopējās robežas tuvumā nedrīkst izmantot vienas un tās pašas frekvences kanālu. C šūnā, kurai ir kopējas robežas ar A un B šūnām, nāksies izmantot diapazona trešo daļu ($\delta_C = 1/10$), bet jau šūnā D , kurai ir kopējas robežas ar šūnām A un C , bet nav kopējas robežas ar šūnu B , atkārtoti var izmantot to pašu diapazona desmito daļu $\delta_D = 1/10$, ko izmanto šūnā B , kas nosacīti apzīmēta kā $D \rightarrow B$. Analogiski tam šūnās: $E \rightarrow A$, $F \rightarrow B$, $H \rightarrow C$, t.i., iegūstam šūnu struktūru, kura sastāv no 3 frekvenču grupām, ko sauc par klasteriem (klasteris - ir šūnu grupa ar noteiktu darba frekvenču komplektu).

2) 7.7. attēlā parādīts šūnu tīkls, kurš sastāv no trīs elementu klasteriem - F_1, F_2, F_3 un tā šūnu tīklos nesajauktajās šūnās tiek izmantoti frekvenču atkārtotās lietošanas principi, pie tam klasteru izmērs var sniegties līdz 19 šūnām.

3) 7.8. attēlā parādīts šūnu tīkls ar 4 klasteru elementiem, bet 7.9. attēlā - ar 7 klasteru elementiem.

Ir acīm redzams, ka 3 elementu klasteris ir apmēru minimālās iespējas klasteris, kura sastāvā esošās šūnas var izmantot 1/3 daļu no darba vietu pilna frekvenču diapazona, kurš atvēlēts sakaru šūnu sistēmai. 3 elementu klasterī ar vienādām joslām, frekvences atkārtojās ļoti bieži, kas ir slikti attiecībā pret līdzkanālu traucējumiem (*co-channel interference*), t.i., attiecībā pret traucējumiem no šūnu sistēmas raidstacijām, kuras darbojas tajā pašā radiokanālu frekvencē, bet citās šūnās. Šajā gadījumā izdevīgāki ir klasteri ar lielāku elementu skaitu (7.7., 7.8. att.).

Vispārējā gadījumā attālums D caur šūnu centriem (7.7. att.), kuros tiek izmantotas vienādas frekvenču grupas (frekvenču diapazoni), ir saistīts ar skaitli N - šūnu skaitu klasterī. To izsaka ar attiecību:

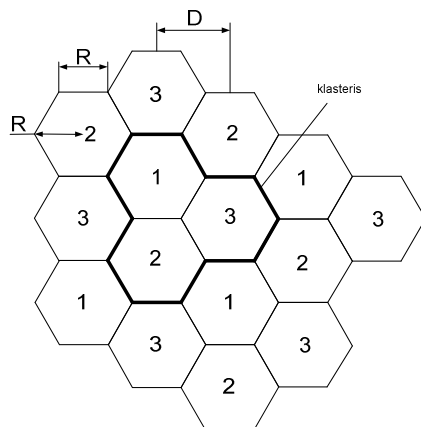
$$D=R \cdot (3N)^m, \quad (7.1)$$

kur R - šūnas rādiuss (apvilktā regulāra sešstūra rādiuss).

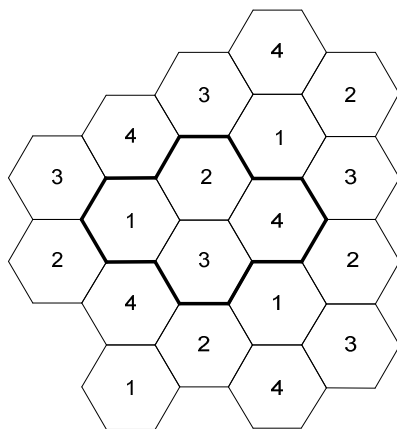
Piemēram, šūnu skaitam klasterī $N = 3$, lielums $D = 3R$; pie $N = 4$ - $D = 3,46 R$, pie $N = 7$ - $D = 4,58 R$, pie $N = 8$ - $D = 5,196 R$, pie $N = 12$ - $D = 6R$, pie $N = 19$ - $D = 7,55 R$.

Attiecības $D/R = q$ lielumu bieži sauc par līdzkanālu traucējumu samazināšanas koeficientu vai par līdzkanālu atkārtotās koeficientu. Lieluma $1/N = C$ - apgrieztu šūnu skaitam klasterī apzīmēšanai izmanto sekojošu nosaukumu - frekvenču atkārtotās izmantošanas efektivitātes koeficients vai vienkāršāk - frekvenču atkārtotās izmantošanas koeficients. Šo lielumu definēšana ļauj izteikt izteiksmi (7.1) sekojošā veidā:

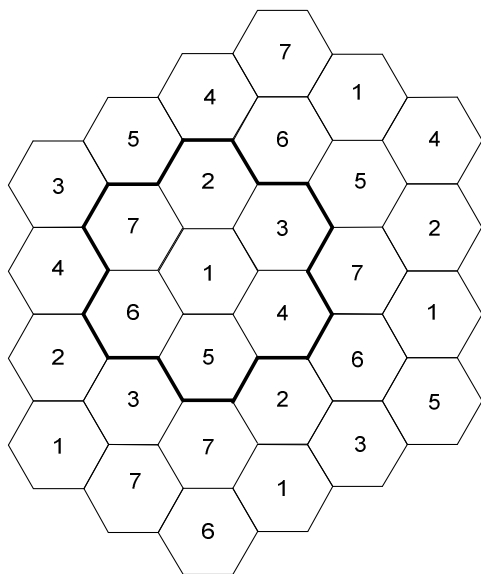
$$D = R \cdot (3/C)^m. \quad (7.2.)$$



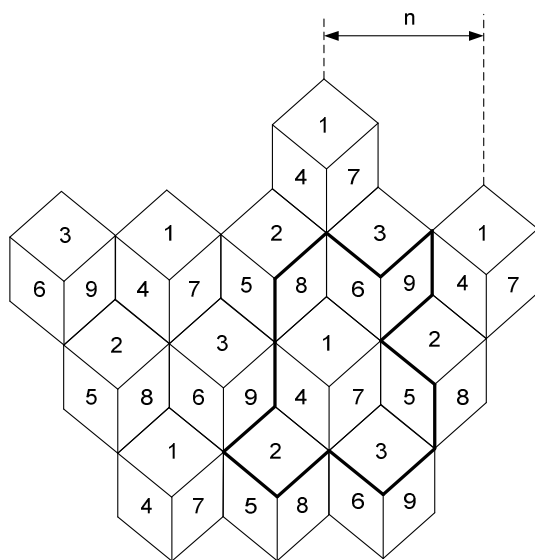
7.7. att. Šūnu tīkla trīs elementu klasteris



7.8. att. Šūnu tīkls ar četrus elementu klasteriem



7.9. att. Šūnu tīkls ar septiņu elementu klasteriem



7.10. att. Šūnu tīkls ar 9 elementu klasteri

Ir jāatzīmē, ka elementu skaita palielināšana klasterī, kas ir izdevīgi no līdzkanālu traucējumu līmeņa samazināšanas viedokļa, noved pie frekvences joslas proporcionālas samazināšanās attiecībā pret to, kuru varētu izmantot vienā šūnā, tādēļ praktiski elementu skaitu klasterī jāizvēlas pēc iespējas minimālākā skaitā, tajā pašā laikā nodrošinot pieļaujamo signāls/traucējumi attiecību.

Viss, kas tika apskatīts šajā nodaļā, tomēr ir tikai shēma, kura izskaidro frekvenču atkārtotas izmantošanas ideju, bet neatbilstoši visus sarežģītus procesus, kuri norisinās reālos šūnu tīklos. Šajos shēmu piemēros (7.6., 7.7. un 7.8. attēli) tika pieņemts, ka bāzes stacijās, kuras izvietotas ideālo šūnu centrā, tiek izmantotas izotropās antenas [(*omnidirectional antennas*) vai vienkāršāk - *omni*], t.i., radio signālu starojums no bāzes stacijām izplatās vienādi visos virzienos, kas MS abonentiem ir ekvivalents ar traucējumu uztveršanu no visām bāzes stacijām visos virzienos, tādēļ, lai samazinātu traucējumu līmeni mūsdienīgajās šūnu mobilo sakaru ciparu tīklos, tiek izmantotas antenas ar izteiktu darbības virzienu, piemēram, sektoru antenas, kuras uzstāda bāzes stacijās.

4) Šūnu tīkls no 9 klastera elementiem parādīts 7.10. attēlā, kurš ir ieguvis pietiekami plašu izplatību šūnu tīklu ciparu standartos. Šajā 9 šūnu klasteru modelī šūnas sadalītas sektoros. Šūnas centrā bāzes stacijā tiek uzstādītas trīs antenas, katra no

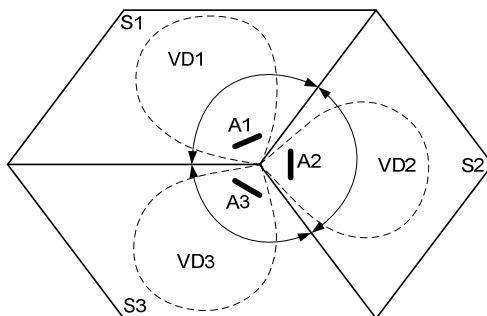
kurām aptver 120° lielu sektoru (7.11. att.). Katrā šūnu sektorā radio signāls no attiecīgās antenas ar izteiktu darbības virzienu tiek raidīts un uztverts tikai vienā

virzienā. Pie tam izstarojuma līmenis pretējā virzienā un tātad dotās šūnas pārējos divos sektoros ir maksimāli samazināts.

Šis apstāklis ļauj izvietot bāzes stacijas, kuras strādā vienā frekvencē, vēl tuvāk, nekā tas parādīts 7.8. attēlā parādītajā modelī. 7.10. attēlā redzamais 9 elementu klasteris lielumam $C = 1/N = 0,11$, dod lielumu $D = 5,196 R$.

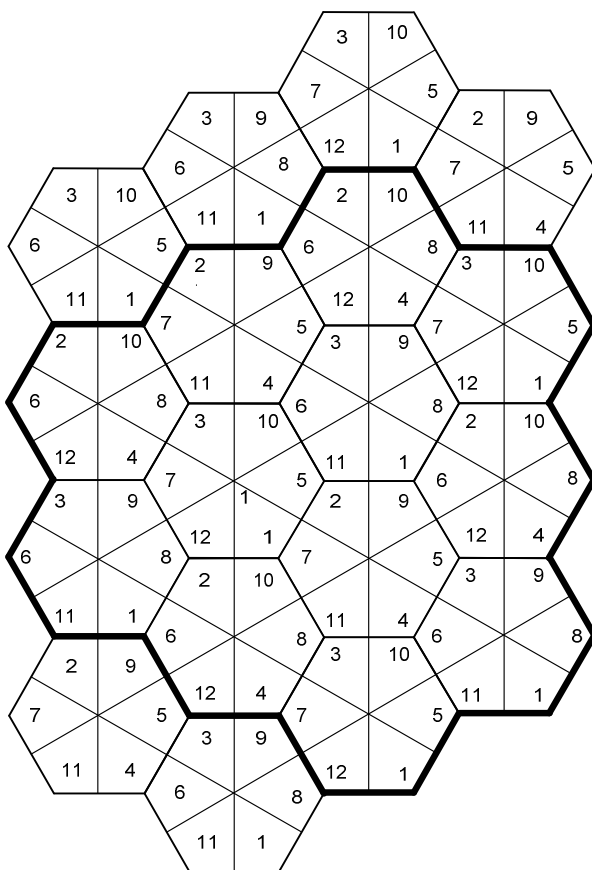
Attēlā izmantotie apzīmējumi:

- A1, A2, A3 - bāzes stacijas antenas ar izteiktu virziena darbību;
- VD1, VD2, VD3 - bāzes stacijas antenas darbības virziena diagrammas;
- S1, S2, S3 - šūnas sektori.



7.11. att. Šūnas bāzes stacija ar trim raidošām antenām

5) Korporācijas Motorola (ASV) speciālisti izstrādājuši vēl efektīvāku frekvences atkārotās izmantošanas modeli. 7.12. attēlā parādītā to izstrādātais šūnu tīkls ar 12 nesošo frekvenču grupām un 60° leņķī uzstādītu antenu pielietojanu (t.i., bāzes stacijās tiek uzstādītas 6 virzītas antenas, kuru virziena diagrammas galvenā lapiņa izstaro tikai 60° sektora robežās. Šāds šūnu tīkls ļauj palielināt abonentu skaitu, kuru var apkalpot šūnu Mobilais tīkls, un tas ir 1,5 reizes



7.12. att. Šūnu tīkls ar 12 - elementu klasteri

lielāks salīdzinājumā ar 7.10. attēlā redzamo modeli.

GSM standartā šūnu tīklu izveidošanai bieži tiek izmantoti 7 elementu klasteri.

7.5. Fizisko radio kanālu skaita novērtējums tīkla šūnā

Šūnas ietilpība ir lietotāja kanālu skaits brīvi izvēlēta šūnā un to nosaka pēc frekvences atkārtotas izmantošanas modeļa veida. Kā piemēru aplūkosim firmas Motorola tīkla modeļa šūnas ietilpības aprēķinu (7.11. att.). Tā kā katru no modeļa divām blakus esošajām šūnām izmantoto dažādas nesošās frekvences grupas, tad brīvi izvēlēta tīkla ietilpība sastāv no $K_i = (124/2) \cdot 8 = 496$ fiziskie kanāli { kur 124 - duplekso radio kanālu skaits $124 = [(25\text{MHz}/0,2\text{MHz}) - 1]$, bet skaitlis 8 - lietotāja kanālu skaits vienā duplexajā radio kanālā. Tādā veidā katrā tīkla sektorā jābūt izveidotiem vidēji $496/6 \sim 80$ lietotāja radio kanālu. 7.10. attēlā redzamajā modelī dažādas nesošās frekvenču grupas tiek izmantotas trijās blakus esošajās šūnās un tādēļ šūnas ietilpība sastāv no: $K_i = (124/3) \cdot 8 = 330$ lietotāja kanāliem.

Tātad atkarībā no GSM standarta šūnu mobilo sakaru tīkla struktūras mainīsies šūnas ietilpība, t.i., lietotāja kanālu skaits - un tātad galu galā apkalpojamo mobilo abonentu skaits.

LITERATŪRA

1. Raņķis I., Žirovecka A. Industriālās elektronikas pamati. Rīga, 2007. - 212 lpp.
2. Raņķis I., Buņina (Radionova) I. Energoelektronika. Rīga: RTU izdevniecība, 2007. - 186 lpp.
3. Bunžs Ziedonis, Miesniece Skaidrīte. Bezkontakta komutācijas aparāti. Rīga: SIA *Drukātava*, 2008. - 308 lpp.
4. Popovs V. GSM standarta šūnu mobilo sakaru sistēma. Projektēšanas problēmas. Rīga: RTU izdevniecība, 2003. - 361 lpp.
5. Frohn Manfred, Oberthur Wolfgang Hans - Siedler Jobst, Wiemer Manfred, Peter Zastro W. Mikroelektronikas komponentes un pamatshēmas. Valmiera: VPIC izd., 2003. - 512 lpp.
6. Grob B. Basic Electronics. NY: Glence Mc Graw – Hill, 1997. - 1010 lpp.
7. Greivulis J., Raņķis I. Iekārtu vadības elektroniskie elementi un mezgli. Rīga: *Avots*, 1997. - 260 lpp.
8. Vainovskis E. Pusvadītāju radioelektronika. Rīga: *Zvaigzne*, 1985. - 208 lpp.
9. Grabinskis A., Pētersons L. Signālu pārraide un elektrosakari. Rīga: *Zvaigzne*, 1984. - 172 lpp.
10. Grundulis A., Stanke H. Tehniskā elektronika. Rīga: *Zvaigzne*, 1976. - 326 lpp.
11. Aprad Barna, Dan I. Porat. Operational amplifiers. New York: *John Wiley & Sons*, 1989. - 273 p.
12. Charles A. Holt. Electronic Circuits. Digital and Analog. New York: *John Wiley & Sons*, 1978. - 857 p.
13. European Telecommunication Standardization Institute (ETSI). Group Special Mobile or Global of Mobile Communications (GSM) Recommendation. ETSI Secretariat, Sophia Antipolice cedex, France, 1988.
14. Hanzo L., Stefanov J. The Pan-European digital cellular mobile radio System known as GSM. IN: Mobile Radio Communications, Steel, R., and Chap.8., p. 677 -773, IEEE Press-Pentech Press, London, 1992.
15. Stiprās strāvas elektronika. / E.A.Blumbergs, J.P.Greivulis, G.K.Leiškalns, V. J. Putniņš. Rīga: *Liesma*, 1978. - 246 lpp.
16. Putniņš V., Greivulis J., Blumbergs E. Rūpniecības elektronikas pamati. Rīga: *Liesma*, 1973. - 100 lpp.