

TURINYS

Pratarmė	6
Elektronikos pagrindai	7
I. Pagrindinės sąvokos	7
§1. Radioelektroninių mazgų elementai ir bendrosios charakteristikos	7
§2. Signalai, jų klasifikacija	10
§3. Grįžtamasis ryšys	11
§4. Informacijos teorijos elementai	12
II. Elektrovakuuminiai prietaisai	15
§1. Bendrosios pastabos	15
§2. Diodas	16
§3. Triodas	18
§4. Tetrodas	20
§5. Pentodas	21
§6. Dar šis tas apie elektrovakuumines lempas	22
§7. Elektroniniai vamzdžiai	22
III. Puslaidininkiai elektronikoje	24
§1. Bendrosios pastabos	24
§2. Savasis ir priemaišinis puslaidininkių laidumas	24
IV. Puslaidininkiniai prietaisai, veikiantys laidumo kitimo principu	27
§1. Termorezistorius	27
§2. Fotorezistorius	29
§3. Varistoriai	32
V. p - n sandūra	35
§1. p - n sandūros suformavimas	35
§2. p - n sandūra, veikiant išoriniam įtampos šaltiniui	36
§3. Puslaidininkiniai diodai	39
§4. Diodų modifikacijos	42
VI. Dvipolis tranzistorius	47
§1. Bendrosios žinios	47
§2. Tranzistoriaus darbas statiniu režimu	48
§3. Stiprinimas tranzistoriumi	49
§4. Tranzistorių jungimo schemas	50
§5. Tranzistoriaus maitinimas ir darbo stabilizavimas	51
§6. Tranzistoriaus charakteristikos	53
§7. Tranzistoriaus parametrai	55

§8. Kai kurios tranzistorių ypatybės.....	58
§9. Tranzistoriaus darbo režimas.....	59
§10. Tranzistoriaus darbas impulsiniu režimu.....	61
VII. Lauko tranzistoriai ir tiristoriai	63
§1. Lauko tranzistoriai.....	63
§2. Tiristoriai.....	66
VIII. Puslaidininkiniai optoelektroniniai prietaisai.....	71
§1. Fotodiodai.....	71
§2. Puslaidininkiniai fotoelementai.....	72
§3. Fototranzistoriai.....	74
§4. Fototiristoriai.....	75
§5. Šviesos diodai.....	76
§6. Optronai.....	77
IX. Mikroelektronika.....	81
§1. Bendrosios žinios	81
§2. Plėvelinės ir hibridinės IS.....	82
§3. Puslaidininkinės IS.....	83
Elektroniniai ESM elementai ir mazgai.....	86
X. Elektroniniai jungikliai	86
§1. Pagrindinės sąvokos	86
§2. Diodinis jungiklis	87
§3. Tranzistorinis jungiklis.....	88
XI. Skaitmeninių įrenginių loginiai elementai.....	93
§1. Logikos algebros pagrindinės sąvokos.....	93
§2. Pagrindinių loginių funkcijų schemotechninė realizacija.....	97
XII. Trigeriai.....	102
§1. Bendrosios žinios	102
§2. Asinchroniniai trigeriai.....	103
§3. Sinchroniniai trigeriai.....	105
XIII. Multivibratoriai.....	112
§1. Bendrosios žinios	112
§2. Kolektorius ir bazės ryšio multivibratoriai	113
XIV. Pagrindiniai skaitmeninių įrenginių mazgai	121
§1. Registrai	121
§2. Skaitikliai	123
§3. Šifratoriai.....	131
§4. Dešifratoriai.....	132
§5. Perštūmikliai.....	134

§6. Kodo keitikliai	134
XV. Aritmetiniai įrenginiai	137
§1. Sumatoriai	137
§2. Daugybės įrenginiai	139
§3. Atminties įrenginiai.....	141
§4. Magnetiniai AI	143
§5. Puslaidininkiniai AI.....	145
XVI. Procesoriai ir mikroprocesoriai	148
§1. Procesoriai, jų evoliucija	148
§2. Bendrosios žinios apie procesorius	151
§3. Pagrindinės mikroprocesorių techninės charakteristikos	153
Literatūra	155

PRATARMĖ

Šiuolaikinė gamyba ir jos dabartinės technologijos, moksliniai tyrimai, ryšiai, transportas ir kitos žmogaus veiklos sritys darosi tiek sudėtingos, jog be automatikos priemonių dažnai neįmanoma apsieiti – žmogus arba neapėmė visos informacijos, arba nepajėgia su ja susidoroti dėl mąstymo ir veiksmų „lėtaeigiškumo“, arba negali aktyviai valdyti vykstančius procesus saugumo sumetimais. Tokiais atvejais siekiama, kad žmogų pakeistų *automatiniai* įrenginiai (*automatos* gr. – savaeigis, savaveikis). Pagal funkcinę paskirtį automatiniai įrenginiai skirstomi į: 1) *automatinės kontrolės*, 2) *automatinės signalizacijos*, 3) *automatinio reguliavimo* ir 4) *automatinio valdymo*. Kai tarp valdomojo objekto ir dispečerinio punkto yra didelis atstumas, naudojami *telemechanikos* įrenginiai, kurie nuo automatinių skiriasi tuo, kad papildomai dar turi radijo siųstuvus, imtuvus ir ryšio linijas.

Automatika ir telemechanika yra nesenos mokslo ir technikos šakos, sparčiau pradėjusios plėtotis tik XX amžiuje. Ypač galingą postūmį šių mokslo šakų plėtrai davė skaičiavimo technikos, mikroprocesorinės technikos išsivystymas. Šių dienų automatinių ir telemechaninių sistemų neįmanoma įsivaizduoti be elektroninių skaičiavimo mašinų (ESM), kurios nuėjo ilgą vystymosi kelią nuo I kartos mašinų su elektromechaninėmis relėmis ir elektrovakuuminėmis lempomis iki mikroprocesorinių šiuolaikinių mašinų. ESM vystymosi istorija atspindi puslaidininkinės elektronikos plėtros lygį.

Leidinys skiriamas informatikos specialybės dieninio, vakarinio ir neakivaizdinio skyrių studentams, kurių fizikos ir elektronikos žinios apsiriboja vidurinės mokyklos fizikos kursu. Kompiuterininkų žargonu tariant, ji padės studentams suprasti kompiuterio „geležies“ veikimo principus. Leidiniu taip pat galės pasinaudoti fizikos bei fizikos ir informatikos specialybės studentai, studijuodami elektronikos kursą.

ELEKTRONIKOS PAGRINDAI

I. PAGRINDINĖS SĄVOKOS

§1. Radioelektroninių mazgų elementai ir bendrosios charakteristikos

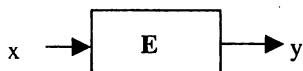
Visi automatikos, telemechanikos ir skaičiavimo technikos įrenginiai sudaryti iš *elementų*, t.y. schemas ar sistemos dalių, atliekančių tam tikrą funkciją. Elementai skirstomi į *pasyviuosius* (neturinčius maitinimo šaltinių ir stiprinimo įrenginių) ir *aktyviuosius* (turinčius maitinimo šaltinius arba stiprinimo įrenginius). Pasyviųjų elementų *išėjimo signalas* dažniausiai yra silpnesnis už *įėjimo signalą*. Aktyviųjų elementų išėjimo signalas paprastai yra stipresnis už įėjimo signalą, nes signalas sustiprinamas maitinimo šaltinio energijos sąskaita.

Signalai gali būti elektriniai ir neelektriniai (pavyzdžiui, slėgis, temperatūra, poslinkis ir t.t.). Elektriniai signalai yra universaliausi.

Pagal vykdomas funkcijas elementai skirstomi į:

- 1) *Daviklius* (elementus, keičiančius matuojamąjį dydį kitu, paprastai elektriniu dydžiu). Jie būna: a) *parametriniai* (reostatiniai, talpiniai ir pan.) ir b) *generatoriniai* (indukciniai, termoelektriniai ir pan.).
- 2) *Stiprintuvus*.
- 3) *Maitinimo* (lygintuvai, stabilizatoriai).
- 4) *Perjungimo* (relės, kontaktoriai, skirstikliai, skaičiavimo technikos elementai).
- 5) *Vykdyto* (varikliai, movos).

Bet kuris automatikos, telemechanikos, skaičiavimo technikos elementas yra keitiklis, į kurio įėjimą patenka signalas x , o išėjime gaunamas signalas y (1.1 pav.); ryšys tarp signalų nusakomas priklausomybe $y = f(x)$, kuri vadinama *amplitudine charakteristika*.



1.1 pav.

Daugumai elementų būdingi šie parametrai: *perdavimo koeficientas*, *jautris*, *stiprinimo koeficientas*, *jautrio slenkstis*, *paklaida*.

Skiriami tokie perdavimo koeficientai:

a) *Statinis* $k_{st} = \frac{y}{x}$.

b) *Dinaminis* $k_{din} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \approx \frac{dy}{dx}$.

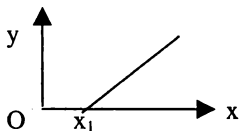
čia Δy – išėjimo signalo pokytis, Δx – įėjimo signalo pokytis.

Kai amplitudinė charakteristika $y = f(x)$ tiesinė, $k_{st} = k_{din}$. Jei y ir x yra to paties pobūdžio dydžiai, perdavimo koeficientai yra bedimensiniai.

c) *Santykinis* $k_{sant} = \frac{k_{din}}{k_{st}} = \frac{\Delta y \cdot x}{y \cdot \Delta x}$.

Kai $y = f(x)$ tiesinė, $k_{sant} = 1$.

Daviklių perdavimo koeficientas vadinamas *jautriu*, stiprintuvų perdavimo koeficientas – *stiprinimo koeficientu*.



1.2 pav.

Jautrio slenksčius x_1 vadinama mažiausia įėjimo signalo reikšmė x , kuriai esant pakinta išėjimo signalas y (1.2 pav.). Ox_1 vadinama *nejautrumo zona*.

Plačiau paliesime matavimo tikslumo ir paklaidos sąvokas.

Dėl matavimo prietaisų, mūsų jutimo organų netobulumo ir kt. priežasčių visus matavimus galime atlikti tik tam tikru, toli gražu ne absoliučiu tikslumu. Matavimo klaidos skirstomos į dvi grupes: **sistemines** ir **atsitiktines**. Sisteminės klaidos daromos dėl matavimo prietaisų gedimų ar netobulumo, netinkamai pasirinkto matavimo metodo. Suprantama, šios klaidos nepriklauso nuo matavimų skaičiaus, nes, nepašalinus klaidos priežasties, jos kartosis kiekvieną kartą matuojant. Atsitiktinės klaidos priklauso nuo eksperimentatoriaus klaidų, jutimo organų netobulumo, kitų įvairiausių priežasčių, kurių dažnai iš anksto numatyti neįmanoma. Atsitiktinės klaidos paklūsta tikimybiniam dėsniams, todėl matuojamojo dydžio vertės aritmetinis vidurkis visada bus arčiausiai absoliučiai tikrosios, etaloninės dydžio vertės.

Matavimo tikslumą nusako ta mažiausia matavimo vieneto dalis, iki kurios eksperimentatorius, būdamas tikras, kad matavimas teisingas, gali atlikti matavimą. Matavimo tikslumo laipsnis priklauso nuo matavimo prietaiso ir bendrųjų matavimo metodų. Iš čia išplaukia

išvada, kad prieš pradėdant matavimus, būtina iš anksto įvertinti matavimų tikslumo ribą, kuri gali būti pasiekta turimais matavimo prietaisais.

Norint padidinti galutinio rezultato tikslumą, reikia bet kurį matavimą atlikti ne vieną, o keletą kartų, išlaikant tas pačias matavimo sąlygas, ir, kaip minėta, rasti aritmetinį vidurkį kaip artimiausią vertę tikrajai matavimo vertei. *Matavimo vidurkis* skaičiuojamas pagal formulę

$$N = \frac{N_1 + N_2 + \dots + N_k}{k};$$

čia N_1, N_2, \dots, N_k - atskirų matavimų rezultatai, k - matavimų skaičius. Kiekvieno matavimo nuokrypis nuo vidurkio ΔN_i , t.y. dydžiai

$$N - N_1 = \pm \Delta N_1,$$

$$N - N_2 = \pm \Delta N_2$$

.....

.....

$$N - N_k = \pm \Delta N_k$$

vadinami atskirų matavimų *absoliutinėmis paklaidomis*. Ženklas „+“ rašomas tada, kai išmatuota vertė didesnė už vidurkio vertę, ženklas „-“ - kai išmatuota vertė mažesnė už vidurkį. Vadinasi, absoliutinė paklaida yra apytikslės reikšmės nuokrypis nuo tikrosios dydžio vertės.

Absoliutinės matavimų paklaidos aritmetinis vidurkis yra dydis

$$\Delta N = \frac{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \dots + \Delta N_k}{k}.$$

Santykiai $\Delta N_1 / N_1, \Delta N_2 / N_2, \dots$ vadinami matavimų *santykinėmis paklaidomis*. Vidutinės absoliutinės paklaidos vidurkio ΔN santykis su vidutine matuojamojo dydžio verte N

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm E$$

vadinamas *vidutine santykinė rezultato paklaida*.

Santykinės paklaidos paprastai išreiškiamos procentais. Tada gauta jų vertė padauginama iš 100%.

Absoliutinės paklaidos santykis su dydžio nominaliąja verte (pavyzdžiui, su matavimo prietaiso matavimo ribos verte) vadinama *redukuota paklaida*. Matavimo prietaiso redukuota paklaida, išreikšta procentais, vadinama *prietaiso tikslumo klase*.

§2. Signalai, jų klasifikacija

Signalas (signum (lot.) – ženklas) yra fizinė informacijos išraiška, kuri susideda iš informacijos nešiklio (materialaus kūno, fizikinės terpės) ir turinio (perduodamos informacijos). Pagal informacijos nešiklio prigimtį signalas gali būti mechaninis (pavyzdžiui, asmens pasas, perforacinė korta), garso, šviesos, magnetinis ir t.t. Dažniausiai naudojami elektriniai arba elektromagnetiniai (radijo) signalai.

Informaciniu požiūriu signalai skirstomi į *determinuotus* ir *atsitiktinius*. Pagrindinė sąlyga, kad procesas tenkintų signalo reikalavimus, yra $x \neq \text{const}$ laiko intervale $-\infty \leq t \leq +\infty$ arba bent jau stebėjimo intervale.

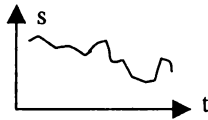
Determinuotu vadinamas signalas, kurio momentinė vertė bet kuriuo laiko momentu žinoma arba gali būti nusakyta tikimybe, lygia vienetai.

Atsitiktiniu vadinamas signalas, kurio momentinės vertės iš anksto nežinomos ir gali būti nusakytos su tikimybe, mažesne už vieneta. Iš esmės bet koks perduodantis naują informaciją signalas yra atsitiktinis, nes determinuotas signalas, t.y. iš anksto žinomas signalas, naujos informacijos neperduoda.

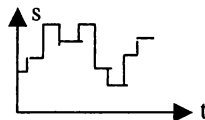
Prie atsitiktinių signalų priskiriami *trukdžiai* arba *triukšmai*, kurie trukdo perduoti informaciją.

Signalus taip pat galima klasifikuoti pagal jų prigimtį: galima kalbėti apie signalą kaip apie *fizinę procesą* ir jį atitinkantį kokio nors fizikinio dydžio (pavyzdžiui, įtampos, srovės ar kt.) nuolatinį kitimą. Toks netrūkus elektrinis signalas vadinamas *analoginiu* ir apdorojamas analoginėmis elektroninėmis grandinėmis ir įrenginiais (stiprintuvais, filtrais, analoginėmis skaičiavimo mašinomis). Tokie signalai gali turėti laisvai kintančią arba kvantuotą amplitudę. Be analoginių, plačiai naudojami diskretiniai (impulsiniai, kodiniai) signalai, apdorojami skaičiavimo technika. Vadinasi, signalus sąlyginai galima suskirstyti į tokias klases:

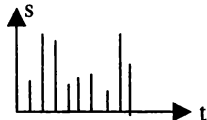
- 1) laisvai kintantis pagal amplitudę netrūkus (analoginis) signalas (2.1 pav.);
- 2) kvantuotas pagal amplitudę netrūkus signalas (2.2 pav.);
- 3) laisvai kintantis pagal amplitudę diskretinis signalas (2.3 pav.);
- 4) kvantuotas pagal amplitudę diskretinis (skaitmeninis) signalas (2.4 pav.).



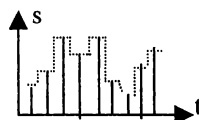
2.1 pav.



2.2 pav.



2.3 pav.

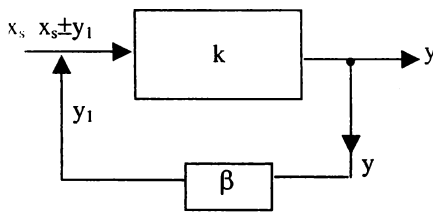


2.4 pav.

§3. Grįžtamasis ryšys

Grįžtamoju ryšiu yra vadinama sistemos veikimo rezultatu poveikis tolesniam tos pačios sistemos veikimui. Jis susidaro tuomet, kai išėjimo signalas y (arba jo dalis) per grįžtamojo ryšio grandinę paduodamas atgal į sistemos, mazgo ar elemento įėjimą. Jei į įėjimą grąžinamas signalas y savo faze sutampa su įėjimo signalu x , grįžtamasis ryšys vadinamas *teigiamu*; jei grąžinamas signalas yra priešingos fazės įėjimo signalui, grįžtamasis ryšys vadinamas *neigiamu*. Neigiamas grįžtamasis ryšys sistemos stabilumą didina; teigiamas grįžtamasis ryšys sistemos stabilumą mažina, artina prie generacijos arba griūtinio irimo (3.1 pav.).

Tegul pagrindinio elemento įėjimo signalas yra $x = x_s$, išėjimo signalas y , o perdavimo koeficientas grąžinamas atgal į įėjimą (3.1 pav.). β vadinamas *grįžtamojo ryšio koeficientu*.



3.1 pav.

$$k = \frac{y}{x}$$

Išėjimo signalas per grįžtamojo ryšio grandinę su perdavimo koeficientu

$$\beta = \frac{y_1}{y}$$

Dabar elemento įėjimo signalas priklausomai nuo grąžinamojo signalo fazės bus

$$x = x_s \pm y_1 = x_s \pm \beta y = x_s \pm \beta k x.$$

Iš čia

$$x_s = x (1 \pm \beta k).$$

Tada elemento, turinčio neigiamą grįžtamąjį ryšį, perdavimo koeficientas bus

$$k_{gr-} = \frac{y}{x_s} = \frac{y}{x(1 + \beta k)} = \frac{k}{1 + \beta k},$$

t.y. $1 + \beta k$ kartų mažesnis nei elemento, kuris grįžtamojo ryšio neturi.

Esant teigiamam grįžtamajam ryšiui, elemento perdavimo koeficientas

$$k_{gr+} = \frac{k}{1 - \beta k},$$

t.y. padidėja. Tai mažina elemento stabilumą.

§4. Informacijos teorijos elementai

Informacija vadinamos žinios, vienų asmenų perduodamos kitiems žodžiu arba masinės komunikacijos priemonėmis (*informatio, informo* (lot.) – išaiškinu, pavaizduoju). Informacija gali būti mokslinė, visuomeninė, politinė, techninė ir pan. Struktūriniu ir funkciniu aspektu informaciją tiria informatika, labiau funkciniu aspektu – matematika, labiau struktūriniu aspektu – semiotika, taikomoji lingvistika. Pagal grįžtamojo ryšio turinį skiriamos 4 informacijos rūšys:

- 1) *elementarioji*, kai poveikį priima negyvas fizinis kūnas;
- 2) *biologinė*, kai poveikį priima gyva biologinė būtybė;
- 3) *semantinė*, kai poveikį sąmoningai priima protinga būtybė;
- 4) *mašininė*, kai signalus priima ir apdoroja techninis įrenginys.

Informacijos saugojimo, matavimo, transformavimo ir perdavimo klausimus nagrinėja matematikos disciplina, vadinama *informacijos teorija*. Ji skirstoma į: 1) *struktūrinę*, tiriančią informacijos masyvų sudarymo ir matavimo problemas; 2) *semantinę*, tiriančią informacijos prasmės, naudingumo, vertės klausimus; 3) *statistinę*, tiriančią informacijos matavimo, perdavimo klausimus pagal tikimybinės charakteristikas. Labiausiai išplėta yra statistinė informacijos teorija.

Informacijos teorija naudojama telegrafijoje, telemechanikoje, skaičiavimo technikoje, biologijoje, lingvistikoje ir t.t. Pradininkas – K. Šanonas (JAV), 1948 – 1949 m. tikimybiniais statistiniais metodais išsprendęs techniniais ryšio kanalais perduodamų pranešimų informacijos matavimo uždavinius ir intuityviai informacijos sąvokai suteikęs matematinį pagrindą.

Svarbiausios sąvokos, kuriomis remiasi statistinė informacijos teorija, yra *pranešimų aibės entropija, informacijos kiekis ir ryšio (informacijos perdavimo) kanalas*.

Pranešimų aibės entropija vadinamas dydis

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i ,$$

čia p_i – pranešimų pasirodymo tikimybės, n – pranešimų aibės apimtis. Entropija naudojama kaip neapibrėžtumo matas. Bet kurio pranešimo informacijos kiekis J reiškiamas neapibrėžtumo pokyčiu, priėmus tą pranešimą:

$$J = H_0 - H,$$

čia H_0 – neapibrėžtumo entropija prieš gaunant pranešimą, H – neapibrėžtumo entropija gavus pranešimą.

Ryšio kanalas yra matematinė abstrakcija, charakterizuojama įėjimo ir išėjimo pranešimų aibėmis, tų aibių elementų (pranešimų) tikimybėmis arba tikimybės tankio funkcijomis, pranešimų teisingo perdavimo arba iškraipymo tikimybėmis, kanalo praleidžiamuoju pajėgumu (didžiausiu informacijos kiekiu, kurį galima perduoti tuo kanalu per laiko vieneta).

Informacijos kiekis yra situacijos neapibrėžtumo pokyčio, kurį sukelia informacijos perdavimas, teorinis matas. Statistinėje informacijos teorijoje informacijos kiekis reiškiamas situacijos neapibrėžtumo sumažėjimu. Matuojamas dvejetainiais vienetais (bitais ir baitais), natūriniais vienetais (hartliais). Struktūrinėje informacijos teorijoje informacijos kiekis apibrėžia informacinių elementų (dvejetainių skaičių, raidžių ir kt.) kiekį informaciniame komplekse (ESM atmintyje, knygoje, masyve), ryšių tarp tų elementų kiekį arba tų elementų galimų kombinacijų kiekį. Matuojamas informacinių elementų, jų ryšių ar kombinacijų skaičiumi, taip pat kombinacijų skaičiaus dvejetainiu logaritmu. Dažniausiai naudojami dvejetainiai informacijos kiekio vienetai. Viena dvejetainė skiltis (taip – ne, 1 – 0) atitinka vieną *bitą*. Tai informacijos kiekis, gaunamas įvykus vienam iš

dviejų lygiai galimų įvykių. Bitais vertinama ESM žodžių ilgiai, atminties talpa. 8 dvejetainių skilčių (bitų) grupė sudaro *baitą*. ESM, perduodama, saugodama, apdorodama informacijos duomenis, baitu operuoja kaip vienetu. Vienu 8 bitų baitu galima atvaizduoti vieną iš galimų $2^8 = 256$ alfabetinių ir skaitmeninių simbolių arba 2 dešimtainius skaitmenis.

II. ELEKTROVAKUUMINIAI PRIETAISAI

§1. Bendrosios pastabos

Elektrovakuuminiai prietaisai sudaro didelę grupę elektroninių prietaisų, kurių veikimas pagrįstas laisvųjų elektronų judėjimo vakuume arba praretintose dujose reiškiniiais. Elektros srovę šiuose prietaisuose sudaro elektriniame lauke judantys laisvieji elektronai arba tuo pat metu judantys elektronai ir dujų jonai. Prietaisas sumontuojamas metaliniame, stikliniame arba keraminiame balione, kuriame sudaromas didesnio ar mažesnio laipsnio vakuumas. *Elektrovakuuminiuose* prietaisuose oro slėgis sumažinamas iki $<100 \mu\text{Pa}$, *joniniuose* – iki 100 mPa . Prie elektrovakuuminių prietaisų priskiriamos elektroninės lempos, elektroniniai vamzdžiai, siunčiamieji televiziniai vamzdžiai ir kineskopai ir t.t. Elektroninės lempos priklausomai nuo balione sumontuotų elektrodų skaičiaus skirstomos į: *diodus, triodus, tetodus, pentodus, heksodus, heptodus ir oktodus*. Visos šios lempos turi 2 vienodus pagrindinius elektrodus: elektronų emiterį – *katodą* ir elektronų kolektorių – *anodą*. Skiriasi tik pagalbinių elektrodų – *tinklelių* – skaičius (triode – 1 tinklelis, tetrode – 2, pentode – 3 ir t.t.).

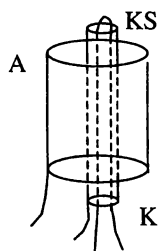
Laisvuosius elektronus vakuume galima gauti keliais būdais:

- 1) elektronus išlaisvinant iš medžiagos, medžiagą kaitinant (*termoelektroninė emisija*);
- 2) medžiagą apšviečiant didelės energijos šviesos kvantais (*fotoelektroninė emisija*);
- 3) medžiagą bombarduojant didelės energijos elektronais (*antrinė elektroninė emisija*);
- 4) elektronus išraunant iš medžiagos stipriu elektriniu lauku (*autoelektroninė emisija*).

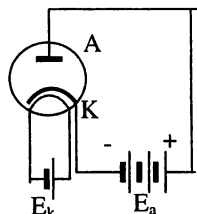
Elektrovakuuminiuose prietaisuose panaudojama termoelektroninė emisija. Kitos emisijos rūšys juose gali pasireikšti kaip šalutiniai (dažniausiai žalingi) efektai.

§2. Diodas

Diodo balione sumontuoti 2 elektrodai – katodas ir anodas. Katodai gali būti *tiesioginio* kaitinimo (pavyzdžiui, volframinis siūlelis, kurio darbo temperatūra būna aukšta – 2100 – 2300°C, tačiau turi mažą naudingumo koeficientą ir nedidelę emisiją) ir *netiesioginio* kaitinimo.



2.1 pav.



2.2 pav.

Netiesioginio kaitinimo katodą K sudaro keraminis vamzdelis K, kuriame pratemptas kaitinimo siūlelis KS. Vamzdelio išorinis paviršius padengiamas medžiaga, turinčia mažą elektronų išlaisvinimo darbą, kartu – žemą darbinę temperatūrą (anglies junginiais, kurių $t_d = 1600 - 1700^\circ\text{C}$ ir efektyvumas $H = 50 - 70$

mA / W, arba šarminių metalų oksidais, kurių $t_d = 700 - 900^\circ\text{C}$ ir efektyvumo koeficientas $H = 50 - 100$ mA/W). Be to, vamzdelio darbinis paviršius gerokai didesnis nei kaitinimo siūlo, todėl emituojama daugiau elektronų. Netiesioginio kaitinimo katodo kaitinimo siūlą galima maitinti tiek nuolatine, tiek kintamąja srove – dėl katodo didelės šiluminės talpos emisija daugmaž susidaro pastovi ir neatsiranda kintamosios srovės fono, kaip kad būna tiesioginio kaitinimo katodą maitinant kintamąja srove.

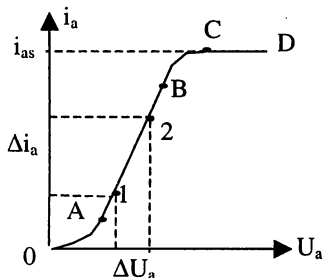
Diodo anodas A gaminamas iš volframo ir yra cilindro, gaubiančio katodą, formos. Diodo elektrodų konstrukcija pavaizduota 2.1 pav. Visa ši konstrukcija montuojama stikliniame balione, kuriame sudaromas vakuumas. 2.2 pav. parodytas diodo scheminis žymuo ir jo maitinimo grandinės – kaitinimo su maitinimo šaltiniu E_k ir anodinė su maitinimo šaltiniu E_a .

Tarkime, diodo anodinė grandinė neįjungta, o kaitinimo grandinė paleidžiame elektros srovę. Kaitinimo siūlelis įkaitina katodą, iš jo aktyviojo sluoksnio išsilaisvina ir į išorę išlekia elektronai. Elektronams išlėkus iš aktyvuojančios medžiagos, šios medžiagos atomai tampa teigiamais jonais, kurie traukia išlėkusius elektronus atgal. Todėl elektronai apie katodą sudaro debesėlį (erdvinį krūvį), kuriame yra

dinaminė pusiausvyra: dalis iš medžiagos išlėkusių elektronų čia pat grįžta atgal į katodą, jų vietą užima naujai emituoti elektronai. Elektronų debesėlis savo neigiamu krūviu ir teigiamų jonų trauka trukdo tolesnei elektronų emisijai. Elektronai, „virdami“ prie katodo, anodo nepasiekia ir per diodą srovė neteka; sakoma, kad diodas uždarytas.

Dabar įjunkime anodinį maitinimo šaltinį taip, kad anodas įgytų „+“ potencialą (jei įjungsime E_a atvirkščiai, tai neigiamas anodas stums laisvuosius elektronus katodo link ir per lempą juo labiau negalės tekėti srovė). Teigiamas anodas trauks elektronus ir tuo stipriau, kuo jo „+“ potencialas didesnis. Elektronai nuo katodo ims judėti anodo link maždaug tvarkingai, o toks elektronų judėjimas vadinamas elektros srove. Vadinasi, anodui turint teigiamą potencialą, per diodą teka elektros srovė. Ji vadinama anodine srove i_a . Kaip anodinė srovė i_a priklauso nuo E_a dydžio (teisingiau nuo anodo įtampos U_a), parodo *anodinė arba voltamperinė charakteristika* (2.3 pav.).

Voltamperinėje charakteristikoje ryškiai išskiriamos kelios dalys: apatinis vingis OA, susidarantis dėl elektronų debesėlio aplink katodą



2.3 pav.

įtakos, proporcingoji (tiesinė) dalis AB, viršutinis vingis BC ir soties sritis CD. Tiesinėje charakteristikos dalyje pasirinkę du taškus 1 ir 2 ir juos suprojektavę į ašis i_a ir U_a , galime matyti, kokių dydžiu Δi_a pakinta anodinė srovė, anodinei įtampai pakitus dydžiu ΔU_a , ir apskaičiuoti diodo parametrus, kurie yra du:

1) Statumas

$$S = \frac{\Delta i_a}{\Delta U_a}$$

Diodo charakteristikos statumas turi laidumo fizikinę prasmę.

2) Vidinė diferencialinė varža

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta i_a} = \frac{1}{S}$$

Tad diodui galioja lygtis

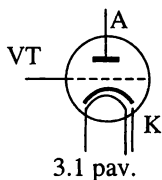
$$SR_i = 1$$

093004628035

Taigi iš diodo charakteristikos matyti, kad per diodą srovė teka ($i_a > 0$) tik tada, kai $U_a > 0$; vadinasi, diodas pasižymi vienpusiu laidumu ir gali būti naudojamas kintamajai srovei lyginti. Dabartiniu metu diodus baigia išstumti puslaidininkiniai diodai.

§3. Triodas

Triodas, be katodo ir anodo, turi dar trečią elektroda – *valdantįjį tinklėlį*. Jis yra metalinis, spiralės formos, sumontuojamas ant atramėlių tarp katodo ir anodo. Jo potencialas turi esminę įtaką elektronų judėjimui lempeje: jeigu jam suteikiama „+“ įtampa U_g , jis sustiprina anodo elektrinį lauką ir skatina elektronų judėjimą anodo link (didina anodinę srovę); jeigu jam suteikiamas „-“ įtampa U_g , jis stumia elektronus atgal katodo link ir silpnina anodinę srovę. Suteikus tinkleliui pakankamai didelį „-“ potencialą, jis nepraleis nė vieno elektrono – lempa bus uždaryta, per ją srovė netekės. Taigi tinkleliu lengva valdyti anodinę srovę. Jei diode $i_a = f(U_a)$, tai triode ji priklauso nuo dviejų įtampų: anodinės U_a ir tinklelinės U_g ($i_a = f(U_a, U_g)$). Todėl triodui reikia braižyti 2 charakteristikų šeimas:



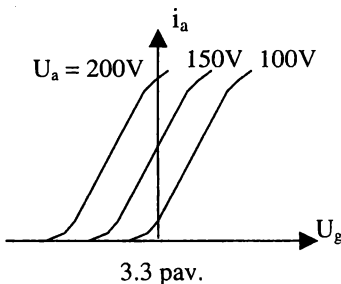
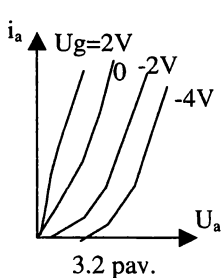
1) *anodinių* charakteristikų

$$i_a = f(U_a), \text{ kai } U_g = \text{const (3.2 pav.)};$$

2) *tinklelinių* charakteristikų

$$i_a = f(U_g), \text{ kai } U_a = \text{const (3.3 pav.)}.$$

Triodo scheminis žymuo parodytas 3.1 pav.



Iš charakteristikų galima rasti triodo parametrus:

1) *statumą*

$$S = \frac{\Delta i_a}{\Delta U_g}, \quad \text{kai} \quad U_a = \text{const};$$

2) *vidinę varžą*

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta i_a}, \quad \text{kai} \quad U_g = \text{const};$$

3) *stiprinimo koeficientą*

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}, \quad \text{kai} \quad i_a = \text{const}.$$

Tad triodui galioja lygtis

$$\mu = SR_i.$$

S, R_i ir μ vadinami *statiniais triodo parametrais*. Triodui dirbant apkrautam apkrova R_a ir kintant tinklelio įtampai, triodas dirba *dinaminiu režimu* (pavyzdžiui, stiprintuve), kurį charakterizuoja *dinaminiai parametrai*:

1) *dinaminis stiprinimo koeficientas*

$$k = \frac{\mu R_a}{R_i + R_a};$$

2) *dinaminis statumas*

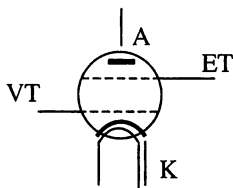
$$S_d = \frac{\mu}{R_i + R_a}.$$

Triodai naudojami elektriniams virpesiams stiprinti, generacijai, moduliacijai, detekcijai ir t.t. Tačiau jie turi labai didelių trūkumų:

- 1) nedidelė vidinė varža R_i ($k\Omega$ eilės), dėl to nedidelis jų stiprinimo koeficientas μ ;
- 2) didelės vidinės tarpelektrocinės (parazitinės) talpos: įėjimo C_{gk} (talpa tarp tinklelio ir katodo), praėjimo C_{ga} (tarp tinklelio ir anodo) ir išėjimo C_{ak} (tarp anodo ir katodo). Jos veikia žalingai triodui dirbant dinaminiu režimu.

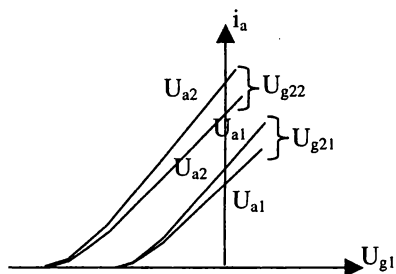
§4. Tetrodas

Tetrodas – keturių elektrodų lempa, turinti du tinklelius: be valdančiojo tinklelio, jame dar yra *ekraninis* tinklelis, sumontuotas tarp valdančiojo tinklelio ir anodo (4.1 pav.).



4.1 pav.

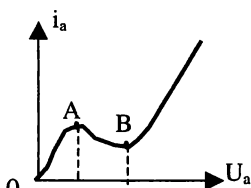
Jam suteikiama teigiama įtampa, siekianti 50 – 80% anodo įtampos. Jo poveikis iš katodo emituotiems elektronams pasireiškia tuo, kad jis susilpnina (ekranuoja) anodo elektrinį lauką, todėl padidina lempos vidinę varžą ir stiprinimo koeficientą, be to, sumažina praėjimo talpą. Tai matyti iš tetrodo tinklelinių charakteristikų (4.2 pav.) eigos: padidinus anodinę įtampą nuo U_{a1} iki U_{a2} , anodinė srovė padidėja nežymiai, tuo tarpu padidinus ekraninio tinklelio įtampą nuo U_{g21} iki U_{g22} , anodinė srovė padidėja



4.2 pav.

gerokai daugiau. Labai įdomi tetrodo anodinė charakteristika $i_a = f(U_a)$, kai $U_{g1} = \text{const}$ ir $U_{g2} = \text{const}$ (4.3 pav.). Didinant U_a , anodinė srovė pradžioje didėja, vėliau ima mažėti (charakteristikos dalis AB), po to vėl didėja. AB srityje lempa tarsi įgauna neigiamą diferencialinę varžą. Šis reiškinys vadinamas

dinatroniniu efektu, kuris

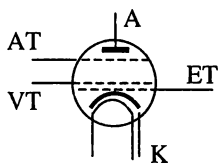


4.3 pav.

paiškinamas taip: charakteristikos dalyje OA anodinė įtampa yra nedidelė ir mažesnė už U_{g2} . Elektrinį lauką lemposje daugiausia sukuria ekraninis tinklelis, kurio greitintami elektronai juda link jo, pralekia pro retą tinklį ir pasiekia anodą. Esant tam tikrai anodinei įtampai, atitinkančiai tašką A, anodą pasiekiantys elektronai jau turi tokią kinetinę energiją, kad atsitenkę į anodą iš jo išmuša antrinius elektronus. Bet dar $U_{g2} > U_a$, todėl antriniai elektronai juda

didesnę teigiamą įtampą turinčio ekraninio tinklelio link. Lempos srityje tarp ekraninio tinklelio ir anodo susidaro priešingų krypčių pirminių ir antrinių elektronų srautai ir normalus lempos darbas sutrinka. Dinatroninis efektas išnyksta, kai U_a tampa didesnė už U_{g2} (taškas B), ir toliau didinant U_a anodinė srovė i_a vėl ima augti. Dinatroninis efektas tetrode yra žalingas reiškinys, nors kartais panaudojamas naudingai - virpesių generacijai.

§5. Pentodas

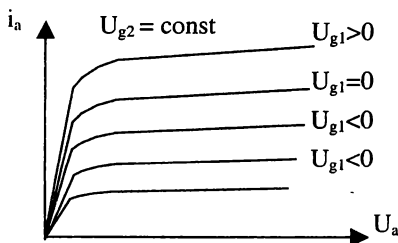


5.1 pav.

Norint išvengti dinatroninio efekto, į lempą tarp ekraninio tinklelio ir anodo buvo įmontuotas dar vienas tinklelis, gavęs *apsauginio* tinklelio vardą. Jis lempos viduje arba išorėje jungiamas su katodu, todėl anodo atžvilgiu turi „-“ potencialą. Iš anodo išmuštus elektronus apsauginis tinklelis nustumia atgal į anodą ir dinatroninis efektas nesusidaro. Lempos

žymuo parodytas 5.1 pav.

Pentodo tinklelinės charakteristikos yra lygiai tokios pat kaip tetrodo, tad pentodas turi didelę vidinę varžą ir stiprinimo koeficientą.



5.2 pav.

Pentodo anodinės charakteristikos parodytos 5.2 pav. Kol anodinė įtampa U_a nedidelė ir $U_a < U_{g2}$, charakteristika kyla sparčiai, o pasiekus $U_a \geq U_{g22}$ (normalus darbo režimas), charakteristikos kilimas smarkiai sulėtėja: pakeitus U_a gana žymiai, anodinė srovė pakinta nedaug. Vadinasi, lempos vidinė varža yra

didelė ($M\Omega$ eilės), didelis ir stiprinimo koeficientas.

§6. Dar šis tas apie elektrovakuuminės lempas

Buvo naudojamos dar sudėtingesnės konstrukcijos lempos, pavyzdžiui, heptodai, turintys 5 tinklelius, iš kurių 2 yra valdantieji. Tai tarsi dviejų aukštų lempa triodas – pentodas. Jos buvo naudojamos dažniui maišyti. Sakau „buvo“, nes elektrovakuuminių lempų pozicijos smarkiai susilpnėjo prasidėjus puslaidininkinių prietaisų erai (tranzistorius išrastas 1948 m.).

Elektrovakuuminės lempos turi daug trūkumų: didelės maitinimo įtampos ir nedidelis naudingumo koeficientas, didelė masė ir matmenys, neatsparios smūgiams ir mechaniniams poveikiams, neilgaamžės ir t.t. Tačiau jos turi ir tam tikrų pranašumų lyginant su puslaidininkiniais prietaisais: gali dirbti sąlyginai aukštesse temperatūrose, kurios neleidžiamos puslaidininkiniams prietaisams, nebijo radioaktyvaus spinduliavimo, gali atiduoti didelę galią (yra siųstuvinių triodų iki MW galios).

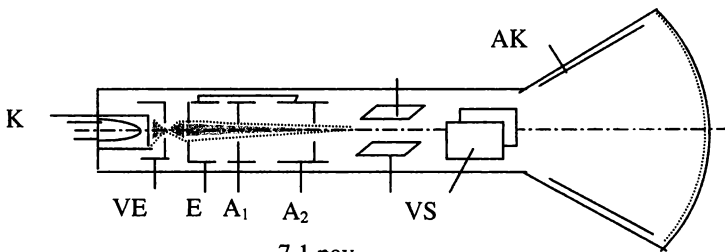
Mažinant radioelektroninės aparatūros masę ir matmenis, visų pirma reikėjo mažinti pačias lempas. Sukurti superminiatiūriniai metalo keraminiai triodai ir tetrodai, gavę *nuvistorių* pavadinimą. Jie labai atsparūs mechaniniams smūgiams ir vibracijoms, gali dirbti nuo -60°C iki 250°C temperatūroje ir iki 2 GHz dažnio, nebijo radioaktyvaus spinduliavimo, dirba, kai nedidelės maitinimo įtampos. Naudojami lėktuvų, karinėje radioaparatuose ir kitur.

§7. Elektroniniai vamzdžiai

Elektroniniai vamzdžiai sudaro kitą elektrovakuuminių prietaisų grupę. Juose, kaip ir lempos, iš kaitinamo katodo emituojami elektronai, iš kurių suformuojamas siauras elektronų pluoštelis – *elektroninis spindulys*. Pluoštelis suformuojamas ir sufokusuojamas elektronams judant per *elektroninės optikos* sistemą. Ją sudaro keli tuščiavidurių cilindrių su diafragmais formos elektrodai, turintys tam tikras įtampas. Tarp jų susidarę elektriniai laukai elektronus veikia taip, kaip lęšiai šviesos spindulius, ir suformuojamas elektroninis spindulys. Ši sistema dar vadinama *elektroniniu prožektoriumi*. Jam priklauso kaitinimo siūlas, katodas K, valdantysis elektrodas (moduliatorius) VE, greitinantis (ekranuojantis) elektrodas E, pirmasis anodas (fokusuojantis elektrodas) A_1 , antrasis anodas A_2 (19 pav.). Šioje

elektrodų sistemoje elektronai ne tik fokusuojami, bet ir įgreitinami. Toliau elektroninis spindulys patenka į valdymo sistemą VS, kurioje jis yra valdomas (atlenkiamas norimu kampu) arba elektrostatiniu, arba magnetiniu būdu, ir nukreipiamas į liuminiscuojančią medžiagą padengtą vamzdžio dugną. Kritimo vietoje elektroninis spindulys sukelia liuminoforo švytėjimą. Kūginė vamzdžio dalis dengiama laidžiu grafito (akvadago) sluoksniu, kuriam paduodama aukšta teigiama įtampa. Jis papildomai pagreitina elektroninio spindulio elektronus ir surenka iš liuminoforo išmuštus antrinius elektronus.

7.1 pav. pavaizduoti elektroniniai vamzdžiai naudojami oscilografuose. Televizorių kineskopuose, PK monitoriuose, norint gauti didelius elektroninio spindulio atlenkimo kampus, naudojama elektromagnetinė valdymo sistema: VS atlenkimo plokštelės pakeičiamos atlenkimo ritėmis.



7.1 pav.

III. PUSLAIDININKIAI ELEKTRONIKOJE

§1. Bendrosios pastabos

Puslaidininkiais vadinamos medžiagos, kurių elektrinis laidumas yra blogesnis negu laidininkų (metalų) ir geresnis negu dielektrikų (izoliatorių). Tačiau ne elektrinio laidumo ar savitosios varžos absoliučioji vertė išskiria puslaidininkius į atskirą medžiagų klasę, o šių parametų priklausomybė nuo išorinių poveikių, visų pirma nuo temperatūros: didinant metalų temperatūrą, jų elektrinis laidumas mažėja, o didinant puslaidininkių temperatūrą, jų laidumas auga.

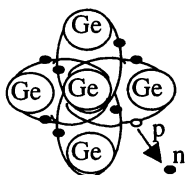
Nors, pavyzdžiui, kristaliniai detektoriai (diodai) atrasti dar XIX a. antrojoje pusėje (1874 m. vokiečių K. Braunas) ir radijo signalų detekcijai panaudoti 1902 m., o kuproksiniai ir seleniniai lygintuvai buvo naudojami nuo 1920 – 1926 m., tačiau jų veikimo teoriniai pagrindai ilgą laiką buvo neaiškūs. Tik sukūrus ir išplėtojus juostinę (zoninę) laidumo teoriją (XX a. 3 – 5 dešimtmetis, A. Zomerfeldas, V. Šotkis (Vok.), H. Vilsonas (JAV), J. Frenkelis, I. Tamas (TSRS)), buvo suprasti „keisti“ kai kurių medžiagų elektrinio laidumo mechanizmo aspektai ir prasidėjo puslaidininkinių elektroninių prietaisų kūrimo ir praktinio pritaikymo era.

Lyginant su elektroninėmis lempomis, puslaidininkiniai prietaisai turi daug pranašumų: 1) maži matmenys ir maža masė; 2) nereikia energijos prietaisui kaitinti; 3) didesnis patikimumas ir tarnavimo laikas; 4) didesnis mechaninis atsparumas; 5) didesnis naudingumo koeficientas; 6) pigesni.

Tačiau jie turi ir trūkumų: 1) didelis parametų ir charakteristikų išbarstymas; 2) didelė parametų ir charakteristikų priklausomybė nuo temperatūros; 3) parametų ir charakteristikų blogėjimas (bėgant laikui, prietaisai „sensta“); 5) ribotas dažnis ir galia; 6) jautrūs radioaktyviam spinduliavimui. Todėl puslaidininkiniai prietaisai ne visur ir ne visada gali pakeisti elektrovakuuminius prietaisus.

§2. Savasis ir priemaišinis puslaidininkių laidumas

Tipiniai puslaidininkiai yra IV grupės elementai germanis Ge ir silicis Si. Jie turi kristalinę struktūrą, o atomai kristale sujungti kovalentiniu ryšiu: atomas savo valentinius elektronus apibendrina su



2.1 pav.

greta esančiais atomais (2.1 pav.), taip tarsi igydamos 8 valentinius elektronus. Žemose temperatūrose visos kovalentinės jungtys užpildytos elektronais, atomai neutralūs ir surišti kristalinėje gardelėje, kristale nėra laisvų krūvininkų ir kristalas yra nelaidus elektros srovei. Tačiau pakėlus temperatūrą, vienas kitas elektronas gali ištrūkti iš kovalentinės jungties, tapti laisvas. Jungtyje, iš kurios ištrūko

elektronas, lieka nesukompensuotas teigiamas krūvis – skylutė. Į ją gali peršokti elektronas iš kitos jungties, todėl skylutė atsiras kitoje vietoje. Vadinasi, judrumu pasižymi ne tik *elektronai* (*n tipo krūvininkai*), bet ir skylutės (*p tipo krūvininkai*). Dabar pakanka kristale sudaryti elektrinį lauką ir per kristalą ims tekėti srovė: elektronai judės lauko linijų kryptimi, skylutės – priešinga kryptimi. Toks puslaidininkių laidumas vadinamas *savoju*. Šiuo atveju puslaidininkyje $n = p$.

Puslaidininkui pridėjime priemaišą, pradžiai kokį nors V grupės elementą (Sb, As ar P). Priemaišos atomai sudarys kovalentinį ryšį su Ge atomais, o mažiausia penktasis priemaišos atomo valentinis elektronas liks laisvas. Suprantama, puslaidininkyje egzistuos ir savojo laidumo mechanizmas, tačiau tokia priemaiša legiruotame puslaidininkyje vyraus *elektroninis* laidumas, nes $n > p$. Toks puslaidininkis vadinamas *n tipo* priemaiša, suteikianti puslaidininkui elektroninį laidumą – *donoru*. *n* tipo puslaidininkyje elektronai vadinami *pagrindiniais*, o skylutės – *nepagrindiniais* krūvininkais.

Jeigu į puslaidininkį kaip priemaišą pridėsime III grupės elementą (B, In, Al), tai tokios priemaišos atomų 3 valentinių elektronų nepakaks visiems ryšiams užpildyti. Todėl puslaidininkis įgis *skylinį* laidumą, taps *p tipo* puslaidininkiu, kuriame $p > n$, pagrindiniai krūvininkai yra skylutės, o elektronai – nepagrindiniai krūvininkai. Tokia priemaiša vadinama *akceptoriumi*.

Iliustracijai keletas skaičių. 1 cm^3 yra $N \cong 10^{22}$ puslaidininkio atomų. Kambario temperatūroje savojo laidumo krūvininkų gryname Ge yra apie $n = p = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, gryname Si $n = p = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Matome, kad $n = p \ll N$. Metaluose $n \geq N$. Todėl, pavyzdžiui, vario savitoji varža $\rho_{\text{Cu}} = 0,017 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, germanio $\rho_{\text{Ge}} = 50 \Omega \cdot \text{cm}$, silicio $\rho_{\text{Si}} = 100000 \Omega \cdot \text{cm}$.

Sakėme, kad 1 cm^3 yra $N \cong 10^{22}$ puslaidininkio atomų. Legiruojant puslaidininkį priemaišomis, net iki N_d arba $N_a = 10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ donorinės ar akceptorinės priemaišos atomų gali pakeisti bazinio puslaidininkio atomus. Tada jau puslaidininkio 1 cm^3 atsiras iki $n_n \cong 10^{16}$ papildomų krūvininkų, plus $n = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ savojo laidumo elektronų. Vadinasi, n_n apie 1000 kartų gali būti didesnis už n . Kaip rodo elementarūs skaičiavimai, skylių kaip nepagrindinių krūvininkų skaičius tiek pat kartų sumažės ir bus $p_n = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Pasirodo, kad galioja labai paprastas sąryšis:

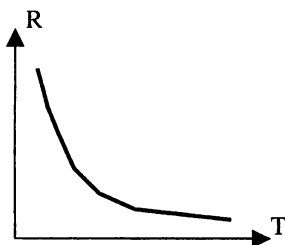
$$n_n p_n = np = n^2 = p^2,$$

todėl bendras krūvininkų skaičius lieka kaip ir savojo laidumo atveju, tačiau ryškiai (milijoną kartų) pagrindinių krūvininkų yra daugiau negu nepagrindinių. Toks pat rezultatas gaunamas ir akceptorinės priemaišos atveju.

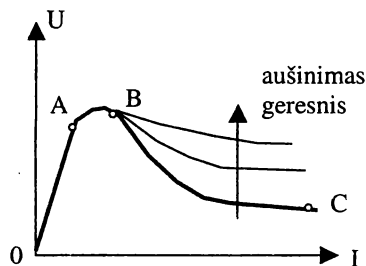
IV. PUSLAIDININKINIAI PRIETAISAI, VEIKIANTYS LAIDUMO KITIMO PRINCIPU

§1. Termorezistorius

Termorezistorius, termistorius (*termo* (gr.) – šiluma, + *resistor* (angl.) – varža) – termoelektrinis puslaidininkinis prietaisas, kurio elektrinė varža priklauso nuo temperatūros. Vieni termistoriai turi neigiamą temperatūrinį varžos koeficientą (TVK) – kylant temperatūrai, jų elektrinė varža mažėja. Tokie termistoriai gaminami iš mangano, kobalto, nikelio oksidų mišinio, priemaišomis legiruoto germanio ar silicio, sintetinio deimanto, organinių puslaidininkių. Jų darbo temperatūros intervalas nuo 170 - 210 K iki 370 – 570 K, TVK nuo – 2,4 iki –8,4 % /K. Kiti termistoriai turi teigiamą TVK – kylant temperatūrai, jų varža didėja. Jie gaminami iš kietųjų tirpalų, kurių pagrindinis komponentas – bario titanatas, legiruotas lantanu, ceriu, bismutu. Termistoriai, kurių TVK teigiamas, dar vadinami *pozistoriais*. Jų TVK temperatūroje, artimoje segnetoelektrinio virsmo temperatūrai, kinta staigiai ir labai, siekia iki 50 % /K.



1.1 pav. Termorezistoriaus, kurio TVK neigiamas, temperatūrinė charakteristika



1.2 pav. Savojo kaitinimo termorezistoriaus voltamperinė charakteristika

Termorezistoriai būna savojo ir pašalinio kaitinimo. Savojo kaitinimo termorezistoriai kaista per juos tekant elektros srovei ir juose išsiskiriant Džaulio-Lenco šilumai. Pašalinio kaitinimo termorezistorius, kaitinamas pašalinio šilumos šaltinio, keičia savo nominalinę vertę.

Termorezistoriaus, kurio TVK neigiamas, temperatūrinė charakteristika $R = f(T)$ parodyta 1.1 pav., o jo voltamperinė charakteristika – 1.2 pav. Voltamperinėje charakteristikoje ryškiai išsiskiria 3 sritis: OA, AB ir BC. Sritis OA yra tiesinė, nes nedidelė srovė nepakeičia termorezistoriaus temperatūros. Nuo taško A charakteristikos tiesiškumas sutrinka. Puslaidininkyje, iš kurio pagamintas termistorius, padaugėja laidumo elektronų ir skylių, termistoriaus varža mažėja. Charakteristika užlinksta taško B link. Toliau didinant srovę, varžos mažėjimas toks didelis, jog mažėja įtampos kritimas termorezistoriuje. Charakteristika nueina į tašką C. Charakteristikos užlinkimo laipsnis ir taško C padėtis priklauso nuo termorezistoriaus aušinimo. Kuo termorezistorius aušinamas geriau, tuo charakteristika užlinksta mažiau.

Pagrindiniai termorezistoriaus *parametrai* yra tokie:

- 1) *Šaltoji (nominalinė) termistoriaus varža* – tai termistoriaus darbinio kūno medžiagos varža 20°C temperatūroje. Termorezistoriai gaminami nuo kelių omų iki dešimčių megaomų nominalo.
- 2) *Temperatūrinis varžos koeficientas (TVK) α_T* – dydis, parodantis procentinį termorezistoriaus darbinio kūno medžiagos varžos pokytį, temperatūrai pakitus 1 K (1°C). Jis nevienodas skirtingoms temperatūroms ir paprastai žinynuose pateikiamas 20°C temperatūrai. Aukštesnėms temperatūroms α_T skaičiuojamas pagal formulę

$$\alpha_T = -\frac{B}{T^2},$$

čia B – temperatūrinio jautrio koeficientas, priklausantis nuo medžiagos fizinių savybių. Jis apskaičiuojamas pagal formulę

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_{T_1}}{R_{T_2}},$$

čia T_1, T_2 – pradinė ir galinė temperatūros, R_{T_1}, R_{T_2} – varžos, esant toms temperatūroms.

- 3) *Didžiausia išskleidoma galia* – galia, kuriai esant termorezistorius, buvęs 20°C temperatūroje, srovės įkaitinamas iki didžiausios darbinės temperatūros.

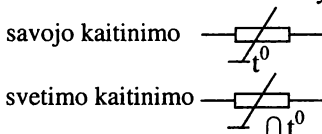
- 4) *Didžiausia darbinė temperatūra* – temperatūra, kuriai esant termistoriaus charakteristikos išlieka stabilios ilgą (garantinį) laiką.
- 5) *Laiko konstanta τ* – laikas, per kurį termistoriaus temperatūra, jį aušinant, sumažėja e kartų. Tad τ charakterizuoja termistoriaus šiluminę inerciją. τ gali būti išreikštas šiluminės talpos H ir išsklaidymo koeficiento b santykiu

$$\tau = \frac{H}{b}.$$

- 6) *Šiluminė talpa H* – šilumos kiekis, kurio reikia norint termistoriaus darbinio kūno temperatūrą pakelti 1°C .
- 7) *Išsklaidymo koeficientas b* – galia, išsklaidoma termorezistoriuje, kai temperatūrų skirtumas tarp termorezistoriaus ir aplinkos 1°C .

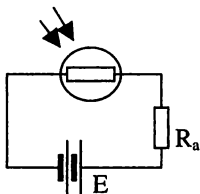
Termorezistoriai, kurių TVK neigiamas, naudojami temperatūrai matuoti ir reguliuoti, elektrinių grandinių, dirbančių plačiose ribose kintant temperatūrai, režimui stabilizuoti ir termokompensacijai, įtampos stabilizacijai, priešgaisrinėje signalizacijoje, aukšto dažnio virpesių galiai matuoti, spindulinės energijos indikacijai ir t.t. Pozistoriai gali būti panaudojami srovei apriboti grandinėje.

Savojo kaitinimo termistoriai schemose žymimi tokiu ženklu:



§2. Fotorezistorius

Fotorezistorius (*photos* (gr.) – šviesa, *resistor* (angl.) – varža) – puslaidininkinis prietaisas, keičiantis savo varžą, veikiant šviesai. Fotorezistorių apšvietus, veikiant šviesos energijai, puslaidininkyje daugėja laidumo elektronų ir skylių, ir rezistoriaus varža sumažėja. Fotorezistoriai gaminami iš kadmio sulfido (CdS), kadmio selenido (CdSe), švino sulfido (PbS), švino telūrido (PbTe), švino selenido (PbSe) ir kt. Priklausomai nuo darbinės medžiagos cheminės sudėties fotorezistoriai skiriasi spektrinėmis savybėmis.



2.1 pav.

Fotorezistoriai paprastai į schemą įjungiami nuosekliai su maitinimo šaltiniu ir apkrovos varža R_a (2.1 pav). Jei fotorezistorius yra tamsoje, per jį tekės *tamsinė fotorezistoriaus srovė*, kuri bus lygi

$$I_t = E / (R_t + R_a),$$

čia E – maitinimo šaltinio evj, R_t – *tamsinė fotorezistoriaus varža*. Fotorezistorių apšvietus, fotonai išlaisvina elektronų - skylių poras, fotorezistoriaus varža sumažėja iki R_s

ir grandine teka *šviesinė srovė*

$$I_s = E / (R_s + R_a).$$

Šviesinės ir tamsinės srovės skirtumas

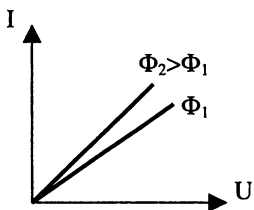
$$I_f = I_s - I_t$$

vadinamas *laidumo pirmine fotosrove*. Kol į fotorezistorių krantančios šviesos srautas nedidelis, ši srovė praktiškai beinercinė, tačiau, šviesos srautą padidinus, fotorezistoriuje ima reikštis inertiškumas (iki 0,1 s).

Pagrindinės fotorezistoriaus charakteristikos yra:

1) *Voltamperinė*, parodanti fotosrovės priklausomybę nuo įtampos, esant pastoviam šviesos srautui $\Phi = \text{const}$. Ji fotorezistoriams praktiškai tiesinė (2.2 pav.).

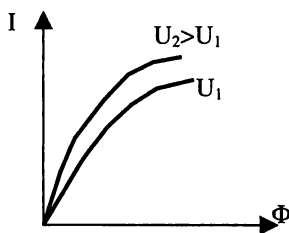
2) *Šviesinė (liuksamperinė)*, charakterizuojanti fotosrovės priklausomybę nuo pastovios spektrinės sudėties šviesos srauto didumo, esant pastoviai įtampai U . Puslaidininkiniai fotorezistoriai turi netiesinę liuksamperinę charakteristiką. Didžiausią jautrį fotorezistoriai turi, kai nedideli apšvietumai E . Tai leidžia panaudoti fotorezistorius silpnų šviesos srautų matavimams. Didinant apšvietumą (arba šviesos srautą), charakteristika užlinksta. Liuksamperinės charakteristikos užlinkimas priklauso nuo



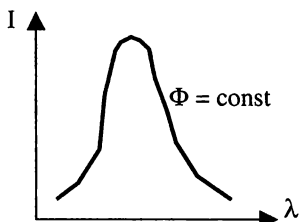
2.2 pav.

įtampos U (2.3 pav.).

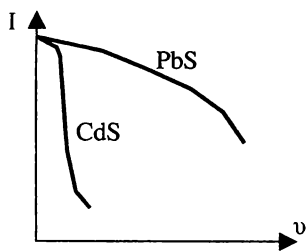
3) *Spektrinė*, apibūdinanti fotorezistoriaus jautrį tam tikro bangos ilgio (tam tikros spalvos) šviesai. Ji brėžiama, kai pastovus šviesos srautas Φ . Spektrinė charakteristika priklauso nuo fotorezistoriaus darbinės medžiagos. Kadmio sulfido fotorezistoriai



2.3 pav.



2.4 pav.



2.5 pav.

jautriausi matomai šviesai, kadmio selenido – raudonai šviesai, švino selenido – infraraudoniesiems spinduliams. Spektrinės charakteristikos pobūdis parodytas 2.4 pav.

4) *Dažninė*, apibūdinanti fotorezistoriaus jautrį, veikiant jį tam tikru dažniu kintančiu šviesos srautu. Kitais žodžiais tariant, dažninė charakteristika apibūdina fotorezistoriaus inertiškumą. Didėjant šviesos srauto kitimo dažniui, fotosrovė mažėja. Ši savybė apriboja fotorezistorių panaudojimą dirbant su aukštadažniais šviesos srautais. Dažninės charakteristikos pobūdis parodytas 2.5 pav.

Pagrindiniai fotorezistorių parametrai tokie:

1) *Tamsinė fotorezistoriaus varža* – fotorezistoriaus varža 20°C temperatūroje po 30 s, išjungus 200 lx apšviestumą.

2) *Tamsinė srovė* – srovė, tekanti per fotorezistorių, veikiant darbinei įtampai po 30 s, išjungus 200 lx apšviestumą.

3) *Šviesinė srovė* – srovė per fotorezistorių, veikiant darbinei įtampai ir 200 lx apšviestumui.

4) *Varžos kitimo kartotinumai* R_f/R_s – fotorezistoriaus tamsinės varžos santykis su jo varža,

apšvietus jį 200 lx apšviestumu.

5) *Savitasis jautris* – fotosrovės santykis su šviesos srauto ir įtampos sandauga

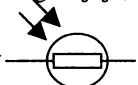
$$K_0 = \frac{I_f}{\Phi U} = \frac{I_s - I_t}{\Phi U}$$

6) *Integralinis jautris* – savitojo jautrio sandauga su ribine darbine įtampa.

7) *Darbinė įtampa* – įtampa, kuriai esant fotorezistorius gali atidirbti garantinį laiką, jo parametrams nepakintant virš leistinų verčių.

8) *Leistinoji išsklaidoma galia* – didžiausia išsklaidoma galia, kurią fotorezistorius gali išlaikyti nesudegdamas.

Fotorezistoriai, turėdami didelį jautrį, būdami paprastos konstrukcijos, mažų matmenų, pakankamai didelės galios, labai plačiai naudojami fotometrijoje, automatikoje, fototelegrafijoje, automatinio reguliavimo sistemose ir t.t.

Fotorezistoriai schemose žymimi ženklų  .

Visada reikia prisiminti, kad fotorezistorių srovė pasižymi priklausomybe nuo temperatūros.

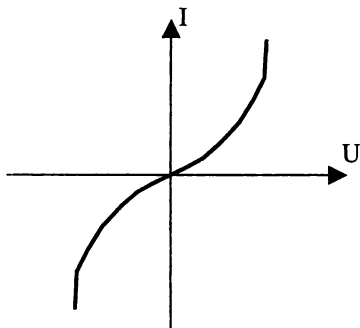
§3. Varistoriai

Varistorius (*vari(able)* (angl.) – kintamas + (*resi*)stor –varža) yra puslaidininkinis rezistorius, kurio varža (arba laidumas), veikiamas teigiamos arba neigiamos įtampos, keičiasi netiesiškai ir vienodai. Varistorių sudaro metalizuotas strypelis iš puslaidininkio, dažniausiai silicio karbido miltelių, ir jungiamosios medžiagos (molio, skystojo stiklo, dervos, lako), supresuotos ir sulydytos ~ 1700⁰C temperatūroje. Varistoriaus varžos kitimas (ji mažėja didėjant teigiamai įtampai) priklauso nuo puslaidininkio grūdelių tarpusavio kontaktų skaičiaus, stipriame elektriniame lauke esančių paviršinių oksidinių plėvelių laidumo kitimo ir jų pramušimo, sustiprėjusios elektros srovės per elektroninę skylinę sandūrą. Šie reiškiniai sąlygoja pagrindinę varistoriaus ypatybę – jo voltamperinės charakteristikos netiesiškumą.

Charakteristika nepriklauso nuo įtampos poliarumo, todėl varistoriai gali būti naudojami nuolatinės ir kintamosios srovės grandinėse. Varistoriaus voltamperinė charakteristika parodyta 3.1 pav.

)

Pagrindiniai varistorių parametrai yra:



3.1 pav.

1) *Statinė varža* R_{st} – varistoriaus varžos vertė, esant pastoviams įtampoms ir srovės dydžiams

$$R_{st} = \frac{U}{I}.$$

2) *Dinaminė varža* R_d – varistoriaus varža kintamajai srovei

$$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Dinaminė varistoriaus varža duotajame voltamperinės charakteristikos taške gali būti rasta kaip charakteristikos liestinės duotajame taške ir horizontaliosios ašies kampo tangentas.

3) *Netiesiškumo koeficientas* β – statinės ir dinaminės varžos santykis

$$\beta = \frac{R_{st}}{R_d} = \frac{\Delta I \cdot U}{\Delta U \cdot I}.$$

β yra teigiamas dydis ir $\beta = 2 \div 6$.

4) *Netiesiškumo rodiklis* α – atvirkščias dydis netiesiškumo koeficientui

$$\alpha = \frac{1}{\beta}.$$

5) *Temperatūrinis varžos koeficientas* χ charakterizuoja varistoriaus laidumo augimą kylant temperatūrai ir apskaičiuojamas pagal formulę

$$\chi = \frac{I_2 - I_1}{I_2(t_2 - t_1)} \cdot 100\%,$$

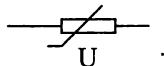
čia I_1 – srovė, kai temperatūra $t_1 = 20$ °C, I_2 – srovė, kai temperatūra $t_2 = 100$ °C.

6) *Didžiausia leistina išsklaidoma galia* – galia, kuriai esant varistorius išlaiko visus savo parametrus per garantinį laiką.

Varistoriai būna žemos įtampos (darbo įtampa $3 \div 200$ V, srovė $0,1$ mA \div 1 A) ir aukštos įtampos (iki 20 kV). Kintamosios srovės

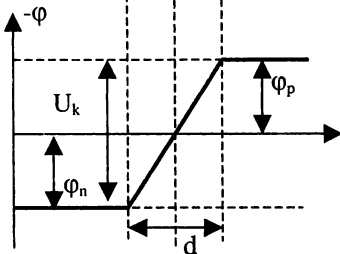
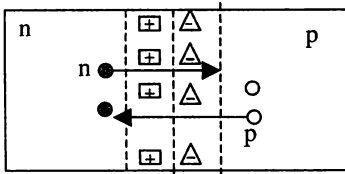
grandinėse gali dirbti iki dažnių <500 kHz. Naudojami įrenginių apsaugai nuo atsitiktinių įtampos šuolių, įtampos ir srovės stabilizacijai, autoreguliacijai ir t.t.

Varistoriai schemose žymimi ženklu



V. p-n SANDŪRA

§1. p-n sandūros suformavimas



1.1 pav.

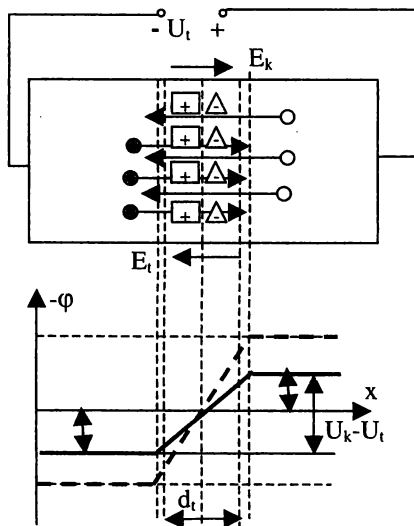
Puslaidininkio kristale sudarius skirtingo laidumo zonas (n ir p), dėl natūralios krūvininkų difuzijos arba specialios gamybos technologijos atsiranda riba, skirianti tas laidumo zonas. Ji gavusi *elektroninės skylinės sandūros* arba tiesiog *p-n sandūros* pavadinimą.

n zonoje elektronų koncentracija n_n yra gerokai didesnė negu skylių koncentracija p_n ; kaip tik todėl n zonoje elektronai yra *pagrindiniai krūvininkai*, o skylutės – *nepagrindiniai*. Normaliai legiruojant Ge kristalą donorine priemaiša, šios koncentracijos būna maždaug tokios: $n_n = 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $p_n = 10^8 \text{cm}^{-3}$. p zonos legiravimo akceptorine priemaiša laipsnis

paprastai imamas mažesnis. Joje pagrindinių krūvininkų – skylių koncentracija siekia iki $p_p = 10^{16} \text{cm}^{-3}$, elektronų $n_p = 10^{10} \text{cm}^{-3}$. Vadinasi, n ir p zonose elektronų ir skylių koncentracijos gerokai skiriasi – maždaug 8 eilėmis. Esant tokiam dideliame koncentracijų gradientui kelių mikrometrų atstumu, įvyksta natūrali difuzija: elektronai iš n zonos difunduoja į p zoną, o skylutės – priešinga kryptimi. n zonoje, iš kur difuzijos metu „pabėga“ elektronai, lieka teigiamų jonų sluoksnis (1.1 pav. jie pažymėti \oplus ženklu). p zonoje, iš kur difunduoja skylutės, lieka neigiamų jonų sluoksnis (brėžinyje pažymėti \ominus ženklu). Šis teigiamų ir neigiamų jonų sluoksnis ir sudaro p-n sandūrą. Pirma, ji nutraukia tolesnę elektronų ir skylių difuziją (neigiami p zonos jonai stumia neigiamus n zonos elektronus, teigiami n zonos jonai - p zonos skylutes). Antra, p-n zonoje atsiranda *potencialinis barjeras* (brėžinyje jis pavaizduotas elektronams) ir *kontaktinis potencialų skirtumas* U_k , lygus potencialinio barjero aukščiui. Kuo didesnė priemaišų

koncentracija, tuo didesnė pagrindinių krūvininkų koncentracija, tuo jų daugiau prasiskverbia per zonų skiriamąją ribą, tuo didesnis kontaktinis potencialų skirtumas (arba potencialinio barjero aukštis). Aukštėjant potencialiniam barjerui, p-n sandūros storis d mažėja. Pavyzdžiui, germaniui, kai priemaišų koncentracijos vidutinės, gaunama $U_k = 0,3 \div 0,4$ V ir $d = 1 \div 0,1$ μm . Kai priemaišų koncentracijos didelės, U_k gali siekti iki 0,7 V, $d = 10^{-8}$ m. Kontaktinis potencialų skirtumas sukelia krūvininkų judėjimą priešinga kryptimi negu difuzijos metu (dreifinę srovę I_{dr}). Dinaminės pusiausvyros atveju tos srovės lygios ir srovė per p-n sandūrą neteka.

§2. p-n sandūra, veikiant išoriniam įtampos šaltiniui



2.1 pav.

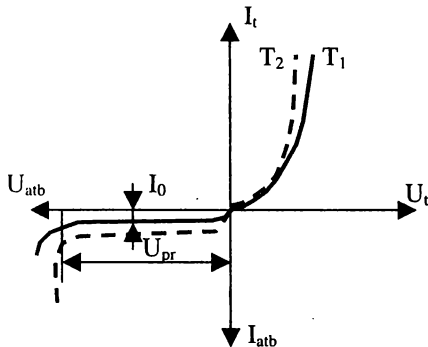
Dabar prie p-n sandūros prijunkime išorinį įtampos šaltinį U_t taip, kad šaltinio „-“ polius būtų prijungtas prie n zonos, o „+“ polius – prie p zonos. Toks šaltinio prijungimas vadinamas *tiesioginiu*. Šaltinio *tiesioginė įtampa* U_t nukreipta prieš kontaktinį potencialų skirtumą U_k . Suminis elektrinis laukas p-n sandūroje susilpnėja, potencialinis barjeras sumažėja, difuzinė srovė padidėja. Dreifinė srovė praktiškai nepakinta, nes ją sudaro nepagrindiniai krūvininkai, į p-n sandūrą patenkantys ir ją praeinantys dėl savo šiluminio judėjimo. Įtampą p-n sandūroje galime laikyti lygia $U_k - U_t$. Palyginti 2.1 pav.

paliktas punktyrine linija pavaizduotas senasis potencialinis barjeras, nesant išorinio įtampos šaltinio. Galų gale galime išvaizduoti ir taip: „+“ šaltinio polius traukia neigiamus elektronus, „-“ polius - skylutes, ir per p-n sandūrą teka *tiesioginė srovė* I_t . Ji lygi

$$I_t = I_{dif} - I_{dr} > 0.$$

Jeigu potencialinis barjeras smarkiai sumažintas išorine tiesiogine įtampa, tai $I_t \approx I_{dif}$.

Tiesioginio šaltinio įjungimo atveju ne tik sumažėja potencialinis p-n sandūros barjeras, bet ir p-n sandūros storis ($d_t < d$), p-n sandūros varža tiesiogine kryptimi R_t yra maža (nuo kelių omų iki kelių dešimčių omų). Kadangi p-n sandūros potencialinis barjeras tėra kelių dešimtųjų volto eilės, tai ir tiesioginė šaltinio įtampa reikalinga nedidelė, tos pačios eilės.



2.2 pav.

Pakeitus išorinio šaltinio poliarumą, t.y. prie n zonos prijungus šaltinio „+“, prie p zonos – „-“, p-n sandūra dirbs *atbuline kryptimi*. Veikiant *atbulinei įtampai* U_{atb} , išorinio šaltinio sukurtas elektrinis laukas kryptimi sutaps su p-n sandūros elektriniu lauku, pagrindiniai krūvininkai tarsi nusiurbiami nuo p-n sandūros, potencialinis barjeras išauga iki $U_k + U_{atb}$ ir

difuzinė srovė $I_{dif} = 0$. Per p-n sandūrą gali tekėti tik dreifinė nepagrindinių krūvininkų sudaryta srovė I_{dr} , tačiau, kaip žinome, tų krūvininkų koncentracija yra nedidelė, todėl nedidelė ir I_{dr} – ji už tiesioginę srovę I_t būna mažesnė 3 – 4 eilėmis. Vadinasi, prijungus išorinį šaltinį atbuline kryptimi, p-n sandūros varža smarkiai išauga ir $R_{atb} \gg R_t$. Sakoma, kad *p-n sandūra uždaryta* (ji yra tarsi *užtvėriamasis sluoksnis*). Išauga sandūros plotis ($d_{atb} > d$).

p-n sandūros voltamperinė charakteristika parodyta 2.2 pav. Tiesiogine kryptimi didinant U_t , srovė I_t auga. Atbuline kryptimi didinant įtampą, pradžioje nusistovi nedidelė $I_{atb} = I_0$, kuri, toliau didinant U_{atb} , ima didėti. Ta atbulinė įtampa, kai ima didėti atbulinė srovė I_{atb} , vadinama *pramušimo įtampa* U_{pr} . Skiriami dviejų tipų p-n sandūros pramušimai: *elektrinis (grįžtamasis) ir šiluminis (negrįžtamasis)*. Įvykus šiluminiam p-n sandūros pramušimui, ji praranda vienpusį laidumą ir yra sugadinama. Vadinasi, pernelyg

didinti U_{atb} negalima. Dažniausiai abu pramušimai įvyksta vienu metu. Elektrinio pramušimo irgi yra du tipai: *lavininis ir tunelinis*.

Vadinasi, p-n sandūros voltamperinė charakteristika yra iš esmės netiesinė ir galima teigti, kad p-n sandūra pasižymi vienusiu laidumu. Charakteristika analitiškai aprašoma formule

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right],$$

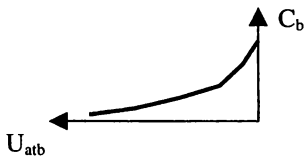
čia I_0 – atbulinė soties srovė, U – p-n sandūrą veikianti įtampa, e – elektrono krūvis, k – Bolcmano konstanta, T – p-n sandūros absoliutinė temperatūra.

p-n sandūra pasižymi ir kitomis savybėmis, visų pirma savąja talpa. Užtveriamasis sluoksnis yra tarsi dielektrikas, kurio abiejose pusėse išsidėstę teigiami ir neigiami jonai, turintys krūvius $+q$ ir $-q$. Taigi p-n sandūroje turime nedidelį kondensatorių. Veikiant atbulinei įtampai, p-n sandūros talpa vadinama *barjerine* ir lygi

$$C_b = \frac{q_{atb}}{U_{atb}}.$$

Ši talpa, kaip ir paprastų kondensatorių talpa, didėja didėjant p-n sandūros plotui ir dielektrinei konstantai (germaniui $\epsilon = 16$), mažėjant užtveriamąjo sluoksnio storiui ir susidaro nemaža (nuo kelių iki kelių šimtų pF). Barjerinė talpa yra *netiesinė* (2.3 pav.) ir, veikiant U_{atb} , gali pakisti keliskart. Vadinasi, C_b galima išnaudoti kaip kintamosios talpos įtampa valdomą kondensatorių.

p-n sandūrą veikiant tiesiogine įtampa, ji turi vadinamąją difuzinę talpą $C_{dif} = q_{dif} / U_t$. Ši talpa būna didesnė už barjerinę, tačiau jos išnaudoti nepavyksta, nes p-n sandūros varža tiesiogine kryptimi yra nedidelė ir ta varža užšuntuoja talpą C_{dif} .



2.3 pav.

Tiek tiesioginė, tiek atbulinė p-n sandūros srovė priklauso nuo temperatūros: temperatūrai didėjant, abi srovės auga. Kas 10^0C germaniui atbulinė srovė išauga 2 kartus, siliciui – 2,5 karto. Voltamperinė charakteristika,

kai $T_2 > T_1$, 2.2 pav. parodyta punktyrine linija.

Kondensatorius kintamosios srovės grandinėje elgiasi kaip reaktyvioji varža

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C}.$$

Jos didumas mažėja didėjant kintamosios srovės dažniui. Kadangi p-n sandūra turi savąją talpą, tai ji irgi pasižymi dažnine priklausomybe. Esant dideliam dažniui, p-n sandūra prarandą savo vienpusį laidumą. Vadinas, kiekvienai p-n sandūrai egzistuoja tam tikras ribinis dažnis ν_{\max} , kuris tuo mažesnis, kuo didesnė sandūros talpa (sandūros plotas).

§3. Puslaidininkiniai diodai

Puslaidininkiniai prietaisai, kuriuose sudaryta viena p-n sandūra su išvadais nuo p ir n zonų, vadinami *puslaidininkiniais diodais (PD)*. Dėl p-n sandūros vienpusio laidumo PD dažniausiai naudojami kintamajai srovei lyginti. Už elektrovakuuminius diodus PD geresni, nes:

- 1) maža masė ir matmenys;
- 2) didelis naudingumo koeficientas (iki 99%);
- 3) praktiškai neribotas tarnavimo laikas;
- 4) nereikia jokio kaitinimo šaltinio;
- 5) didesnis mechaninis atsparumas ir patikimumas.

Pagal p-n sandūros plotą PD skirstomi į *taškinius* ir *plokštinius*. Taškiniuose PD p-n sandūros plotas ir savoji talpa yra nedideli, jie gali lyginti mažas aukšto dažnio sroves. Tuo tarpu plokštiniai PD turi didelio ploto ir talpos p-n sandūrą, naudojami žemo dažnio galinguose lygintuvuose. Plokštinio ir taškinio PD konstrukcija parodyta 3.4 pav.

Pagal p-n sandūros gamybos technologiją PD būna *difuziniai* ir *lydytiniai*.

Schemose PD žymimi tokiu ženklu:



3.4 pav.

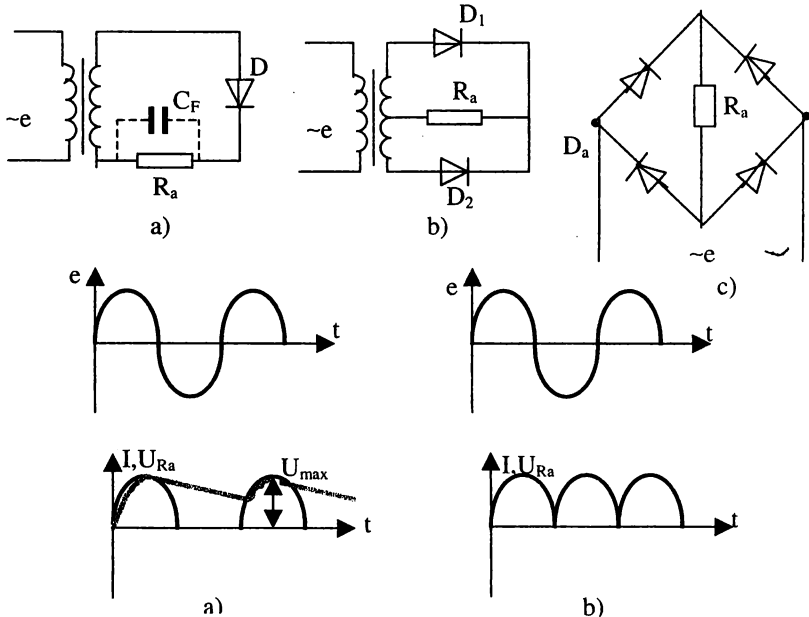
Lyginimo diodai. Taškiniai PD gali lyginti sroves nuo žemų dažnių iki kelių šimtų MHz. Ge ir Si diodai gaminami atbulinėms įtampoms iki 150 V ir gali praleisti sroves iki 100 mA.

Plokštiniai diodai gali lyginti srovės iki kelių kHz dažnio. Jie skirstomi į *mažos galios* (srovei iki 300 mA), *vidutinės galios* (srovėms nuo 300 mA iki 10 A) ir *didelės galios* (daugiau kaip 10 A).

Ge plokštiniai diodai gaminami į n tipo germaniją lydant indį ir gali atlaikyti 100 A/cm² srovės tankį. Atbulinė įtampa neviršija 400 V. Jų darbo temperatūra yra -60 + +75 °C. Gaminami natūralaus aušinimo Ge diodai srovei iki 1000 A ir U_{atb} iki 150 V.

Si diodai gaminami į n tipo Si lydant Al arba į p tipo Si lydant alavą su fosforu arba auksą su stibiu. Jie geresni už Ge diodus. Jų ribinis tiesioginės srovės tankis siekia 200 A/cm², ribinė atbulinė įtampa iki 1000 V. Darbinės temperatūros intervalas -60 + 125 °C. Jų atbulinė srovė kur kas mažesnė. Gaminami srovėms iki 500 A ir U_{atb} iki 1000 V.

Norint gauti didesnes išlygintas sroves, diodus galima jungti lygiagrečiai, o norint gauti didesnes atbulines įtampas – nuosekliai.



3.5 pav.

Kintamajai srovei lyginti diodai jungiami pagal *vienpusio lyginimo* (3.5 a pav.) arba *dvipusio lyginimo* schemas (3.5 b pav.).

Vienpusio lyginimo schemoje stovi vienas diodas, kuris srovę praleidžia tik vieną pusperiodį, kai veikianti $\sim e$ diodui yra tiesioginė. Kitą pusperiodį diodas uždarytas ir per apkrovą R_a srovė neteka. Tokiame lygintuve vidutinė išlygintos srovės vertė per pusę periodo

$$U_{vid} = \frac{2}{\pi} U_{max} = 0,636 U_{max},$$

o per periodą, kadangi antrą pusperiodį diodas uždarytas,

$$U_{vid} = \frac{U_{max}}{\pi} = 0,318 U_{max}.$$

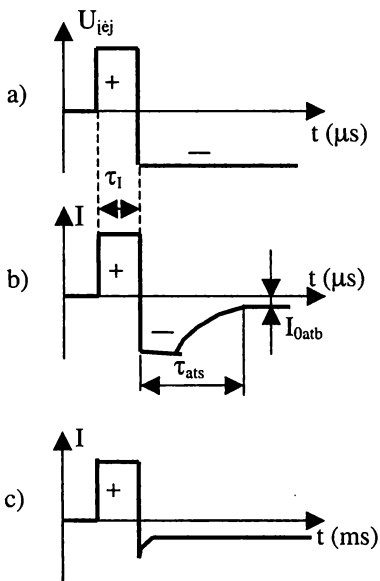
Iš grafiko matyti, kad srovė per apkrovą teka pulsuojanči. Srovės pulsacijas galima sumažinti, lygiagrečiai apkrovai R_a įjungus filtrą, kuriuo paprasčiausiu atveju gali būti didelės talpos kondensatorius C_F . Įtampos arba srovės grafikas tokiu atveju įgyja formą, kaip parodyta blyškesne linija.

Dvipusio lyginimo schemoje (3.5 b) pav.) apkrovą R_a maitina 2 diodai D_1 ir D_2 , kurių vienas praleidžia srovę vieną pusperiodį, kitas – kitą pusperiodį. Tada vidutinė srovės vertė per periodą padidėja dvigubai, pulsacijos sumažėja. Kad daugiau sumažintume pulsacijas, galima naudoti filtrą.

3.5 c) pav. parodyta dvipusio lyginimo tiltelio schema. Ji patogi tuo, kad nereikia transformatoriaus su atšaka nuo antrinės apvijos vidurio.

Impulsinis puslaidininkinio diodo režimas. Daugelyje šiuolaikinių radioelektroninių įrenginių, tarp jų ir ESM, PD dirba impulsiniu režimu, kai impulsų trukmė siekia tik mikrosekundes ir yra net trumpesnė. Sakykime, turime PD, nuosekliai sujungtą su apkrovos varža R_a , o $R_a \gg R_t$ (R_t – diodo varža tiesiogine kryptimi). Tarkime, šią grandinę veikia įėjimo įtampa $U_{i\epsilon j}$, susidedanti iš trumpo teigiamo impulso, veikiančio diodą tiesiogine kryptimi, ir ilgo neigiamo impulso, patikimai uždarančio diodą. Impulsai – stačiakampiai (3.6 a) pav.). Srovės, tekančios per apkrovą R_a , grafikas parodytas 3.6 b) pav. Kadangi diodo tiesioginė varža R_t nedidelė, tai jos netiesiškumas neatsiliepia impulso formai, o srovės amplitudę lemia R_a dydis. Tad „+“ impulsas praktiškai neiškraipomas. Nedideli jo iškreipimai matomi, jei impulsas labai trumpas (μs dalys).

Pasikeitus įėjimo įtampos poliarumui, diodas užsidaro ne iš karto. Pagrindinė priežastis – difuzinės talpos iškrova. Tad tam tikrą laiką τ_{ats}



3.6 pav.

grandine teka mažėjanti p-n sandūros iškrovos srovė, kuri po laiko τ_{ats} nusistovi iki vertės I_{0atb} . Vadinasi, didelė diodo atbulinė varža nusistovi ne iš karto, nes, išskraunant p-n sandūros talpą, krūvininkai priverčiami judėti priešinga kryptimi, kol jie rekombinuoja. Tas laikas τ_{ats} vadinamas *atbulinės varžos atgavimo laiku*. Tai svarbus impulsinių diodų parametras. Kuo jis mažesnis, tuo diodas geriau dirba impulsinėse schemose. Kita atbulinio impulso susidarymo priežastis – p-n sandūros talpos persielektrinimas. Todėl pageidautina, kad impulsiniam darbui skirti diodai turėtų kuo

mažesnę p-n sandūros talpą.

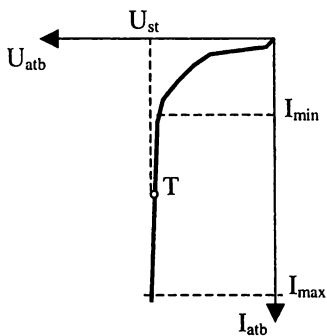
Jei tiesioginis impulsas ilgas (milisekundinis), tai atbulinio srovės impulso dėl mažos jo trukmės galima nepaisyti (2.6 c) pav.).

Impulsiniai diodai gaminami su maža p-n sandūros talpa, kad τ_{ats} būtų mažas. Jie atlaiko impulsinę srovę iki kelių šimtų mA ir atbulinę įtampą iki kelių dešimčių V.

§4. Diodų modifikacijos

Stabilitronas. Stabilitronas (*stabilis* (lot.) – pastovus + (elek)tronas) – specialus diodas, dirbantis elektrinio pramušimo sąlygomis: elektros srovei kintant plačiose ribose, įtampa beveik nekinta. Stabilitrono charakteristika tiesiogine kryptimi tokia pat kaip ir kitų diodų, o atbuline kryptimi parodyta 4.1 pav.

Stabilitronai gaminami išimtinai siliciniai ir gali stabilizuoti įtampas $3 \div 180$ V ribose ir praleisti srovės iki kelių dešimčių ar net kelių šimtų miliamperų. Juose išsklaidoma galia siekia nuo šimtų mW iki kelių W. Diferencialinė varža $R_d = du / di$ gali kisti nuo dešimtuju



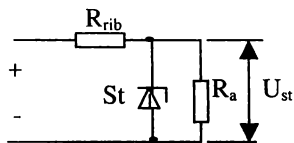
4.1 pav.

omo dalių iki kelių šimtų Ω priklausomai nuo stabilizuojamos įtampos dydžio. Kuo mažesnė R_d , tuo stabilizacija geresnė. R_d yra stabiltrono varža kintamajai srovei ir jos nereikia maišyti su jo varža nuolatinei srovei $R_0 = U / I$. Visada $R_0 \gg R_d$. Temperatūros įtaką stabiltrono darbui atspindi temperatūrinis stabilizuotos įtampos koeficientas, rodantis, kaip pakinta stabilizuota įtampa, temperatūrai pakitus 1°C :

$$\alpha_t = \frac{\Delta U_{st}}{U_{st} \cdot \Delta T}.$$

α_t būna nuo 10^{-5} iki 10^{-3}K^{-1} .

Gaminant stabilitronus žemoms stabilizuotoms įtampoms, naudojamas stipriai legiruotas silicis ir p-n sandūra daroma kiek įmanoma plonesnė. Todėl sandūroje gaunamas stiprus elektrinis laukas, o α_t – neigiamas. Panaudojus mažiau legiruotą Si, p-n sandūra išeina storesnė, α_t – teigiamas ir tokie stabilitronai tinka aukštesnėms stabilizuotoms įtampoms.



4.2 pav.

Paprasčiausia stabiltrono įjungimo schema parodyta 4.2 pav. Srovė per stabilitroną ribojama rezistoriumi R_{rib} , o jis apkrautas apkrovos varža R_a . Ribojimo varža apskaičiuojama pagal formulę

$$R_{rib} = \frac{E_{vid} - U_{st}}{I_{vid} + I_{apkr}},$$

čia $E_{vid} = 0,5(E_{min} + E_{max})$, $I_{vid} = 0,5(I_{min} + I_{max})$, $I_{apkr} = U_{st} / R_a$. Jei šaltinio įtampa E pakinta dydžiu ΔE , tai stabilizacija vyks, kai bus tenkinama sąlyga $\Delta E \leq (I_{max} - I_{min})R_{rib}$.

Galimas ir kitas atvejas, kai $E = \text{const}$, tačiau kinta apkrovos varža R_a nuo $R_{a\ min}$ iki $R_{a\ max}$. Tada ribojimo varža apskaičiuojama pagal formulę

$$R_{rib} = \frac{E - U_{st}}{I_{vid} + I_{avid}},$$

čia $I_{a\ vid} = 0,5(I_{a\ min} + I_{a\ max})$, o $I_{a\ min} = U_{st} / R_{a\ max}$, ir $I_{a\ max} = U_{st} / R_{a\ min}$.

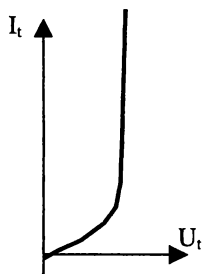
Įtampos stabilizavimo efektyvumas charakterizuojamas stabilizacijos koeficientu

$$k_{st} = \frac{\Delta E / E}{\Delta U_{st} / U_{st}}.$$

4.2 schemos pagrindinis trūkumas – didelė nenaudingai sunaudojama galia rezistoriuje R_{rib} , todėl mažas schemos naudingumo koeficientas. Tačiau R_{rib} būtinas, nes jo nesant gali būti viršyta leistina galia ir sugadintas stabilitronas.

Yra PD, kurie tiesiogine kryptimi turi staigiai kylančią charakteristiką (4.3 pav.). Jie irgi gali būti panaudoti įtampai stabilizuoti ir tokiu atveju jie vadinami *stabistoriais*.

Varikapai. Varikapai (*vari(able)* (angl.) kintamas + *cap(acity)* (angl.) – talpa) – plokštiniai puslaidininkiniai diodai, kurių p-n sandūros barjerinė talpa mažėja didėjant sandūrą veikiančiai atbulinei įtampai.



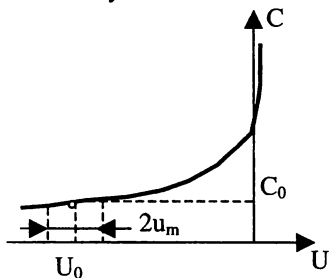
4.3 pav.

Vadinasi, varikapai yra kintamosios talpos elektriškai valdomi kondensatoriai. Kai varikapą veikianti kintamoji įtampa u_m maža, o atbulinė įtampa U_0 didelė, tai kintamoji įtampa varikapo talpos C_0 beveik nekeičia (4.4 pav.). Šitokių režimu dirbantis varikapas naudojamas paderinti virpesių kontūrams elektroniniu būdu, automatiškai paderinti dažniui, dažninei moduliacijai. Kai varikapą veikianti kintamoji įtampa didelė (kintančios netiesinės talpos režimas), varikapai generuoja aukštesnio dažnio kintamąsias sroves. Tokiu režimu dirbantis varikapas

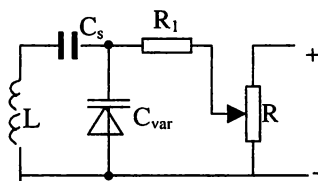
kartais dar vadinamas *varaktoriumi* arba *parametriniu PD*. Naudojami parametriniams stiprinimui, dažniui dauginti ir dalinti.

Kaip varikapus pakankamai sėkmingai galima naudoti Si stabilitronus, kai įtampas mažesnės už U_{st} o atbulinė srovė dar maža ir R_{atb} didelė.

Varikapo įjungimo į kontūrą schema parodyta 4.5 pav. Schemoje C_s statomas kaip skiriamasis kondensatorius, skiriantis varikapą nuo ritės L pagal nuolatinę srovę. R_1 yra papildoma varža, įjungta tam, kad reostatas R , kuriuo keičiama varikapo atbulinė įtampa, nepablogintų kontūro kokybės.



4.4 pav. Varikapo
volfaradinė charakteristika



4.5 pav.

Saulės elementai. Yra puslaidininkinių prietaisų, kurių veikimas pagrįstas *vidiniu fotoefektu*. Vidinio fotoefekto metu medžiagoje, veikiant šviesai, išlaisvinami krūvininkai. Jis gali pasireikšti puslaidininkio p-n sandūroje, puslaidininkių heterosandūroje, metalo ir puslaidininkio sandūroje.

p-n sandūroje veikiantis elektrinis laukas turi tokią kryptį, kad jis užgriebia nepagrindinius krūvininkus ir permeta juos į sritį, kur jie tampa pagrindiniai. Jei, apšviesdami p-n sandūrą, netoli jos sužadinsime keletą porų elektronas - skylutė, tai p srityje sužadinti elektronai p-n sandūros lauko bus permeti į n sritį, o skylutės, sužadintos n srityje, iš n srities bus perverstos į p sritį. Dėl to proceso ant išorinių PD gnybtų atsiras fotoelektrovara, siekianti 0,4 – 0,5 V. Tokio pobūdžio fotoefektas vadinamas *užtvartinu (ventiliniu, fotogalvaniniu)*. Šiuo principu veikia Saulės elementai, seleniniai fotoelementai, Ge ir Si fotodiodai, fototranzistoriai. Fotosrovė

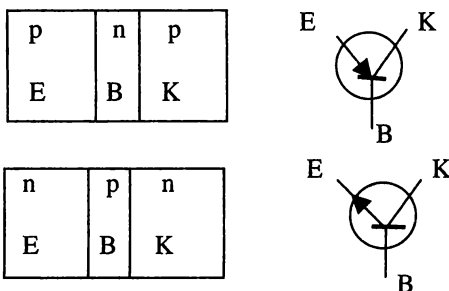
apšviestos p-n sandūros grandinėje padidėja prijungus išorinį šaltinį atbuline kryptimi.

Saulės elementai daromi iš silicio, galio arsenido, rečiau iš kadmio sulfido, kadmio telūrido. Didžiausią naudingumo koeficientą turi siliciniai Saulės elementai (20%) ir iš galio arsenido (18%). Saulės elementai yra paprasti, patikimi, ilgaamžiai, neteršia aplinkos, gamina energiją nenaudodami kuro. Daugiausia naudojami kosminiams aparatams maitinti. Saulės elementai jungiami į baterijas, ir viena tokia baterija plokštėje turi kelis šimtus tūkstančių Saulės elementų, plokštės plotas – dešimtys kvadratinių metrų, srovė – šimtai amperų, įtampa – dešimtys voltų, galia – dešimtys kilovatų.

VI. DVIPOLIS TRANZISTORIUS

§1. Bendrosios žinios

Dvipolis tranzistorius yra puslaidininkinis prietaisas, kuriame suformuotos dvi lygiagrečios p-n sandūros ir veikimas pagrįstas abiejų ženklų krūvininkų panaudojimu. Priklausomai nuo zonų išsidėstymo skiriami n-p-n ir p-n-p tipo tranzistoriai. Vidurinioji zona vadinama *baze*, viena šoninė zona – *emiteriu*, kita – *kolektoriumi*. Sandūra tarp emiterio ir bazės vadinama *emiterine*, o tarp kolektoriaus ir bazės – *kolektorine*. Tos sandūros yra labai arti viena kitos, nes bazė daroma labai plona – kelių mikrometrų storio. Be to, bazės legiravimo laipsnis daug mažesnis negu emiterio ir kolektoriaus. p-n-p ir n-p-n tipo tranzistorių struktūra ir žymėjimo schemose simboliai parodyti 1.1 pav.



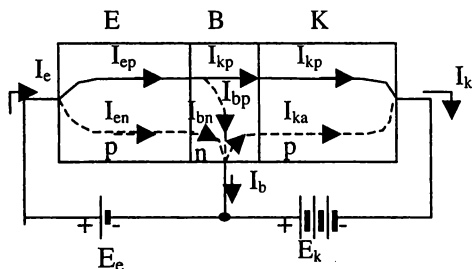
1.1 pav.

Priklausomai nuo išorinių įtampos šaltinių, prijungtų sandūroms, tranzistorius gali dirbti keliais režimais: 1) kai emiterinė sandūra dirba tiesiogine kryptimi, o kolektorinė sandūra – atbuline, tranzistoriaus režimas vadinamas *aktyviu*. Taip tranzistoriai dirba stiprintuvuose ir generatoriuose; 2) kai abi sandūros dirba atbuline kryptimi, tranzistorius dirba *atkirtos* režimu; 3) kai abi sandūros dirba tiesiogine kryptimi, tranzistorius dirba *soties* režimu; 4) kai emiterinė sandūra dirba atbuline kryptimi, o kolektorinė – tiesiogine, tranzistoriaus režimas vadinamas *inversiniu*.

p-n-p ir n-p-n tipo tranzistorių veikimas toks pat, skiriasi tik maitinimo šaltinių poliarumas ir srovų kryptys.

§2. Tranzistoriaus darbas statiniu režimu

Panagrinsime, kaip veikia tranzistorius *aktyviu statiniu režimu*, kai jis neapkrautas, o yra jo prijungti tik maitinimo šaltiniai. Tegul turime p-n-p tipo tranzistorių.



2.1 pav.

Gaminant tranzistorių emiteris akceptorine priemaiša legiruojamas stipriau negu bazė donorine priemaiša. Todėl tiesioginė srovė, tekanti per emiterinę sandūrą, daugiausia yra skylinė I_{ep} ir skylutės injektuojamos iš emiterio į bazę (2.1 pav.). Nedidelę emiterio srovės I_e dalį sudaro nepagrindinių krūvininkų – elektronų, pereinančių iš bazės į emiterį, srovė I_{en} . Į bazę injektuotos skylutės tampa nepagrindiniais krūvininkais ir iš dalies rekombinuoja su elektronais, sudarydamos srovę I_{bp} . Kadangi bazė yra plona, didžioji skylučių dalis, pagriebta kolektorinės sandūros lauko, spėja prasiskverbti pro bazę ir patenka į kolektorių, sudarydama kolektorinės srovės dedamąją I_{kp} . Taške, kuriame išvestas išvadas iš kolektorius, skylutės rekombinuoja su E_k tiekiamais elektronais ir sudaro naudingą kolektorius srovę. Per kolektorinę sandūrą visada prateka nedidelė *atbulinė kolektorius srovė* I_{ka} (nepagrindinių krūvininkų srovė), tad kolektorius srovė $I_k = I_{kp} + I_{ka}$. Santykis

$$\frac{I_{kp}}{I_e} = \alpha$$

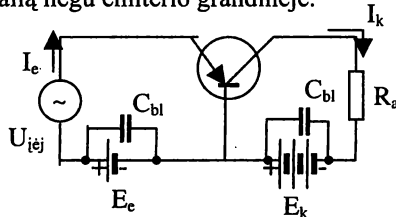
vadinasi *srovės perdavimo koeficientu* *schemoje su bendra baze*, nes šiuo atveju tranzistorius įjungtas taip, kad bazė vienu metu priklauso ir įėjimo (emiterio), ir išėjimo (kolektorius) grandinėms. Tas perdavimo koeficientas α gali siekti nuo 0,950 iki 0,998. Kuo mažesnė

rekombinacija bazėje, tuo α didesnis. Kadangi $I_{kp} = \alpha I_e$, tai $I_k = \alpha I_e + I_{ka}$, kadangi $I_{ka} \ll I_e$, tai galime laikyti, kad $I_k \approx \alpha I_e$.

Bazės srovė $I_b = I_e - I_k = (1 - \alpha)I_e - I_{ka}$. Kadangi $\alpha \rightarrow 1$, o I_{ka} nedidelė, tai nedidelė ir I_b (10–100 kartų mažesnė už I_k). Bazės srovė tranzistoriuje apskritai nėra naudinga ir pageidautina, kad ji būtų kaip galima mažesnė.

§3. Stiprinimas tranzistoriumi

Tranzistoriaus panaudojimas aktyviu *dinaminiu režimu* (stiprinimui, generacijai) paremtas tuo, kad emiterio srovė I_e yra tiesioginė emiterinei sandūrai ir sukuriama nedidelės (kelios dešimtosios volto) išorinės šaltinio įtampos. Tranzistorius šią srovę su koeficientu $\alpha \rightarrow 1$ perduoda į kolektoriaus grandinę, kuri maitinama aukštesne įtampa (nuo kelių iki keliolikos voltų), nes kolektorinė sandūra dirba atbuline kryptimi. Įjungus kolektoriaus grandinėje apkrovos rezistorių R_a , didesnės varžos už emiterinės sandūros varžą, kolektoriaus srovė I_k rezistoriuje R_a sudarys didelį įtampos kritimą ir daug didesnę galią negu emiterio grandinėje.



3.1 pav.

Dabar į emiterio grandinę įjunkime kintamosios įėjimo įtampos $u_{i1} = U_m \sin \omega t$ šaltinį (3.1 pav.). Ši įtampa susidės su emiterinio šaltinio E_e nuolatine įtampa U_{eb0} , tad emiterio ir bazės grandinėje įtampa $u_{eb} = U_{eb0} + U_{m1} \sin \omega t$ taps pulsuojanti. Todėl ims pulsuoti emiterio srovė I_e , vadinasi, ir kolektoriaus srovė $i_k = I_{k0} + I_{mk} \sin \omega t$, o ji apkrovos rezistoriuje R_a sukels įtampos kritimą $u_R = U_{R0} + U_{mR} \sin \omega t =$

$U_{R0} + U_{m1} \sin \omega t = U_{R0} + I_{mk} R_a \sin \omega t$. Čia U_{R0} – nuolatinės įtampos kritimas rezistoriuje, o antrasis narys atitinka kintamąją išėjimo įtampą. Ji bus didesnė už $U_m \sin \omega t$ beveik tiek kartų, kiek rezistoriaus R_a varža didesnė už emiterinės sandūros varžą tiesiogine kryptimi. Santykis

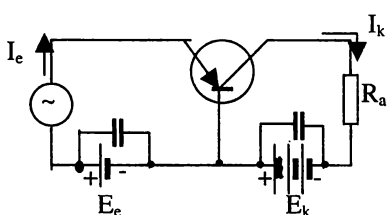
$$\frac{U_{miš}}{U_{miė}} = \frac{U_{iš}}{U_{iė}} = k$$

vadinas *įtampos stiprinimo koeficientu*.

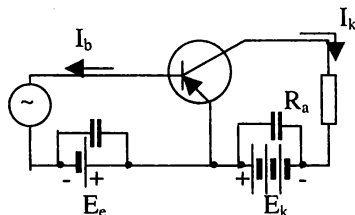
Schemoje maitinimo šaltiniai E_e ir E_k šuntuoti blokavimo kondensatoriais C_{bl} . Jie reikalingi tam, kad kintamosios I_e ir I_k dedamosios galėtų tekėti per tuos kondensatorius ir nebūtų jų nuostolių maitinimo šaltinių vidinėse varžose.

§4. Tranzistorių jungimo schemas

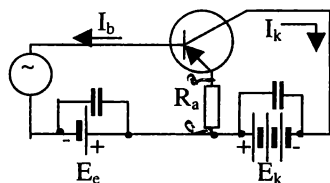
Jungiant tranzistorius į schemas, visuomet vienas jų elektrodas yra bendras įėjimo ir išėjimo grandinėms. Pavyzdžiui, mūsų



4.1 a)



4.1 b)



4.1 c)

nagrinėtuose 2.1 ir 3.1 pav. toks bendras (dar vadinama *įžemintu*) elektrodas buvo bazė. Iš viso galimos trys tranzistorių jungimo schemas: *bendra bazė (BB)* (4.1 a) pav.), *bendra emiteris (BE)* (4.1 b) pav.) ir *bendra kolektorius (BK)* (4.1 c) pav.

Iš schemų matyti, kad schemose BB ir BE apkrovos rezistorius R_a stovi kolektoriaus grandinėje, schemoje BK – emiterio grandinėje. $U_{iėj}$ šaltinis schemoje BB stovi emiterio grandinėje, schemose BE ir BK – bazės grandinėje. Todėl visos schemas gerokai skiriasi savo parametrais, tačiau visos jos yra naudojamos, tik šiek tiek skirtingais tikslais. Pagrindiniai schemų parametrai pateikti 1 lentelėje.

	Parametras	BB	BE	BK
1.	Įėjimo varža $R_{i\text{į}}$	$R_{i\text{į}} = \Delta U_c / \Delta I_c$ Maža $(30+100)\Omega$	$R_{i\text{į}} = \Delta U_b / \Delta I_b$ Vidutinė $(400\Omega+2 \text{ k}\Omega)$	$R_{i\text{į}} = \Delta U_b / \Delta I_b$ Didelė $(5+200) \text{ k}\Omega$
2.	Išėjimo varža $R_{i\text{š}}$	$R_{i\text{š}} = \Delta U_k / \Delta I_k$ Didelė (0,2+1) M Ω	$R_{i\text{š}} = \Delta U_k / \Delta I_k$ Vidutinė $(25+100) \text{ k}\Omega$	$R_{i\text{š}} = \Delta U_c / \Delta I_c$ Maža $(30\Omega+10 \text{ k}\Omega)$
3.	Srovės stiprinimo koeficientas k_i	$k_i = \alpha = \Delta I_k / \Delta I_c$ $\alpha < 1$	$k_i = \beta = \Delta I_k / \Delta I_b$ $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ $\beta = 10 \div 100$	$k_i = \gamma = \Delta I_e / \Delta I_b$ $\gamma = 1 / (1 - \alpha)$ $\gamma = 10 \div 100$
4.	Įtampos stiprinimo koeficientas k_u	$k_u = \Delta U_k / \Delta U_e$ Priklauso nuo apkrovos. Gali siekti iki 5000	$k_u = \Delta U_k / \Delta U_b$ Priklauso nuo apkrovos. Gali siekti iki 5000	$k_u = \Delta U_c / \Delta U_b$ $k_u < 1$
5.	Galios stiprinimo koeficientas k_p	$k_p = \Delta P_k / \Delta P_e$ Vidutinis (30 db)	$k_p = \Delta P_k / \Delta P_b$ Didelis (40 db)	$k_p = \Delta P_c / \Delta P_b$ Mažas (15 db).
6.	Fazės postūmis tarp $U_{i\text{š}}$ ir $U_{i\text{į}}$	0°	180°	0°
7.	Panaudojimas	Darbai nuo žemaomnio generatoriaus arba su didelės varžos apkrova	Universalus (stiprintuvai, fazoninventoriai ir t.t.)	Darbai nuo aukštaomnio generatoriaus arba su mažos varžos apkrova; emiteriniai kartotuvai

§5. Tranzistoriaus maitinimas ir darbo stabilizavimas

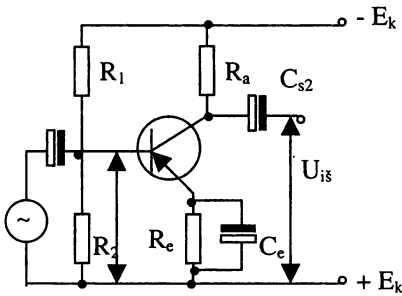
Maitinant tranzistorių dviem maitinimo šaltiniais, jo darbo tašką nustato šaltinių įtampos ir darbo taškas jokios stabilizacijos nereikalauja. Tačiau maitinimas dviem šaltiniais labai nepatogus. Pasirodo, tranzistorių galima maitinti iš vieno, kolektorinio šaltinio, reikiamą įtampą įėjimo grandinei sudarant įtampos dalikliu. Tipinė schema parodyta 5.1 pav.

Panagrinėkime stiprinimo laipsnį su BE. Norėdami sudaryti reikiamą įtampą tarp bazės ir emiterio, galime panaudoti įtampos daliklį R_1R_2 . Jis prijungiamas prie kolektorinio maitinimo šaltinio E_k lygiagrečiai tranzistoriui ir pats naudoja srovę I_d . Kadangi emiterinė srovė dirba tiesiogine kryptimi, jai maitinti pakanka kelių dešimtųjų volto įtampos, todėl būtina, kad įtampos kritimas rezistoriuje R_2 būtų

nedidelis: $R_2 = U_{be}/I_d$. Rezistorius R_1 „gesina“ praktiškai visą E_k įtampą, todėl jis privalo turėti didelę varžą:

$$R_1 = (E_k - U_{be}) / (I_d + I_{b0}) \approx E_k / (I_d + I_{b0});$$

čia I_{b0} – nuolatinė bazės srovė, U_{be} – įtampa tarp bazės ir emiterio. Prie daliklio viduriniojo taško jungiama tranzistoriaus bazė. Kad į bazę nepatektų kokia nors nuolatinė įtampa iš $U_{i\text{ej}}$ šaltinio ir nepakeistų tranzistoriaus darbo taško, jis nuo bazės atskiriamas kondensatoriumi C_{s1} . Tranzistorius apkraunamas apkrovos rezistoriumi R_a , nuo kurio per skiriamąjį kondensatorių C_{s2} gaunama sustiprinta įtampa U_{is} . Skiriamieji kondensatoriai C_{s1} ir C_{s2} turi turėti mažą varžą net žemiausio garsinio dažnio kintamajai srovei, todėl jais paprastai būna pakankamai didelės talpos mažų matmenų elektrolitiniai kondensatoriai.



5.1 pav.

Vienas didžiausių tranzistorių trūkumų yra jų parametrų ir charakteristikų priklausomybė nuo temperatūros. Pakilus temperatūrai, darbu metu šylant tranzistoriui, padidėja srovės ir normalus tranzistoriaus režimas sutrinka. Todėl tranzistorinėse schemose tenka imtis įvairių darbo taško stabilizavimo priemonių, tam panaudojant termostabilizaciją ir termokompensaciją su termo-

varžomis ir diodais, neigiamą grįžtamąjį ryšį ir kt. Viena paprasčiausių priemonių yra emiterinė kompensacija. Emiterio grandinėje jungiamas rezistorius R_e , atliekantis stabilizatoriaus vaidmenį. Kai, pakilus temperatūrai, padidėja emiterinės sandūros tiesioginė srovė, padidėja įtampos kritimas rezistoriuje R_e , o tos padidėjusios įtampos „-“ veikia emiterį ir sumažina emiterinę sandūrą veikiančią tiesioginę įtampą, todėl emiterio srovė sumažėja. Tačiau R_e vienu metu stovi ir įėjimo, ir išėjimo grandinėje, todėl per jį tekanti srovė sukuria stiprų grįžtamąjį ryšį. Jei tas ryšys nepageidautinas, R_e šuntuojamas pakankamai didelės talpos kondensatoriumi. Tada per R_e teka tik emiterinės srovės nuolatinė dedamoji ir R_e atlieka jos stabilizatoriaus vaidmenį, o per C_e teka emiterinės srovės kintamoji dedamoji. Kadangi kondensatorius

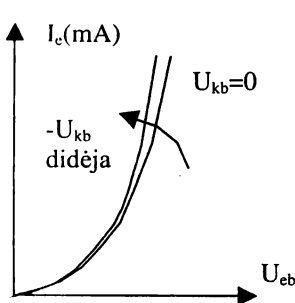
būna pakankamai didelės talpos, jo varža kintamajai srovei yra nedidelė ($x_c \ll R_e$), tad grįžtamasis ryšys schemoje praktiškai nesusidaro.

5.1 pav. pavaizduota schema yra analoginio signalo (paprastai žemo dažnio) stiprinimo laipsnio schema.

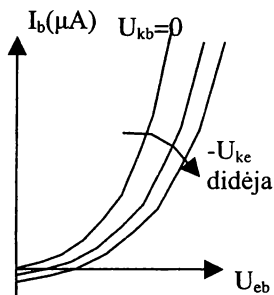
§6. Tranzistoriaus charakteristikos

Tranzistoriaus srovių bei įtampų priklausomybę rodo statinės tranzistoriaus charakteristikos, kai tranzistoriaus išėjimo grandinėje nėra apkrovos varžos. Tranzistoriujė tarpusavyje visada susiję 4 dydžiai: įėjimo srovė I_1 , įėjimo įtampa U_1 , išėjimo srovė I_2 ir išėjimo įtampa U_2 . Savaiame aišku, viena charakteristikų šeima išreikšti jų visų tarpusavio priklausomybės neįmanoma. Todėl priimta brėžti tranzistoriaus *įėjimo charakteristikų* $I_1=f(U_1)$ *šeimą* ir *išėjimo charakteristikų* $I_2=f(U_2)$ *šeimą*. Kiekvienam tranzistoriaus įjungimo būdai (BB, BE, BK) egzistuoja savos įėjimo ir išėjimo charakteristikos. Žinyuose dažniausiai pateikiamos schemų BB ir BE charakteristikos. n-p-n ir p-n-p tipo tranzistorių charakteristikos yra analogiškos, skiriasi tik įtampų poliarumai ir srovių kryptys.

Tranzistorių įėjimo charakteristikos primena diodo charakteristikas tiesiogine kryptimi, o išėjimo charakteristikos – diodo charakteristikas atbuline kryptimi.



6.1 pav.



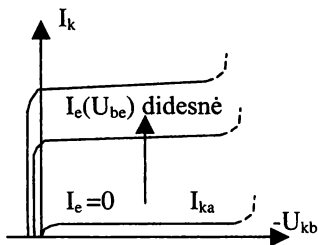
6.2 pav.

Įėjimo charakteristikos schemai BB parodo I_e priklausomybę nuo įtampos tarp emiterio ir bazės U_{eb} , esant pastovioms įtampoms tarp kolektoriaus ir bazės U_{kb} ($I_e = f(U_{eb})$; $U_{kb} = \text{const}$). Charakteristikos

parodytos 6.1 pav. Charakteristika, kai $U_{kb} = 0$, atitinka emiterinės sandūros tiesioginę charakteristiką, o neigiamą U_{kb} didinant charakteristikos pasislenka labai nedaug (srovė I_e padidėja nedaug). Tai paaiškinama tuo, kad kolektorinės sandūros elektrinis laukas sutelktas būtent kolektorinėje sandūroje ir mažai veikia procesus emiterinėje sandūroje. Tačiau matomas nedidelis I_e didėjimas, didinant U_{kb} , paaiškinamas tuo, kad, didėjant U_{kb} , sumažėja bazės storis ir padidėja kolektorius atbulinė srovė.

Iėjimo charakteristikos schemai BE parodo I_b priklausomybę nuo įtampos tarp bazės ir emiterio U_{be} , kai pastovios įtampos tarp kolektorius ir emiterio U_{ke} ($I_b = f(U_{be}); U_{ke} = \text{const}$) (6.2 pav.). Kai $U_{ke} = 0$, charakteristika prasideda koordinačių pradžioje ir sutampa su p-n sandūros charakteristika tiesiogine kryptimi. Didinant $-U_{ke}$, I_b mažėja. Tai visų pirma paaiškinama tuo, kad, padidinus atbulinę kolektorinės sandūros įtampą, padidėja sandūros plotis, o bazės storis sumažėja, vadinasi, sumažėja rekombinacinė bazės srovės dedamoji. Primename, kad bazės srovė susideda iš rekombinacinės dedamosios I_{bp} , emiterinės sandūros nepagrindinių krūvininkų srovės I_{bn} , kurios kryptimi sutampa, ir joms priešingos atbulinės kolektorinės sandūros srovės I_{ka} . Kai įtampa U_{be} maža, tačiau veikia pakankamai didelė $-U_{ke}$, vyrauja I_{ka} ir bazės srovė neigiama. Padidinus U_{be} , bus atvejis, kai $I_{ka} = I_{bp} + I_{bn}$ ir $I_b = 0$. Toliau didinant U_{be} , $I_{ka} < I_{bp} + I_{bn}$, todėl bazės srovė pasidaro teigiama ir auga didėjant U_{be} . Reikia prisiminti, kad I_b yra nedidelė, μA eilės, tuo tarpu I_e ir I_k matuojama mA.

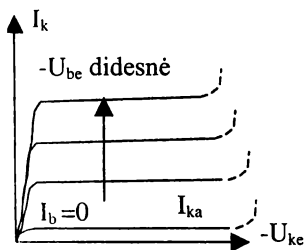
Išėjimo charakteristikos schemai BB parodo kolektorius srovės I_k priklausomybę nuo įtampos tarp kolektorius ir bazės $-U_{kb}$, esant pastoviai emiterio srovei I_e arba pastoviai įtampai tarp emiterio ir bazės



6.3 pav.

U_{eb} . ($I_k = f(U_{kb}); I_e = \text{const}$ arba $U_{eb} = \text{const}$). Charakteristikos parodytos 6.3 pav. Apatinė charakteristika, kai $I_e = 0$ ($U_{eb} = 0$), yra ne kas kita kaip atbulinė kolektorius srovė I_{ka} . Didinant I_e (arba U_{eb}), didėja kolektorius srovė I_k . Charakteristikos eina truputį pasvirusios, nes didinant $-U_{kb}$ mažėja bazės storis, rekombinacija bazėje ir I_k nežymiai auga.

Išėjimo charakteristikos schemai BE parodo kolektoriaus srovės I_k priklausomybę nuo įtampos tarp kolektoriaus ir emiterio U_{ke} , esant pastoviai bazės srovei I_b arba įtampai tarp bazės ir emiterio U_{be} ($I_k = f(U_{ke})$; $I_b = \text{const}$ arba $U_{be} = \text{const}$). Charakteristikos parodytos 6.4 pav.



6.4 pav.

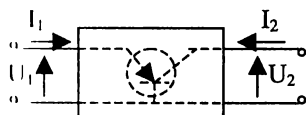
Iš charakteristikų eigos matyti, kad pradžioje, didinant U_{ke} , kolektoriaus srovė I_k didėja staigiai ir nusistovi tuo didesnė, kuo didesnė $-U_{be}$ arba bazės srovė I_b . Toliau didinant $-U_{ke}$, kolektoriaus srovė auga nežymiai dėl rekombinacijos mažėjimo bazėje.

Reikia prisiminti, kad atbulinių įtampų $-U_{kb}$ ir $-U_{ke}$ didinimas ribotas, nes gali įvykti kolektorinės sandūros elektrinis pramušimas, kuris prasideda tuo anksčiau, kuo didesnės srovės I_c ir I_e . 6.3 ir 6.4 pav. tos charakteristikos dalys parodytos punktyrine linija. n-p-n tipo tranzistorių charakteristikos yra analogiškos, skiriasi tik stovių kryptys ir įtampų poliarumas.

§7. Tranzistoriaus parametrai

Tranzistoriaus parametrai yra dydžiai, charakterizuojantys tranzistoriaus savybes. Juos sulyginant, galima spręsti apie tranzistoriaus kokybę. Bėda ta, kad tranzistoriams vertinti yra pasiūlyta kelios parametrų sistemos, kurių kiekviena turi savų privalumų ir trūkumų. Dabartiniu metu dažniausiai naudojamos hibridiniais ir ribiniais parametrais.

Hibridiniai parametrai. Jei tranzistoriui prijungtas maitinimas ir tuo nustatytas jo darbo taškas, tai į jo įėjimą padavus mažą kintamąją įtampą, tranzistorius elgiasi kaip aktyvus tiesinis keturpolis su užtrumpintais apatiniais gnybtais. (Vienas tranzistoriaus elektrodas bendras.)



7.1 pav.

(7.1 pav.). Pagal keturpolių teoriją įėjimo dydžius I_1 , U_1 , išėjimo dydžius I_2 ir U_2 galima sujungti įvairiai, priklausomai nuo to, kuriuos 2 dydžius iš 4 pasirinkime nepriklausomais kintamaisiais. Nepriklausomais kintamai-

siais pasirinkę I_1 ir U_2 , kitus du kintamuosius galėsime išreikšti funkcinėmis priklausomybėmis $U_1 = f(I_1, U_2)$ ir $I_2 = f(I_1, U_2)$.

Lygtimis galime užrašyti taip:

$$dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2$$

$$dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2.$$

Jei nuolatinės srovės ir įtampas sudėsime su nedidelės amplitudės kintamosios įtampos signalu u arba I , tai jų mažas amplitudines arba efektines vertes galime laikyti nuolatinių dedamųjų mažais pokyčiais. Dalines išvestines pakeitę pokyčiais ir pažymėję

$$h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}, \quad h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2},$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}, \quad h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2},$$

gauname lygčių sistemą

$$\Delta U_1 = h_{11} \Delta I_1 + h_{12} \Delta U_2$$

$$\Delta I_2 = h_{21} \Delta I_1 + h_{22} \Delta U_2.$$

Koeficientai h_{11} , h_{12} , h_{21} ir h_{22} vadinami *tranzistoriaus h parametrais*. Kiekvienas h parametras turi konkrečią fizikinę prasmę.

$$h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}, \quad \text{kai } \Delta U_2 = 0 \text{ arba } U_2 = 0,$$

vadinamas *tranzistoriaus įėjimo varža*, esant trumpam išėjimo jungimui.

$$h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}, \quad \text{kai } \Delta I_1 = 0 \text{ arba } I_1 = 0,$$

vadinamas *grįžtamojo ryšio koeficientu* tranzistoriaus tuščioje eigoje.

$$h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}, \quad \text{kai } \Delta U_2 = 0 \text{ arba } U_2 = 0,$$

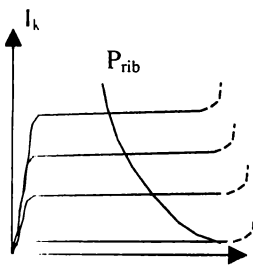
vadinamas *srovės perdavimo (stiprinimo) koeficientu*, esant trumpam išėjimo jungimui.

$$h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2}, \quad \text{kai } \Delta I_1 = 0 \text{ arba } I_1 = 0,$$

vadinamas *išėjimo laidumu* tranzistoriaus tuščioje eigoje.

h parametrų sistema vadinama *hibridine*, nes vieni parametrai nustatomi tuščioje tranzistoriaus eigoje, kiti – esant trumpam tranzistoriaus išėjimo jungimui. h parametrus nesunku apskaičiuoti iš charakteristikų: h_{11} , h_{12} skaičiuojami iš tranzistoriaus įėjimo charakteristikų, h_{21} ir h_{22} – iš išėjimo charakteristikų. Taip pat h parametrus nesunku išmatuoti eksperimentiškai, todėl h parametrai dažniausiai naudojami skaičiuojant tranzistorines schemas.

Ribiniai tranzistoriaus parametrai. *Ribinė kolektorinės sandūros temperatūra* T_{rib} charakterizuoja tą aukščiausią kolektorius temperatūrą, kai dar garantuojamas saugus tranzistoriaus darbas schemoje. Dėl temperatūrinės priklausomybės dauguma tranzistoriaus parametrų pablogėja. Kolektorius temperatūra visų pirma priklauso nuo tranzistoriuje naudojamos galios, be to, nuo aplinkos temperatūros ir aušinimo. Ge tranzistoriams nustatyta $T_{rib} = 85^{\circ}\text{C}$, Si tranzistoriams $T_{rib} = 150^{\circ}\text{C}$.



7.2 pav.

Ribinė tranzistoriaus galia P_{rib} charakterizuoja tą didžiausią galią, kurią gali atiduoti tranzistorius. Tranzistoriaus atiduodamą galią galima skaičiuoti pagal formulę $P_k = I_k U_k$. Dėl P_{rib} viršijimo paprastai tranzistorius perkaista. Žinyuose kartu su išėjimo charakteristikomis paprastai parodoma P_{rib} kreivė (7.2 pav.), kurią peržengti į dešinę pusę nerekomenduojama.

Ribinė kolektorius įtampa $U_{k rib}$. Schemoje BB šis parametras paprastai nurodo kolektorinės sandūros atsparumą elektriniam ir šiluminiam pramušimui. Viršijus $U_{k rib}$, tranzistoriaus pramušimas labai tikėtinas.

Schemoje su bendru emiteriu galimas griūtinis atbulinės kolektorius srovės I_{ka} augimas dėl jos praėjimo per emiterinę sandūrą tiesiogine kryptimi. Kuo didesnė bazės grandinės varža, tuo didesnė I_{ka} srovės dalis nukreipiama į emiterinę sandūrą. Savo ruožtu ši srovė didina tiesioginę įtampą, o dėl to – save pačią. Šis savotiškas vidinis teigiamas grįžtamasis ryšys sukelia griūtinių kolektorinės srovės augimą

netgi esant įtampai, žemesnei už $U_{k_{rib}}$. Esant atjungtai basei, visa I_{ka} nukreipiama per emiterinę sandūrą ir griūtis gali prasidėti, kai yra maždaug 5 V įtampa. Todėl, maitinant tranzistorių iš vieno šaltinio ir esant įjungtam maitinimui, reikia vengti nors trumpam palikti tranzistorių atjungta base, nes jis gali būti sugadintas net tada, kai įtampa žemesnė už darbinę.

Ribinės tranzistoriaus srovės priklauso nuo tranzistoriaus ribinės galios P_{rib} .

Ribinis tranzistoriaus dažnis ν_{rib} . Didėjant virpesių dažniui, tranzistoriaus stiprinimas mažėja dėl dviejų priežasčių: dėl kolektorinės sandūros talpos C_k , šuntuojančios apkrovos varžą, ir dėl procesų, vykstančių tranzistoriuje, inertiškumo. Dėl pastarojo įtakos kintamoji I_k dedamoji savo faze vis daugiau atsilieka nuo I_e . Taigi, didėjant dažniui, mažėja visi stiprinimo koeficientai – k_i , k_u ir k_p . Ribiniu generacijos dažniu vadinamas tas dažnis, kai k_p sumažėja iki 1.

Visi ribiniai tranzistorių parametrai nurodomi žinynuose ir reikia vengti juos viršyti.

§8. Kai kurios tranzistorių ypatybės

Tranzistorių parametų išbarstymas. Tranzistoriai turi gerokai išbarstytus parametrus. Dabartiniu metu galiojanti brokavimo sistema pagal visus parametrus, išskyrus srovės stiprinimo koeficientą β , yra vienpusė, t.y. tranzistoriui žinynuose nurodomi leistini blogiausi parametrai. Vadinasi, didžioji dauguma tos markės tranzistorių turi geresnius parametrus, negu nurodo žinynai.

Tranzistorių parametų išbarstymas labai apsunkina jų pakeičiamumą schemose. Labiausiai išbarstyti yra šie parametrai: atbulinė kolektoriaus srovė I_{ka} (įvairių tranzistorių egzempliorių gali skirtis 10 – 20 kartų), išėjimo laidumas h_{22} (iki 5 kartų), ribinis dažnis pagal srovės stiprinimą (iki 2 – 3 kartų). Tad norint sėkmingai pakeisti sugedusį tranzistorių, reikia specialiai jį atrinkti. Parametų išbarstymo įtaką gerokai mažina neigiamas grįžtamasis ryšys.

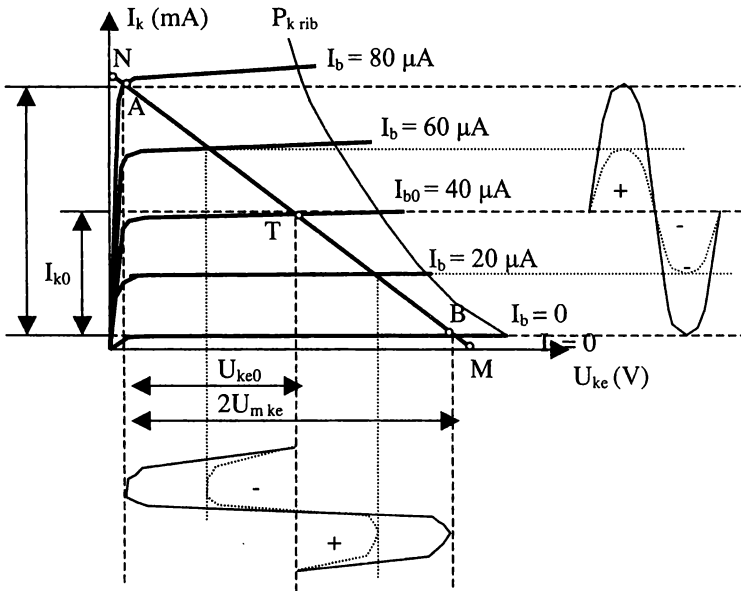
Parametų priklausomybė nuo temperatūros Kintant temperatūrai, tranzistorių parametrai pastebimai kinta: paprastai, kylant temperatūrai, tranzistoriaus parametrai blogėja. Ge tranzistorių I_{ka} kas 10⁰C padidėja 1,5 – 2 kartus, srovės stiprinimo koeficientas schemoje BE β kas 10⁰C padidėja 10 – 15%, h_{22} didėja temperatūrai kintant į abi puses

ir padvigubėja, kai $+70$ ir -50°C , h_{11} schemoje BB temperatūrai augant iki $+70^{\circ}\text{C}$ padidėja 20 – 30%, o schemoje BE – 1,5 – 2 kartus ir t.t.

Temperatūrinei parametų ir charakteristikų stabilizacijai tranzistorinėse schemose plačiai naudojama specialios darbo taško stabilizacijos schemos, neigiamas grįžtamasis ryšys, termokompensacija su termorezistoriais ir diodais ir kt.

§9. Tranzistoriaus darbo režimas

Tranzistorius stiprintuve, generatoriuje ar kitoje schemoje dirba dinamiiniu režimu, t.y. tokiu režimu, kai jo įėjimą veikia silpno signalo generatorius ir dėl jo poveikio tranzistoriaus srovės ir įtampos tampa pulsuojančios, o tranzistorius apkraunamas apkrovos varža R_a . Tai buvome paminėję kalbėdami apie tranzistoriaus panaudojimą stiprintuvuose. Tačiau, naudojant tranzistorių virpesiams stiprinti, labai svarbu, kad stiprinimas vyktų be *signalų iškreipimų*. Iškreipimai gali būti *netiesiniai* (signalų formos iškreipimai), *dažniniai* (nevienodas įvairaus dažnio virpesių stiprinimas) ir *faziniai* (kai atsiranda fazių skirtumų tarp išėjimo ir įėjimo signalo). Kad nebūtų iškreipimų ir pautume pakankamą stiprinimą, stiprintuvas turi būti suderintas: tinkamai parinktos maitinimo įtampos, apkrovos varža, įėjimo įtampos dydis, tranzistoriaus tipas ir t.t. Darbinį tranzistoriaus režimą galima skaičiuoti analitiškai, tačiau rezultatas dėl tranzistorių parametų nubarstymo visada būna apytikslis. Vaizdesnis, o kai kada ir tikslesnis yra grafoanalitinis metodas. Jam panaudojamos tranzistoriaus išėjimo ir įėjimo charakteristikos. Pasinaudokime schemos BE charakteristikomis. Ant statinių išėjimo charakteristikų šeimos brėžiama *dinaminė (apkrovos) charakteristika* (9.1 pav.).



9.1 pav.

Apkrauto tranzistoriaus išėjimo grandinei galią lygtis

$$E_k = U_{ke} + I_k R_a.$$

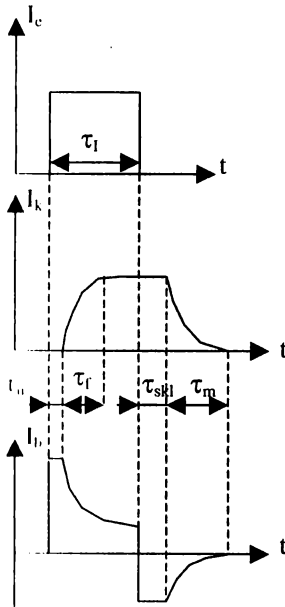
Tai yra tiesės lygtis ir dinaminė charakteristika brėžiama per 2 taškus – N ir M, kuriuose ši tiesė kerta koordinačių ašis. Kai $U_{ke} = 0$, $I_k = E_k / R_a$ (taškas N); kai $I_k = 0$, $E_k = U_{ke}$ (taškas M). Nubrėžus dinaminę charakteristiką, parenkama *charakteristikos darbinė dalis*. Norint gauti didžiausią galią ir naudingumo koeficientą, reikia kuo geriau išnaudoti charakteristiką. Darbinės dalies dydį lems $U_{iėj}$ amplitudė. Tarkime, darbinė dalimi pasirenkame charakteristikos atkarpą AB. Darbinės charakteristikos dalies projekcijos į I_k ir U_{ke} ašis duoda I_k ir U_{ke} kintamųjų dedamųjų dvigubų amplitudžių $2I_{mk}$ ir $2U_{mke}$ dydžius. Dinaminės charakteristikos polinkis priklauso nuo E_k ir R_a dydžių ir juos reikia pasirinkti taip, kad dinaminė charakteristika neitų nei per daug stačiai, nei per daug gulsčiai. R_a imama daug didesnė už schemos įėjimo varžą $R_{iėj}$. Charakteristikos darbinės dalies viduryje pasirenkame *darbo tašką T*. Darbo taškas nusako darbinę bazės srovę I_{b0} . Jei T yra charakteristikos darbinės dalies viduryje, tai I_{b0} bus

vidutinė vertė bazės srovių, atitinkančių taškus A ir B. 9.1 pav. $I_{b0} = 40 \mu\text{A}$, $I_{bA} = 80 \mu\text{A}$, $I_{bB} = 0$. Vadinasi, įėjimo srovės pulsacijų amplitudė I_{mb} sieks $40 \mu\text{A}$. Darbo tašką T atitinkanti įėjimo srovė I_{b0} ir išėjimo srovė I_{k0} vadinamos *rimties srovėmis*. T taip pat nusako rimties įtampą U_{ke0} . Galime rasti tranzistoriaus galią rimties režimu $P_{k0} = I_{k0}U_{ke0}$ ir ši galia turi būti $P_{k0} \leq P_{k\text{ rib}}$ (darbo taškas būtinai turi būti kairiau kreivės $P_{k\text{ rib}}$). Turint įėjimo charakteristikas, galima ant jų perkelti taškus A, T ir B ir pagal juos rasti įėjimo parametrus $R_{i\text{ įėj}}$, $P_{i\text{ įėj}}$, R_b , visus stiprinimo koeficientus, naudingumo koeficientą ir kt.

Jei darbinės charakteristikos dalys $AT = TB$, tai signalo formos (netiesiniai) iškraipymai minimalūs. Iš dinaminės charakteristikos matyti, kad I_k ir U_{ke} kitimai yra priešingų fazių.

Turėdami dinaminę charakteristiką, galime apskaičiuoti visus stiprinimo laipsnio parametrus.

§10. Tranzistoriaus darbas impulsiniu režimu



10.1 pav.

Tegul į tranzistorinės schemos BB įėjimą paduotas τ_i trukmės mikrosekundinis impulsas. Kolekto­rinės srovės impulsas prasideda šiek tiek vėliau – užlaikytas laiką τ_u . Tai krūvininkų perėjimo per bazę laikas. Toliau I_k auga eksponentės dėsnium laika τ_f (priekinio fronto trukmė), kai kaupiasi krūvininkai bazėje. Be to, iš emiterio į bazę injektuoti krūvininkai ne visi turi vienodą greitį ir ne vienu metu pasiekia kolektorių. Laikas $\tau_u + \tau_f = \tau_{ijung}$ yra tranzistoriaus įjungimo laikas. Įėjimo impulsui pasibaigus, kol išsisklaido susikaupę bazėje krūviai, išėjimo impulsas dar kurį laiką τ_{skl} tęsiasi, po to laipsniškai per laiką τ_m sumažėja iki nulio. Laikas $\tau_{skl} + \tau_m = \tau_{išj}$ yra išjungimo laikas. Taigi išėjimo srovės I_k impulsas savo forma gerokai skiriasi

nuo įėjimo srovės I_e formos, o tranzistorius pasižymi tam tikru inertiškumu. Visi tie procesai atsispindi 10.1 pav. Jo apatiniame grafike parodytas bazės srovės $I_b = I_e - I_k$ kitimas. Matome, kad I_b turi gana sudėtingą formą. Jei įėjimo impulsas ilgas (daug ilgesnis už pereinamuosius procesus tranzistoriuje), tai išėjimo impulsas savo forma nedaug skiriasi nuo įėjimo impulso formos.

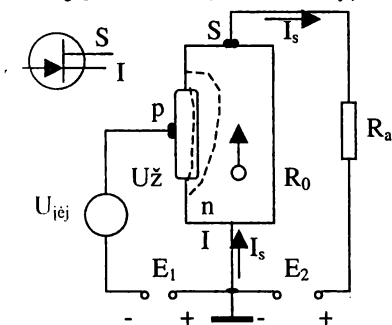
Specialūs tranzistoriai, skirti darbui su trumpalaikiais impulsais, turi turėti mažas sandūrų talpas ir ploną bazę. Kad greičiau išsisklaidytų bazėje sukauptas krūvis, į ją įterpiama nedaug priemaišų, skatinančių bazėje susikaupusių krūvininkų rekombinaciją (pavyzdžiui, aukso).

Pereinamieji procesai tranzistoriuje, jų trukmė priklauso nuo tranzistoriaus įjungimo schemas. Tranzistoriaus darbą jungiklio režimu panagrinėsime kiek vėliau.

VII. LAUKO TRANZISTORIAI IR TIRISTORIAI

§1. Lauko tranzistoriai

Plačiai naudojami *lauko (kanaliniai, vienpoliai, unipoliniai)* tranzistoriai. Jo sandaros idėją išskėlė vienas iš dvipolio tranzistoriaus išradėjų V. Šoklis (W. Shockley) 1952 m. Pagrindinė lauko tranzistorių



1.1 pav.

ypatybė – labai didelė įėjimo varža, kartais didesnė negu elektroninių lempų, todėl jie vis labiau išstumia dvipolius tranzistorius.

Jų sandaros principas ir lauko tranzistoriaus su valdančiąja p-n sandūra įjungimas bei simbolis, kuriuo jie žymimi schemeje, pateikta 1.1 pav.

Puslaidininkio plokštelė, pavyzdžiui, n tipo, priešinguose galuose turi išvadás,

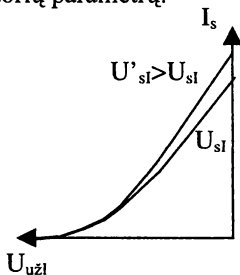
kuriomis ji įjungta į *išėjimo (valdomąją)* grandinę. Ši grandinė maitinama iš evj šaltinio E_2 ir apkrauta apkrovos rezistoriumi R_a . Išilgai tranzistoriaus teka pagrindinių krūvininkų išėjimo srovė. *Įėjimo (valdančioji)* grandinė sudaryta trečiuoju tranzistoriaus elektrodu, turinčiu kitokį laidumo tipą; mūsų atveju tai p tipo puslaidininkis. Maitinimo šaltinis E_1 vienintelėje tranzistoriaus p-n sandūroje sukuria atbulinę įtampą. Tiesioginė įtampa į p-n sandūrą nepaduodama, nes tada įėjimo varža būtų labai maža. Į įėjimo grandinę jungiamas kintamosios evj generatorius, sukuriantis kintamąją $U_{įėj}$. Veikiant $U_{įėj}$, kinta atbulinės p-n sandūros įtamos dydis ir užtveriamojo sluoksnio (1.1 pav. parodyta punktyrine linija) storis. Vadinasi, tada kinta puslaidininkinės plokštelės *kanalo*, kuriuo teka pagrindinių krūvininkų srovė (išėjimo srovė), skerspjūvio plotas. Elektrodas, iš kurio išteka pagrindiniai krūvininkai į kanalą, vadinamas *ištaka I*. Iš kanalo krūvininkai patenka į elektrodą, kuris vadinamas *santaka S*. Valdantysis elektrodas vadinamas *užtūra Už*. Čia labai ryški analogija su vakuuminio triodo elektrodais: ištaka analogiška katodui, santaka – anodui, užtūra – tinkleliui.

Didinant įtampą tarp užtūros $U_{\text{ž}}$ ir ištakos $I_{U_{\text{ž}}}$, užtvarinio p-n sandūros sluoksnio storis didėja, kanalas siaurėja, jo varža nuolatinei srovei R_0 didėja, ir santakos srovė I_s mažėja. Tam tikra $U_{\text{ž}}$ gali visiškai uždaryti kanalą. Kai $U_{\text{ž}} = 0$, kanalo skerspjūvis didžiausias, R_0 mažiausias ir I_s didžiausia. Kad įėjimo įtampa efektyviai valdytų kanalą, pagrindinis puslaidininkis, kuriame susiformuoja kanalas, turi turėti didelę varžą, t.y. nedaug priemaišų. Tada užtvarinis sluoksnis jame pasidaro storesnis. Be to, pradinis kanalo skerspjūvio plotis turi būti mažas (kelių mikrometrų eilės). Tada tranzistorių galima uždaryti kelių voltų įtampa $U_{\text{ž}}$.

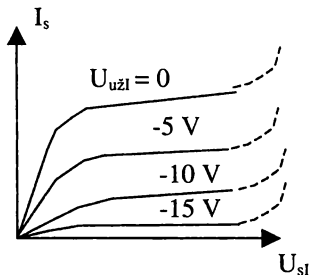
Lauko tranzistoriai su p-n sandūra gali būti gaminami sulydymo ir difuzijos būdu. Geresni yra difuziniai lauko tranzistoriai, nes gali dirbti, kai aukštesni dažniai (iki kelių šimtų MHz).

Lauko tranzistoriaus savybes parodo charakteristikų šeimos: įėjimo arba valdymo charakteristikų $I_s = f(U_{\text{ž}})$, kai $U_{\text{sl}} = \text{const}$ (1.2 pav.) ir išėjimo charakteristikų $I_s = f(U_{\text{sl}})$, kai $U_{\text{ž}} = \text{const}$ (1.3 pav.). Įėjimo charakteristikos nepatogios skaičiavimams, todėl jomis naudojamos rečiau. Išėjimo charakteristikos rodo, kad, didinant U_{sl} , srovė I_s pradžioje auga staigiai, vėliau augimas sustoja ir srovė tarsi įsotinama. Tai paaiškinama taip: didinant U_{sl} srovė I_s turi didėti, tačiau, kadangi tuo pat metu padidėja atbulinė įtampa p-n sandūroje, tai užtveriamasis sluoksnis išsiplečia ir sumažina srovę. Padavus didesnę neigiamą užtvarinę įtampą į užtūrą, srovė sumažėja ir charakteristika eina žemiau.

Pernelyg didelė U_{sl} gali pramušti kristalą (punktyrinė išėjimo charakteristikų dalis). Pramušimo įtampa yra vienas ribinių lauko tranzistorių parametų.



1.2 pav.



1.3 pav.

Tranzistorius paprastai dirba gulsčiojoje charakteristikos dalyje, t.y. srityje, kuri vadinama *soties* sritimi; įtampa, kai prasideda ši sritis – *soties įtampa*; užtvartinę užtūro įtampa, uždarančią tranzistorių, – *atkirtos įtampa*. Lauko tranzistorių charakterizuoja tokie pat pagrindiniai parametrai kaip ir elektrovakuuminį triodą:

statumas

$$S = \frac{\Delta I_s}{\Delta U_{uzl}}, \quad U_{sl} = \text{const},$$

vidinė (išėjimo) varža

$$R_i = \frac{\Delta U_{sl}}{\Delta I_s}, \quad U_{uzl} = \text{const},$$

stiprinimo koeficientas

$$\mu = \frac{\Delta U_{sl}}{\Delta U_{uzl}}, \quad I_s = \text{const},$$

$$\mu = SR_i,$$

įėjimo varža

$$R_{i\text{įj}} = \frac{\Delta U_{uzl}}{\Delta I_{uz}}, \quad U_{sl} = \text{const}.$$

Lauko tranzistorių *įėjimo talpa* C_{uzl} yra *p-n* sandūros barjerinė talpa ir siekia kelias pF, jei tranzistorius difuzinis, ir keliasdešimt pF, jei tranzistorius lydytinis. Praėjimo talpa C_{uzs} ir išėjimo talpa C_{sl} yra visai mažos.

Lauko tranzistorius gali būti jungiamas į schemas panašiai, kaip ir dvipolis tranzistorius: BUŽ (BB), BI (BE), BS (BK). Tų schemų savybės analogiškos dvipolio tranzistoriaus jungimo schemoms.

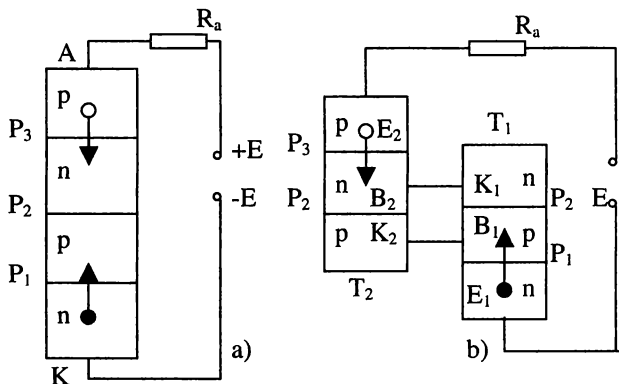
Lauko tranzistoriai už dvipolius geresni ne tik tuo, kad turi didelę įėjimo varžą, bet jų parametrai mažiau jautrūs temperatūros pokyčiams, nes jų srovę I_s sudaro pagrindiniai krūvininkai, kurių skaičių puslaidininkyje daugiau lemia legiravimo laipsnis negu temperatūra. Lauko tranzistoriai turi mažesnius savuosius triukšmus, pagal radiacinį atsparumą jie artimi elektroninėms lempoms. Iš trūkumų galima paminėti palyginti nedidelį statumą.

Paprastai lauko tranzistoriai gaminami iš Si, nes tada atbulinė *p-n* sandūros srovė būna daug mažesnė (gali būti tik $1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$).

Tobulinant lauko tranzistorius buvo sukurti tranzistoriai su izoliuota užtūra: MDP tranzistoriai (metalas-dielektrikas-puslaidininkis struktūros) ir MOP tranzistoriai (metalas-oksidas-puslaidininkis struktūros). Jie gali būti su savuoju kanalu ir su indukuotu kanalu. Tokių tranzistorių parametrai geresni už paprasto lauko tranzistoriaus: įėjimo varža siekia iki $10^{12} - 10^{15} \Omega$, įėjimo talpa nesiekia 1 pF, gali dirbti dažniui siekiant iki šimtų MHz, gamyba, ypač MOP tranzistorių su indukuotu kanalu, nesudėtinga ir labai tinkanti mikroschemų gamybai. Todėl lauko tranzistoriai vis labiau mikroschemose (integralinėse schemose) išstumia dvipolius tranzistorius.

§2. Tiristoriai

Tiristoriai yra perjungimo prietaisai (*thyra* (gr.) – durys + (rez)istorius). Tai puslaidininkinis prietaisas, turintis 4 sluoksnius arba 3 p-n sandūras. Jis gali turėti 2 išvadsus ir tada vadinamas *dinistoriumi* arba 3 išvadsus ir vadinamas *trinistoriumi*.

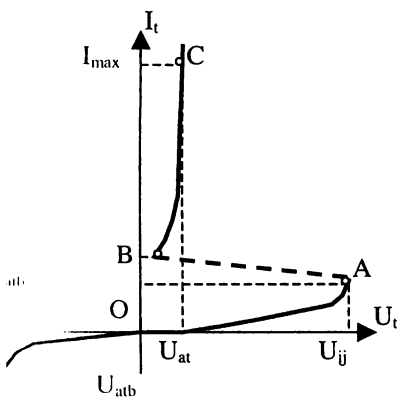


2.1 pav.

Dinistoriaus sandara parodyta 2.1 pav. Tad dinistorius turi 3 p-n sandūras, kurių dvi (P₁ ir P₃) dirba tiesiogine kryptimi, o vidurinioji P₂ – atbuline kryptimi. Šoninė p zona vadinama anodu, šoninė n sritis – katodu. Dinistoriaus veikimą lengviau suprasti pasinaudojant modeliu, kuriame dinistorius „perpjautas“ į du tranzistorius T₁ ir T₂. Tada

sandūros P_1 ir P_3 yra tų tranzistorių emiterinės sandūros. Tranzistoriaus T_1 bazė B_1 tuo pat metu yra tranzistoriaus T_2 kolektorius K_2 , o antrojo tranzistoriaus T_2 bazė B_2 yra pirmojo tranzistoriaus T_1 kolektorius K_1 . Vadinasi, tranzistoriaus T_1 kolektorius srovė I_{k1} tuo pat metu yra antrojo tranzistoriaus bazės srovė I_b , o antrojo tranzistoriaus I_{k2} yra pirmojo tranzistoriaus bazės srovė I_{b1} . Tiristoriai gali būti gaminami pagal įvairias technologijas iš Si, tačiau visada vidurinėsios (bazinės) sritys legiruojamos daug mažesniu laipsniu negu šoninės sritys.

Fizikinius procesus tiristoriuje galima įsivaizduoti taip. Jei būtų tik vienintelė sandūra P_2 , dirbanti atbuline kryptimi, tai tekėtų tik nedidelė atbulinė srovė, judant per sandūrą nepagrindiniams krūvininkams. Tačiau esame minėję, kad galima gauti didelę kolektorius atbulinę srovę, jei į tranzistoriaus bazę iš emiterio injektuojama daug nepagrindinių krūvininkų. Kuo didesnė emiterinės sandūros įtampa, tuo didesnė kolektorinė srovė. Bet tada kolektorinės sandūros įtampa mažėja, nes didėja įtampos kritimas apkrovos varžoje. Taip tranzistorius gali pereiti į soties režimą (9.1 pav. atitinka tašką A), kai kolektorius srovė didžiausia, o įtampos kritimas tarp kolektorius ir bazės – mažiausias, tik kelios dešimtosios volto.



2.2 pav.

Panašiai yra ir tiristoriuje. Per sandūras P_1 ir P_3 , dirbančias tiesiogine kryptimi, į sritis, besiribojančias su sandūra P_2 , injektuojami nepagrindiniai krūvininkai, kurie sumažina sandūros P_2 varžą. Toliau tiristoriuje vykstančius procesus galima aiškintis pasinaudojant jo voltamperine charakteristika (2.2 pav.). Pradžioje, didinant įtampą U_b , srovė per prietaisą didėja lėtai ir nežymiai (charakteristikos dalis OA). Šioje charakteristikos dalyje tiristorių galima laikyti

uzdarytu. Sandūros P_2 varžą veikia du priešingi procesai. Viena vertus, atbulinės U_1 didinimas sandūros varžą didina, kadangi, didėjant

atbulinei sandūros įtampai, nuo p-n sandūros „nusiurbiami“ pagrindiniai krūvininkai, pati sandūra praplatėja. Antra vertus, tiesioginės sandūrų P_1 ir P_3 įtampos didėjimas skatina vis didesnę krūvininkų injekciją, o krūvininkai, priartėję prie sandūros P_2 , praturtina ją krūvininkais ir mažina jos varžą. Iki taško A vyrauja pirmasis procesas, tačiau didėjant U_1 vis labiau stiprėja antrasis procesas ir taške A abiejų procesų poveikiai susilygina. Tašką A atitinka kelių dešimčių ar šimtų voltų eilės *įjungimo įtampa* U_{ij} . Kai persveria antrojo proceso poveikis, sandūros P_2 varža griūtiškai sumažėja ir tiristorius atsidaro. Srovė šuoliu šiek tiek padidėja (charakteristikos dalis AB) ir nusistovi režimas, primenantis tranzistoriaus soties režimą – didelė srovė, kai maža įtampa. Dabar iš esmės srovę riboja tik apkrovos rezistorius R_a . Kadangi sandūros P_1 ir P_3 dirba tiesiogine kryptimi, o P_2 „pramušta“, įtampos kritimas tiristoriuje neįžymus. Sandūra P_2 dėl didelės krūvininkų sankaupos joje dirba tiesiogine kryptimi.

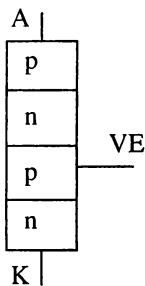
Pagal 2.1 b) pav. srovę I galime laikyti tranzistorių T_1 ir T_2 kolektorinių srovių $I_{k1} = -\alpha_1 I_{e1}$ ir $I_{k2} = \alpha_2 I_{e2}$ ir pradinės P_2 sandūros srovės I_{k0} suma: $I = \alpha_1 I_{e1} + \alpha_2 I_{e2} + I_{k0}$, o iš čia

$$I = \frac{I_{k0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}.$$

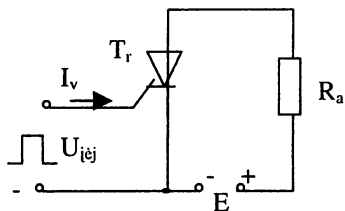
Kai $\alpha_1 + \alpha_2 \rightarrow 1$, srovė $I \rightarrow \infty$, tad ją praktiškai apriboti būtina apkrovos varža R_a . Ši srovės ypatybė neribotai augti nurodo griūtinį srovės augimą, dėl kurio tiristorius atsidaro.

Pagrindiniai dinistoriaus parametrai yra: didžiausia leistina dinistoriaus srovė I_{max} , pilnutinė talpa C_p , įsijungimo laikas t_{ijung} (kelių μs eilės), išsijungimo laikas $t_{išj}$ (jis susijęs su krūvininkų rekombinacijos procesu ir siekia kelias dešimtis μs ; todėl dinistoriai gali dirbti, tik kai neaukšti dažniai). Mažinant srovę nuo I_{max} iki srovės, atitinkančios tašką B, prietaisas šuoliu pereina į uždarytą būseną.

Pakeitus maitinimo šaltinio poliarumą, atbulinė charakteristikos dalis yra tokia pat kaip diodo, nes sandūros P_1 ir P_3 yra veikiamos atbulinės įtampos.

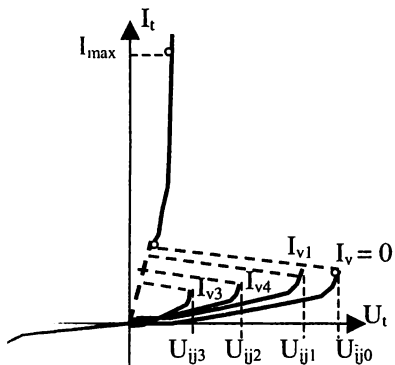


2.3 pav.



2.4 pav.

Iš vienos bazinių sričių (pavyzdžiui, iš p) išvedus išvadą, gaunamas *triodinis tiristorius* arba *trinistorius*. Šis išvadas vadinamas *valdančiuoju (VE)* (2.3 pav.). Trinistoriaus įjungimas parodytas 2.4 pav. Per VE paduodant tiesioginę įtampą sandūrai, ir taip dirbančiai tiesiogine kryptimi, galima reguliuoti U_{ij} dydį. Įtampos



2.5 pav.

į VE padavimas reikštų srovės padidinimą viename iš ekvivalentinės schemos 2.1 b) pav. tranzistorių. Kuo didesnė ta valdymo srovė I_v , tuo didesnė krūvininkų injekcija iš atitinkamo emiterio į vidurinę kolektorinę sandūrą P_2 , tuo esant mažesnei įtampai U_t atsidaro trinistorius. Didžiausia U_{ij} yra, kai $I_v = 0$; kuo didesnė valdymo srovė I_v , tuo žemesnė U_{ij} . Tad didėjant I_v , trinistoriaus charakteristika artėja prie diodo tiesioginės charakteristikos (2.5 pav.).

2.3 pav. pavaizduotas trinistorius su išvadu nuo p srities, esančios prie katodo, vadinamas katodinio valdymo trinistoriumi. Trinistorių parametrai tokie pat kaip dinistoriaus, prisideda tik valdymo grandinė charakterizuojantys. Tiristoriai schemose žymimi tokiais ženklais:

a) dinistorius,

- b) tristorius, valdomas nuo p srities,
- c) tristorius, valdomas nuo n srities (2.6 pav.).

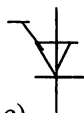


a)



b)

2.6 pav.



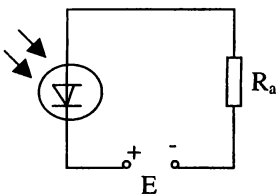
c)

Iš tristoriaus charakteristikos matyti, kad jo uždaryti valdymo srove negalima. Sukonstruoti uždaromi tristoriai, užsidarantys į VE padavus trumpą atbulinės įtampos impulsą. Yra simetrinių tristorių atsidarančių ir praleidžiančių srovę abiem kryptimis.

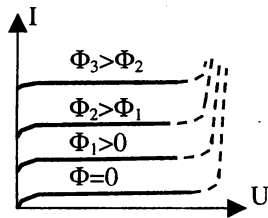
VIII. PUSLAIDININKINIAI OPTOELEKTRONINIAI PRIETAISAI

§1. Fotodiodai

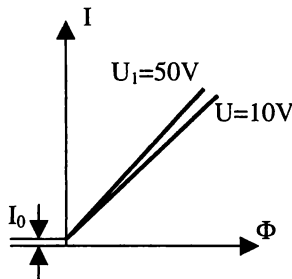
Įvairių puslaidininkinių prietaisų ypatybė reaguoti į šviesos srautą pagrįsta *vidiniu fotoefektu*, t.y. reiškiniu, kai, veikiant šviesai, puslaidininkyje padaugėja krūvininkų ir puslaidininkio laidumas išauga. Papildomas laidumas, pasireiškiantis veikiant šviesai, vadinamas *fotolaidumu*. Metaluose fotolaidumas beveik nepastebimas, nes juose laidumo elektronų koncentracija yra labai didelė ir siekia 10^{22} cm^{-3} . Žinome, kad papildomo fotolaidumo atsiradimu pagrįstas fotorezistorių veikimas. Analogiškai šviesa veikia ir puslaidininkinį diodą: šviesa, veikdama p-n sandūrą ir artimas jai sritis, generuoja krūvininkų poras ir padidėja diodo laidumas, kurio padidėjimas kur kas geriau pastebimas atbuline kryptimi. Padidėja ir atbulinė srovė. Toks prietaiso režimas vadinamas *fotodiodiniu*. Režimas be išorinio maitinimo šaltinio vadinamas *ventiliniu*. Fotodiodo įjungimo schema parodyta 1.1 pav., voltamperinė charakteristika – 1.2 pav., energetinė charakteristika – 1.3 pav.



1.1 pav.



1.2 pav.



1.3 pav.

Voltamperinės charakteristikos $I = f(U)$, kai $\Phi = \text{const}$, fotodiodiniu režimu primena dvipolio tranzistoriaus schemoje BB išėjimo charakteristikas. Jei p-n sandūra neapšviesta, per sandūrą teka srovė I_0 , kuri vadinama *tamsine*. Sandūrą apšvietus, srovė auga ir charakteristikos išsidėsto aukščiau. Kuo didesnis šviesos srautas Φ , tuo didesnė srovė. Atbulinės įtampos didinimas srovę didina labai nežymiai. Pernelyg didelė U_{atb} priveda prie p-n sandūros pramušimo (punktyrinė charakteristikų dalis).

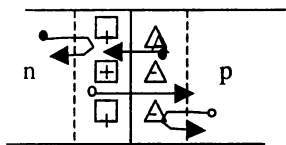
Fotodiodo energetinės charakteristikos $I = f(\Phi)$, kai $U = \text{const}$, yra tiesinės ir mažai priklauso nuo įtampos (1.3 pav.).

Integralinis fotodiodo jautris paprastai siekia dešimtis miliamperų liumenui. Jis priklauso nuo šviesos bangos ilgio ir tikram bangos ilgiui, skirtingam įvairiems puslaidininkiams, yra didžiausias. Fotodiodų inertiškumas nedidelis, gali dirbti dažniams siekiant iki šimtų megahercų. Jų darbinė įtampa 10 – 30 V, tamsinė srovė 10 – 20 μA Ge diodams ir 1 – 2 μA Si diodams. Apšvietus srovė siekia šimtus mikroamperų.

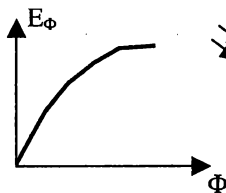
Yra kelios fotodiodų rūšys: *lavininiai*, kuriuose vyksta griūtinis krūvininkų dauginimasis p-n sandūroje, dėl ko jų jautrumas padidėja dešimtis kartų; padidinto greitaeigiškumo (iki 15 – 20 GHz) fotodiodai *su Šotkio barjeru*, kai srovė teka per metalo ir puslaidininkio sandūrą; pagerintų savybių fotodiodai su *heterosandūromis* (sandūromis tarp skirtingų puslaidininkinių medžiagų, turinčių skirtingo pločio draudimo zonas; iš dažniausiai naudojamų tokių puslaidininkių porų dažniausiai naudojami Ge-GaAs, Ge-Si, GaAs-GaP, GaAs-InAs). Parenkant sudėtingų puslaidininkinių medžiagų poras, gaminami fotodiodai su jautrio maksimumais bangų ilgių diapazone nuo infraraudonųjų spindulių iki γ spindulių. Fotodiodai naudojami fotometrijoje, fotokalorimetrijoje, branduolinių dalelių registracijai ir skaičiavimui, automatinio reguliavimo schemose ir t.t.

§2. Puslaidininkiniai fotoelementai

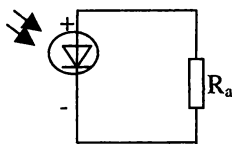
Puslaidininkiniai fotoelementai, dar vadinami *ventiliniaisiais* arba *fotogalvaniniais*, keičia elektromagnetinių bangų energiją į elektros energiją. Tai yra fotodiodai, dirbantys ventiliniu režimu (be išorinio šaltinio) ir sukuriantys savo evj veikiami šviesos.



2.1 pav.



2.2 pav.



2.3 pav.

Fotonai, veikdami p-n sandūrą ir artimas jai sritis, generuoja krūvininkų poras. n ir p srityse atsiradę elektronai ir skylės difunduoja sandūros link ir, jeigu nespėja rekombinuoti, patenka į sandūros vidinį elektrinį lauką. Tas laukas veikia ir pačioje sandūroje atsiradusius krūvininkus. Poveikis toks, kad elektronai ir skylutės atskiriami vieni nuo kitų. Nepagrindiniams krūvininkams, pavyzdžiui, elektronams, generuotiems p srityje, vidinis elektrinis laukas yra greitinantis (elektronai 2.1-pav. pažymėti juodais rutuliukais). Taip pat veikiamos skylutės (balti rutuliukai), generuotos srityje n. Pagrindiniams krūvininkams (n srities elektronams ir p srities skylutėms) vidinis elektrinis laukas veikia kaip užtvarinis. Taigi sandūros elektrinis laukas separuoja fotonų generuotus krūvininkus ir dėl to proceso n ir p srityse susidaro krūvininkų perteklius ir ant išorinių diodų gnybtų sukuriama fotoevj E_Φ . Didinant šviesos srautą, E_Φ auga netiesiškai (2.2 pav.) ir pasiekia kelių dešimtųjų volto vertę. Prijungus apkrovos rezistorių (2.3 pav.), to diodo, dabar jau vadinamo *fotoelementu*, grandinėje teka srovė

$$I_\Phi = \frac{E_\Phi}{R_i + R_a},$$

čia R_i – paties fotoelemento vidinė varža.

Iš fotoelementų trūkumų minėtini didelis inertiškumas ir integralinio jautrio (kartu E_Φ) priklausomybė nuo temperatūros.

Pirmieji fotoelementai iš vario hemioksido buvo pagaminti dar 1926 m. Vėliau labai plačiai buvo naudojami seleno fotoelementai, kurie turi spektrinę charakteristiką tokią pat kaip žmogaus akis, todėl labai patogūs fotometriniams matavimams. Neblogi yra TaS fotoelementai, kurių jautris siekia tūkstančius mikroamperų liumenui. Dabar plačiausiai naudojami Si fotoelementai, kurių evj siekia 0,4 – 0,5 V. Jungiant juos mišriai į baterijas, vadinamas *Saulės baterijomis*, gaunami elektros energijos šaltiniai iki kelių kW galios. Be to, jų

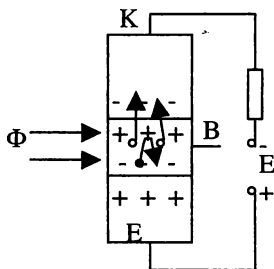
pakankamai didelis (iki 20%) naudingumo koeficientas. Saulės baterijos yra pagrindinis kosminių aparatų energijos šaltinis.

§3. Fototranzistoriai

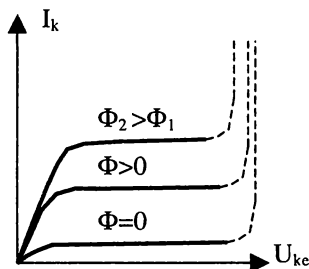
Fototranzistorių integralinis jautris yra dešimtis kartų didesnis negu fotodiodų. *Dvipolis fototranzistorius* yra paprastas dvipolis tranzistorius, turintis langelį korpuse, per kurį šviesa gali patekti į tranzistoriaus bazės sritį. Jungiant fototranzistorių, bazė paliekama laisva, emiterinė sandūra dirba tiesiogine kryptimi, kolektorinė – atbuline kryptimi (3.1 pav.).

Fotonai tranzistoriaus bazėje generuoja krūvininkų poras, kurias kolektorinė sandūra separuoja taip pat kaip fotodiode. Skylutės p-n-p tipo tranzistoriuje, veikiamos kolektorinės sandūros elektrinio lauko, iš bazės pereina į kolektorių ir padidina kolektorinę srovę, o elektronai lieka bazėje, savo krūviu padidindami emiterinės sandūros tiesioginę įtampą, tuo didindami emiterio srovę, kartu papildomai – kolektoriaus srovę. n-p-n tipo tranzistoriuje viskas vyksta atvirkščiai.

Fototranzistorių integralinis jautris gali siekti šimtus miliamperų liumenui. Tačiau tranzistorius su atvira baze turi blogą temperatūrinį stabilumą ir tenka naudoti specialias stabilizacijos schemas, jungiamas į bazės grandinę.



3.1 pav.



3.2 pav.

Fototranzistoriaus išėjimo charakteristikos parodytos 3.2 pav. Jos labai panašios į tranzistoriaus, įjungto pagal schemą BE, tik charakteristikos išbrėžtos, kai skirtingos šviesos srauto Φ vertės, o ne kai skirtingos bazės srovės. Kai U_{ke} per daug didelė, galimas

tranzistoriaus pramušimas (punktyrinė charakteristikos dalis). Fototranzistorių pagrindiniai parametrai yra: *integralinis jautris* – santykis fototranzistoriaus srovės, tekančios esant darbinei įtampai, su šviesos srautu, *darbinė įtampa* (10 – 15 V), *tamsinė srovė* – srovė per užtamsintą fototranzistorių, esant darbinei įtampai (iki šimtų μA), *darbinė srovė* (iki dešimčių mA), *ribinė galia* (iki dešimčių mW), *ribinis dažnis* (lydytiniams tranzistoriams – iki kelių kHz, difuziniams – iki kelių MHz).

Didelis fototranzistorių trūkumas yra nemaži savieji triukšmai.

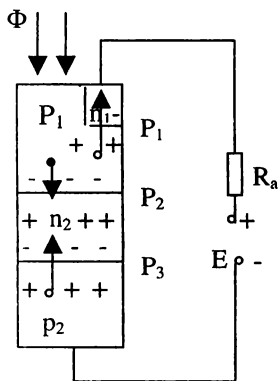
Kaip fototranzistorių galima panaudoti lauko tranzistorius, MDP tranzistorius ir kt.

Fototranzistoriai naudojami fototelegrafijoje, įvairiose automatinėse schemose, kino ir fotoaparaturoje, ultravioletinio ir infraraudonojo spinduliavimo registracijai ir t.t.

§4. Fototiristoriai

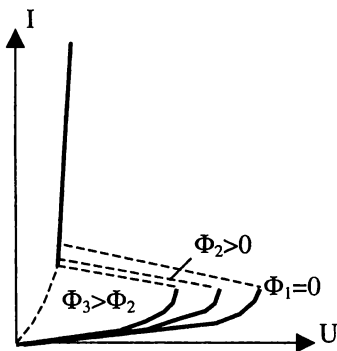
Keturių sluoksnių tiristorinė p-n-p-n-struktūra gali būti valdoma šviesos srautu, panašiai kaip trinistorius valdomas valdančiąja įtampa, paduodama į vieną jo emiterinių sandūrų. Pavyzdžiui, apšvietus sritį P_1 , joje generuojamos krūvininkų poros, kurios difunduoja (4.1 pav.) prie p-n sandūros. Elektronai, patekę į atbulinės įtampos veikiamą sandūrą P_2 , mažina sandūros varžą. Dėl to persiskirsto įtampos tiristoriuje:

įtampa sandūroje P_2 šiek tiek sumažėja, įtampos sandūrose P_1 ir P_3 šiek tiek išauga. Bet tada padidėja injekcija sandūrose P_1 ir P_3 , sandūros P_2 link juda injektuoti krūvininkai, jos varža dar sumažėja ir vėl papildomai persiskirsto įtampos, vėl didėja injekcija ir t.t. Procesas įgyja lavininį pobūdį (punktyrinės charakteristikos dalys 4.2 pav.) ir tiristorius atsidaro. Kuo didesnis šviesos srautas veikia tiristorių, tuo esant mažesnei įtampai atsidaro tiristorius. Tiristoriui atsidarius, įtampos kritimas jame nedidelis ir beveik visa įtampa krinta apkrovos rezistoriuje R_a .



4.1 pav.

Kai kada fototiristoriuje būna išvadas nuo vienos iš bazių ir tada, paduodant didesnę ar mažesnę tiesioginę įtampą į tą bazę, galima mažinti tiristoriaus atidarymo įtampą, tačiau pats tiristoriaus įsijungimas vis tiek valdomas šviesos srautu.



4.2 pav.

Fototiristoriai panaudojami įvairiose automatinėse schemose kaip bekontaktiniai jungikliai didelėms įtampoms ir galioms įjungti. Už kontaktinius jungiklius geresni tuo, kad yra mažų matmenų, mažai naudoja galios, trumpas įsijungimo laikas, nesukelia kibirkščiavimo.

§5. Šviesos diodai

Kaip mažo inertiškumo puslaidininkiniai šviesos šaltiniai vis plačiau naudojami *šviesos diodai*, dirbantys esant tiesioginei įtampai. Juos kartais vadina *injekciniais šviesos diodais*, nes švytėjimas, atsirandantis dioduose, kai yra tam tikos sąlygos, vadinamas *injekcine elektroliuminescencija*.

Veikimo principas pagrįstas tuo, kad, veikiant tiesioginei įtampai diode, krūvininkai iš n srities injektuojami į p sritį. Jei elektronų n srityje yra daugiau nei skylių p srityje ($n_n > p_p$), tai elektronai injektuojami į p sritį ir ten rekombinuoja su skylutėmis. Rekombinuojant elektronams, jie iš aukštesnio energetinio lygmens pereina į žemesnį energetinį lygmenį ir dėl to yra išspinduliuojamas fotonas, kurio energija $\Delta W = h\nu$. Kad spinduliuojamas fotonas būtų matomoje spektro dalyje, reikia, jog $\Delta W > 1,7$ elektronvolto (eV). Todėl Ge ir Si šviesos diodams gaminti netinka, nes jų ΔW daug mažesnė. Šviesos diodai gaminami iš GaP, SiC, GaAlAs, GaAsP ir kitokių junginių. Nuo cheminės puslaidininkio sudėties priklauso švytėjimo spalva. Iš GaAs gaminami šviesos diodai, spinduliuojantys infraraudonuosius spindulius.

Pagrindiniai šviesos diodų parametrai yra tokie:

1. Šviesos stipris I , matuojamas kandelomis (cd). Jis nurodomas tam tikro dydžio tiesioginei srovei I_t . Šviesos diodų šviesos stipris siekia dešimtąsias dalis, kartais vienetus milikandelų.
2. Švytėjimo ryškis B , išreiškiamas šviesos stiprumo santykiu su švytinčio paviršiaus plotu. Šviesos diodams jis siekia dešimtis, šimtus kandelų iš kvadratinio cm.
3. Nuolatinė tiesioginė įtampa U_t (2–3 V).
4. Bangos ilgis λ (švytėjimo spalva), atitinkantis didžiausią švytėjimo srautą.
5. Ribinė nuolatinė tiesioginė srovė (dešimtys miliamperų).
6. Ribinė atbulinė įtampa (keli voltai).
7. Leistinas temperatūrų intervalas ($-60^0 + +70^0\text{C}$).

Šviesos diodams paprastai pateikiamos tokios charakteristikos: *ryškuminė charakteristika – šviesos ryškio priklausomybė nuo tiesioginės srovės $B = f(I_t)$, šviesinė charakteristika – šviesos stiprio priklausomybė nuo tiesioginės srovės $I = f(I_t)$, spektrinė charakteristika, parodanti spinduliavimo priklausomybę nuo bangos ilgio λ , voltamperinė charakteristika (ji tokia pat kaip paprasto diodo) ir spinduliavimo kryptingumo diagrama.*

Kai kurie šviesos diodų parametrai priklauso nuo temperatūros. Kylant temperatūrai šviesos stipris I ir ryškis B mažėja. Šviesos diodų mertiškumas nedidelis: padavus stačiakampį impulsą, švytėjimas pasiekia maksimumą per 10^{-8} s.

Šviesos diodai panaudojami įvairių indikatorių, švieslenčių, didelių matmenų telekranų gamybai, skaičiavimo technikoje ir automatikoje, signalizacijai ir kt.

§6. Optronai

Optronai – puslaidininkiniai prietaisai, kuriuose konstruktyviai sujungti šviesos šaltinis ir imtuvas, tarp savęs turintys optinį ryšį. Šviesos šaltinyje elektrinis signalas paverčiamas šviesos signalu, kurį imtuvas vėl paverčia elektriniu. Tad oprono įėjimą ir išėjimą visada veikia elektrinis signalas, o ryšys tarp išėjimo ir įėjimo palaikomas optiniu signalu. Jei opronas turi tik vieną šviesos šaltinį (spinduolį) ir vieną fotoimtuvą, jis vadinamas *optopora* arba *elementariuoju opronu*. Spinduolio grandinė yra valdančioji, fotoimtuvo grandinė – valdomoji.

Svarbiausios teigiamos optronų savybės:

1) Elektrinio ryšio ir grįžtamojo ryšio nebuvimas tarp įėjimo ir išėjimo. Izoliacijos varžos dydis tarp įėjimo ir išėjimo siekia iki 10^{12} - $10^{14}\Omega$, praėjimo talpa neviršija 2 pF, o dažnai siekia tik pF dalis.

2) Plati svyravimų dažnių juosta (nuo 0 Hz iki 10^{13} - 10^{14} Hz).

3) Galimybė valdyti išėjimo signalą, tiesiogiai veikiant prietaiso optinį ryšį.

4) Optinio ryšio neveikia išoriniai elektromagnetiniai laukai, tad signalo optrone neveikia trukdžiai.

5) Optronai puikiai derinasi su kita puslaidininkine ir mikroelektronine aparatūra.

Tačiau optronai turi ir trūkumų:

1) Santykinai didelė naudojama galia ir nedidelis naudingumo koeficientas.

2) Ryškus temperatūros ir radiacijos poveikis.

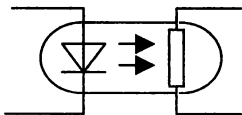
3) Ryškus „senėjimas“ (parametrų kitimas bėgant laikui).

4) Dideli savieji triukšmai.

5) Būtina hibridinės gamybos technologija; patogesnė, pigesnė ir modernesnė planarinė technologija netinka, nes spinduolis ir fotoimtuvus gaminami iš skirtingų puslaidininkių.

6) Optoporos spektrinės savybės turi būti suderintos.

Pagal optinio kanalo konstrukciją optoporos būna su uždaru ir atviru kanalu, o pagal naudojamus spinduolius ir imtuvus – labai įvairios.



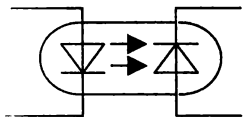
6.1 pav.

Rezistorines optoporas sudaro superminiatiūrinė lemputė arba šviesos diodas ir fotorezistorius, kuris gaminamas iš kadmio selenido ar kadmio sulfido matomam spinduliavimui arba iš švino selenido arba sulfido – infraraudonajam spinduliavimui (6.1 pav.).

Iš jų parametrų paprastai nurodomos didžiausios srovės bei įtamos įėjime ir išėjime, išėjimo varža ir tamsinė išėjimo varža, nesant įėjimo signalo, izoliacijos varžos dydis ir didžiausia leistina įtampa tarp įėjimo ir išėjimo, praėjimo talpa, įsijungimo ir išsijungimo laikas arba prietaiso inertiškumas. Pagrindinės optoporos charakteristikos yra voltamperinė ir perdavimo. Pastaroji parodo $R_{i\bar{s}} = f(I_{i\bar{e}j})$. Naudojamos automatiniam stiprinimui reguliuoti, ryšiui tarp kaskadų realizuoti,

bekontaktčiams įtampos dalikliams valdyti, signalams moduluoti, juos formuoti ir t.t.

Diodines optoporas paprastai sudaro Si fotodiodas ir infraraudonasis GaAs šviesos diodas. Fotodiodas gali dirbti fotogeneratoriniu režimu, sukurdamas 0,5 – 0,8 V fotoelektrovarą, ir fotodiodiniu režimu (6.2 pav.). Pagrindiniai diodinių optoporų parametrai yra: įėjimo ir išėjimo įtampos ir srovės nuolatinio ir impulsinio režimu, srovės perdavimo koeficientas, išėjimo signalo augimo ir mažėjimo laikas ir kt. parametrai, analogiški rezistorinėms optoporoms. Diodinių optoporų

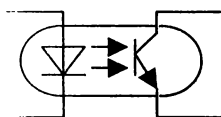


6.2 pav.

svarbiausios charakteristikos yra įėjimo ir išėjimo voltamperinės charakteristikos ir perdavimo charakteristikos fotogeneratoriniu ir fotodiodiniu režimu. Daugiakanalės optoporos turi kelias diodines optoporas viename korpuse. Imtuvu optoporoje vietoje fotodiodo gali būti fotovarikapas.

Diodinės optoporos panaudojamos kaip beapvijiniai impulsiniai transformatoriai signalams perduoti tarp sudėtingos radioelektroninės aparatūros blokų, įvairių mikroschemų darbui valdyti ir kt.

Tranzistorines optoporas paprastai sudaro GaAs šviesos diodas ir dvipolis n-p-n tipo fototranzistorius. Vadinasi, tokios optoporos įėjimo parametrai tokie pat kaip diodinės optoporos. Papildomai nurodoma didžiausia leistina srovė, įtampa, įėjimo galia, tamsinė fototranzistoriaus srovė, įsijungimo ir išsijungimo laikas, izoliacijos varžos tarp įėjimo ir išėjimo dydis. Tranzistorinės optoporos (6.3 pav.) paprastai dirba jungiklio režimu ir naudojamos komutatorinėse schemose kaip relės ryšiai tarp daviklių ir matavimo prietaisų ir kt.



6.3 pav.

Norint padidinti optoporos jautrį, kartais naudojamas sudėtinis tranzistorius. Tačiau tada sumažėja optoporos greitaieigiškumas. Naudojant lauko fototranzistorių, gaunama tiesinė išėjimo voltamperinė charakteristika, o tai labai patogu analoginėse schemose.

Tiristorinės optoporos imtuvu naudoja Si fototiristorius ir dirba šuntinai jungiklio režimu galingų impulsų formavimo, galingų tiristorių valdymo schemose, įvairių įrenginių, kurių galinga apkrova, valdymui ir komutacijai. Svarbiausi parametrai yra: įėjimo ir išėjimo

įtampos ir srovės įjungimo, darbo ir išjungimo metu, įsijungimo ir išsijungimo laikas, izoliacijos varžos tarp įėjimo ir išėjimo dydis ir kt.

Sudėtingoms operacijoms su įėjimo ir išėjimo signalu naudojamos *optoelektroninės integralinės mikroschemos*, kurios gali būti gana sudėtingos sandaros.

IX. MIKROELEKTRONIKA

§1. Bendrosios žinios

Naudojant vis sudėtingesnę elektroninę aparatūrą, visų pirma iškilo jos masės ir tūrio mažinimo problema ir jos patikimumo klausimai. Pavyzdys: reikia pagaminti ESM, susidedančią iš 10^8 elementų. Tegul vienas diskretinis elementas (diodas, tranzistorius, rezistorius, kondensatorius ar kt.) vidutiniškai turi 1 g masę, 1 cm^3 tūrį, sunaudojamą galią 10 mW, gedimų intensyvumą 10^{-5} val^{-1} . Visa ESM turės 100 t masę, 100 m^3 tūrį, naudos 1000 kW galią, o ges kas 3,6 sek. Suprantama, iš tokios ESM mažai naudos. Tad visų pirma iškilo aparatūros miniatiūrizavimo problema. Vietoje *kabančiojo (tūrinio)* montažo buvo imta naudoti *spausdintą* montažą, kuriame jungiamieji laidai pakeisti metalo juostelėmis dielektriko plokštės paviršiuje, o ant plokštės sumontuojami diskretiniai elementai. Toliau imta konstruoti aparatūrą iš *modulių* ir *mikromodulių* – miniatiūriuose korpusuose ant spausdintų plokščių sumontuotų ištisu blokų (stiprintuvų, generatorių, keitiklių ar kt.). Jus buvo labai patogų keisti gedimo atveju. Tačiau problema galutinai buvo išspręsta tik panaudojus *integralines schemas (IS)*, kuriose visi elementai tarpusavyje sujungti neatskiriamomis jungtimis ir visas gaminys yra kaip tam tikras vienetas. Pagrindiniai mikroschemų tipai: *plėvelinės*, kai visi elementai (laidininkai, rezistoriai, kondensatoriai) pagaminti iš įvairių savybių plėvelių ant dielektrinio pagrindo, *puslaidininkinės*, kurių elementai padaryti puslaidininkio viduje arba jo paviršiuje, ir *hibridinės*, kuriose dalis elementų yra diskretiniai.

Pagrindiniai mikroschemų privalumai: maži matmenys ir masė, maža naudojama galia, didelis patikimumas, greitaeigiškumas, santykinai maža kaina. Tačiau turi ir trūkumų: yra mažos galios, sunku padaryti didelio induktyvumo rites ir didelės talpos kondensatorius, sugedus vienam schemos elementui, reikia išmesti visą mikroschemą, nes jos netaisytinios. Mikroschemos jungiamos senu būdu, todėl mažėja patikimumas. Elektroninės aparatūros elementų tankis ir schemos patikimumas, aparatūrą surinkus įvairiais būdais, palyginti pateiktas 1 lentelėje. Pagal elementų skaičių (integracijos laipsnį) mikroschemos skirstomos į: *paprastas* (iki 10 elementų), *vidutinės* ($10 \div 100$ elementų), *didžiausias* ($100 \div 1000$ elementų) ir *superdidžiausias*

(daugiau kaip 1000 elementu). Pagal apdorojamo signalo tipą ir funkcijas integralinės schemos skirstomos į *analogines* ir *skaitmenines*. Pastarosios daugiausia naudojamos ESM ir dirba impulsiniu režimu.

1 lentelė

Schemos tipas	Elementų skaičius 1cm^3	Gedimų Intensityvumas val^{-1}
Lempinės schemos su kabančiu montažu	10^{-1}	10^{-5}
Tranzistorinės schemos su kabančiu montažu	1	10^{-6}
Schemos su mikromoduliais	10	10^{-7}
Plėvelinės ir hibridinės integralinės schemos	10^2	10^{-8}
Puslaidininkinės integralinės schemos	10^3+10^5	10^{-9}

§ 2. Plėvelinės ir hibridinės IS

Gaminant plėvelines IS, imamas dielektrinis (stiklas, keramika) pagrindas poliruotu paviršiumi, ant kurio garinimo vakuume būdu suformuojami pasyvūs schemos elementai (rezistoriai, kondensatoriai, ritės, jungiamieji laidai). Aktyvūs elementai (diodai, tranzistoriai) plėveliniai nedaromi, nes sunku užtikrinti gerą jų kokybę. Plėvelinės IS būna *plonaplėvelinės* (plėvelės storis 1-2 μm) ir *storaplėvelinės*, tačiau jos skiriamos ne pagal plėvelės sluoksnių storį, o pagal gamybos technologiją.

Gaminant plėvelinius rezistorius, formuojamos didelės savitosios varžos medžiagų (nichromas ir kt.) plėvelės arba metalo ir keramikos mišinio (kermeto) plėvelės. Savitoji varža plėvelinėje technologijoje matuojama ypatingais vienetais – omais kvadratai ($\Omega / \text{€}$). Taigi, taikant plėvelinę technologiją, gaunami plonaplėveliniai rezistoriai, kurių savitoji varža $10 + 300 \Omega / \text{€}$, jų nominalai $10 + 10^6 \Omega$, gamybos tikslumas – $\pm(5\% + 0,05\%)$, temperatūrinis varžos koeficientas $\approx 0,25 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$. Storaplėveliniai rezistoriai turi savitąją varžą $5 + 10^6 \Omega / \text{€}$, nominalus $0,5 + 5 \cdot 10^8 \Omega$, tikslumą $\pm(15 + 0,2)\%$, temperatūrinį varžos koeficientą $\approx 2 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$.

Plėveliniai kondensatoriai paprastai gaminami tik su dviem plokštelėmis. Priklausomai nuo dielektriko plėvelės tarp plokštelių storio jie irgi būna plonaplėveliniai ir storaplėveliniai. Kaip dielektrikas naudojami Si, Al, Ti oksidai. Pasiekiamo talpa nuo dešimčių iki kelių

tūkstančių pF, gamybos tikslumas $\pm 15\%$, temperatūrinis talpos koeficientas $(0,05 \pm 0,2) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Plėvelinės ritės daromos plokščios spiralės formos. Pasiekiamas induktyvumas iki $0,5 \mu\text{H}$.

Kadangi plėvelinėse IS pavyksta kokybiškai suformuoti tik pasyvius elementus, tai aktyvūs elementai prie jų primontuojami ir schema tada tampa *hibridinė*. Paprastai prie plėvelinės IS primontuojami bekorpusiniai diodai ir tranzistoriai, rečiau pasyvieji elementai (jei jų neįmanoma pagaminti pagal plėvelinę technologiją, pvz., miniatiūriniai transformatoriai).

§3. Puslaidininkinės IS

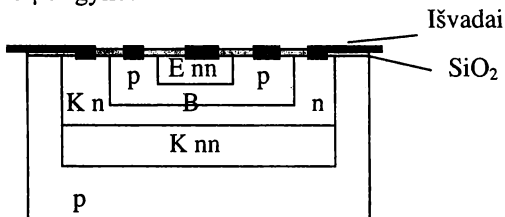
Izoliacija. Puslaidininkinėse IS visi elementai suformuojami puslaidininkinio kristalo paviršiniame sluoksnyje ir ant paviršiaus. Naudojamos $200 - 300 \mu\text{m}$ storio puslaidininkinės medžiagos plokštelės nuo $1,5 \times 1,5$ iki 6×6 mm dydžio. Puslaidininkinės IS yra plačiausiai naudojamos, turi didžiausią montažo tankį, labiausiai patikimos, tačiau pasyvūs elementai išeina blogesnės kokybės, o ričių suformuoti jose išvis neįmanoma.

Kadangi visi schemos elementai formuojami viename kristale, tai pirmiausia reikia išspręsti jų izoliavimo vienas nuo kito klausimą. Naudojami du izoliavimo būdai. Paprasčiausias ir pigiausias būdas - izoliavimas p-n sandūra. Tarkime, p tipo puslaidininkyje difuzijos būdu daromos n tipo „kišenės“, kuriose formuojami aktyvūs ir pasyvūs elementai. p-n sandūros tarp kišenių ir kristalo visą laiką išoriniu potencialu laikomos esant atbulinei įtampai. Tada sandūra atlieka izoliacijos vaidmenį. Tačiau tokiai izoliacijai būdinga parazitinė savoji barjerinė talpa.

Kitas izoliavimo būdas – panaudoti dielektrinį sluoksnį. Čia irgi sudaromos kišenės, kurios nuo kristalo atskiriamos dielektriko, dažniausiai SiO_2 , sluoksniu. Izoliacija gaunama geresnė, nes dielektrinis sluoksnis keliskart storesnis už p-n sandūrą, parazitinė talpa mažesnė, tačiau dielektriko sluoksnio suformavimas yra pakankamai sudėtingas technologinis uždavinys.

Dvipoliai tranzistoriai. Dvipoliai tranzistoriai suformuojami puslaidininkinio kristale, difuzijos metodu sukūrus kolektoriaus, bazės ir emiterio sritis. Paprastai daromi n-p-n tipo tranzistoriai.

Pirmiausia p tipo puslaidininkyje suformuojamas kolektorius. Kad kolektorius turėtų mažesnę varžą, vidinis jo sluoksnis nn gaminamas su dideliu priemaišos kiekiu. Kad kolektorinė sandūra būtų pakankamai stora, bazės link legiravimo laipsnis mažinamas (kolektoriaus sluoksnis n). Emiteris irgi gaminamas stipriai legiruotas (nn tipo), kad krūvininkų injekcija būtų didelė. Nuo visų tranzistoriaus sričių išvedami išvadai ir jis izoliuojamas dielektrine SiO₂ plėvele (3.1 pav.). Kad tranzistorių jungiant su kitais schemas elementais išvadai ir jungtys tarpusavyje nesikirstų, nuo kiekvieno tranzistoriaus elektrodo gali būti išvedama po 2 išvadas. Visas tranzistorius į p tipo kristalą įsiterpia 10 – 15 μm gyliu.

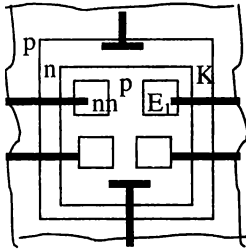


3.1 pav.

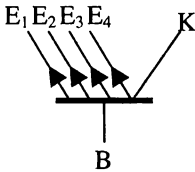
Tipiniai tranzistorių, suformuotų integralinėse schemose, parametrai gaunami tokie: $\beta \approx 200$, v_{rib} iki 500 MHz, kolektorinės sandūros talpa iki 0,5 pF, $U_{ka rib}$ iki 50 V, savitoji n ir p sluoksnių varža yra kelių šimtų, o nn sluoksnių – 15 – 20 Ω /€.

Nesunku pastebėti, kad taip gaminant tranzistorius susidaro parazitinės struktūros: kartu su n-p-n tipo tranzistoriumi, įskaitant p kristalą, gaunamas p–n–p tipo tranzistorius, sudarytas iš p pagrindo, suformuoto tranzistoriaus K ir B sričių, arba tiristorius n–p–n-p. Veikiant normalioms maitinimo įtampoms, tos parazitinės struktūros uždarytos, tačiau patekus kokiems nors atsitiktiniams trikdžiams, jos gali atsidaryti. Tada integralinė schema dažniausiai sugadinama. Todėl IS jautrios labai stipriems elektriniams laukams.

Gaminant tranzistorius, visiškai nesunku suformuoti ne vieną, o kelis emiterius ir pagaminti *daugiaemiterinį tranzistorių* (3.2 pav.). Jo žymėjimas schemoje parodytas 3.3 pav. Tokį tranzistorių galima atidaryti padavus tiesioginės įtampos impulsą į bet kurią emiterinę sandūrą.



3.2 pav.

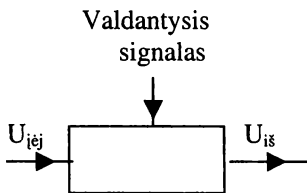


3.3 pav.

Kiekvienam tranzistoriui jungiamas savas atidarančiojo impulso šaltinis. Kitų emiterių sandūros uždarytos. Tokio tranzistoriaus režimą pakeitę inversiniu, turėsime daugiakolektorinį tranzistorių. Panašiai gaminami sudėtiniai tranzistoriai, tranzistoriai su Šotkio barjeru (metalo kontakto su puslaidininkiu), lauko, MOP struktūros ir kitų modifikacijų tranzistoriai, diodai, optoelektroniniai prietaisai, pasyvūs schemas elementai ir iš jų suformuojamos įvairiausios IS, turinčios vienokią ar kitokią funkcinę paskirtį.

X. ELEKTRONINIAI JUNGIKLIAI

§1. Pagrindinės sąvokos



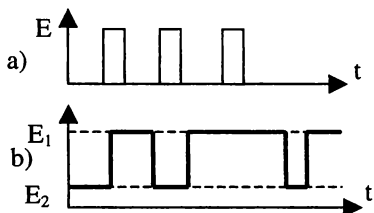
1.1 pav.

Impulsų formavimo, keitimo ir valdymo impulsais įrenginių pagrindiniai elementai yra *jungikliai*. Pagrindinė jų paskirtis – įvairių grandinių *komutacija* (įjungimas, išjungimas) veikiant *valdančiam signalui*. Stacionariu režimu jungiklis gali būti vienos iš dviejų būsenų: *uždarytas (įjungtas)* ir *atidarytas (išjungtas)*. Pirmuoju atveju signalas $U_{įėj}$

pasiekia apkrovą, antruoju – jos nepasiekia. Pagrindiniai jungikliams keliami reikalavimai:

1. Kuo mažesnė jo varža, kai įjungtas, ir kuo didesnė jo varža, kai išjungtas.
2. Greitaeigiškumas (mažas persijungimo laikas). Jį lemia pereinamųjų procesų trukmė.
3. Slenkstinių lygių (persijungimo parametru) stabilumas.

Elektroniniai jungikliai gaminami elektrovakuuminių, puslaidininkinių, magnetinių prietaisų pagrindu. Priklausomai nuo juose panaudojamų prietaisų jie skirstomi į: *diodinius, tranzistorinius, magnetinius* ir pan. bei *hibridinius* (su įvairių tipų prietaisais).



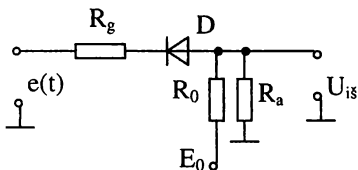
1.2 pav.

Įėjimo, valdymo ir išėjimo signalai gali būti *impulsai* arba *įtampos lygiai*. Šiuo pagrindu jungikliai skirstomi į: *impulsinius, potencialinius* ir *impulsopotencialinius*. Impulsinį signalą sudaro trumpi impulsai, fiksuoti tam tikro pastovaus lygio atžvil-

giu (1.2 a) pav.). Potencialinis signalas turi du fiksuotus lygius: aukštą E_1 ir žemą E_2 (1.2 b) pav.). Įtampos (potencialo) lygiai, impulsiniai signalai, jungiklio būsenos gali būti koduojamos dvejetainėje sistemoje skaičiais 0 ir 1. Jungikliai yra vieno ar kelių įėjimų.

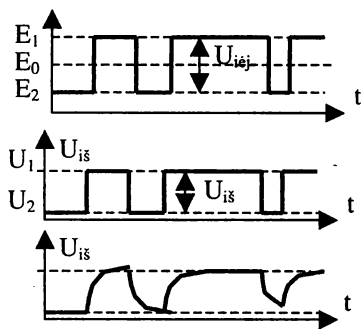
§2. Diodinis jungiklis

Paprasciausia diodinio jungiklio schema parodyta 2.1 pav. Schemoje $U_{i\text{ej}} = e(t)$, R_g – įėjimo įtampos $e(t)$ šaltinio vidinė varža, R_a – apkrovos rezistorius, E_0 – nuolatinė įtampa (priešįtampis), paduodama į diodą, R_0 – priešįtampio šaltinio vidinė varža. Ši schema yra potencialinio valdymo.

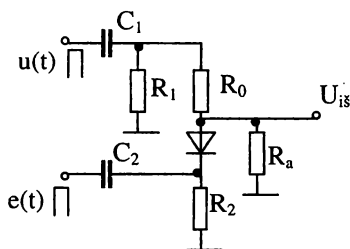


2.1 pav.

Diodas įtampa E_0 gali gauti priešįtampį arba atbuline kryptimi, arba tiesiogine kryptimi. Pirmuoju atveju, kaip žinome, per diodą teka tik nedidelė atbulinė srovė I_{atb} , nes diodo varža atbuline kryptimi siekia $R_{\text{atb}} = (0,1 \div 1) \text{ M}\Omega$. Kai priešįtampis veikia tiesiogine kryptimi, per diodą teka nemaža tiesioginė srovė I_{ties} , kadangi tiesiogine kryptimi diodo varža nedidelė. Įėjimo įtampa $U_{i\text{ej}} = e(t)$ kinta ribose $E_1 \geq e(t) \geq E_2$, o priešįtampis imamas $E_0 > E_2$. Diodas tada dirbs tiesiogine kryptimi ir gausime $U_2 \approx E_2$ (2.2 a) ir b) pav.), t.y. kai įėjime yra žemas potencialas, išėjime taip pat gaunamas žemas potencialas. Kai $E_1 > E_0$, išėjime gaunama $U_1 \approx E_0 + I_{\text{atb}}R_0 \geq E_0$, t.y. kai įėjime yra aukštas potencialas, išėjime taip pat gaunamas aukštas potencialas.



2.2 pav



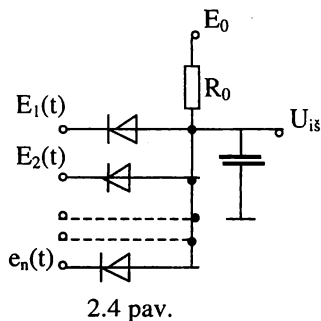
2.3 pav.

Schema su impulsiniais valdančiaisiais signalais parodyta 2.3 pav. Jeigu impulso trukmė t_i ir pauzės trukmė t_p viršija pereinamųjų procesų trukmę, tai schema veikia taip pat kaip potencialinio valdymo. Šiuo atveju impulsai $u(t)$ vaidina priešįtampio E_0 vaidmenį ir $U_{is} = 1$, kai $u(t)$ ir $e(t)$ sutampa laiko atžvilgiu.

Vadinasi, diodinis jungiklis gali būti tokių būsenų:

- 1) A, kai $e(t) = E_1 > E_0$; tada diodas yra uždarytas, $U_1 \geq E_0$; išėjime turime 1.
- 2) B, kai $e(t) = E_2 < E_0$; tada diodas dirba tiesiogine kryptimi ir yra atidarytas; išėjime turime 0.
- 3) C, kai $e(t) = E_1 = E_0$; srovė per diodą lygi 0; $U_1 = E_0$; vadinasi, išėjime turime 1.

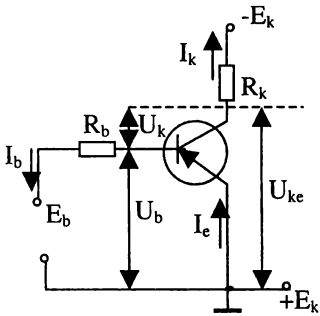
Kaip žinome, diodas pasižymi tam tikru inertiškumu, susijusiu su krūvininkų rekombinacijos procesais ir p-n sandūros savąja talpa. U_{is} forma būna iškraipyta, kaip parodyta 2.2 c) pav. Smulkiau šis klausimas paliestas skirsnielyje „Impulsinis puslaidininkinio diodo režimas“. Diodiniai jungikliai gali turėti n įėjimų (2.4 pav.). Jei į visus įėjimus



paduoti aukšti potencialai E_1 , tai išėjime irgi gaunamas aukštas potencialas U_1 . Jeigu bent į vieną įėjimą paduotas žemas potencialas E_2 , tai išėjime irgi bus žemas potencialas U_2 , nes diodas dirbs tiesiogine kryptimi, ir nors visi kiti diodai uždaryti, išėjime bus žemas potencialas U_2 . Jei žemas lygis paduotas ne į vieną, o į kelis arba visus įėjimus, išėjime bus žemas lygis.

§3. Tranzistorinis jungiklis

Paprasčiausio tranzistorinio jungiklio su BE schema parodyta 3.1 pav. Apkrovos varža R_k įjungta kolektoriaus grandinėje, valdymo impulsai paduodami iš impulsų generatoriaus E_b per rezistorių R_b (R_b gali būti impulsų generatoriaus vidinė varža). Išjungtą jungiklio būseną atitinka žemas teigiamas įėjimo signalo $U_{iej} = E_0$ lygis. Įjungtą būseną lemia aukštas įėjimo signalo lygis $U_{iej} = E_1$. Jungiklis būna vienos būsenos, kol įėjime veikia atitinkamo lygio signalas.

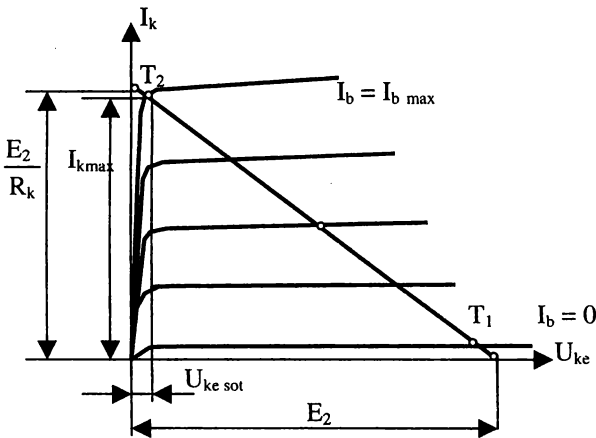


3.1 pav.

Impulsinėje technikoje tranzistorius gali dirbti kokybiškai skirtingais režimais negu aktyviuoju režimu stiprintuvuose. Tranzistoriaus režimą lemia įtampų tranzistoriaus p-n sandūrose poliarumas. Skiriami tokie tranzistoriaus režimai (įtampų poliarumas nurodytas p-n-p tipo tranzistoriui; n-p-n tipo tranzistoriaus sandūrų poliarumas priešingas):

- 1) *normalus aktyvusis režimas* ($U_e > 0, U_k < 0$),
- 2) *inversinis aktyvusis režimas* ($U_e < 0, U_k > 0$),
- 3) *atkirtos (atjungimo, nukirtimo) režimas* ($U_e < 0, U_k < 0$),
- 4) *soties (dvigubos injekcijos režimas)* ($U_e > 0, U_k > 0$).

Jungikliuose tranzistorius dirba arba atkirtos režimu, kai jungiklis išjungtas, arba soties režimu, kai jungiklis įjungtas.



3.2 pav.

Ant statinių tranzistoriaus išėjimo charakteristikų nubrėškime dinaminę charakteristiką, nes, suprantama, tranzistorius jungiklyje dirba dinaminio režimu (3.2 pav.). Pagal šią charakteristiką išeina, kad, kol į tranzistoriaus bazę nepaduotas $U_{i\dot{e}j}$ impulsas, tranzistorius bus uždary-

tas. Tą būseną atitinka taškas T_1 . Tada kolektoriaus grandinėje teka tik maža (atbulinė) kolektoriaus srovė, $I_b = 0$, šaltinio E_2 visa įtampa krinta tranzistoriuje. Taške T_1 tranzistorius dirba atkirtos režimu.

Į tranzistoriaus įėjimą padavus srovės impulsą $I_b = I_{b \max}$, tranzistorius persoka į būseną T_2 , atitinkančią soties režimą. Dabar per tranzistorių teka didžiausia $I_k = I_{k \max}$ ir ją riboja tik R_k . Ji vadinama *soties srove*. Iš brėžinio matyti, kad $I_{k \max} \approx E_2 / R_k$. Ši srovė su bazės srove susijusi tiesiškai $I_{b \max} = I_{bs} = \beta I_{k \max}$; čia β – statinis srovės stiprinimo koeficientas. Dabar beveik visa E_2 krinta apkrovos rezistoriuje R_k . Iš brėžinio matyti, kad tranzistoriuje krinta tik nedidelė įtampa $U_{ke \text{ sot}}$, vadinama *soties įtampa*. Ji tesiekia kelias dešimtąsias volto. Nors įtampa $U_{ke \text{ sot}}$ ženklo nepakeitė, tačiau pačioje kolektorinėje sandūroje ji pasidarė tiesioginė. Pavyzdžiui, n-p-n tipo tranzistoriui $U_{ke \text{ sot}} = 0,2 \text{ V}$, o $U_{be} = 0,6 \text{ V}$. Tada $U_{kb} = 0,2 - 0,6 = -0,4$ volto, o tai yra tiesioginė įtampa n-p-n tipo tranzistoriaus kolektorinei sandūrai.

Srovių santykis

$$\frac{I_{k \max}}{I_{b \max}} = B,$$

o B vadinamas *stiprių signalų srovės stiprinimo koeficientu*. Tranzistoriaus įsotinimo stiprumas kiekybiškai charakterizuojamas vienu iš šių koeficientų:

soties koeficientu

$$S = \frac{I_b}{I_{bs}}$$

arba *soties laipsniu*

$$N = \frac{I_b - I_{bs}}{I_{bs}} = S - 1.$$

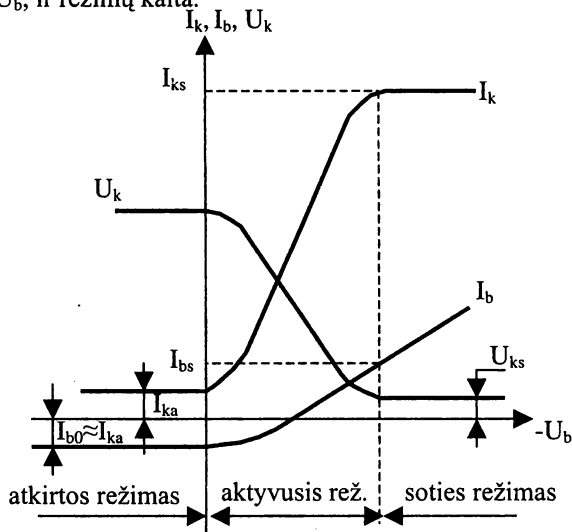
Vienas iš soties režimo parametrų yra *soties varža*

$$R_s = \frac{U_{kesot}}{I_{k \max}}.$$

Ji būna nuo kelių iki kelių dešimčių omų.

Tranzistorinis jungiklis priverčia tranzistorių dirbti impulsiniu režimu, kuriam labai svarbūs pereinamieji procesai. Dėl jų daugiau ar mažiau iškraipoma išėjimo impulsų forma. Tranzistoriaus darbo ypatumai impulsiniu režimu trumpai aptarti §10.

Tranzistorius jungiklyje iš atkirtos režimo (taškas T_1) į soties režimą (tašką T_2) pereina pagal dinaminę charakteristiką normaliu aktyviuoju (stiprinimo) režimu. Tą perėjimo procesą gana vaizdžiai rodo voltamperinės charakteristikos (3.3 pav.), kurios brėžinyje duotos nagrinėtai BE schemos tranzistoriniam jungikliui su p-n-p tipo tranzistoriumi. Iš charakteristikų puikiai matyti, kaip kinta I_k , I_b ir U_k , kintant U_b , ir režimų kaita.

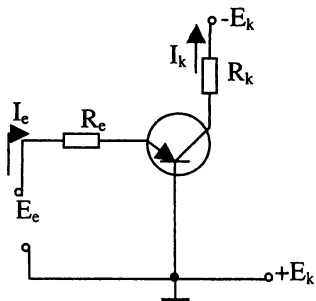


3.3 pav.

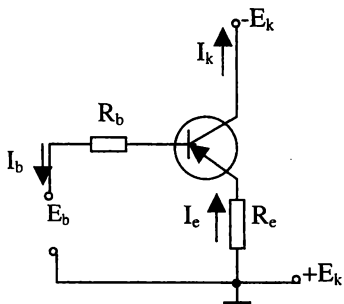
Tranzistoriniai jungikliai pagal konstrukciją yra įvairūs. Visų pirma, kadangi tranzistoriai gali būti jungiami pagal schemas BE, BB, BK, tai ir jungikliai būna pagal atitinkamas schemas BE, BB, BK ir jungiklis-žvaigždė. BE schemos jungiklį trumpai aptarėme. Žinome, kad stiprintuvų, surinktų pagal schemas BE, BB ir BK, savybės gerokai skiriasi.

Skiriasi ir atitinkamų schemų jungiklių savybės.

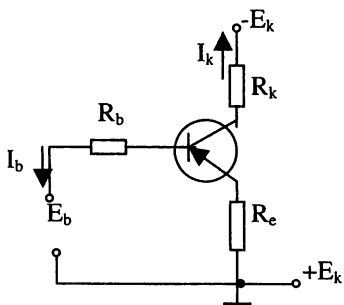
Schemas BB jungiklis parodytas 3.4 pav. Apie šios schemos ypatybes trumpai galima pasakyti tiek – BB jungiklis nepatogus tuo, kad: 1) įėjimo srovė turi būti didesnė už apkrovos srovę, nes $I_b = I_e - I_k$, o sotinimo sąlyga yra $\alpha I_e > I_k$; 2) įtampa U_{kb} atidarytame jungiklyje gaunama didesnė negu įtampa U_{ke} schemoje BE. Vienintelis šios sche-



3.4 pav.



3.5 pav.



3.6 pav.

mos privalumas (ir tai ne visada) – minimali įėjimo srovė atkirtos režimu.

Schemos BK jungiklis parodytas 3.5 pav. Jo privalumai: 1) minimali srovė atkirtos režimu; 2) minimali įtampa soties režimu. Pagrindinis šio jungiklio trūkumas – valdymo įtampa E_b turi viršyti maitinimo įtampą.

Jungiklis-žvaigždė yra BE jungiklių kombinacija (3.6 pav.). Kaip ir schemoje BE, jungiklis uždaromas teigiama E_b . Soties režimu I_k pasidaro neigiama ir jungiklis tampa tarsi dvigubas diodas. Tada priekinis frontas formuojamas momentaliai.

Tad pagrindinis tranzistorinių jungiklių trūkumas yra pakankamai ilgi pereinamieji procesai, sukeliantys išėjimo impulsų iškraipymus ir mažinantys jungiklių greitaeigiškumą. Siekiant išvengti šio trūkumo, naudojami jungikliai, turintys RC grandis bazės grandinėje, arba neįsotinti tranzistoriniai jungikliai. Didžiausias greitaeigiškumas pasiekiamas naudojant jungiklius, turinčius grįžtamąjį ryšį, grįžtamojo ryšio grandinėje panaudojant Šotkio diodą (su metalo ir puslaidininkio barjeru). JAME NESIKAUPIA KRŪVIS, KARTU – NEIŠSIURBIAMI nepagrindiniai krūvininkai iš bazės. Taip gaunami jungikliai, kurių persijungimo trukmė mažesnė už 1 ns, o ypač patogu tai, kad tranzistoriai su Šotkio diodu labai nesunkiai formuojami integralinėse schemose.

XI. SKAITMENINIŲ ĮRENGINIŲ LOGINIAI ELEMENTAI

§1. Logikos algebros pagrindinės sąvokos

Ryšių technikoje, valdyme, ESM ir kt. naudojami signalai, kurių parametrai (amplitudė, trukmė ar pan.) pateikiami arba *analogine* (netrūkia), arba *diskretine* (dažniausiai binarine) forma. Priklausomai nuo signalo charakterio (analoginiai jie ar diskretiniai) naudojami ir analoginiai arba diskretiniai funkciniai įrenginiai, skirti signalams registruoti, apdoroti, selekcijai pagal vieną ar kitą požymį, paskirstyti tarp ryšio kanalų ir t.t.

Iš diskretinių signalų labiausiai paplito *binariniai*, galintys turėti tik dvi iš esmės skirtingas vertes, koduojamas 0 ir 1. Tokie signalai gali būti įtampos (potencialo) lygiai (0 – žemas, 1 – aukštas arba atvirkščiai), trumpi impulsai (1 – impulsas yra, 0 – jo nėra), dažnis (1 – aukštas dažnis, 0 – žemas dažnis) ir t.t. Binarinius signalus apdoroja diskretiniai funkciniai įrenginiai, kurių veikimas pagrįstas logikos algebra.

Pagrindinės sąvokos. Tegul turime aibę n kintamųjų (x_1, x_2, \dots, x_n) , kurių kiekvienas nepriklausomai nuo kitų gali turėti 2 vertes: 0 ir 1. Galimų būsenų arba kombinacijų skaičius

$$N_x = 2^n.$$

Loginė (perjungiančioji) n kintamųjų funkcija $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ nusakoma jos vertėmis kiekvienai n kintamųjų verčių kombinacijai, be to, pati funkcija y gali turėti vieną iš galimų 2 verčių: 0 arba 1. Vadinasi, galimų y verčių bus

$$N_y = 2^{N_x} = 2^{2^n}.$$

Funkcija y gali būti apibrėžta ne visoms galimoms jos argumentų būsenoms N_x . Funkciją y galima užrašyti analitiškai arba pateikti būsenų lentelės forma. Priklausomai nuo kintamųjų skaičiaus galimos skirtingos y funkcijos būsenos. Funkcijos galimas būsenas realizuoja atitinkamas funkcinis įrenginys.

Jei turime vieno kintamojo funkciją $y = f(x)$, tai galimi tik 2 variantai:

a)

x	y
0	0
1	1

b)

x	y
0	1
1	0

1 lentelė

- a) atvejį gali realizuoti jungiklis - kartotuvus, realizuojantis loginę funkciją $y = x$;
- b) atvejį gali realizuoti jungiklis- invertorius, realizuojantis loginę funkciją $y = \bar{x}$ („ne x “). Taigi šiuo atveju bus realizuojama *loginė funkcija NE (inversija, neigimas)*.

2 lentelė

x_1	x_2	y
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Vadinasi, kartojimo arba inversijos operaciją gali realizuoti schema, turinti vieną įėjimą. Kelių įėjimų schemomis galima realizuoti kitas logines operacijas. Schema, turinti n įėjimų ir 1 išėjimą, vadinama *sutapatinimo (konjunkcijos, IR)*, jeigu ji realizuoja tokią loginę operaciją: išėjime gaunamas 1 tik tada, kai visuose įėjimuose yra 1; jei bent viename įėjime yra 0, išėjime gaunamas 0.

Pavyzdžiui, dviejų įėjimų schema galima apdoroti dviejų kintamųjų $y = f(x_1, x_2)$ funkciją ir šiuo atveju galimos būsenos pateiktos 2 lentelėje. Loginė funkcija IR dar vadinama loginiu dauginimu $y = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n$ arba dviejų kintamųjų atveju $y = x_1 \cdot x_2$. Turint n kintamųjų, loginę sandaugą IR galima užrašyti formule

$$y = \prod_{i=1}^n x_i .$$

Dviejų įėjimų IR schemą vadina ir *ventiliu*. Tokia schema dirba kaip jungiklis, praleidžiantis arba nepraleidžiantis į signalini įėjimą paduotą signalą priklausomai nuo to, paduotas ar nepaduotas valdantysis signalas į kitą (valdantįjį) įėjimą.

3 lentelė

x_1	x_2	y
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Schema, turinti n įėjimų ir vieną išėjimą y , vadinama *surinkimo (disjunkcijos, ARBA)*, jeigu ji realizuoja tokią loginę operaciją: išėjime signalo vertė lygi 1, jeigu bent viename įėjime yra 1; signalas išėjime

lygus 0 tik tada, kai visuose įėjimuose yra 0. Dviejų įėjimų schemas galimos būsenos pateiktos 3 lentelėje.

Operacija ARBA dar vadinama loginiu sumavimu $y = x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n$ arba

$$y = \sum_{i=1}^n x_i .$$

Dviem kintamiesiems $y = x_1 \vee x_2$.

Loginės schemas IR bei ARBA yra *dvilypės*. Dvilypumas pasireiškia tuo, kad viena ir ta pati schema priklausomai nuo signalo lygio kodavimo 0 ir 1 būdo gali būti arba schema IR, arba schema ARBA. Norint tuo įsitikinti, pakanka būsenų lentelėje skaičius pakeisti inversiniais. Vadinasi, jeigu schema dirba kaip IR aukštiesiems lygiams (arba teigiamiesiems signalams), tai ji tuo pat metu gali būti schema ARBA žemiems lygiams (neigiamiesiems signalams).

4 lentelė

x_1	x_2	y
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1

Schemas, realizuojančios funkcijas NE, IR, ARBA, yra pagrindinės ta prasme, kad galima surinkti sudėtingą jungiklinę schemą, gebančią realizuoti bet kokio sudėtingumo loginę operaciją. Įrodyta, kad norint realizuoti bet kokio sudėtingumo loginę operaciją, pakanka dviejų schemų iš trijų, t.y. IR bei NE, ARBA ir NE arba IR bei ARBA. Panaudojant tokius schemų junginius, galima pagaminti universalų loginį elementą. Dviejų įėjimų IR bei NE dirba pagal 4 būsenų lentelę. Matyti, kad išėjimo signalo informacinė reikšmė yra įėjimo signalų loginės sandaugos inversija $y = \overline{x_1 x_2}$. Šiam elementui aktyvusis loginis lygis, vienareikšmiškai nustatantis išėjimo lygį, yra 0.

5 lentelė

x_1	x_2	y
1	1	0
1	0	0
0	1	0
0	0	1

Loginis elementas ARBA bei NE (NI), turintis du įėjimus, dirba pagal 5 būsenų lentelę, atitinkančią loginės sumos inversiją

$$y = x_1 \vee x_2.$$

Šio elemento aktyvusis loginis lygis, vienareikšmiškai nusakantis lygį išėjime, yra 1.

Pagrindiniai dėsniai. Logikos algebroje galioja šie pagrindiniai dėsniai:

1) Perstatymo

$$x_1 + x_2 = x_2 + x_1,$$

$$x_1 x_2 = x_2 x_1.$$

2) Jungimo

$$(x_1 + x_2) + x_3 = x_1 + (x_2 + x_3),$$

$$(x_1 x_2) x_3 = x_1 (x_2 x_3).$$

3) Pasiskirstymo

$$(x_1 + x_2) x_3 = x_1 x_3 + x_2 x_3,$$

$$x_1 x_2 + x_3 = (x_1 + x_3) (x_2 + x_3).$$

4) Inversijos

$$\overline{\overline{x_1 + x_2}} = \overline{\overline{x_1} \overline{x_2}}, \quad \overline{\overline{x_1 x_2}} = \overline{\overline{x_1} + \overline{x_2}}.$$

1) ir 2) dėsniai bei 3) dėsnio sumos atvejis sutampa su paprastos algebros dėsniais. 3) dėsnio daugybos atvejis galioja tik logikos algebroje.

Iš pagrindinių dėsnių išeina tokios tapatybės:

$$x + \overline{x} = 1$$

$$x + 1 = 1$$

$$\overline{\overline{x}} = x$$

$$x \cdot 0 = 0$$

$$x \cdot 1 = x,$$

$$x \cdot x \cdot \dots \cdot x = x,$$

$$x_1 + x_1 x_2 + x_1 x_3 = x_1,$$

$$x_1 (x_1 + x_2) (x_1 + x_3) = x_1,$$

$$x_1 + \overline{\overline{x_1} x_2} = \overline{\overline{x_2}} + \overline{\overline{x_2} x_1} = x_1 + x_2,$$

$$\overline{\overline{x}} = x.$$

Logikos algebros dėsniai ir tapatybės leidžia keisti (transformuoti) ir supaprastinti logines funkcijas. Be to, logikos algebroje įrodoma, kad bet kokia sudėtinga loginė kintamųjų (x_1, x_2, \dots, x_n) funkcija gali būti pateikta forma, kai kintamieji x_1, x_2, \dots, x_n ir jų inversijos sujungiami tik loginio dauginimo ir sudėties (disjunkcijos ir konjunkcijos) operacijomis.

Visus logikos algebros dėsnius galima užrašyti būsenų lentele:

x_1	x_2	\bar{x}_1	\bar{x}_2	$x_1 + x_2$	$\overline{x_1 + x_2}$	$x_1 x_2$	$\overline{x_1 x_2}$	$x_1 \bar{x}_2$	$\bar{x}_1 x_2$	$x_1 + \bar{x}_2$
1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1
0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1
0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1

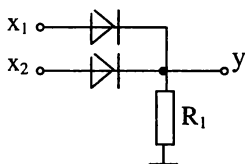
§2. Pagrindinių loginių funkcijų schemotechninė realizacija

Elektroninė skaičiavimo mašina susideda iš daugybės elektroninių mazgų ir elementų, tačiau šių elementų įvairovė nėra didelė, neviršija kelių dešimčių.

Pagal vykdomas funkcijas elementus galima suskirstyti į 3 grupes: loginius, atminties ir pagalbinius. Logines operacijas, taip pat kai kurias aritmetines operacijas atlieka loginiai elementai. Pagal dvejetainės informacijos pateikimo ir jos apdorojimo būdą elementai gali būti:

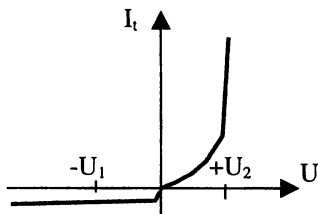
- potencialiniai (pvz., aukštas potencialo lygis – 1, žemas – 0),
- impulsiniai (impulsas – 1, pauzė 0),
- impulso potencialiniai.

Impulsiniai ir impulso potencialiniai elementai buvo plačiai naudojami ankstesnių kartų ESM. Dabar plačiausiai naudojami potencialiniai elementai.

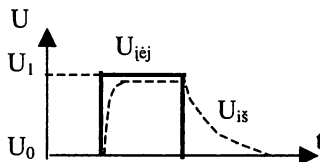


2.1 pav.

Disjunkcijos operaciją (ARBA) atlieka *disjunktoriai* (*surinkimo schema*). Paprasčiausią potencialinį disjunktorių galima surinkti panaudojant diodus. Žinome, kad disjunktoriaus išėjime bus 1, jei bent viename įėjime yra 1. Disjunktoriaus schema pateikta 2.1 pav.



2.2 pav.



2.3 pav.

Iš diodo voltamperinės charakteristikos (2.2 pav.) matyti, kad, paveikus diodą viena ir ta pačia įtampa U_1 tiesiogine ir atbuline kryptimi, srovė tiesiogine kryptimi bus daug didesnė už atbulinę, nes $R_t \ll R_{atb}$. Rezistorius R_1 schemoje turi būti tokio didumo, kad būtų tenkinama sąlyga $R_t \ll R_1 \ll R_{atb}$. Tegul 1 atitinka įtampa U_1 , o 0 – įtampa $U_0 = 0$. Kai į schemas įėjimus bus paduota U_0 , išėjime bus U_0 (t.y. 0), nes disjunktoriaus vidinių įtampos šaltinių neturi. Kai į vieną įėjimą bus paduota įtampa U_1 , išėjime gausime $U_{is} \approx U_1$. Kai į abu įėjimus paduota U_1 , U_{is} savo amplitudė praktiškai nesiskirs nuo U_{iej} . Savo forma U_{is} skiriasi nuo U_{iej} dėl diodų p-n sandūrų savųjų talpų įtakos (2.4 pav.). Išėjimo įtampos forma parodyta punktyrine linija.

Disjunktoriuose naudojami taškiniai diodai, kurių mažas p-n sandūros plotas. $R_1 = (1 \div 10) \text{ k}\Omega$. Įėjimų gali būti iki 10.

Jeigu signalai, atitinkantys loginį 1, patenka kartu į kelis įėjimus, tai atsидaro visi prie tų įėjimų prijungti diodai (jeigu įėjimo signalai lygūs). Jei jie nelygūs, tai atsидaro tik tas diodas, kurio signalo reikšmė yra didžiausia.

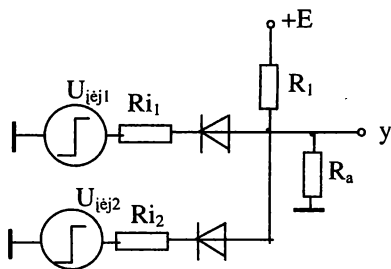
Konjunktoriaus IR (sutapatavimo schema) turi duoti 1 išėjime tik tada, kai visuose įėjimuose 1; jeigu bent viename įėjime yra 0, išėjime

yra 0. Paprasčiausias konjunktoriaus irgi gali būti diodinis, surinktas pagal 2.4 pav. parodytą schemą.

Paprastumo dėlei sakysime, kad U_{iej} viršutinis lygis yra šiek tiek aukštesnis už +E. Schemos elementai turi tenkinti šias sąlygas:

$$R_{11} = R_{12} = R_{ties},$$

čia R_{ties} – diodo varža tiesiogine kryptimi,



2.4 pav.

$$R_{atb} \gg R_1 \gg R_{ties},$$

$$R_a > R_1.$$

Tegul į įėjimus paduodamas toks pat signalas kaip schemoje ARBA. Nesant signalo abiejuose įėjimuose, abu diodai bus atidaryti +E įtampa ir išėjimo signalo lygį lems įtampos kritimas rezistoriuje R_1 ; kadangi $R_1 \gg R_{ties}$, tai išėjime bus $U_{is} \approx U_0$.

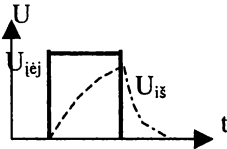
Jei viename įėjime veiks $U_{i\text{ej}} = U_1$, o kitame U_0 , tai išėjime irgi bus maža įtampa U_0 , nes diodas, gavęs $U_{i\text{ej}} = U_1$, dirbs atbuline kryptimi, o gavęs U_0 – tiesiogine kryptimi.

Kai abiejuose įėjimuose yra aukštas lygis U_1 (loginis vienetas), abu diodai dirbs atbuline kryptimi ir įtampa išėjime bus

$$U_{i\text{is}} = E \frac{R_a}{R_a + R_1},$$

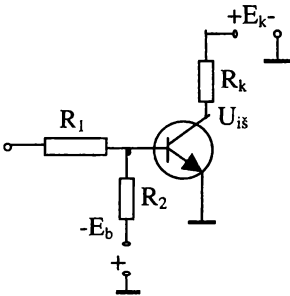
t.y. aukštas lygis $U_{i\text{is}} \rightarrow E$.

Konjunktoriai irgi gali turėti daugiau įėjimų negu du. Gaminant IR schemas integralinių schemų pavidalu, įėjime suformuojami daugiaemiteriniai tranzistoriai. Paprastai žemu lygiu laikoma, kai $U_0 < 0,4 \text{ V}$, aukštu – kai $U_1 > 2,4 \text{ V}$.



Panagrinėjus pereinamuosius procesus konjunktoriuje, gaunama, kad jame labiau yra užtęstas priekinis frontas, tačiau užpakalinis frontas krinta greičiau negu disjunktoriuje. IR schemas $U_{i\text{is}}$ forma 2.5 pav. parodyta punktyrine linija.

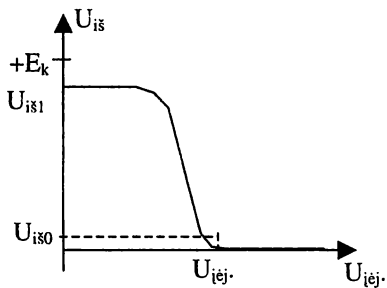
Invertorius NE paprastai daromas kaip tranzistorinis jungiklis, surinktas pagal 2.6 pav. schemą. Verta atkreipti dėmesį į tai, kad diodinės ARBA bei IR schemas gali apdoroti informaciją, išreikštą ir potencialine, ir impulsine forma, tuo tarpu tranzistorinė NE schema tinka darbui tik su potencialine forma išreikštais kintamaisiais.



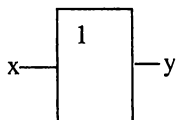
2.6 pav.

Įėjimo daliklis R_1 ir R_2 , veikiami įėjimo signalo ir priešįtampio šaltiniui – E_b , turi garantuoti tokį tranzistoriaus režimą: kai $U_{i\text{ej}} = U_0$, tranzistorius turi būti

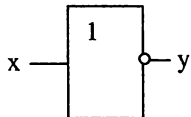
uždarytas dėl $-E_b$ poveikio ir y išėjime bus $U_{i\text{is}} \approx +E_k$ (aukštas lygis, loginis vienetas). Kai $U_{i\text{ej}} = U_1$ (aukštas lygis), tranzistorius turi būti atidarytas ir įsotintas. Tada išėjime turėsime $U_{i\text{is}} \approx U_{i\text{is0}} = U_{k\text{e sot}}$, t.y. loginį nulį. Įėjimo ir išėjimo įtampų tarpusavio priklausomybės grafikas parodytas 2.7 pav. Loginiai elementai schemose žymimi tam tikrais simboliais.



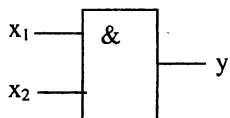
2.7 pav.



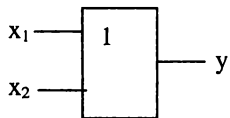
Kartotuvai $y = x$



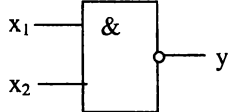
Invertorius NE $y = \bar{x}$



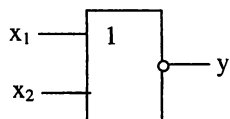
Konjunktoriaus IR $y = x_1 \cdot x_2$



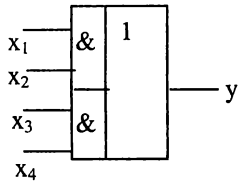
Disjunktoriaus ARBA $y = x_1 \vee x_2$



Šeferio elementas IR bei NE $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$



Pirso elementas ARBA bei NE $y = \overline{x_1 \vee x_2}$



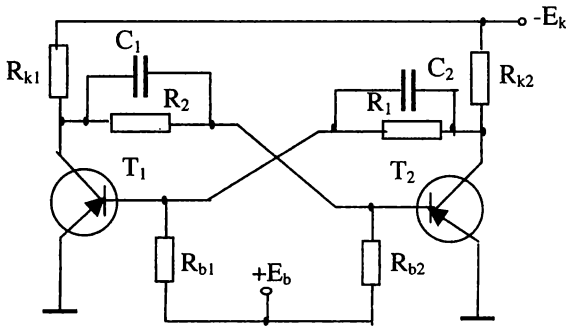
IR bei ARBA $y = x_1 \cdot x_2 \vee x_3 \cdot x_4$

2.8 pav.

XII. TRIGERIAI

§1. Bendrosios žinios

Trigeris (*trigger* – (angl.) šautuvo gaidukas, spragtukas) yra įrenginys, turintis dvi pastovias, tarpusavyje besiskiriančias pusiausvyros būsenas. Trigeris iš vienos būsenos į kitą pereina šuoliu, paveikus paleidimo (valdymo) signalui. Dažniausiai naudojamą potencialiniai (statiniai) trigeriai, kurių stabilios būsenos skiriasi išėjimo signalo aukštu ir žemu potencialo lygiu. Iš esmės tokie trigeriai yra sudaryti iš dviejų stiprintuvų, susietų teigiamo grįžtamojo ryšio grandinėmis. Viena tokių trigerio su kolektoriaus ir bazės ryšiu schemų parodyta 1.1 pav.



1.1 pav.

Trigeriai naudojami informacijai išiminti, aritmetinėms bei loginėms operacijoms atlikti, stačiakampiems impulsams formuoti, dalyti impulsų pasikartojimo dažniui, iš jų sudaromi sudėtingesni ESM mazgai.

Potencialiniai trigeriai pagal savo schemas struktūrą skirstomi į simetrinius ir nesimetrinius. Simetriniuose trigeriuose grįžtamojo ryšio grandinės, jungiančios stiprintuvus, yra vienodos.

Vienas svarbiausių trigerių parametru yra jų greitaeigiškumas. Šiuolaikinių trigerių persijungimo greitis yra šimtų GHz eilės.

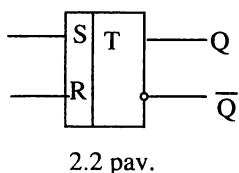
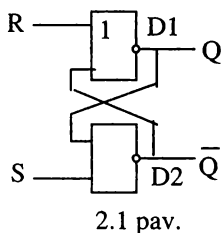
1.1 pav. pavaizduotą trigerį arba kitokias trigerio modifikacijas galima surinkti iš diskretinių elementų, pagaminti integralinės schemas pavidalu, tačiau dabar trigeriai stiprintuvų pagrindu skaičiavimo

mašinose nenaudojami. Jie surenkami panaudojant loginius elementus. Tokie trigeriai turi paprastą schemotechniką ir juos labai patogų gaminti integralinės technologijos metodais.

Trigeriai turi dvi stabilias būsenas, žymimas 0 ir 1. Šias būsenas galima nusakyti išėjimų loginiais lygiais. Trigeris turi 2 išėjimus: tiesioginį Q ir inversinį \bar{Q} . Tiesioginio išėjimo Q loginis lygis sutampa su trigerio būseną: jei trigerio būseną yra 0, tai ir $Q = 0$; jei trigerio būseną lygi 1, tai ir $Q = 1$. Inversinio \bar{Q} išėjimo lygiai yra priešingi.

Pagal reakciją į įėjimo signalus trigeriai skirstomi į asinchroninius ir sinchroninius. Asinchroniniams trigeriams būdinga tai, kad įėjimo signalai veikia trigerio būseną tiesiogiai, kai tik jie patenka į įėjimą, sinchroniniai veikia, tik kai paduodamas sinchronizavimo signalas.

§2. Asinchroniniai trigeriai



Panaudojus 2 ARBA bei NE elementus, gaunamas mazgas, kurio dvi būsenos stabilios. Tai – **tiesioginių įėjimų RS trigeris**. Laikoma, kad jeigu elemento D1 išėjime Q yra aukštas lygis (tuo pat metu elemento D2 inversiniame išėjime yra žemas lygis), tai tokia trigerio būseną atitinka 1; žemas lygis D1 išėjime atitinka trigerio 0. Taigi elemento D1 išėjimas yra trigerio tiesioginis išėjimas; jis žymimas Q, o D2 išėjimas yra inversinis ir žymimas \bar{Q} . Vienas įėjimas žymimas S (*set* – (angl.) pastatyti), antrasis – R (*reset* – (angl.) atkurti), todėl šis trigeris vadinamas RS trigeriu. Jam aktyvieji lygiai yra 1.

1 lentelė

t		t+1
R	S	Q(t+1)
0	0	Q(t)
0	1	1
1	0	0
1	1	*

Trigerio darbą apibūdina būsenų lentelė, kurios kairėje pusėje užrašytos įėjimų lygių kombinacijos laiko momentu t , o dešinėje – trigerio tiesioginio išėjimo (trigerio apskritai) būseną laiko momentu $t+1$, trigeriui persivertus ir pasibaigus pereinamiesiems procesams. Tad pagal lentelę:

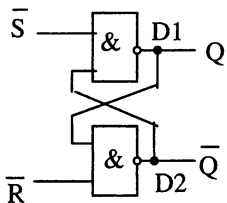
a) Įėjimuose turima 0-0. Jeigu laikysime, kad iki to momento Q turėjo aukštą lygį, tai, padavus 0-0, D2 išėjime bus žemas lygis, nes jo viršutinis įėjimas sujungtas su Q ir gauna 1, o ARBA bei NE tipo elementams pakanka bent vieno 1, kad išėjime būtų 0. Vadinasi, D1 išėjime Q išliks aukštas lygis, nes jo abiejuose įėjimuose yra 0. Jeigu laikysime, kad prieš paduodant 0-0 aukštas lygis buvo D2 išėjime, tai ir ta būseną išliks, nes schema simetrinė. Taigi, padavus 0-0, išėjimo signalas priklausys tik nuo pradinės būsenos, t.y. $Q(t+1) = Q(t)$.

b) Į įėjimus paduota 0-1. Nesvarbu, kokios būsenos iki to būtų D2, jo išėjime pasirodys 0. Tada D1 įėjime bus du 0, kurie išėjime Q duos 1. Toks poveikis žymimas raide S. S raide žymimas tas trigerio įėjimas, į kurį paduodamas S poveikis.

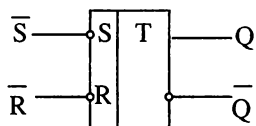
c) Į įėjimus paduota 1-0. Analogiškai samprotaudami, gausime, kad trigeris pereis į 0 būseną (Q išėjime bus 0). Toks poveikis žymimas raide R ir trigerio įėjimas, į kurį paduodamas R poveikis, taip pat žymimas raide R.

d) Į įėjimus paduodama aktyvieji lygiai 1-1. Išėjimuose Q ir \overline{Q} būtų 0, o tai prieštarauja trigerio apibrėžimui. Tad tokio signalo paduoti trigeriui neleidžiama, o trigerio būseną būtų neapibrėžta (pažymėta *).

Inversinių įėjimų RS trigeris. Kryžminių ryšiu galima tarpusavyje sujungti 2 IR bei NE elementus. Tada gaunamas inversinių įėjimų trigeris. Jo loginė struktūra parodyta 2.3 pav., o žymuo schemose – 2.4 pav. IR bei NE tipo elementams pakanka bent vieno 0 įėjime, kad išėjime būtų 1. Tegul įėjimuose veikia lygiai $S = 0$, $R = 0$ ($S = 1$, $R = 1$). Kai trigerio būseną yra 0, $Q = 0$, šis lygis patenka į D2 įėjimą ir sukelia jo išėjime lygį $\overline{Q} = 1$, 1 lygis iš D2 išėjimo patenka į D1 įėjimą, bet kadangi abiejuose D1 įėjimuose yra 1, tai išėjime $Q = 1$. Trigerio būseną nepakitę. Analogiškai galima nustatyti trigerio būsenas, esant kitokioms įėjimo signalų kombinacijoms. Trigeris „nemėgsta“ aktyviųjų lygių 0-0. Trigerį aprašo 2 būsenų lentelė.



2.3 pav.



2.4 pav.

2 lentelė

t		t+1
\bar{R}	\bar{S}	Q(t+1)
0	0	*
0	1	0
1	0	1
1	1	Q(t)

Lyginant su ARBA bei NE tipo trigeriu, šio trigerio įėjimai yra inversiniai. Taip jie ir pažymėti schemos žymenyje.

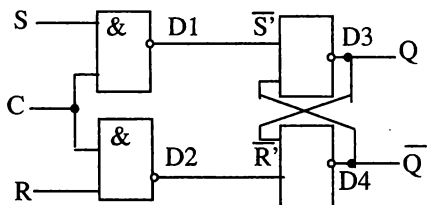
Šie abiejų tipų trigeriai vadinami asinchroniniais. Jie pakeičia savo būseną arba jos nepakeičia pasikeitus lygiams įėjimuose. Tačiau tai ne visada patogiu. Todėl dažnai naudojami trigeriai, kurių logika įėjime sudėtingesnė, kai informacijos priėmimo momentą galima valdyti sinchronizuojančiais signalais. Tokie trigeriai vadinami sinchroniniais.

§3. Sinchroniniai trigeriai

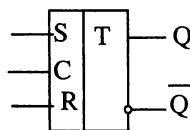
Sinchroniniai trigeriai skirstomi į dvi klases: 1) *valdomus statiškai*, kai valdymo signalai (vykdomieji įėjime C ir leidžiamieji įėjime V) veikia visą savo egzistavimo laiką (trigeris sinchronizuojamas sinchroimpulso viršumi); 2) *dinaminio valdymo*, kai trigeris į informacinių įėjimų lygius reaguoja tik tais momentais, kai sinchronizavimo įėjime pereinama iš loginio 0 į 1 (arba atvirkščiai) (sinchronizuojama sinchroimpulso priekiniu arba užpakaliniu frontu).

Pradžioje pateiksime keletą sinchroninių statinio valdymo trigerių.

RS trigeris. Synchroninį RS trigerį, turintį IR bei NE logiką, galime gauti panaudoję IR bei NE tipo asinchroninį trigerį su papildoma valdymo grandine iš IR bei NE tipo elementų D1 ir D2 (3.1 pav.). Tokio trigerio scheminis žymuo parodytas 3.2 pav.



3.1 pav.



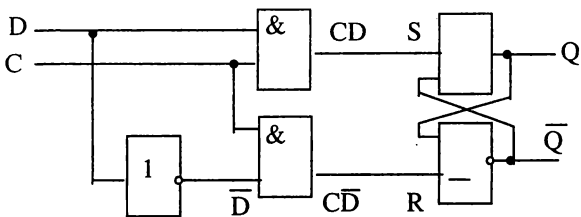
3.2 pav.

Kol nėra sinchrosignalas, galimi bet kokie signalų S ir R kitimai – jie trigerio nepaveikia. Įėjimų S ir R lygiai gali paveikti trigerį tik nuo sinchrosignalas padavimo momento, tačiau sinchroimpulso veikimo metu S ir R turi nekisti. Taigi per elementus D1 ir D2 asinchroninio trigerio įėjimus aktyvieji signalai pasiekia tik tuo atveju, jei $C = 1$. Trigerio būseną lemia įėjime veikiančys lygiai, kaip ir anksčiau nagrinėtame asinchroniniame trigeryje. Jei $C = 0$, trigeris išlieka ankstesnės būsenos. Vadinasi, tik kai $C = 0$, leidžiamas lygių kitimas įėjimuose S ir R – į juos trigeris nereaguos. Kadangi šiame trigeryje yra 2 papildomi IR bei NE tipo elementai, tai iš esmės šis sinchroninis trigeris dirba pagal ARBA bei NE trigerio būsenų lentelę.

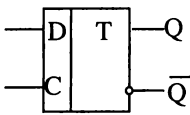
D trigeris yra sinchroninio trigerio modifikacija. Jis turi 1 loginį įėjimą, kurio būseną su kiekvienu sinchroimpulso perduodama į išėjimą, t.y. išėjimo signalai yra vienu taktu užlaikyti įėjimo signalai. (Jo pavadinimas nuo angl. *delay* – užlaikyti.) D trigerio schema ir žymuo parodyti 3.3 ir 3.4 pav. D trigerio funkcionavimą nusako 3 būsenų lentelė arba charakteristikos lygtis $Q(t+1) = D(t)$.

Kaip matyti iš lentelės, kai $C = 1$, trigeris pereina į būseną, kurią lemia loginis lygis įėjime D. Kai $C = 0$, išlieka ankstesnė trigerio būseną Q_0 . Iš schemos matyti, kad D trigerį galima gauti iš asinchroninio RS trigerio, kurio įėjimuose įjungti loginiai elementai.

t	t+1	3 lentelė
D	Q(t+1)	
0	0	
1	1	



3.3 pav.



3.4 pav.

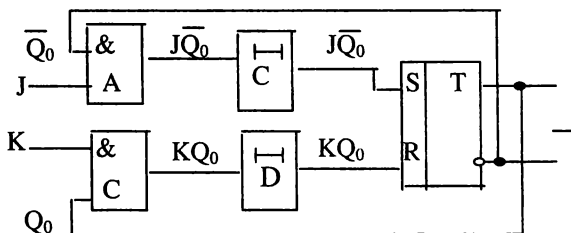
Kai $C = 0$, elementų IR išėjimuose susidaro pasyvieji asinchroniniai trigeriui lygiai. Tik kai $C = 1$, lygis, paduotas į loginį įėjimą D, sudaro aktyvųjį RS trigeriui lygį arba trigerio įėjime S (kai $D = 1$), arba įėjime R (kai $D = 0$) ir trigeris pereina į būseną, atitinkančią loginį lygį įėjime D. Tad D trigeris priima įėjimo D informaciją, kai $C = 1$, ir gali ją laikyti neribotą laiką (3 lentelė).

D trigerio modifikacija yra **DV trigeris**. Jis turi antrą valdymo įėjimą V. Trigeris perjungiamas į būseną, atitinkančią lygį įėjime D, tik tada, kai $C = 1$ ir $V = 1$. Tada įėjimas C gali būti naudojamas nustatyti laiko intervalams, kuriais trigeris gali priimti informaciją, o įėjimas V – paduoti signalams, leidžiantiems arba draudžiantiems priimti įėjimo D signalą. Kai $C = 1$, lygiai D ir V turi nekisti.

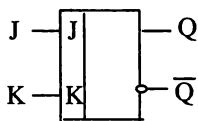
JK trigeris. Tiesioginių ar inversinių įėjimų asinchroniniai RS trigeriai pasižymi tuo trūkumu, kad turi draudžiamas įėjimo lygių kombinacijas, kurioms esant trigerio būseną yra neapibrėžta. To išvengti galima panaudojant sudėtingesnę įėjimo logiką: tam reikia papildomų loginių ir užlaikymo elementų. Taip sudaromi JK trigeriai. Jie gali būti asinchroniniai ir sinchroniniai. Asinchroninio JK trigerio blokinė schema parodyta 3.5 pav., jo žymuo schemose – 3.6 pav. 3.5 schemoje A ir C yra IR elementai, C ir D – užlaikymo elementai, signalą užlaikantys vienu taktu. JK trigeris turi 2 įėjimus: signalas įėjime J trigerį nustato vienetui, o įėjime K – 0. Šio trigerio ypatumas tas, kad jis neturi draudžiamų įėjimo signalų kombinacijų: padavus $J = K = 1$, trigeris pereina į būseną, priešingą ankstesnei. Trigerio būsenas nusako 4 lentelė, o trigerio charakteringoji lygtis yra

$$Q(t+1) = J(t)\bar{Q}(t) + \bar{K}(t)Q(t).$$

t		t+1
J	K	Q(t+1)
0	0	Q(t)
0	1	0
1	0	1
1	1	$\overline{Q}(t)$



3.5 pav.

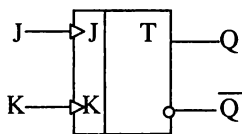


3.6 pav.

Vadinasi, JK trigerį galima sudaryti iš RS trigerio į jo įėjimus padavus $S = J\overline{Q}_0$ ar $R = \overline{K}Q_0$ (čia $Q_0 = Q(t)$). Tai leidžia išvengti RS trigeriui draudžiamų $S = 1$ ir $R = 1$. Kad JK trigeris veiktų teisingai, būtina tenkinti RS trigerio normalaus darbo sąlygas: a) trigerio

įėjime veikiantis aktyvusis lygis turi veikti tol, kol trigeris visiškai persijungia (kol pasibaigia pereinamieji procesai trigeryje), b) kai $J = \overline{K} = 1$, aktyvieji lygiai įėjimuose R ir S turi atsirasti ne kartu; tam ir reikalingi vėlinimo elementai. Dar kartą priminsime, kad *aktyviaisiais loginiais lygiais* vadinami loginiai lygiai, kurie, veikdami viename elemento įėjime, vienareikšmiškai nustato jo išėjimo lygį nepriklausomai nuo kitų įėjimų. Lygiai, atvirkštiniai aktyviesiems, vadinami *pasvyviaisiais loginiais lygiais*.

Lygiai, paduoti į įėjimą J arba K, nustoja veikti, kai trigeris persijungia, nes elementai A ir B dėl grįžtamojo ryšio nebeperduoda tų lygių. Tokie įėjimai vadinami *dinaminiais* ir žymenyje dažnai žymimi trikampėliais (3.7 pav.).

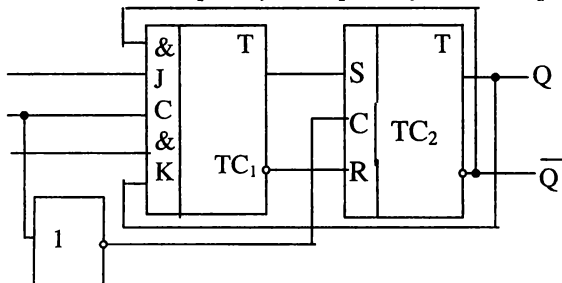


3.7 pav.

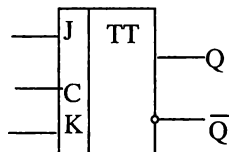
Lygiai taip pat JK trigeris gali būti padarytas iš RS inversinių įėjimų trigerio.

Iš charakteringosios JK trigerio lygties išeina, kad būseną Q , kuriai nustatomas trigeris, nusakoma ne tik informacinių įėjimų J ir K lygiais, bet ir ankstesne trigerio būseną Q_0 . Todėl galima

sudaryti JK loginę struktūrą iš dviejų RS trigerių taip, kad būtų tenkinama charakteringoji lygtis. Vienas RS trigeris skirtas įsiminti ankstesnei trigerio būsenai Q_0 ; jo išėjimo lygiai Q_0 ir \bar{Q}_0 kartu su įėjimų J ir K informaciniais signalais naudojami antrojo RS trigerio būsenai formuoti. Dabar jau nebereikalingi užlaikymo elementai, o trigeriai, sudaryti tokiu principu, vadinami *dvipakopiais*. Tokio trigerio blokinė schema parodyta 3.8 pav., žymuo – 3.9 pav.



3.8 pav.

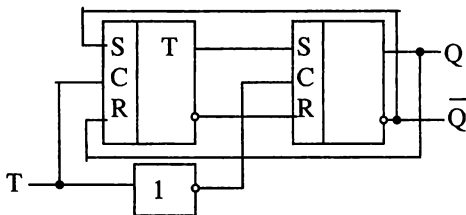


3.9 pav.

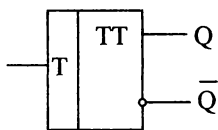
Abiejose pakopose naudojami sinchroniniai RS trigeriai. Kai pirmojo trigerio TC_1 sinchroėjime C yra nulinis lygis, trigeris nereaguoja į įėjimų J ir K signalus. Tada per invertorių antrąjį trigerį TC_2 pasiekia 1 lygis ir trigeriui TC_2 perduodama trigerio TC_1 būseną. Abiejų trigerių būsenos pasidaro vienodos.

Kai įėjime C yra 1 lygis, į trigerio TC_2 sinchroėjimą per invertorių patenka 0 ir trigerių loginis ryšys nutrūksta. Trigerio TC_1 būseną tampa Q . Vėl į C padavus 0, būseną Q bus perduota trigeriui TC_2 . Tokio dvipakopio trigerio privalumas tas, kad nekeliama jokių reikalavimų J ir K įėjimo lygių trukmei, nereikia vėlinimo elementų, be to, trigeris gerai skiria grįžtamojo ryšio signalus nuo įėjimo signalų.

T trigeris. Iš dvipakopio RS trigerio labai nesunku padaryti skaičiavimo trigerį, pavadintą T trigeriu. Jo schema parodyta 3.10 pav., žymuo – 3.11 pav.



3.10 pav.



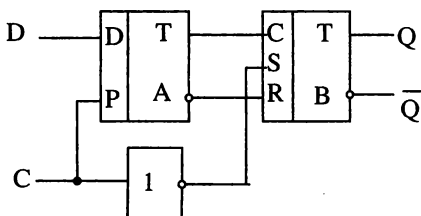
3.11 pav.

Iš JK trigerio veikimo išeina, kad, norint gauti T trigerį, reikia į JK trigerio abu įėjimus paduoti 1. Tuomet impulsai, ateinantys į įėjimą C (tas vienintelis trigerio loginis įėjimas žymimas T), pakeičia trigerio būseną priešinga; jei loginiame įėjime 0, trigeris lieka pirmąsios būsenos. Taigi trigeris pagal charakteringąją lygtį

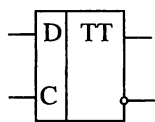
$$Q(t+1) = \bar{T}(t)Q(t) + T(t)\bar{Q}(t)$$

skaičiuoja dvejetainė sistema. Prisiminus JK trigerio struktūrinę schemą, vienetai įėjimuose J ir K yra vienetai elementų IR įėjimuose, o šiems elementams 1 yra pasyvusis lygis. Tad nustatydami T trigerio režimą, užuot padavę 1 į JK trigerio įėjimus J ir K, galime paprasčiausiai nedaryti schemoje tų įėjimų. Tokia schema ir parodyta 3.10 pav.

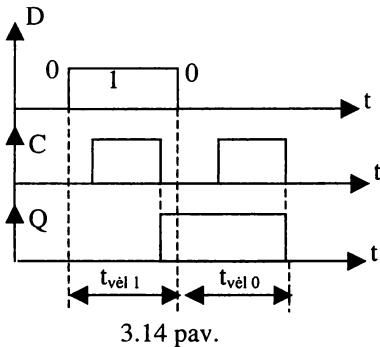
D trigeris, veikiantis dvipakopiu informacijos įsiminimo principu, gali būti sudarytas iš minėto D trigerio ir sinchroninio RS trigerio pagal 3.12 pav. schemą. Jo žymuo – 3.13 pav. Kai $C = 0$, A trigeris nepriima įėjimo D informacijos. Šis lygis per inverterių patenka į trigerio B sinchroįėjimą ir trigerio A būsena perduodama trigeriui B.



3.12 pav.



3.13 pav.



Į įėjimą C padavus 1, loginis trigerių ryšys nutrūksta ir trigeris A pereina į būseną, atitinkančią įėjimo D lygį. Po to į įėjimą C padavus 0 lygį, trigerio A būsena perduodama trigeriui B. 3.14 pav. parodyta tokio trigerio veikimo laikinė diagrama, kurioje matyti, kad trigeris 0 ir 1 lygius iš įėjimo D į išėjimą Q perduoda vėlindamas. Vėlinimo trukmė yra tarpinė tarp sinchronizavimo įėjimo C impulsų trukmės ir jų pasikartojimo periodo.

Visi nagrinėti trigeriai buvo statiškai valdomi sinchroniniai trigeriai. Naudojami ir *dinaminių sinchronizavimo įėjimų trigeriai*. Šios trigerių klasės ypatumas tas, kad į informacinių įėjimų lygius jie reaguoja tais momentais, kai sinchroįėjime pereinama iš 0 į 1 (arba iš 1 į 0). Taip valdomi gali būti RS, D, DV, JK trigeriai.

XIII. MULTIVIBRATORIAI

§1. Bendrosios žinios

Stačiakampiems impulsams su stačiais frontais gauti plačiai naudojami trūkių svyravimų *relaksaciniai generatoriai (relaksatoriai)*. Relaksatoriai turi bent vieną reaktyvų dvipolį – energijos kaupiklį (kondensatorių ar ritę), kuriuo sudaromas grįžtamasis ryšys ir nuo kurio iš esmės priklauso generuojamų impulsų trukmė.

Šuoliškus įtampų ir srovių pokyčius relaksatoriuose galima gauti elementais, kurių charakteristikose yra sričių, turinčių neigiamą varžą (tuneliniai diodai, tiristoriai, dujiniai prietaisai ir pan.). Dar paprasčiau tai realizuoti panaudojant stiprinimo laipsnius ir teigiamą grįžtamąjį ryšį. Relaksatoriai, kurių grįžtamojo ryšio grandinėje panaudojami transformatoriai, vadinami *blokinggeneratoriais*. Relaksatoriai, kurių grįžtamojo ryšio grandinėse panaudojami rezistyvieniai bei talpiniai elementai, vadinami *multivibratoriais (multi – (lot.) daug, vibro – (lot.) svyruoti + platus spektras)*.

Bet koks relaksatorius gali dirbti tokiais režimais: a) *laukiančiuoju (monostabiliu)*, b) *autogeneraciniu (savižadžiu)*, c) *sinchronizacijos ir dažnio dalijimo*.

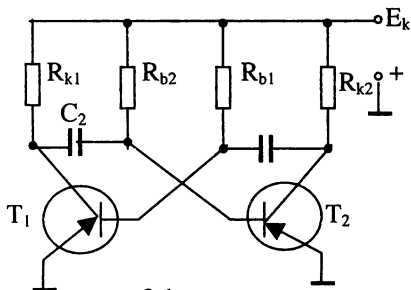
Laukiančiuoju (vientakčiu monovibraciniu) režimu relaksatorius dirba panašiai kaip trigeris, tik šiuo atveju viena pusiausvyros būsenų yra nepastovi. Pastovios pusiausvyros būsenos relaksatorių paveikęs išorinis impulsas sukelia šuolišką relaksatoriaus perėjimą į nepastovios pusiausvyros būseną, iš kurios po tam tikro laiko jis savaime grįžta į pradinę, pastovios pusiausvyros būseną. Vadinasi, išorinis valdantysis impulsas sukelia 1 monostabilaus relaksatoriaus taktą. Pagrindiniai šiam relaksatoriui keliami reikalavimai – formuojamo impulso trukmės stabilumas ir pradinės būsenos pastovumas. Panaudojami tam tikros trukmės laikiniam intervalui fiksuoti, impulsams praplėsti, dažniui dalyti ir pan.

Relaksatorius, dirbantis autogeneraciniu režimu, neturi nė vienos pastovios pusiausvyros būsenos – jo abi pusiausvyros būsenos nepastovios. Relaksatorius, dirbantis šiuo režimu, savaime šuoliškai šokinėja iš vienos kvazipusiausvyros padėties į kitą. Generuojamų impulsų amplitudę, trukmę ir dažnį lemia relaksatoriaus schemos elementai. Tokie relaksatoriai naudojami kaip pagrindiniai generatoriai

įvairiose impulsinėse schemose ir pagrindinis jiems keliamas reikalavimas – generuojamų virpesių dažnio stabilumas, ku, deja, jie nepasižymi, nes jų dažnis priklauso nuo daugelio faktorių (maitinimo įtampų, schemos parametrų stabilumo, temperatūros, drėgmės, elektromagnetinio lauko trikdžių ir kt.). Kai reikalingas itin didelis relaksatoriaus virpesių dažnio stabilumas, jie pertvarkomi darbui sinchronizacijos arba dažnio dalijimo režimu. Tokiu atveju generatoriaus virpesių dažnį lemia išoriniai sinchroimpulsai arba harmoninė įtampa.

§2. Kolektoriaus ir bazės ryšio multivibratoriai

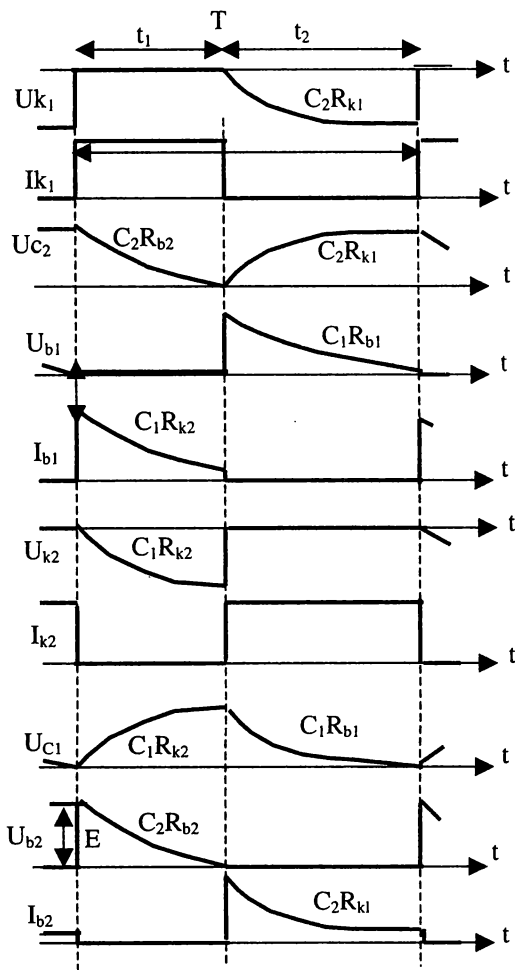
Šiuo metu naudojamų multivibratorių schemos labai įvairios. Paprasčiausias multivibratorius gaunamas du varžinius stiprinimo



2.1 pav.

laipsnius sujungus taip, kad vieno jų įėjimas būtų sujungtas su kito išėjimu. Taip sudaromas teigiamas grįžtamasis ryšys, skatinantis schemos susižadinimą. Tokio bazės ir kolektoriaus ryšio multivibratoriaus schema parodyta 2.1 pav. Schema dirba taip: įjungiant maitinimą abiejų multivibratoriaus pečių tranzistoriai atidaryti,

nes į jų bazes per rezistorius R_{b1} ir R_{b2} patenka neigiami potencialai. Tuo pat metu pradeda įsikrauti kondensatoriai: C_2 per tranzistoriaus T_2 emiterinę sandūrą ir rezistorių R_{k1} , o C_1 – per T_1 emiterinę sandūrą ir R_{k2} . Šios grandinės, būdamos įtampos dalikliais, kondensatoriams įsikraunant, sukuria ant tranzistorių bazių augančias teigiamas emiterių atžvilgiu įtampas, kurios stengiasi uždaryti tranzistorius. Dėl varžų ir kondensatorių nominalų skirtumo, tranzistorių parametrų skirtingumų ir pan. vienas tranzistorius užsidarys šiek tiek anksčiau už kitą, o antrasis liks atidarytas. Bet tokia būseną nestabili.



2.2 pav.

Tegul T_1 liko atidarytas, T_2 užsidarė. Nuo šio momento C_2 pradeda išsikrauti per R_{b2} ir atidarytą tranzistorių T_1 , kurio emiterio ir kolektoriaus varža maža. Kondensatoriui C_2 išsikraunant, teigiama įtampa ant T_2 bazės mažėja. Kai ši įtampa taps artima 0, T_2 atsidarys, jo kolektoriaus grandinėje atsiras srovė, kuri paveiks C_1 ir per jį T_1 bazę,

kurios „-“ įtampa sumažės. Dėl to pradės mažėti T_1 kolektoriaus srovė. Tas srovės pokytis per C_2 paveikia T_2 bazę, dėl to poveikio T_2 dar sparčiau auga, o T_1 mažėja. Dėl šio griūtinį poveikį turinčio tarpusavio poveikio tranzistorius T_1 užsidaro, T_2 atsidaro. Toliau procesas vyksta priešinga kryptimi.

2.2 pav. pateiktos multivibratoriaus įtampų ir srovių laiko diagramos, iliustruojančios multivibratoriaus darbą.

Generuojamų virpesių periodas $T \approx 0,7R_{b2}C_2 + 0,7R_{b1}C_1$, o simetrinio multivibratoriaus $T \approx 1,4R_bC$. Tad nagrinėjamas multivibratorius dirba autogeneraciniu režimu, kai multivibratoriaus tranzistoriai pakaitomis būna arba uždaryti, arba įsotinti, t.y. multivibratoriaus elementų parametrai turi būti parinkti taip, kad tranzistoriai dirbtų jungiklio režimu. Tranzistorių uždarymo sąlygos išpildomos visuomet, nes teigiamo kolektorių įtampos šuolio amplitudė, juos atidarant, visada didesnė už tranzistorių bazės atidarymo įtampą. Tranzistoriaus T_1 įsotinimo sąlyga yra $\beta I_{b1} > I_{k1}$. Kolektoriaus srovė susideda iš dviejų dedamųjų: srovės E_k / R_{k1} , tekančios rezistoriumi R_{k1} , ir kondensatoriaus įsikrovimo srovės, kuri kvazistabilios būsenos pradžioje yra maksimali ir lygi $I_{C1} \approx 2E_k / R_{b2}$. Ji gaunama laikant, kad kondensatoriaus C_1 įsikrovimo srovė teka tik rezistoriumi R_{b2} (tranzistoriaus T_2 bazės grandinė uždaryta). Pradiniu kvazistabilios būsenos momentu vienas rezistoriaus R_{b2} galas turi šaltinio $-E_k$ potencialą, antrasis – pradinę tranzistoriaus T_2 bazės įtampą $U_{b2}(0) \approx +E_k$. Vadinasi, bendroji įtampa, krintanti rezistoriuje R_{b2} , lygi $2E_k$. Į tranzistoriaus įsotinimo sąlyga

$$\beta I_{b1} > I_{k1}$$

įrašę srovių vertes, gauname

$$\frac{\beta}{R_{b1}} > \frac{1}{R_{k1}} + \frac{2}{R_{b2}}$$

Analogiškai tranzistoriui T_2 įsotinimo sąlyga

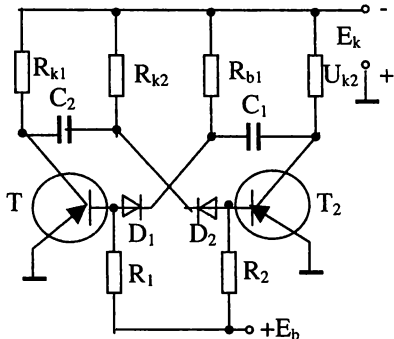
$$\frac{\beta}{R_{b2}} > \frac{1}{R_{k2}} + \frac{2}{R_{b1}}$$

ir kolektoriaus bei bazės ryšio multivibratoriaus, dirbančio autogeneravimo režimu, regeneracijos sąlyga

$$\beta \cdot \beta = \beta^2 > 1$$

visada tenkinama.

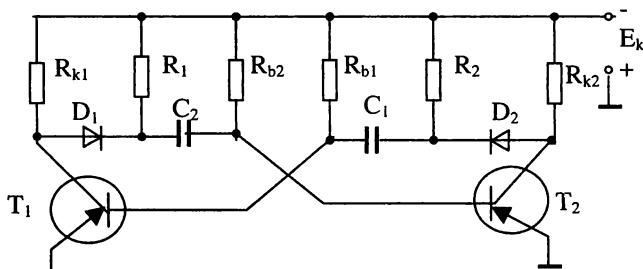
Užsidarančių tranzistorių frontų trukmę lemia kondensatorių C_1 ir C_2 įsikrovimo laiko konstantos $R_{k2}C_1$ ir $R_{k1}C_2$. Siekiant sutrumpinti formuojamų impulsų frontų trukmę (siekiant gauti virpesius, artimus stačiakampiams) arba padidinti impulsų dažnį, dažnai naudojami dreifiniai tranzistoriai, kurių emiterinės sandūros pramušimo įtampa yra



2.3 pav.

(trikampėliu pažymėto elektrodo), kartu ir tranzistoriaus T_2 emiterinės sandūros potencialas lygus maždaug $E_b < U_{pr}$. Įsikraunant kondensatoriui C_2 , diodo D_2 katodo potencialas mažėja. Kai uždaro diodo įtampa sumažėja iki nulio, atsidaro ir įsisotina tranzistorius T_2 . Tranzistorius pereina į antrąją kvazistabiliąją būseną, kai užsidarius diodui D_1 uždaro tranzistoriaus T_1 emiterinės sandūros įtampa maždaug lygi $+E_k$.

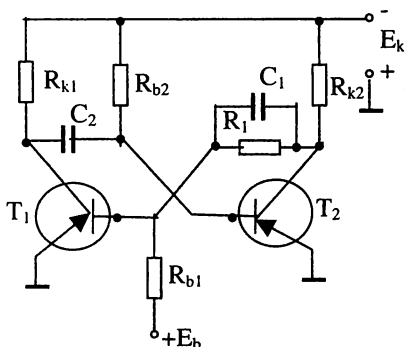
žema: $U_{be\ max} = 1 - 1,5\ V$. Stengiantis apsaugoti šią sandūrą nuo pramušimo, bazės grandinėse įjungiami diodai (2.3 pav.). Tuo atveju reikalingas papildomas nedidelis įtampos šaltinis $E_b < U_{pr}$. Atsidarius ir įsisotinus, pavyzdžiui, tranzistoriui T_1 , tranzistoriaus T_2 bazės įtampa padidėja šuoliu beveik iki $+E_k$. Diodas D_2 užsidaro: jo katodo (brūkšneliu pažymėto elektrodo) potencialas pradiniu laiko momentu lygus $+E_k$; anodo



2.4 pav.

Kaip matyti 2.2 pav., kondensatorių įsikrovimas ir iškrova, užsidarančių tranzistorių kolektorių įtampos kinta eksponentės dėsniu su laiko konstantomis $R_{k1}C_2$, Norint pagerinti impulso formą, sudaromos papildomos kondensatorių C_1 ir C_2 įsikrovimo grandinės, kuriose kolektorių apkrovos rezistoriai R_{k1} ir R_{k2} atskirti nuo atitinkamų kondensatorių C_1 ir C_2 diodais D_1 ir D_2 . Užsidarius, pavyzdžiui, tranzistoriui T_1 , užsidaro ir diodas D_1 , o kondensatorius įsikrauna grandine: $-E_k$, papildomas rezistorius R_1 , C_2 , įsotinto tranzistoriaus T_2 bazė ir emiteris. Kadangi ryšys per R_{k1} ir C_2 , kai uždarytas diodas D_1 , nutrūksta, tai įtampa tranzistoriaus T_1 kolektoriuje gali šuoliu padidėti iki uždaro tranzistoriaus kolektoriaus įtampos $-E_k$. Tokia schema suformuotų impulsų forma artima stačiakampei ir abiejų frontų trukmės yra maždaug tos pačios eilės. Kai tranzistorius T_1 įsotintas, jo kolektoriaus srovė teka pro lygiagrečiai sujungtus rezistorius R_{k1} ir R_1 , nes diodas D_1 tuo metu būna atdaras.

Kolektoriaus ir bazės ryšio multivibratorius gali dirbti laukimo režimu. Toks laukiantysis multivibratorius sudarytas iš dviejų jungiklių, kurie tarpusavyje sujungti teigiamo ryšio grandinėmis. Viena ryšio grandinė sudaryta iš kondensatoriaus C_2 ir rezistoriaus R_{b2} , o antra – panašiai kaip trigeryje: iš rezistorinio daliklio R_1R_{b1} , kurio vienas rezistorius (R_1) šuntuotas pereinamuosius procesus trumpančiu kondensatoriumi C_1 . Multivibratorius maitinamas iš dviejų šaltinių E_k ir E_b (2.5 pav.).

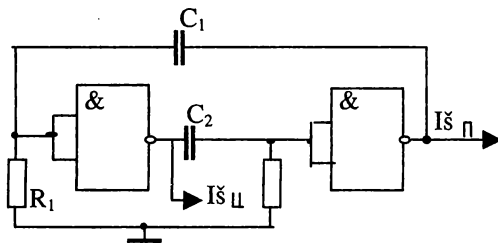


2.5 pav.

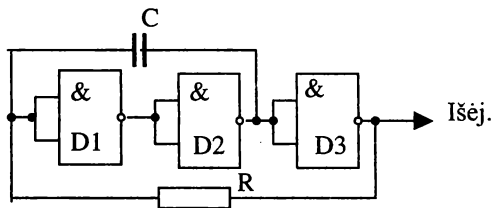
Laukiantysis multivibratorius gali būti vienos stabilios būsenos, kai turi būti patenkintos tranzistoriaus T_1 uždarymo ir tranzistoriaus T_2 įsotinimo sąlygos. Multivibratorius paleidžiamas teigiamu impulsu, kurį padavus atsidaro tranzistorius T_1 ir multivibratorius iš stabilios būsenos pereina į kvazistabiliąją. Pereinamasis procesas plėtojasi laviniškai ir pasibaigia T_2 uždarymu ir T_1 įsotinimu taip pat kaip

trigeryje. Po tam tikro laiko, priklausančio nuo schemos parametrų, T_2 atsidaro, o stiprėjant jo kolektoriaus srovei, jo įtampa mažėja, kartu mažėja ir tranzistoriaus T_1 bazės srovė. Išėjus tranzistoriui T_1 iš soties režimo, veikiant teigiamam grįžtamajam ryšiui, vyksta lavininis T_1 uždarymo ir T_2 atidarymo ir įšotinio procesas ir multivibratorius grįžta į stabilią būseną.

Yra įvairiausių multivibratorių modifikacijų, tačiau ESM patogiausia naudoti multivibratorius, surinktus panaudojant loginius elementus. Pasirodo, tokiu būdu sukurti multivibratorius visiškai nesunku – tik reikia tarp loginių elementų sudaryti teigiamą grįžtamąjį ryšį. Pavyzdžiui, galime paimti du elementus IR bei NE, naudojamus kaip invertorius, ir sudarę grįžtamąjį ryšį grandinėmis C_1R_1 ir C_2R_2 gausime multivibratorių, analogišką nagrinėtam (2.6 pav.). Panaudojant 3 invertorius, multivibratorių galima surinkti pagal 2.7 pav. Šis multivibratorius veikia taip: įjungus maitinimą, vienas iš loginių elementų pirmas pasieks vieną galimų būsenų – 0 ar 1 ir taip paveiks kito elemento būsenas.



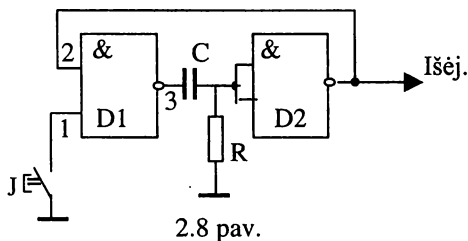
2.6 pav.



2.7 pav.

Tarkime, kad pirma nusistovėjo 1 elemente D2. Per D1 ir D2 įsikrauna kondensatorius C, priverčiantis D1 nusistovėti taip, kad jo būseną būtų 0. D3 įėjime yra 1, tad jis irgi nusistovi 0. Tačiau tokia sistemos pusiausvyra nepastovi, nes D3 išėjime esant 0 kondensatorius pradeda išsikrauti per R ir D3. Kondensatoriui išsikraunant, teigiama įtampa D1 įėjime mažėja ir jai pasiekus tam tikrą lygį D1 persijungia į 1 būseną, D2 – į 0, D3 – į 1. Kondensatorius vėl pradės įsikrauti per D3, R ir D2 ir procesas kartosis.

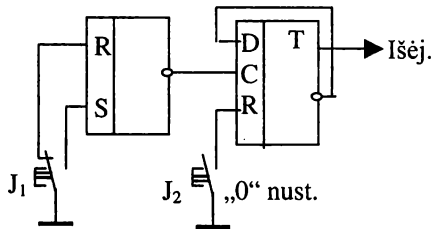
Paprasčiausią monovibratorių galima surinkti pagal 2.8 schemą. Mygtuku J paduotas teigiamas paleidimo impulsas τ_{pal} elementą D1



perjungia į 1 būseną. Laiko momentu t_1 susidarantis teigiamas įtampos šuolis D1 išėjime kondensatoriumi persiduoda į D2 įėjimą ir perjungia jį iš 1 į 0. Tačiau nuo momento t_1 pradeda įsikrauti kondensatorius per D1 ir R.

Kondensatoriui išsikraunant, įtampa ant R mažėja ir, jai pasiekus tam tikrą vertę, D2 persijungia į 1, kondensatorius išsikrauna per D1 ir D2, sistema pereina į stabilią būseną, kai D1 yra 0, o D2 – 1 būsenos. Ši būseną pastovi todėl, kad D1 apatinis įėjimas 1 yra atviras, išėjime yra 0, o D2 išėjime 1. Valdymo impulsas būtina turi būti trumpesnis už monovibratoriaus generuojamą impulsą.

Šioje schemoje valdymo impulsas paduodamas kontaktiniu mygtuku arba jungikliu. Skaitmeninėse schemose, panaudojant tokio tipo (kontaktinius) įrenginius, reikia būti labai atsargiems. Reikalas tas, kad įrenginio, turinčio kontaktus (mygtuko, jungiklio, klaviatūros, relės ir kt.), kontaktų susilietimo arba atsijungimo momentu jų grandinėje dėl kontaktų virpesių atsiranda serija mikrosekundinių impulsų. Dėl tų impulsų pradeda be reikalo veikti skaitmeninės schemos (trigeriai, skaitikliai ir kt.). Todėl, naudojant mygtukus (klaviatūrą, pelę), būtina reikia naudoti specialias apsaugos schemas, saugančias nuo kontaktų virpesių poveikio. Jose paprastai panaudojami RS arba JK trigeriai. Vienos tokios schemos pavyzdys pateiktas 2.9 pav.



2.9 pav.

Pradinės padėties priekinio trigerio tiesioginiame išėjime (schemoje neparodytas) yra 1 lygis (nes įėjime S yra 0), o inversiniame – 0. Skaitiklinis D trigeris išlaiko būseną, kai jis nusistovėjo maitinimo įjungimo momentu. Nuspaudus mygtuką J_1 , prasideda jo kontaktų virpėjimas. Pirmasis jų impulsas perjungia RS trigerį į nulinę būseną ir jokie vėlesni impulsai to jo būvio nepanaikina. Tuo pat momentu inversiniame RS trigerio išėjime susidaro teigiamos įtampos šuolis, kuris paveikia D trigerį ir priverčia jį pakeisti savo būseną. Atleidus mygtuką J_1 į RS trigerio viršutinį įėjimą vėl paduodamas 0 ir RS trigeris persijungia į pradinę būseną. Skaitiklinis D trigeris gali grįžti į pradinę būseną tik papildomai nuspaudus J_1 arba pasinaudojus mygtuku J_2 , kuriuo nustatomas 0.

Esame minėję kitą stačiakampių virpesių generatorių – blokingeneratorių, kurio grįžtamojo ryšio grandinėje panaudojamas transformatorius. Multivibratoriai už blokingeneratorius geresni tuo, kad neturi jokių induktyvių ričių, kurias labai nepatogu gaminti mikroelektronikos technologija. Todėl multivibratoriai daug dažniau naudojami.

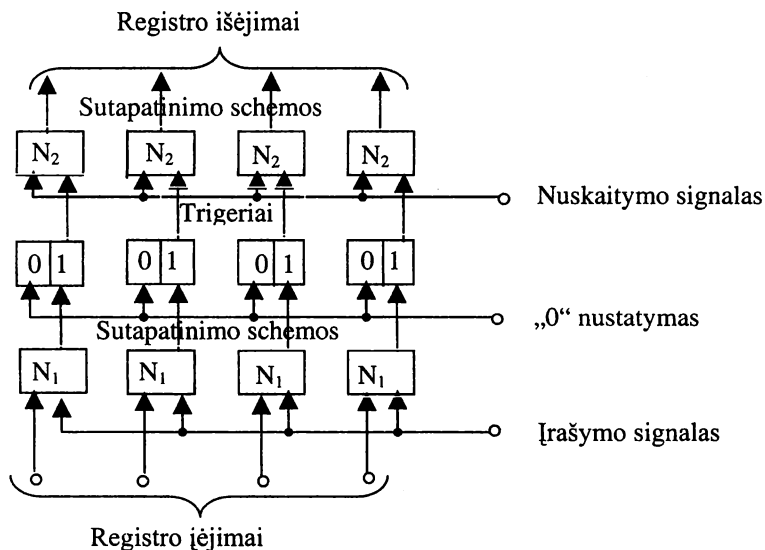
XIV. PAGRINDINIAI SKAITMENINIŲ ĮRENGINIŲ MAZGAI

§1. Registrai

Pagrindinė registrų paskirtis – įsiminti ir saugoti skaitmeninius kodus (dvejetainius skaičius). Skaičius turi būti išreikštas dvejetainė skaičiavimo sistema arba bet kuria kita sistema, bet skilčių skaitmenys pavaizduoti dvejetainė sistema (bet kuria dvejetainė kodine skaičiavimo sistema). Kai kada registrai atlieka kai kurias logines operacijas.

Registrą sudaro dinaminių ar statinių trigerių rinkinys, nors gali būti naudojami ir kitokie elementai (feritinės magnetinės šerdys, ferotranzistorinės gardelės ir kt.). Kiekvienas trigeris saugo dvejetainio skaičiaus vienos skilties skaičius. Tad n -skilčio dvejetainio skaičiaus registras sudarytas iš n trigerių (iš tiek trigerių, kokia saugomo skaičiaus eilė).

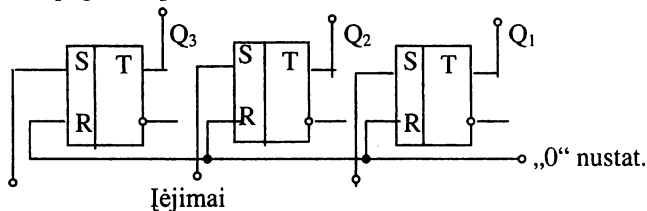
Skaitmeninis kodas iš registro į registrą gali būti perduodamas lygiagrečiai ir nuosekliai. Lygiagrečiojo registro schema parodyta 1.1 pav.



1.1 pav.

Prieš įrašant skaitmeninį kodą, impulsu, paduotu į „0“ nustatymo šyną, visi trigeriai $Tr_1...Tr_n$ nustatomi nuliui. Skaitmeninis kodas į trigerius ateina per sutapatinimo schemas N_1 , į jas tuo pat metu patenkant įrašymo signalui. Trigeriai nustatomi 1 ar 0 būsenai. Norint nuskaityti įrašytą kodą, nuskaitymo signalas nukreipiamas į išėjimo sutapatinimo schemas N_2 . Tada 1 signalai atsiranda tik tų sutapatinimo schemų N_2 išėjimuose, į kurių įėjimus ateina 1 iš trigerių.

Paprasčiausias lygiagretusis registras su RS trigeriais gali būti surinktas pagal 1.2 pav. schemą.

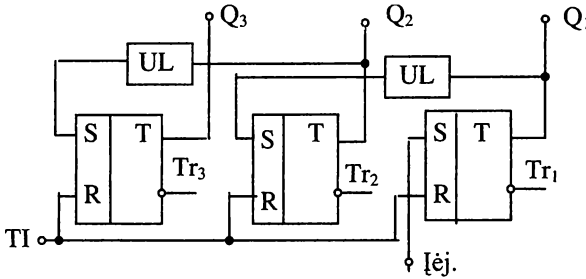


1.2 pav.

Kita registrų rūšis yra nuoseklusis (postūmio) registras.

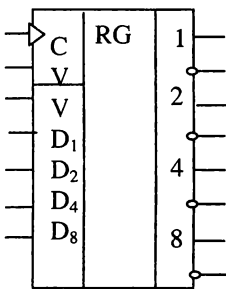
Skaitmeninis kodas į šį registrą įrašomas pradedant nuo aukščiausios skilties. Registras valdomas periodiniais taktiniais impulsais, įrašomais į visų trigerių „0“ nustatymo įėjimus. Taktiniai impulsai bent puse periodo nesutampa su skaitmeniniu kodu. Tad taktinis impulsas paruošia registrą informacijai priimti. Tada į įėjimą įrašomas skaitmeninis kodas. Jeigu impulsas vienetinis, jis permeta trigerį Tr_1 į padėtį 1. Po to taktinis impulsas trigerį Tr_1 vėl permeta į 0 būseną, o šio permetimo metu jo išėjime atsiradęs impulsas paveikia trigerį Tr_2 ir nustato jį 1. Vadinasi, taktiniai impulsai perstumia aukštesniąją skiltį į kitą registro ląstelę. Kodas perstumiamas per užlaikymo liniją UL, kurios užlaikymo laikas parenkamas toks, kad iki patenkant skaitmeniniam signalui į Tr_2 įėjimą visi pereinamieji procesai, sukelti taktinių impulsų, jau būtų pasibaigę. Tad užlaikymo laikas turi būti didesnis už taktinių impulsų trukmę. Užlaikymo linija gali būti, pavyzdžiui, monovibratorius. Tokio nuoseklaus registro su RS trigeriais schema pateikta 1.3 pav.

Toliau į trigerį Tr_1 įrašoma kita skaičiaus skiltis. Tada aukščiausioji skiltis perstumiamą į Tr_3 , įrašytoji – į Tr_2 , o Tr_1 paruošiamas žemesnei skilčiai priimti. Tad kodas, susidedantis iš n skilčių, bus įrašytas registro trigeriuose po $n-1$ taktinio impulso.



1.3 pav.

Nuskaityti informaciją galima nuosekliai per išėjimą Q_3 padavus n taktinių impulsų. Po n -tojo taktinio impulso visi trigeriai nusistovi 0. Nuoseklaus registro informaciją galima nuskaityti lygiagrečiai, išvedus išėjimus $Q_1, Q_2 \dots$. Tada informaciją galima išgauti po 1 taktinio impulso.



1.4 pav.

Dažniau registrai surenkami iš JK trigerių, veikiančių dvipakopio informacijos įsiminimo principu. Kiekvienos skilties trigerio tiesioginis ir inversinis išėjimai tiesiogiai jungiami prie aukštesnės skilties trigerio įėjimų J ir K. Padavus impulsą į skaičiavimo įėjimą C, kiekvieno trigerio būsena perduodama gretimam aukštesnės skilties trigeriui. Taip skaičius registre pastumiamas per vieną skiltį į kairę, o žemiausios skilties trigeris nustatomas 0 būsenai. Tokiu pat principu veikia registras, sudarytas iš sinchroninių D trigerių, turinčių dinaminis sinchroįėjimus. Tad šioje pastraipoje minėtuose trigeriniuose registruose užlaikymo linijos nereikalingos. Postūmio registro sutartinis grafinis žymuo parodytas 1.4 pav.

§2. Skaitikliai

Skaitikliu vadinamas skaitmeninis įrenginys, skaičiuojantis į įėjimą patenkančius tam tikrus loginius lygius, tarkime, loginio 1 lygius. Skaičius skaitiklyje atitinka tam tikras jų sudarančių trigerių kombinacijas. Atėjus į įėjimą eiliniam loginio 1 lygiui, skaitiklyje nusistovi nauja tam tikra būsenų kombinacija, vienetu didesnė už

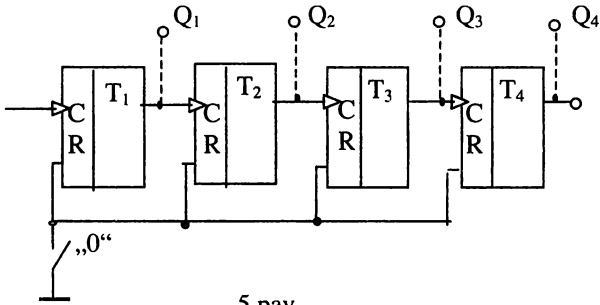
ankstesniąją. Taigi skaitiklis yra loginis įtaisas, kurio nauja būseną apibūdinama ankstesne būseną ir įėjimo loginio kintamojo reikšme. Skaičiai skaitiklyje gali būti išreiškiami dvejetainė arba dešimtainė skaičiavimo sistema.

Dvejetainiai skaitikliai. Naudojant dvejetainę sistemą, trigerių būsenos ir jas atitinkantys lygiai trigerių tiesioginiuose išėjimuose nusako skaičiaus dvejetainių skilčių skaitmenis. Jei dvejetainiam skaičiui registruoti skaitiklyje skirta n trigerių, tai maksimali reikšmė, iki kurios gali skaičiuoti skaitiklis, yra $N = 2^n - 1$. Kai $n = 4$, $N = 15$. 1 lentelėje parodyta skaičių seka ir skaičių atitinkančios trigerių būsenos skaičiavimo procese, kai $n = 4$. Dešimtainio skaičiaus skilčių skaitmenys skaitiklyje vaizduojami 4-skiltine dvejetainė forma, t.y. naudojama dvejetainė dešimtainė skaičiavimo sistema. Vadinas, kiekvienos dešimtainio skaičiaus skilties skaitmeniui pavaizduoti skaitiklyje reikia 4 trigerių, ir jeigu yra k dešimtainių skilčių, tai skaitiklyje reikia $4 \cdot k$ trigerių skaičiui registruoti, o skaičiaus maksimali reikšmė $N = 10^k - 1$.

Skaitikliai gali būti *sudėties*, *atimties* ir *reversiniai*. Sudėties skaitiklyje kiekvienas naujas skaičius yra vienetu didesnis už ankstesnį. Skaitikliams tinka visų tipų trigeriai. Paprasčiausio sudėties skaitiklio, sudaryto iš trigerių, turinčių dinامينius skaičiavimo įėjimus, schema parodyta 5 pav.

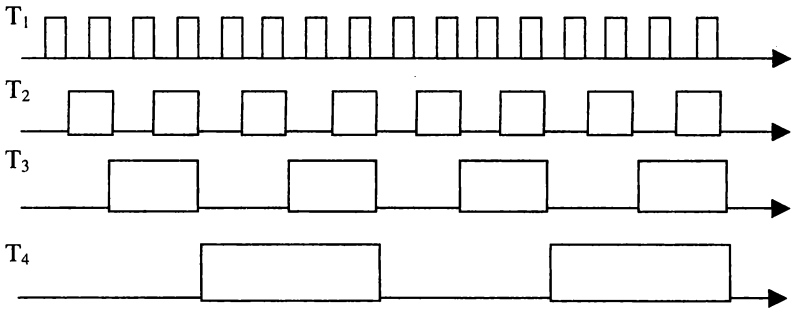
1 lentelė

Skaičius	Trigerių būseną			
	Q ₄	Q ₃	Q ₂	Q ₁
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1



5 pav.

Impulsai, kuriuos reikia skaičiuoti, paduodami į pirmojo trigerio įėjimą. Prieš pradėdant skaičiuoti, visi trigeriai nustatomi 0, nužeminant trigerių R įėjimus. Priklausomai nuo trigerio prigimties jo persivertimas gali vykti arba pagal teigiamą, arba pagal neigiamą įtampos impulsą (pagal priekinį arba pagal užpakalinį impulso frontą). Pavyzdžiui, trigeriams pradėdant veikti nuo užpakalinio fronto, skaitiklio darbo laikinė diagrama parodyta 2.2 pav.



2.2 pav.

Tokia 4 kaskadų schema turi dalijimo koeficientą $k = 2^4 = 16$, t.y. į įėjimą padavus 16 impulsų, išėjime gaunamas 1 impulsas. Apskritai schemas, turinčios m kaskadų, perskaičiavimo koeficientas $k = 2^m$. Po 2^m impulsų schema grįžta į pradinę padėtį.

Nustatytą skaičių rodo indikacijos schemas arba ją galima nuskaityti nuo išėjimų Q_1 , Q_2 , Q_3 ir Q_4 . Bendruoju atveju, jeigu m

kaskadų skaitiklio išėjime po kažkurio laiko pasirodė n impulsų, tai įėjimą buvo paduota

$$N = n 2^m + a_m 2^{m-1} + a_{m-1} 2^{m-2} + \dots + a_1 2^0$$

impulsų. Čia a_i ($i = 1, 2, \dots, m$) lygūs arba 0, arba 1 priklausomai nuo i-tojo skaitiklio kaskado būsenos (ji lygi 1 ar 0).

Šio tipo (nuoseklus pernešimo) skaitikliai yra lėtaeigiai. Jų greitį galima padidinti taikant lygiagretų pernešimo vienetų perdavimą. Tada skaitiklio nustatymo laikas neviršija trigerio persivertimo laiko trukmės.

Atimties skaitikliai. Atimties skaitiklyje, prieš skaičiuojant, visi skaitiklio trigeriai nustatomi 1. Skaitiklis pradeda dirbti nuo priekinio impulso fronto ir skaitiklyje sukauptas skaičius su kiekvienu taktu sumažėja vienetu. Skaitiklis dirba pagal 2 lentelę.

2 lentelė

Skaičius	Trigerių būsenos				Skaičius	Trigerių būsenos			
	Q ₄	Q ₃	Q ₂	Q ₁		Q ₄	Q ₃	Q ₂	Q ₁
0	1	1	1	1	9	0	1	1	0
1	1	1	1	0	10	0	1	0	1
2	1	1	0	1	11	0	1	0	0
3	1	1	0	0	12	0	0	1	1
4	1	0	1	1	13	0	0	1	0
5	1	0	1	0	14	0	0	0	1
6	1	0	0	1	15	0	0	0	0
7	1	0	0	0	16	1	1	1	1
8	0	1	1	1					

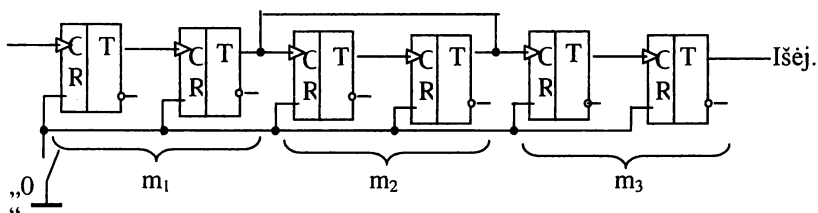
Reversiniai skaitikliai. Reversinis skaitiklis yra toks, kurį darbo metu galima perjungti iš sudėties režimo į atimties režimą arba atvirkščiai. Tokiame skaitiklyje yra dvi keliamųjų vienetų perdavimo grandinės, viena iš jų – sudėties režimui, kita – atimties. Grandinės įjungiamos (kartu nustatoma skaitiklio darbo kryptis) valdymo signalais.

Skaitikliai, skaičiuojantys kitu (ne 2ⁿ) pagrindu. Kalbėdami apie sudėties skaitiklį, sakėme, kad 4 kaskadų skaitiklis gali užfiksuoti skaičius iki $2^4 - 1 = 15$; 16-tasis impulsas skaitiklį perjungia į pradinę būseną. Vadinasi, 4 kaskadų skaitiklį galime laikyti viena skiltimi (kaskadu) skaitiklio, dirbančio 16-tainėje skaičiavimo sistemoje. Analogiškai 3 kaskadų sudėties dvejetainis skaitiklis būtų 8-tainės sistemos vienas kaskadas. Tačiau praktikoje dažnai reikia skaitiklių,

dirbančių sistemoje, kurios pagrindas ne 2^n , pavyzdžiui, dešimtainėje sistemoje. Tokio skaitiklio perskaičiavimo koeficientas turi būti 10^n .

Bendruoju atveju, jei skaitiklio ciklinio darbo periodas turi būti N , o N nelygus 2 sveikuoju laipsniu, tai būtinas trigerių skaičius yra minimalus n , tenkinantis nelygybę $2^n \geq N$. Skaitiklio, turinčio tiek trigerių, periodas 2^n didesnis už reikalaujamą N . Todėl skaitiklį, atsiradus skaičiui $N - 1$, būtina per kitą darbo taktą perjungti į pradinę būseną. Tarkime, kad mums reikalingas dešimtainis skaitiklis. Vadinasi, $n = 4$, nes tik toks mažiausias n tenkina nelygybę $2^n \geq N$. Skaitiklio schema turi pradėti veikti nuo 10 impulsų ir grįžti į pradinę būseną. Išeina, kad bendruoju atveju, jeigu mums reikalinga perskaičiavimo schema skaičiavimo sistemai, kurios pagrindas N ir kuriai $2^{n-1} < N < 2^n$, reikia nuosekliai sujungti n dvejetainių trigerių ir iš jų galimų būsenų „išjungti“ $2^n - N$ stacionarių būsenų. Tai galima atlikti įvairiais būdais.

Grįžtamųjų ryšių būdas. Išvengti kelių stacionarių 2^n nuoseklojo skaitiklio būsenų galima sudarius grįžtamąjį ryšį, pasiūniant kažkurio trigerio išėjimo signalą į prieš stovinčio kurio nors trigerio įėjimą. Tokia galima schema parodyta 2.3 pav.



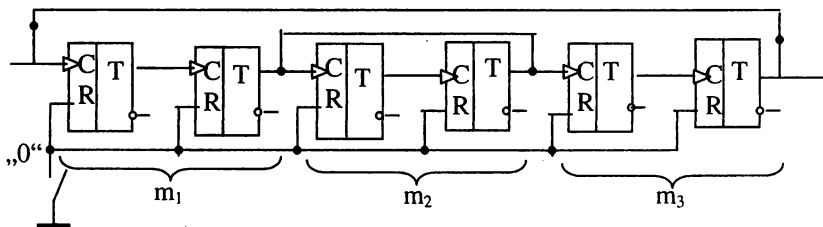
2.3 pav.

Tegul skaitiklis turi $m = m_1 + m_2 + m_3$ binarinių ląstelių (trigerių), o jame grįžtamoju ryšiu apimta m_2 trigerių. Grupės m_1 išėjime impulsas susidarys į grupės įėjimą padavus 2^{m_1} impulsų. Grupės m_2 išėjimo impulsas susidarys po $2^{m_2} - 1$ įėjimo impulsų, nes vieną impulsą pridėda grįžtamasis ryšys. Grupės m_3 išėjimo impulsas susidarys po 2^{m_3} impulsų jos įėjime. Tad schemas perskaičiavimo koeficientas

$$k = 2^{m_1} (2^{m_2} - 1) 2^{m_3} = 2^{m_1 + m_2 + m_3} - 2^{m_1 + m_3}$$

Pavyzdžiui, 4 skilčių skaitiklyje paėmę $m_1 = 1$, $m_2 = 2$, $m_3 = 1$, gauname $k = 12$. Vadinasi, skaitiklis sėkmingai dirbtų 12-tainėje skaičiavimo sistemoje.

Grįžtamojo ryšio schemų gali būti įvairių. Pavyzdžiui, galima vieną grįžtamąjį ryšį apimti kitu, kaip parodyta 2.4 pav.

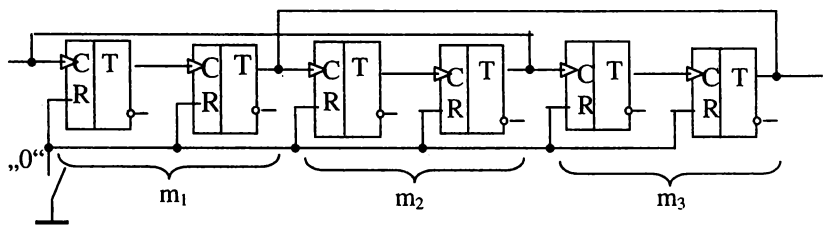


2.4 pav.

Analogiškai galvojant, šios schemos perskaičiavimo koeficientas gaunamas

$$k = 2^{m_1} (2^{m_2} - 1) 2^{m_3} - 1.$$

Sukryžmintu grįžtamojo ryšio schema parodyta 2.5 pav.

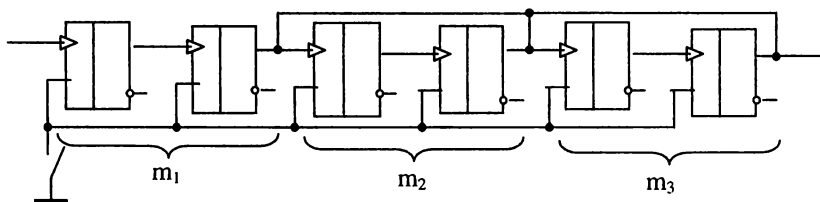


2.5 pav.

Šiuo atveju, neįskaitant grįžtamojo ryšio iš skaitiklio išėjimo į grupės m_2 įėjimą, perskaičiavimo koeficientas būtų $(2^{m_1+m_2} - 1) 2^{m_3}$. Įskaičius tą poveikį, jis ekvivalentus impulsui, ateinančiam iš m_1 išėjimo, t.y. tarsi į schemos įėjimą būtų paduota 2^{m_1} impulsų. Tad

$$k = (2^{m_1+m_2} - 1) 2^{m_3} - 2^{m_1} = 2^{m_1+m_2+m_3} - 2^{m_1} - 2^{m_3}.$$

Jei $m_1 = 2$, $m_2 = 1$, $m_3 = 1$, $k = 10$.



2.6 pav.

2.6 pav. parodytos schemos perskaičiavimo koeficientas

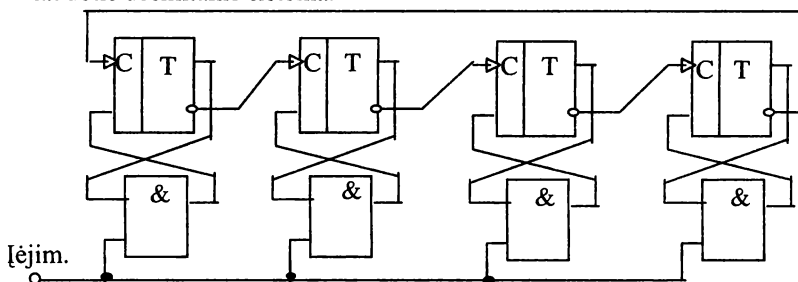
$$k = 2^{m_1 + m_2} (2^{m_3} - 1) - 2^{m_1} = 2^{m_1 + m_2 + m_3} - 2^{m_1 + m_2} - 2^{m_1}$$

Šioje schemoje $k = 10$, kai $m_1 = m_2 = 1$, $m_3 = 2$.

Praktiškai šios schemos sudėtingesnės, nes, panaudojant grįžtamąjį ryšį, į šio ryšio grandines reikia įrengti užlaikymo linijas ir grįžtamojo ryšio signalus paduoti per elementus ARBA.

Impulsų perstūmimo būdas paremtas tuo, kad dalis impulsų schemoje, sudarytoje iš dvejetainių ląstelių, panaudojant užlaikymo linijas ir logines schemas, nukreipiami ir pasiekia schemos išėjimą aplenkdami žemesniųjų skilčių ląsteles.

Žiedinis skaitiklis. Nesunkiai skaitmeniniai skaitikliai su bet koku perskaičiavimo koeficientu padaromi panaudojant žiedinius skaitiklius. Tokio skaitiklio schema parodyta 2.7 pav. Iš esmės – tai sužiedintas postūmio registras, kuriame visada tik viena ląstelė yra 1 būsenos, visos kitos yra 0 būsenos. Šio 1 perstūmimas iš ląstelės į ląstelę vyksta veikiant įėjimo impulsams. Po k -tojo impulso 1 būsenos yra k ląstelė. Žiediniai skaitikliai gali skaičiuoti bet kuriuo pagrindu. Dekadinis skaitiklis turi turėti $m = 10$ ląstelių, atitinkančių skaičius 0,1,2,...,9. Vadinasi, žiediniuose skaitikliuose ląstelių kur kas daugiau negu skaitikliuose, turinčiuose grįžtamąjį ryšį, tačiau skaičių atvaizdavimas jame natūralusis, įprastesnis žmogui, įpratusiam naudotis dešimtaine sistema.



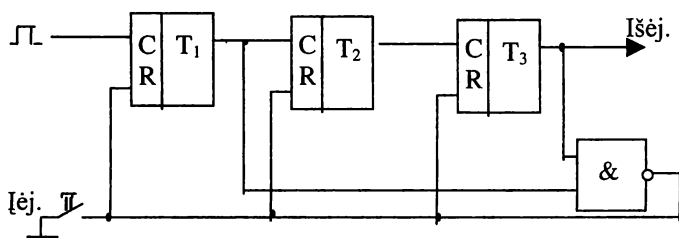
2.7 pav.

Žiedinis skaitiklis gali būti *atdaras*, kai pirmoji ląstelė kiekvieno ciklo pradžioje nustatoma 1 specialiu įrenginiu, ir *uždaras*, kai 1 būseną iš m -tosios ląstelės į pirmąją pereina automatiškai.

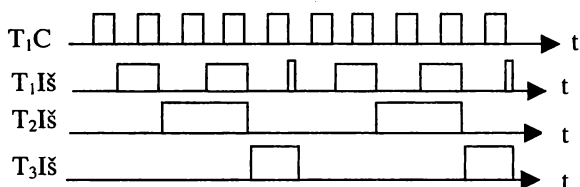
Žiedinio skaitiklio darbas primena komutatoriaus veikimą, todėl jie dažnai naudojami kaip elektroniniai komutatoriai.

2.7 pav. schema veikia labai paprastai: per IR schemą įėjimo impulsas pasiekia tik tą trigerį, kuris yra 1 būsenos. Ta ląstelė pereina į 0 būseną, o jai pereinant susidarys impulsas permeta kitą ląstelę į 1 būseną. kitas įėjimo impulsas pasieks jau šią ląstelę, ją permes į 0 būseną, o 1 pasieks vėl naują ląstelę.

Skaitikliai - dalikliai. Šie skaitikliai išėjimo impulsus skaičiuoja iki tam tikro numatyto perskaičiavimo koeficiento ir po to automatiškai grįžta į 0 padėtį. Skaitiklis, skaičiuojantis iki 5, parodytas 2.8 pav., gali būti padarytas iš dvejetainių trigerių, turinčių dinaminis skaičiavimo įėjimus, ir elemento IR bei NE. Pirmus 4 taktus skaitiklis dirba kaip paprastas dvejetainis skaitiklis. & elementas, gaudamas į vieną arba abu įėjimus 0, yra būsenos 1. Pagal penktojo impulso užpakalinį frontą T_1 ir T_3 išėjimuose susidaro 1, todėl & persiverčia į 0. Jo išėjime suformuojamas trumpas impulsas, visus trigerius permetantis į 0. Nuo šio momento prasideda naujas skaitiklio darbo ciklas. 2.9 pav. parodyta tokio skaitiklio laiko diagrama.



2.8 pav.

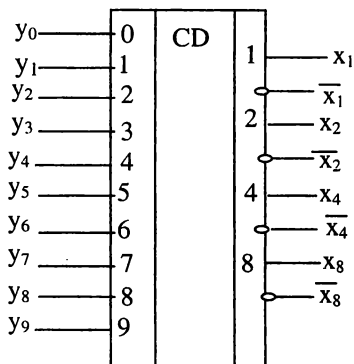


2.9 pav.

§3. Šifratoriai

Dešimtainis skaičius	Dvejetainis kodas 8421			
	x_8	x_4	x_2	x_1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1

Šifratorius (dar vadinamas kodavimo įrenginiu) yra įrenginys, keičiantis dešimtainius skaičius į dvejetainę skaičiavimo sistemą. Tarkime, šifratorius turi m įėjimų, sunumeruotų iš eilės dešimtainiais skaičiais $(0, 1, 2, \dots, m-1)$, ir n išėjimų. Padavus į vieną įėjimą signalą, išėjimuose atsiranda n -skiltis dvejetainis skaičius, atitinkantis sužadinto įėjimo numerį. Suprantama, jog sunku sukonstruoti šifratorių, turintį labai daug įėjimų m , todėl jie naudojami palyginti nedideliams dešimtainiams skaičiams versti į dvejetainę sistemą. Šifratoriai naudojami įvairiuose informacijos įvedimo į ESM įtaisuose. Tokie įtaisai gali turėti klaviatūrą, kurios kiekvienas klavišas susietas su tam



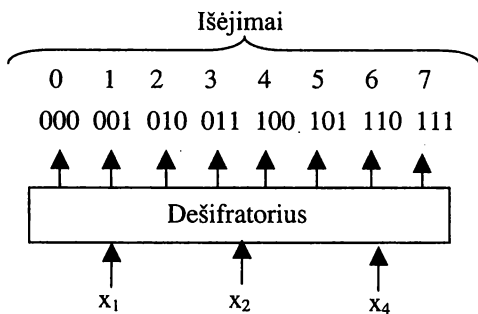
3.1 pav.

tikru šifratoriaus įėjimu. Paspaudus klavišą, signalas patenka į konkretų šifratoriaus įėjimą ir jo išėjime atsiranda dvejetainis skaičius, atitinkantis klavišo numerį. Sakykime, dešimtainius skaičius $0, 1, 2, \dots, 9$ reikia išreikšti tiesioginiu dvejetainiu kodu 8421. Koduojama pagal lentelę. 3.1 pav. parodytas šifratoriaus grafinis žymuo. Kairėje parodyta 10 įėjimų, atitinkančių dešimtainius skaičius. Dešimtainiam skaičiui, atėjus į atitinkamą įėjimą, loginio 1 lygis patenka į

atitinkamą šifratoriaus įėjimą. Dešinėje parodyti šifratoriaus išėjimai. Skaitmenimis 1, 2, 4, 8 pažymėti reikšminiai koeficientai dvejetainių skilčių, atitinkančių atskirus išėjimus. Kiekvienai dvejetaini skilčiai numatyti 2 išėjimai – tiesioginis ir inversinis. Tiesioginiame išėjime suformuojamas loginis lygis, atitinkantis dvejetainės skilties skaitmenį (0 ar 1), inversiniame – jo inversija. Šifratoriai surenkami iš loginių elementų.

§4. Dešifratoriai

Atvirkštiniam dvejetainių skaičių keitimui nedideliais dešimtainiais skaičiais naudojami *dešifratoriai (dekoderiai)*. Dešifratoriaus įėjimai, skirti dvejetainiams skaičiams paduoti, išėjimai numeruojami iš eilės dešimtainiais skaičiais. Į įėjimus padavus



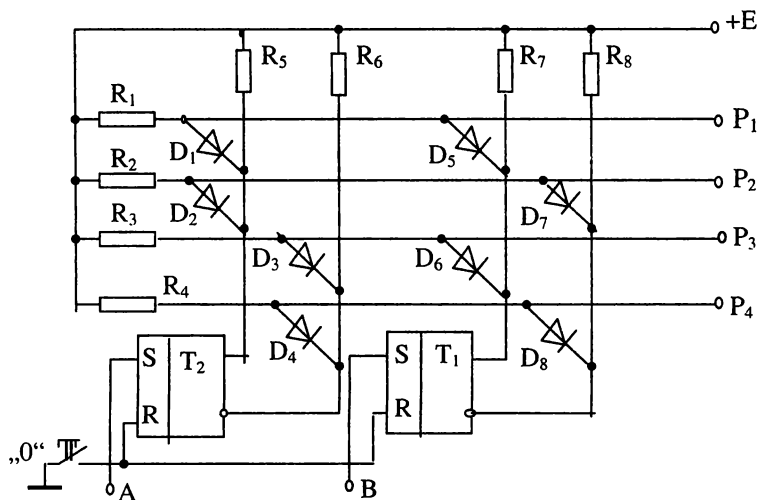
4.1 pav.

dvejetainį skaičių, išėjime, kurio numeris atitinka įėjimo skaičių, susidaro signalas. Apskritai n įėjimų dešifratorius turi $N = 2^n$ išėjimų, nes n skilčių įėjimo kodas gali įgyti 2^n įvairių reikšmių ir kiekvieną šių reikšmių turi atitikti signalas viename dešifratoriaus išėjimų. Vadinasi, dešifratorius turi susidėti iš N loginių

schemų, kurių kiekviena apskaičiuota ir suderinta su tam tikra skaičių kombinacija. Dešifratoriaus sandaros principas pavaizduotas 4.1 pav. Schemos gali būti labai įvairios, priklausomai nuo to, kokie panaudojami elementai (IR bei NE(matricinis dešifratorius), vien tik dviejų įėjimų IR (piramidinis dešifratorius), kelių ir dviejų įėjimų IR kombinacija (pakopinis dešifratorius)). IR schemos dešifratorius gali būti diodinis, tranzistorinis, magnetinis arba kombinuotas. Dažniausiai naudojami diodiniai dešifratoriai. Pats paprasčiausias dešifratorius būtų dviejų įėjimų ir $2^2 = 4$ išėjimų matricinis dešifratorius. Pagrindiniai schemos elementai yra dviejų jų skilčių trigerinis registras ir diodinė matrica. Schema turi du įėjimus: A ir B ir keturis išėjimus P_1, \dots, P_4 .

Schemas darbas aprašomas lygtimis $P_1 = AB$, $P_2 = AB$, $P_3 = AB$, $P_4 = AB$.

Tegul $A = 1$, $B = 1$. Tuomet abu trigeriai T_1 ir T_2 yra vienetinės būsenos ir jų tiesioginiuose išėjimuose yra aukšti potencialai (4.2 pav.). Diodai D_1 , D_2 , D_5 ir D_6 yra uždaryti, o likusieji – atidaryti. Jeigu bent vienas diodas, prijungtas prie išėjimo šynos, atidarytas, šynos potencialas bus žemas, nes beveik visa E įtampa krinta viename iš rezistorių $R_1 - R_4$, kurių varžos daug didesnės negu atidaryto diodo varža. Tad šiuo atveju aukštas potencialas susidarys tik šynoje su išėjimu P_1 , nes prie jos prijungti diodai D_1 ir D_5 yra uždaryti.

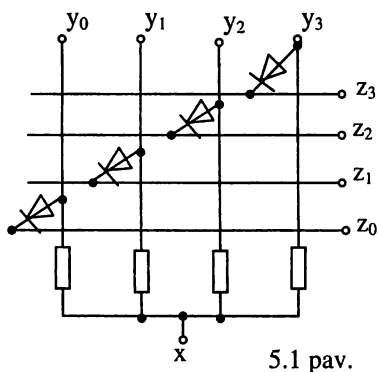


4.2 pav.

Tokiu pat būdu galime įrodyti, kad kai $A = 1$, $B = 0$, 1 bus išėjime P_2 , kai $A = 0$, $B = 1$, - 1 išėjime P_3 , ir kai $A = 0$, $B = 0$, - P_4 .

Dažnai dešifраторiai patogumo dėlei jungiami su skaitmeniniais dujinio išlydžio indikatoriais, parodančiais dešimtinius skaičius, atitinkančius į dešifраторiaus įėjimą paduotą dvejetainio kodo kombinaciją.

§5. Perstūmikliai



5.1 pav.

$y_1 = z_1x, \dots, y_n = z_nx$. Principinė schema, panaudojant diodus, pateikta 5.1 pav. Didesnio skilčių skaičiaus perstūmikliai daromi panaudojant IR bei ARBA elementus.

Tai įrenginiai, perstumiantys skaitinio kodo skiltis į kairę arba į dešinę. Vienos skilties perstūmiklis turi praleisti signalą x (vieną dvejetainio skaičiaus skiltį) be perstūmimo į išėjimą y_0 arba perstumti jį per vieną skiltį į išėjimą y_1 , arba per dvi skiltis į išėjimą y_2 ir t.t., priklausomai nuo to, kur paduotas valdantysis signalas – į įėjimus z_0, z_1, z_2 ir t.t. Vadinasi, perstūmiklio darbas aprašomas lygtimis $y_0 = z_0x$,

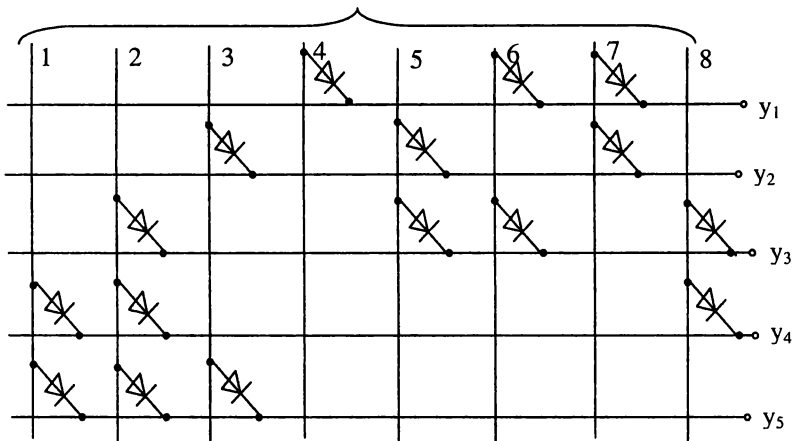
§6. Kodo keitikliai

Praktikoje tenka spręsti įvairius kodo keitimo klausimus. Visų pirma labai dažnai reikia pereiti iš skaičiaus tiesioginio kodo į atvirkštinį. Kai kada tie klausimai sprendžiami labai paprastai. Pavyzdžiui, jeigu skaičius įrašytas trigeriniame registre, tai jo tiesioginis kodas gali būti nuskaitytas nuo tiesioginių trigerių išėjimų, o atvirkštinis – nuo inversinių išėjimų. Kartais tam naudojamos specialios schemas.

Dažnai reikia pereiti iš vieno kodo į kitą. Keičiant n -elementinį (n skilčių) kodą į m -elementinį, pirmiausia n -elementinis kodas dešifruojamas jau žinomu dešifratoriumi ir kiekvienoje iš 2^n išėjimo šynų gaunamas signalas, atitinkantis vieną įėjimo kodinių kombinacijų. Po to kiekvienas išėjimo signalas koduojamas m -elementiniu kodu. Šią operaciją atlieka šifratorius. Paprastai šifratorių sudaro išsišakojimo schemų rinkinys. Kiekviena tokia schema turi vieną įėjimą ir kelis išėjimus, tad signalas, paduotas į įėjimą, perduodamas į kelis išėjimus.

Galimas ir tiesioginis kodo keitimas, prieš keitimą jo nedešifruojant. Tada pagal duotas kodo keitimo sąlygas užrašomos struktūrinės formulės kiekvienam antrinio kodo elementui, o pagal struktūrines formules sukuriama kodo keitiklio schema.

Paprasčiausi kodo keitikliai gaunami naudojant diodines matricas. Pavyzdžiui, 3-elementiam kodui keisti į 5-elementį matrica parodyta 6.1 pav.



6.1 pav.

Toks kodo keitiklis dirba pagal šią lentelę.

Eil. Nr.	Deš. sk.	3-elementis kodas			5-elementis kodas				
		x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
1.	0	0	0	0	0	0	0	1	1
2.	1	0	0	1	0	0	1	1	0
3.	2	0	1	0	0	1	0	0	1
4.	3	0	1	1	0	1	0	1	0
5.	4	1	0	0	1	0	0	0	1
6.	5	1	0	-1	1	0	0	1	0
7.	6	1	1	0	1	0	1	0	0
8.	7	1	1	1	1	1	0	0	0

Nagrinėjama atvejui struktūrinės formulės atrodytų taip:

$$y_1 = x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 + x_1 \bar{x}_2 x_3 + x_1 x_2 \bar{x}_3 = x_1 (\bar{x}_2 + \bar{x}_3).$$

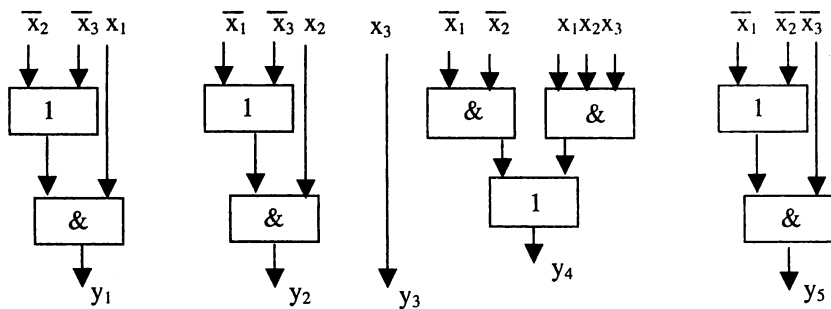
$$y_2 = \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 + \bar{x}_1 x_2 x_3 + x_1 x_2 \bar{x}_3 = x_2 (\bar{x}_1 + \bar{x}_3).$$

$$y_3 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 + \bar{x}_1 x_2 x_3 + x_1 \bar{x}_2 x_3 + x_1 x_2 x_3 = x_3.$$

$$y_4 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 + \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 + x_1 x_2 \bar{x}_3 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 + x_1 x_2 x_3.$$

$$y_5 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 + \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 + x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 = \bar{x}_3 (\bar{x}_1 + \bar{x}_2).$$

Tada kodo keitiklio, pagaminto iš loginių elementų, schema gali būti tokia, kaip parodyta 6.2 pav.



6.2 pav.

XV. ARITMETINIAI ĮRENGINIAI

Aritmetiniame įrenginyje atliekamos aritmetinės ir loginės operacijos su skaičiais ir komandomis. Jis sudarytas iš operacinių blokų rinkinio dviem skaičiams sumuoti, dauginti, dalyti, laikinai įsiminti ir pan. Šių blokų skaičių lemia mašinos paskirtis ir joje naudojami elementai. Aritmetinio įrenginio pagrindą sudaro sumatoriai ir daugybos įrenginiai.

§1. Sumatoriai

Vienaskiltis dvejetainis sumatorius. Sumatoriuje aritmetiškai sudedami skaičių kodai. Aritmetiniuose įrenginiuose (AI) naudojami dviejų tipų sumatoriai: *kombinaciniai* ir *kaupiantieji*.

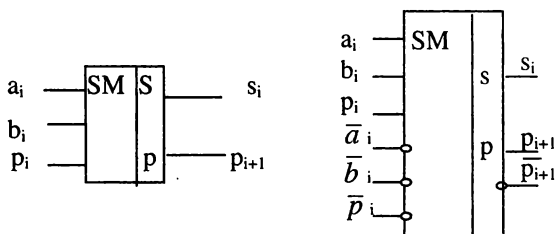
Kombinaciniame sumatoriuje suma gaunama tuo pat metu, kai įvedami duomenys ir yra įėjimo dydžių kombinacijų rezultatas. Nustojus perdavinėti įėjimo informaciją, suma išnyksta, nes šis sumatorius neturi atminties.

Kaupiančiajame sumatoriuje skaičiai paduodami ne vienu metu ir suma randama kaip dėmenų, įvestų skirtingu laiku, sudėties rezultatas. Dėmenis panaikinus, suma išlieka. Ją galima nutrinti specialiu signalu.

Tiek kombinaciniai, tiek kaupiantieji sumatoriai yra vienos skilties sumatoriai (pusiausumatoriai). Iš dvejetainių skaičių sudėties principo išplaukia, kad kiekvienoje skiltyje atliekami to paties tipo veiksmai: sudedant modulių 2 dėmenų skaitmenis ir atėjusį į tą skiltį keliamąjį vieneta, randamas sumos skaitmuo ir formuojamas keliamasis vienetas į kitą skiltį. Tad vienaskiltis dvejetainis sumatorius turi 3 įėjimus, į kuriuos paduodami dėmenų skaitmenys a_i , b_i ir keliamasis skaitmuo p_i , dviejuose išėjimuose formuojama suma s_i ir keliamasis vienetas p_{i+1} perdavimui į kitą skiltį. Sudėtingesnis sumatorius gali turėti įėjimus ir tiesioginėms, ir inversinėms įėjimo kintamųjų vertėms. Tada įėjimai yra 6. Išėjime irgi gali būti formuojamos inversinės išėjimo kintamųjų reikšmės. Tada bus sumatorius, kuris turės tris išėjimus. Sumatorių grafiniai žymenys pateikti 1.1 pav.

Kaip funkcionuoja vienaskiltis sumatorius, nusakyta 1 lentelėje.

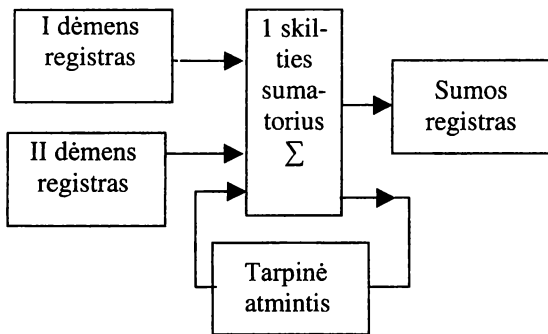
Įėjimai			Išėjimai	
dėmenys		keliamasis skaitmuo	suma	keliamasis skaitmuo
a_i	b_i	p_i	s_i	p_{i+1}
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1



1.1 pav.

Daugiaskilčiai dvejetainiai sumatoriai. Pagal tai, kaip įvedami dėmenų kodai, skiriami dviejų tipų sumatoriai: *nuoseklieji* ir *lygiagretieji*.

Į nuoseklųjį sumatorių skaičių kodai įvedami nuosekliaja forma, t.y. skiltis po skilties, pradedant žemiausiaja. Nuosekliojo sumatoriaus struktūrinė schema parodyta 1.2 pav. Jame du skaičiai sudedami vienaskilčiame sumatoriuje, kuris turi tarpinę atmintį. Dėmenys į vienaskiltį sumatorių paduodami nuosekliu kodu, pradedant nuo žemiausios skilties, ir sumuojama pagal skiltis. Jeigu susidaro keliamasis vienetas, jis išimamas tarpinėje atmintyje, iš kurios jis išvedamas atėjus kitai dėmenų skilčiai ir prie jos prisumuojamas. Procesas tęsiasi tol, kol sudedamos visos skiltys. Tokioje schemoje neįmanomas ciklinis perkėlimas, t.y. neįmanoma pridėti vieneto iš aukštesnės sumos skilties į žemesnę. Todėl neigiamiesiems skaičiams reikia naudoti papildomąjį kodą. Akivaizdus nuosekliojo sumatoriaus privalumas – paprasta schema, tačiau jo veikimo greitis yra mažas.



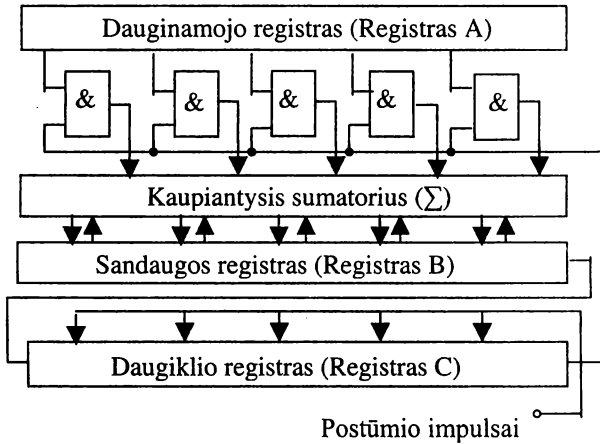
1.2 pav.

Plačiau paplitę lygiagrečiai sumatoriai. Jie turi po vienaskiltį sumatorių kiekvienai skilčiai. Paduodamų dėmenų skilčių skaitmenys patenka į tuos vienaskilčius sumatorius. Kiekvienas jų savo išėjimuose formuoja sumos atitinkamos skilties skaitmenis ir keliamąjį vieneta, paduodamą į gretimos aukštesnės skilties vienaskilčio sumatoriaus įėjimą. Lygiagrečiojo sumatoriaus greitį smarkiai riboja keliamojo vieneto apdorojimo laikas. Todėl stengiamasi naudoti greitaigės schemas, mažinti elementų skaičių grandinėse tarp įėjimo, į kurį ateina keliamasis impulsas p_i , ir išėjimo, kuriame formuojamas perduodamas į gretimą skiltį keliamasis impulsas p_{i+1} . Taip pat naudojamos lygiagrečios perkėlimų grandinės, kai keliamieji dydžiai formuojami iškart visose skiltyse. Kai sumatoriuje yra daug skilčių, jos dalijamos į nedideles skilčių grupes. Keliamieji impulsai tarp grupių gali būti perduodami lygiagrečiai kaip ir pačiose grupėse.

§2. Daugybės įrenginiai

Skaiciavimo mašinos daugybės veiksmas dažniausiai atliekamas sudarant ir sumuojant dalines sandaugas, kurių kiekviena lygi arba dauginamajam, arba nuliui. Kaip pavyzdį panagrinėsime kaupiančiojo tipo daugybės schemą, į kurią dalinės sandaugos paduodamos lygiagrečiai.

Daugybės įrenginį sudaro 3 postūmio registrai: dauginamojo A, daugiklio C, dalinių sandaugų B ir kaupiantysis sumatorius (2.1 pav.).



2.1 pav.

Prieš pradėdant daugybą, dauginamasis įvedamas į A registrą, daugiklis – į C registrą. Sumatorius Σ ir B registras nustatomi nuliui. Į daugybos įrenginio schemą atėjus postūmio impulsams, daugiklio skaitmeninis kodas nuosekliai, skiltis po skilties, pradėdant nuo žemiausios, paduodamas į loginės daugybos IR elementus. Jei eilinėje daugiklio skiltyje stovi 1, tai IR elementas praleis dauginamojo reikšmę iš A registro į kaupiantįjį sumatorių Σ . Ta reikšmė sudedama su B registro turiniu. Dalinių sandaugų suma iki daugybos pabaigos saugoma B registre.

Jei duotoje daugiklio skiltyje yra 0, dauginamasis nepridedamas. Per pirmąją daugybos taktą B registras yra „0“ būsenos, tuomet nesumuojama, o dauginamasis perkeliamas iš A registro į sumatorių, po to į B registrą. B registre dalinių sandaugų sumos pasistumia kartu su daugikliu C registre į žemesniųjų skilčių pusę (dešinėn), o tai tolygu dalinių sandaugų postūmiui į kairę.

Dviejų n skilčių sandauga turi turėti $2n$ skilčių. Kad reikėtų mažiau įrenginių, žemiausios sandaugos skiltys užima laisvas C registro vietas. Atlikus pakankamai dauginimo taktų, sandauga įrašoma A ir B registruose.

§3. Atminties įrenginiai

ESM atmintis – tai įvairių atminties įrenginių (AI), skirtų dvejetainiams kodams užrašyti, saugoti ir išduoti, visuma. Ji charakterizuojama dviem pagrindiniais parametrais: *talpa* ir *greitaeigiškumu*.

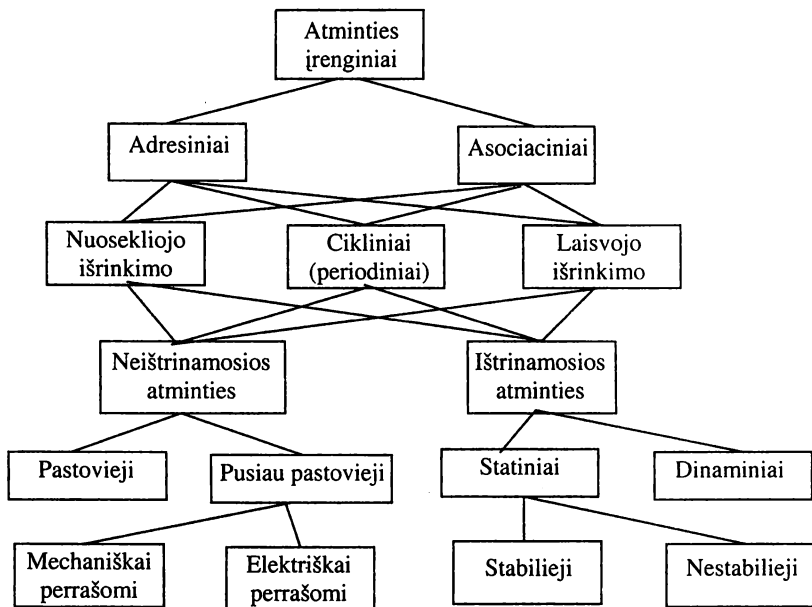
AI talpa M – tai dvejetainių skilčių skaičius, kuris vienu metu gali būti saugomas atmintyje. Mažiausias informacijos kiekis – 1 dvejetainė skiltis – vadinama *bitu*, 8 dvejetainės skiltys – *baitu*. Dabar net nedidelių mašinų atminties talpa siekia šimtus gigabaitų (10^9 eilės).

AI greitaeigiškumas T_c nusakomas mažiausiu laiku tarp dviejų galimų kreipimūsi į atmintį. Jis gali siekti nuo keliasdešimt ar kelių mikrosekundžių iki kelių ns.

Kartais naudojamas apibendrintas AI parametras – informacijos galia $W = M / T_c$ baitų per sekundę.

AI talpa ir greitaeigiškumas – prieštaringi parametrai. Atminties talpai augant, greitaeigiškumas mažėja. Norint sumažinti šio pobūdžio prieštaravimus, mašinos naudojami įvairiausių tipų atmintis.

Informacija į mašinos atmintį gali būti įrašoma įvairiais fizikiniais principais: keičiant magnetinių disko, būgno, juostos, kortos, feritinės matricos būseną, sukaupiant elektrostatinę krūvį dielektrikuose, panaudojant superlaidumą, garso ir ultragarso virpesius, kieto kūno fizikos reiškinius (integralinė puslaidininkinė atmintis), fizikinių ir cheminių medžiagų savybių kitimą, veikiant lazerio spinduliu (optinė elektroninė, holografinė atmintis), ir kt. AI skirstomi pagal paskirtį, informacijos išdėstymą, paiešką, išrinkimą, funkcionavimą (3.1 pav.).



3.1 pav.

Kai kiekviena atminties ląstelė turi adresą ir informacijos ieškoma pagal jį, AĮ vadinamas adresiniu; kai informacijos ieškoma pagal turinį (bendrus požymius) – asociacinės atminties įrenginiu. Pagal informacijos išrinkimo iš atminties tvarką yra nuoseklojo, ciklinio (periodinio) ir laisvojo išrinkimo AĮ. Neištrinamosios atminties įrenginyje įrašytą informaciją galima perskaityti daug kartų. Ištrinamosios atminties įrenginyje įrašyta informacija kaskart ištrinama ją perskaičius. Dar AĮ būna stabilūs (juose informacija savaime neišsitrina) ir nestabilūs, kuriuose informacija išsitrina per tam tikrą laiką.

Pagrindiniai ESM įrengtos atminties tipai tokie:

Supergreita operatyvinė atmintis (SOA) naudojama saugoti tai informacijai, į kurią tenka kreiptis ir ją naudoti 1 mašininė komanda įvykdyti. Tokių AĮ talpa labai ribota, neviršija 10^3 bitų, kreipimosi laikas – kelios dešimtys ns. SOAĮ naudojami registrai, didžiosios integralinės schemos, plonos magnetinės plėvelės.

Operatyviosios atminties įrenginys (OAI) skirtas tai informacijai, į kurią sprendžiant uždavinį tenka labai dažnai kreiptis, saugoti.

Pirmiausia prie tokios atminties priskiriama programa. OAĮ turi palyginti nedidelę talpą, bet pakankamai didelį greitaeigiškumą (0,75 – 4 μ s). Kartai ji daroma feritinių šerdžių pagrindu, tačiau dažniausiai – didžiųjų integralinių schemų pagrindu, ir toks puslaidininkinis OAĮ yra greitesnis, patikimesnis, ekonomiškesnis, turi mažesnius matmenis už feritinį.

Nuolatinės (ilgalaikės) atminties įrenginys (NAI) skirtas saugoti tokiai informacijai, į kurią pakankamai dažnai gali tekti kreiptis sprendžiant uždavinį, tačiau kuri nekinta (konstantos, funkcijų verčių skaičiavimo paprogramės ir pan.). Vartotojas informacijos į NAI įrašyti negali, gali tik iškviešti saugomą iš anksto įrašytą informaciją. Paprastai NAI gaminama tokiu pat pagrindu kaip OAĮ, bet jų įranga paprastesnė.

Magnetiniai diskai (MD), magnetiniai būgnai (MB), magnetinė juosta (MJ) dažniausiai yra kaip AĮ ir kaip įvedimo ir išvedimo įrenginiai. Kartais dar juos vadina *kaupikliais* ir priskiria prie išorinės atminties įrenginių (IAI). Šie įrenginiai gali kaupti ir saugoti informaciją, gautus skaičiavimo rezultatus, kurie šiuo metu nereikalingi. Jų talpa praktiškai gali būti neribota, tačiau greitaeigiškumas mažas: geriausias MD – apie 100 μ s. Kadangi IAI lėtaeigiškumas nesiderina su mašinos darbo sparta, tai neracionalu į ją įrašinėti ir nuskaitinėti atskirą skaičių. Todėl paprastai IAI su OAĮ keičiasi informacija gabalais po kelis kilobaitus.

AĮ su MD ir MB, taip pat su puslaidininkinėmis didžiosiomis integralinėmis schemomis panaudojami kaip buferinės atminties įrenginys (BAI), kurio paskirtis – suderinti įėjimo ir išėjimo įrenginių lėtaeigiškumą su mašinos darbo sparta.

Perforacinės kortos ir perforacinė juosta nėra atminties įrenginiai, o tik tarpiniai informacijos perteikėjai, galintys saugoti informaciją nepriklausomai nuo mašinos.

§4. Magnetiniai AĮ

Magnetiniai AĮ šiuo metu labai plačiai paplitę. Informacijos užrašymo ir atgaminimo magnetiniu būdu principas toks pat, kaip užrašant ir atgaminant garsą, tačiau pastaruoju atveju svarbiausia yra atgaminimo kokybė bei ilga trukmė, o informacijos įrašymo atveju – įrašo talpa ir kreipimosi laikas.

Magnetiniai būgnai (MB) daromi iš nemagnetinės medžiagos ir išorinis būgno paviršius išklojamas magnetinės dangos sluoksniu.

Darbo metu būgnas sukasi. Išilgai būgno pagal jo sudaromąją pastatytas magnetinių galvučių blokas, kuriame glaudžiai viena prie kitos išdėstytos įrašymo ir atgaminimo galvutės. Informacija į būgną gali būti įrašoma nuosekliai pagal cilindro apskritimą arba lygiagrečiai pagal cilindro dedamąją. Be darbinių takelių, turi būti tarnybinių – atskaitos pradžios takelis, turintis įrašytą 1 signalą, bei sinchronizacijos takelis (turintis tiek sinchrosignalų, kiek dvejetainių signalų įrašoma pagal būgno apskritimo ilgį). Kiekvienas sinchrosignalas lemia sudaromosios, kurioje bus įrašytas n skilčių lygiagretus kodas, vietą.

Būgnai buvo gaminami 100-800 mm skersmens, linijinis jų paviršiaus greitis magnetinių galvučių atžvilgiu siekė 10-100 m /s, būgno talpa iki $8 \cdot 10^9$ bitų. Dabartinėse mašinose MB jau praktiškai nebenaudojami.

Magnetiniai diskai (MD) yra pranašesni už MB. Pirma, ant diskų magnetinis sluoksnis gali būti iš abiejų pusių. Antra, diskus galima išdėstyti paketais, o reikalui esant, juos keisti. Trečia, MD turi didelę informacinę talpą tūrio vienetui. Ant vienos ašies esančių diskų skaičius gali siekti iki kelių dešimčių. Pavyzdžiui, stacionaraus tipo mašina EC AĮ su diskais turi $7,25 \cdot 10^6$ baitų talpą vienam 6 diskų kaupikliui, diskų sukimosi greitis 3000 aps /min. Vidutinis kreipimosi laikas – 87 μ s.

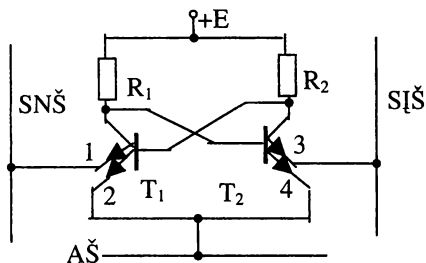
Mažiausią greitaeigiškumą turi atminties įrenginys su magnetine juosta (MJ). Jame naudojamas kontaktinis informacijos įrašymo ir nuskaitymo būdas. Naudojama 6,25–35 mm pločio, 500–1000 m ilgio juostos, turinčios 2–128 takelių. Minėtoje EC mašinoje AĮ su MJ turi $25 \cdot 10^6$ baitų talpą, juostos plotis 12,7 mm, ilgis 750 m, juostos judėjimo greitis – 2 m /s. Paprastai ESM komplektuojamos keliais AĮ su MD (2 – 6) ir su MJ (4 – 8).

AĮ su feritinėmis šerdimis buvo naudojamos operatyviosios ir nuolatinės atminties įrenginiuose. Dažniausiai buvo naudojamos miniatiūrinės žiedinės feromagnetinės šerdys su stačiakampe histerezės kilpa. Iš jų buvo surenkamos matricos, turinčios 2048 arba 4096 šerdis, o matricos jungiamos į kubus, turinčius 8–64 matricas. Dabar tokio tipo OAĮ ir NAĮ pakeitė puslaidininkinė atmintis.

§5. Puslaidininkiniai AĮ

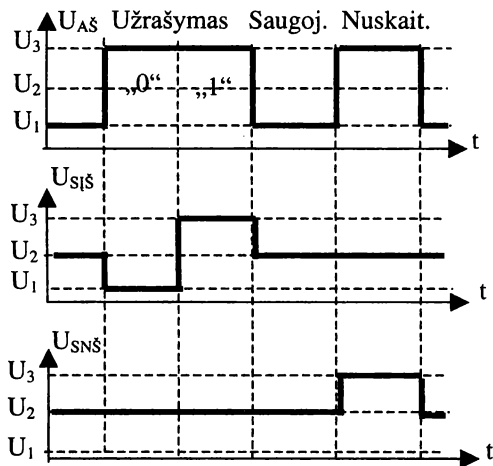
Kaip minėta, šiuolaikinėse ESM vis labiau įsigali puslaidininkiniai AĮ, nes puslaidininkinė atmintis yra pranašesnė už kitus AĮ: ji greitesnė, patikimesnė, ekonomiškesnė, turi mažesnius matmenis, išorinių ryšių skaičių ir atstumus. Gaminant serijiniu būdu ir tobulėjant gamybos technologijai, kur kas sumažėja kaina. Tačiau ji turi ir trūkumų – informacijai saugoti naudojama energija ir ji gali išsitrinti nutrūkus maitinimui.

Paprasčiausias puslaidininkinio AĮ elementas (ląstelė) gali turėti schemą, kuri parodyta 5.1 pav. Panaudojant duemiterinius tranzistorius



5.1 pav.

T_1 ir T_2 , surenkama bistabili ląstelė, kuri valdoma per emiterių grandines. Į adresinę šyną AŠ ir skiltinę įrašo šyną SĮŠ gali būti paduodami trijų lygių $U_3 > U_2 > U_1$ valdantieji signalai. Į skiltinę nuskaitymo šyną SNŠ nuolat paduotas lygis U_2 . Ląstelė dirba pagal laiko diagramą, parodytą 5.2 pav.



5.2 pav.

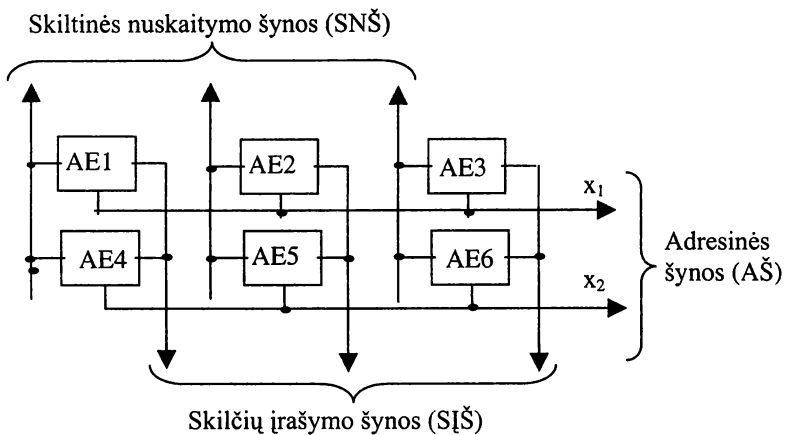
Užrašant „0“, į AŠ paduodamas U_3 lygio, į SĮŠ – U_1 lygio signalai. Tokiu atveju emiteriai 2 ir 4 turės aukštesnį „+“ potencialą negu emiteriai 1 ir 3, todėl jie negalės lemti bistabilios ląstelės būsenos. Kadangi emiteris 1 turės aukštesnį „+“ potencialą U_2 negu emiteris 3 (U_1), tranzistorius T_2 atsidarys, T_1 užsidarys. Tegul tai atitinka ląstelės 0.

Užrašant „1“, į AŠ ir SĮŠ paduodama įtampa U_3 . Dabar 3 emiterio „+“ įtampa U_3 didesnė už 1 emiterio U_1 , todėl atsidaro T_1 ir užsidaro T_2 . Tai atitinka ląstelės 1.

Norint išsaugoti įrašytą informaciją, reikia pereiti į saugojimo režimą. Tam į AŠ paduodamas U_1 lygis. Srovė, tekėjusi per atdaro tranzistoriaus emiterį 1 arba 3, persijungia į atitinkamus emiterius 2 arba 4, o įtampa SĮŠ nusistovi U_2 . Ląstelės būseną išlieka (vienas ląstelės tranzistorius atidarytas, kitas – uždarytas), informacija saugoma.

Nuskaitant informaciją, į AŠ paduodama U_3 . Kadangi emiteriai 1 ir 3 turėjo žemesnį potencialą negu 2 ir 4, tai įvyks atvirkščias srovių persijungimas iš emiterių 2 ir 4 į emiterius 1 ir 3. Padidėjus srovėms, tekančioms abiem skiltinėmis šynomis, šiek tiek išsaugys įtampos ant šių emiterių. Įrašyta informacija nuskaitoma nuo SNŠ. Jei buvo įrašytas 1 (T_1 atidarytas), šioje šynoje įtampa padidėja; jei buvo įrašytas 0 (atidarytas T_2), įtampa nepakinta.

Atminties įrenginys su tokiomis puslaidininkinėmis ląstelėmis vadinamas dvimačiu, nes ląstelių būseną lemia dvi šynos – AŠ ir SĮŠ. Toks AĮ organizuojamas pagal 5.3 pav. schemą. Adresinės šynos išrenka atminties elementų (AE) eilutę, signalai ant SĮŠ nustato, kas turi būti įrašyta į kiekvieną išrinktosios eilutės AE, o nuskaitant ant SNŠ atsiras signalai nuo išrinktosios eilutės, atitinkantys šios eilutės AE būsenas.



5.3 pav.

Tokie AI gaminami didžiųjų integralinių schemų pavidalu, jų talpa būna $1024 + 8192$ bitų, kreipimosi laikas $100 + 200$ ns.

XVI. PROCESORIAI IR MIKROPROCESORIAI

§1. Procesoriai, jų evoliucija

Procesorius (skaičiuoklis) yra centrinis skaitmeninės ESM įrenginys, kuris pagal programą atlieka visas su uždavinio sprendimu susijusias operacijas. Jis susideda iš dviejų pagrindinių dalių: operacinės dalies (aritmetinio loginio įrenginio), kurioje atliekamos operacijos su skaičiais (kodais), ir valdymo dalies, kurioje formuojami operacijų atlikimo proceso valdymo signalai.

Šia proga verta trumpai prisiminti ESM raidos etapus. ESM atsirado XX a. 5 dešimtmetyje, o 6 dešimtmetyje pradėtos naudoti moksliniuose tyrimuose, gamyboje ir valdyme. Pirmoji skaitmeninė ESM ENIAC pagaminta JAV 1946 m. Pagrindiniai elementai – elektroninės lempos, standartinės radijo detalės, sumontuotos erdvinio montažu. Tokios mašinos vadinamos I kartos ESM. Jų atminties talpa retai siekė kelias dešimtis kilobaitų, darbo greitis – keli šimtai tūkstančių operacijų per sekundę. 1948–1965 m. buvo gaminamos II kartos mašinos. Jose pagrindiniai elementai buvo puslaidininkiai, į schemas sujungti spausdintu montažu. Nuo 1965 m. imta gaminti III kartos mašinas, kurių pagrindiniai elementai – integralinės schemas, sujungtos spausdintu, paprastai daugiasluoksniu, montažu. Šių ESM darbo greitis pasiekė milijonus operacijų per sekundę, atminties talpa – dešimtis milijonų baitų. III kartos mašinos buvo pradėtos gaminti šeimomis (gamomis), turinčiomis bendrą programinę įrangą. XX a. 8 - ajame dešimtmetyje imtos gaminti IV kartos ESM, kurių pagrindiniai elementai – didelės integracijos (> 1000 aktyviųjų elementų l kristale) schemas, dirbančios superdideliu dažniu.

Procesorius, kaip atskiras ESM blokas, pirmą kartą panaudotas II kartos ESM. Kai operacinė dalis buvo sukonzentruota viename bloke, pavyko gerokai suprastinti mašinos struktūrą ir įrenginių skaičių, sumažinti mašinos masę ir matmenis, pagreitinti jos darbą ir ekonomiškumą.

III kartos ESM aparatūros ekonomijos klausimas jau nebuvo toks svarbus, tad atsisakyta universalios operacinės dalies konstravimo principo ir procesorius suskirstytas į blokus, skirtus tam tikros grupės operacijoms atlikti: operacijoms su fiksuoto kablelio dvejetainiais skaičiais, operacijoms su slankaus kablelio dvejetainiais skaičiais,

operacijoms su dešimtainiais skaičiais, loginėms operacijoms. Taip pat procesorius turi savo superoperatyvią atmintį, registrus ir kt.

IV kartos mašinos naudojami mikroprocesoriai (MP). Tai procesorius, funkcionuojantis pagal į AĮ įrašytą programą, o ypatingas tuo, kad sukonstruotas iš vienos arba kelių DIS (didžiųjų integralinių schemų – mikroschemų, viename kristale turinčių tūkstančius tranzistorių). Šiuolaikiniuose MP suformuojama iki 50 milijonų tranzistorių. Pirmieji MP pasirodė 1971m. Pirmasis MP „Intel 4004“ per taktą apdorodavo 4 bitus duomenų ir veikė 100 kHz taktiniu dažniu. 1972 m. „Intel“ išleido 8 bitų procesorių „Intel 8008“. Tas MP ir firmos „Datapoint“ jam sukurtas instrukcijų rinkinys tapo šių dienų asmeninių kompiuterių „x86“ architektūriniu pagrindu. Vėliau MP buvo nuolatos tobulinami: 1974 m. pasirodė „Intel 8080“, 1981 m. – „Intel 8088“ ir t.t. Pagrindiniai duomenys apie šiuos mikroprocesorius pateikti 1 lentelėje. Jie pakankamai vaizdžiai iliustruoja MP evoliuciją.

1 lentelė

MP charakteristikos	Bitų skaičius			
	4	8	16	32
Pasirodymo metai	1971	1972	1974	1981
Elementų skaičius 1 kristale	2300	10 000	70 000	450 000
Taktinis dažnis MHz	0,1	1 – 2	2 – 5	10 – 20
Santykinė kaina	1	5	50	250

Suprantama, MP gamina ne tik „Intel“ firma. Plačiausiai žinomos firmos – minėtoji „Intel“, „Motorola“, „NS“ (National Semiconductor), „Zilog“ ir kt. Labai dažnai skirtingų firmų MP gaminami pagal skirtingas technologijas. Taikomos gamybos technologijos ir jų lyginamieji (santykiniai) duomenys pateikti 2 lentelėje.

Technologija	Vidutinis operacijos atlikimo laikas	Naudojama galia	Integracijos laipsnis	Patikimumas	Kaina	Technologijos „amžius“
pMOP (metalas-oksidas-puslaidininkis su p kanalu)	1	0,7	0,3	0,5	0,2	1
nMOP (metalas-oksidas-puslaidininkis su n kanalu)	0,5	0,6	0,5	0,7	0,3	0,8
KMOP (technologija su komplementariomis schemomis)	0,4	0,2	1	1	0,5	0,5
TTL-Šotki (bipoliarinė technologija su tranzistorine logika ir Šotkio diodais)	0,3	0,9	0,2	0,3	0,9	0,5
ESL (emiteriais susieta logika)	0,2	1	0,1	0,2	1	0,3
I ² L (integralinė injekcinė logika)	0,8	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4

Kaip pasirenkama gamybos technologija pagal MP keliamus reikalavimus, iliustruoja 3 lentelė.

3 lentelė

Sistemai keliami reikalavimai	Tinkama technologija
Nedidelė kaina	pMOP, nMOP, KMOP
Maži matmenys	pMOP, nMOP, KMOP
Didelis greitaiegiškumas	ESL, TTL-Šotki
Maža naudojama galia	KMOP
Didelis patikimumas	nMOP, KMOP
Paplitimo laipsnis	pMOP, nMOP
Suderinamumas su TTL	TTL-Šotki, KMOP
Suderinamumas su KMOP	TTL-Šotki, KMOP
Suderinamumas su ESL	ESL
Didelės atminties talpos DIS	nMOP, KMOP
Išplėtotas programinis aprūpinimas	nMOP, KMOP

Dabar mikroprocesoriai yra pakankamai pigūs, mažų matmenų, labai ekonomiškai ir naudojami ne tik ESM, bet įvairiausiose srityse kaip valdymo įrenginiai (pramonėje, ryšiuose, transporte ir kt.).

MP pakeitė skaitmeninių įrenginių projektavimo pobūdį. Kai panaudojami MP, užuot kūrus schemas, sudaromos programos. Tada lengva pakeisti MP veikimo būdą – užtenka pakeisti programą. Kadangi MP atliekamos funkcijos susijusios su daugybės komandų

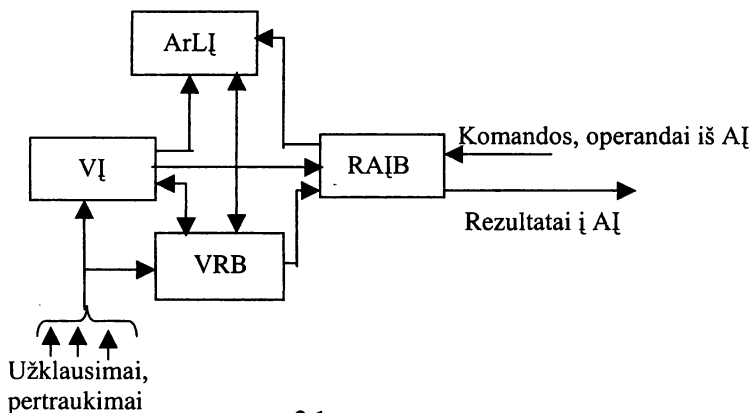
vykdymu, įrenginiai, kuriuose naudojami procesoriai, yra palyginti lėtaeigiai. Kai reikia didelio veikimo greičio, kai kurias programas komandas geriau keisti tam tikru būdu sujungtais schemas elementais, vadinamais aparatūrinės logikos elementais. Dabar mikroprocesoriai naudojami taip plačiai, kad jų įtaką kai kada vadina revoliucija technikoje.

§2. Bendrosios žinios apie procesorius

Procesorius yra pagrindinė ESM dalis, tiesiogiai dalyvaujanti apdorojant duomenis ir vadovaujanti to apdorojimo procesui. Priklausomai nuo vykdomos funkcijos procesoriaus gali būti centrinis, valdymo ir t.t. Jis automatiškai vykdo operacijų (aritmetinių, loginių, informacijos keitimosi su kitais ESM įrenginiais ir t.t.), numatytų programoje, seką. Procesorius yra sujungtas su valdymo pultu, AI ir periferiniais įrenginiais.

Jis dešifruoja ir vykdo programos komandas, kreipiasi į atmintį, organizuoja ryšio kanalų ir periferinių įrenginių darbą, priima ir apdoroja darbo metu gaunamą informaciją.

Procesorius visų pirma susideda iš aritmetinio loginio įrenginio (ArLI) ir valdymo įrenginio (VI). Į jo sudėtį taip pat gali įeiti superoperatyvi greitaeigė atmintis, pertraukimų blokas, atminties apsaugos blokas, darbo kontrolės ir procesoriaus diagnostikos blokas ir kt.



2.1 pav.

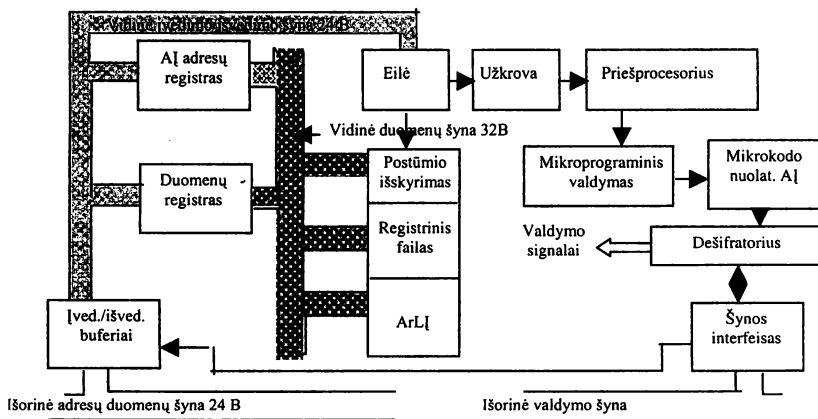
Supaprastinta procesoriaus blokinė schema parodyta 2.1 pav. Šiuo atveju procesorių sudaro aritmetinis loginis įrenginys ArLĮ, valdymo įrenginys VĮ, valdančiųjų registrų blokas VRB ir ryšio su AĮ blokas RAĮB.

VĮ garantuoja automatinį programos vykdymą, priverstinai koordinuodamas visos mašinos darbą.

RAĮB yra procesoriaus interfeisas (standartizuotos ryšio tarp įrenginių priemonės, susidedančios iš informacijos perdavimo šynų ir unifikotų elektroninių schemų, valdančių informacijos perdavimą šynomis).

ArLĮ skirtas aritmetinėms ir loginėms operacijoms atlikti. Priklausomai nuo savo struktūros ir darbo organizavimo ArLĮ gali būti nuoseklus, lygiagretaus ir mišraus veikimo. ArLĮ pagrindą sudaro sumatoriai ir registrai.

Realiai MP schemas yra gerokai sudėtingesnės ir labai skirtingos – nuo to priklauso MP galimybės. Kaip pavyzdį (2.2 pav.) pateikiame mikroprocesoriaus NS (firma National Semiconductor) 32B procesoriaus funkcinę schemą.



2.2 pav.

§3. Pagrindinės mikroprocesorių techninės charakteristikos

Paprasčiausių operacijų atlikimo laiką lemia minimalus dviejų operandų, esančių registruose, sudėties laikas. Jeigu vienas ar abu dedamieji yra ne registruose, o AĮ, tai į tą laiką įskaitomas dedamųjų persiuntimo į registrus laikas ir gautos sumos įrašymo AĮ laikas. Esant ribotam registrų skaičiui, prireikia papildomo laiko registrams išvalyti. Kai kuriuose MP paprasčiausių operacijų laikas išauga sudedant neigiamuosius skaičius. Daugumos šiuolaikinių MP operacijos atlikimo laikas yra nuo kelių šimtų ns iki kelių μ s.

Komandų skaičius charakterizuoja MP funkcinių lankstumą.

Bendrosios paskirties registrai yra programiškai pasiekiami darbiniai MP blokai, kurie gali būti panaudojami operando operatyviam laikymui, baziniam adresui saugoti, kaip panaudojimo skaitiklis, modifikatorius. Bendrosios paskirties registrų skaičius tiesiogiai veikia MP greitaiegiškumą. Kai kuriuose šiuolaikiniuose MP registrų skaičius siekia 128.

Viena svarbiausių MP charakteristikų yra tiesioginės atminties adresavimo galimybė, t.y. darbas tokiu režimu, kai komandos adresinė dalis turi tiesioginį adresą, nusakantį atminties ląstelės, saugančios reikiamą operandą, vietą. Toks režimas skiriasi nuo netiesioginio adresavimo režimo, kai iš pradžių kreipiamasi į tą atminties dalį, kur saugomi operandų adresai, o tik po to ieškoma paties operando.

Didžiausia adresuojama atminties talpa gali siekti iki 16 Mbaitų.

MP naudojama galia yra parametras, priklausantis nuo MP gamybos technologijos, elementų integracijos laipsnio ir schemos topologijos. Nuo to parametro priklauso MP eksploatacijos šiluminis režimas ir MP patikimumas. Šiuolaikiniuose MP didžiausia išskleidoma galia yra apie 1,5 W. Geriausią šį parametą turi MP, pagaminti pagal KMOP technologiją, – MP galia neviršija 50 mW.

Maitinimo įtampos dydis ir lygiai parodo MP eksploataavimo patogumą. Patogiausi MP, maitinami vieno lygio įtampa, sakykime, $U = 5$ V. Tačiau schemos, sprendžiamų uždavinių sudėtingumas, siekimas išplėsti MP funkcines galimybes priverčia kai kuriems MP naudoti maitinimo šaltinius, turinčius 2 – 3 maitinimo įtampos lygius.

Komandos ilgis atitinka dvejetainių skilčių (bitų) kiekį, būtina atliekamai komandai suformuoti. Komandos gali būti to paties ilgio kaip ir MP apdorojami informaciniai žodžiai arba keliskart (1,5, 2 ar 3)

ilgesnės. Paprastai trumpesnės komandos atliekamos greičiau. Sudėtingesnėms operacijoms, pavyzdžiui, su dviem operandais, užrašytais AĮ, patogiau naudotis ilgesnėmis komandomis. Tad galimybė naudoti įvairaus ilgio komandas rodo MP skaičiavimo organizavimo lankstumą.

Pertraukimas reiškia laikiną vykdomos programos sustabdymą, kad būtų pradėta vykdyti kita, aukštesnio prioriteto, programa, kurią užbaigus grįžtama prie pertrauktosios programos vykdymo. Pertraukimų galimybė didina MP darbo efektyvumą.

Labai svarbi yra tiesioginio priėjimo prie atminties galimybė. Ji leidžia atlikti informacijos įvedimo ir išvedimo operacijas nepriklausomai nuo MP darbo. Nesant tiesioginio priėjimo, MP turi apdoroti specialią duomenų įvedimo ir išvedimo paprogramę (dirbti programuojamo įvedimo ir išvedimo režimu).

Labai dažnai, norint „idealių“ MP parametrų, vienoje ESM panaudojami keli MP, kurių 1 – 2 būna pagrindiniai, o kiti – pagalbiniai.