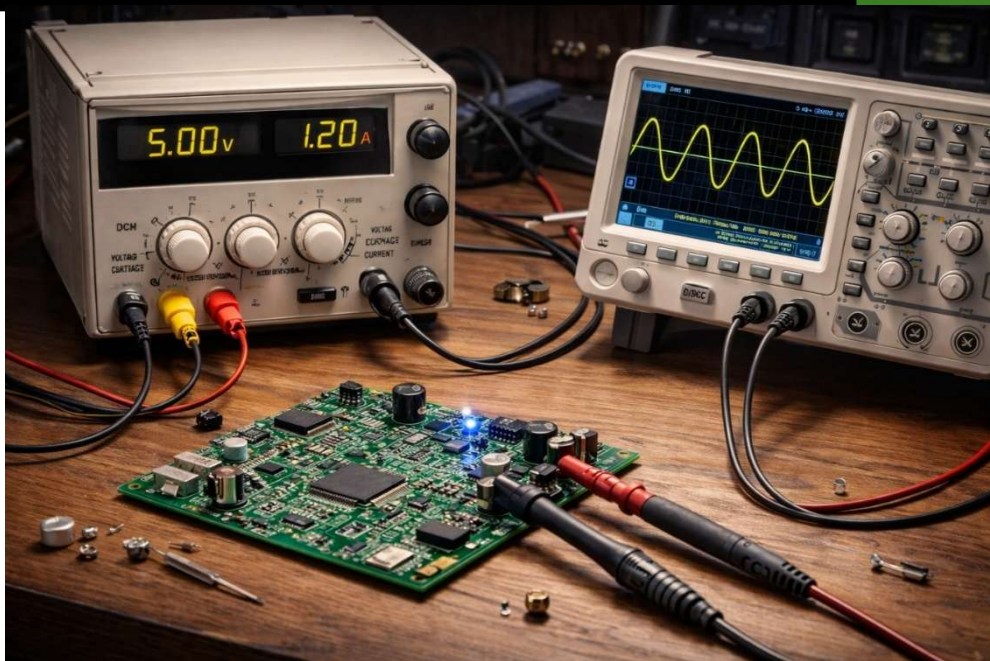


2026

PRAKTINĖ ELEKTRONIKA



Skirta III – IV gimnazijos
klasių mokiniams

PRAKTINĖ ELEKTRONIKA

Skirta III–IV gimnazijos klasių mokiniams

Parengė: Vaidas Mikalajūnas

Vilnius, 2026

Mokomoji medžiaga surinkta, susisteminta ir adaptuota iš įvairių viešai prieinamų šaltinių švietimo tikslais. Leidinys skirtas naudoti mokymo(si) procese ir neplatinamas komerciniais tikslais.

Visos leidinyje pateiktos lentelės ir schemos sudarytos autoriaus. Dalis iliustracijų sukurta naudojant generatyvinio dirbtinio intelekto priemones ir autoriaus pritaikyta mokomajai medžiagai. Kai kurios elektronikos komponentų iliustracijos paimtos arba adaptuotos iš gamintojų techninių aprašymų.

© 2026 Vaidas Mikalajūnas · sudarymas ir išdėstymas

TURINYS

TRUMPINIAI	8
1. ĮŽANGA.....	10
2. ELEKTROS SROVĖ IR ĮTAMPA	12
2.1 Elektros krūvis.....	12
Elektros krūvio tvermės dėsnis.....	13
2.2 Elektros srovė.....	15
2.3 Elektros srovės stipris.....	16
2.4 Elektrovara ir įtampa.....	18
2.5 Elektrinė varža ir Omo dėsnis	20
3. ENERGIJOS ŠALTINIAI	26
3.1 Idealūs įtampos ir srovės šaltiniai	26
3.2 Transformatorius.....	30
3.3 Nuolatinės srovės šaltiniai	34
4. PASYVINIAI ELEKTRONIKOS KOMPONENTAI	37
4.1 Rezistorius	37
Išvadinių rezistorių spalvinis žymėjimas	38
Paviršinio montavimo rezistorių žymėjimas	39
Rezistorių paklaida	42
Rezistorių galia.....	43
Rezistoriaus temperatūrinis koeficientas.....	44
Specialūs rezistoriai	45
Rezistorių jungimas	46
Rezistoriaus energija	49
Varžinis daliklis	50
4.2 Fotorezistorius	52
4.3 Kondensatoriai.....	54
Kondensatorių jungimas	57
RC grandinės.....	59
Kondensatoriuose sukauptą energiją	62
Kondensatorių tipai	63
4.4 Induktorius.....	64

Induktyvumas	64
Induktorių jungimas.....	66
RL grandinės	67
Induktorių tipai	70
4.5 Varistoriai	72
Veikimo principas.....	72
Varistorių panaudojimas.....	73
4.6 Temperatūros jutikliai	74
NTC termistoriai	75
PTC termistoriai	77
RTD jutikliai	79
Termoporiniai jutikliai	81
Integriniai temperatūros jutikliai.....	84
5. KOMUTACINIAI KOMPONENTAI	89
5.1 Mygtukai	90
5.2 Jungikliai	91
5.3 Elektromagnetinė relė	93
6. AKTYVINIAI ELEKTRONIKOS KOMPONENTAI	95
6.1 Diodai	95
Diodo sandara ir veikimo principas	96
6.2 Stabilitronai	98
Stabilitrono veikimo principas.....	98
Stabilitrono jungimas grandinėje.....	100
6.3 Šviesos diodai (šviestukai)	102
Šviesos diodo veikimo principas	102
LED voltamperinė charakteristika	103
6.4 Tranzistoriai	107
Dvipoliai tranzistoriai.....	107
Darlingtono tranzistoriai	110
Lauko tranzistoriai	112
6.5 Fototranzistoriai	118
Sandara	118
Veikimas	118

6.6	Simistoriai.....	121
6.7	Optoporos.....	124
	Tipinis optoporos jungimas	126
6.8	Kieto kūno relės.....	127
7.	INTEGRINIAI GRANDYNAI	131
7.1	Operaciniai stiprintuvai.....	131
	Invertuojantis stiprintuvas	134
	Neinvertuojantis stiprintuvas	136
	Įtampos kartotuvai.....	137
7.2	Komparatoriai ir Šmito trigeriai.....	138
7.3	Loginiai elementai	141
7.4	Keitikliai ADC/DAC	144
	Analogas-kodas keitiklis (ADC)	144
	Kodas-analogas keitiklis (DAC)	145
7.5	Įtampos stabilizatoriai ir keitikliai	146
	Linijiniai stabilizatoriai	146
	LM7805 stabilizatorius.....	148
	LM317 stabilizatorius.....	149
	Impulsiniai DC/DC keitikliai	151
	Žeminantysis (Buck) keitiklis	151
	Aukštinantysis Boost keitiklis	154
	Buck-boost keitikliai	157
7.6	Mikrovaldikliai	158
8.	PRAKTINIS SCHEMŲ NAGRINĖJIMAS	164
8.1	Valdiklio sandara.....	164
8.2	Maitinimo šaltiniai	165
8.3	Procesoriaus parinkimas	169
8.4	Ryšio sąsajos	174
	RS-485 sąsaja	175
	Ethernet sąsaja	176
8.5	Įėjimai ir išėjimai.....	180
	Filtrų pradmenys	181
	Skaitmeniniai įėjimai (angl. DI – digital input)	183

Skaitmeniniai išėjimai (angl. DO – digital output).....	185
Analoginiai įėjimai (angl. AI – analog input)	188
Analoginiai išėjimai (angl. AO – analog output).....	191
9. DARBO PRIEMONĖS.....	196
Lydmetalio	197
Flusas	200
Lydmetalio šalinimas.....	201
Dūmų nutraukimas.....	202
Atsuktuvai	202
Pincetas.....	203
Kąstukai (kandiklis)	204
Multimetras	205
Osciloskopas	209
Laboratorinis maitinimo šaltinis.....	210
10. LITAVIMAS	212
Darbo vietos paruošimas	212
Litavimo eiga	212
Jungties kokybė	213
SMD litavimo pagrindai	213
11. SCHEMŲ SIMULIACIJA	215
12. LABORATORINIAI DARBAI.....	216
13. Baigiamasis žodis.....	220

TRUMPINIAI

ESD apsauga – (*angl. electrostatic discharge*) statinės iškvovos apsaugos priemonės.

EVJ – elektrovaros jėga arba elektrovara, tai šaltinio gebėjimas kurti elektros srovę. Angliškoje literatūroje sutinkamas terminas EMF (*angl. electromotive force*).

LED – (*angl. Light Emitting Diode*) šviesos diodas (šviestukas) – puslaidininkinis diodas, skleidžiantis šviesą, kai juo teka tiesioginė srovė.

SMD – (*angl. surface mount device*) paviršinio montavimo komponentai.

PTH – (*angl. plated through hole*) metalizuota kiaurymė.

THT – (*angl. through hole technology*) išvadiniai komponentai, kurie montuojami kiaurymėje.

DC/DC – (*angl. direct current to direct current*) nuolatinės įtampos keitiklis, keičiantis vieną nuolatinės įtampos lygį į kitą, dažniausiai realizuojamas impulsine schema ir vadinamas impulsiniu keitikliu.

BUCK – Žeminantysis impulsinis keitiklis.

BOOST – Aukštinantysis impulsinis keitiklis.

TTL - (*angl. Transistor-Transistor Logic*) tranzistorinė-tranzistorinė logika. Esant 5 V maitinimui, įėjimo įtampa iki 0,8 V laikoma žemu lygiu (loginis 0), o nuo 2 V – aukštu lygiu (loginis 1). Tarpinis diapazonas nėra garantuotas.

PCB – (*angl. printed circuit board*) spausdintinė plokštė, ant kurios lituojami komponentai.

CV – (*angl. Constant Voltage*) pastovios įtampos režimas: šaltinis palaiko nustatytą įtampą, o srovė priklauso nuo apkrovos.

CC – (*angl. Constant Current*) pastovios srovės režimas: šaltinis palaiko nustatytą srovę, o įtampa prisitaiko pagal apkrovą. Pasiekus srovės ribą, laboratorinis šaltinis iš CV automatiškai pereina į CC.

SPST – (*angl. Single Pole Single Throw*) vienpolis vienpadėtis jungiklis, įjungia arba atjungia vieną grandinę.

SPDT – (*angl. Single Pole Double Throw*) vienpolis dvipadėtis jungiklis, perjungia vieną grandinę tarp dviejų kontaktų.

DPST – (*angl. Double Pole Single Throw*) dvipolis vienpadėtis jungiklis, vienu metu įjungia arba atjungia dvi atskiras grandines.

DPDT – (*angl. Double Pole Double Throw*) dvipolis dvipadėtis jungiklis, vienu metu perjungia dvi atskiras grandines tarp dviejų kontaktų.

IP – (*angl. Ingress Protection*) korpuso apsaugos klasė, žymima dviem skaitmenimis: pirmasis – apsauga nuo dulkių, antrasis – nuo vandens (pvz., IP67).

CTR – (*angl. Current Transfer Ratio*) optoporos srovės perdavimo koeficientas – išėjimo ir įėjimo srovių santykis, išreiškiamas procentais.

SSR – (*angl. Solid State Relay*) kieto kūno (puslaidininkinė) relė – elektroninis jungiklis be judančių dalių, valdomas mažos galios signalu.

ADC – (*angl. Analog to Digital Converter*) analogas–kodas keitiklis, analoginį signalą paverčiantis skaitmeniniu kodu.

DAC – (*angl. Digital to Analog Converter*) kodas–analogas keitiklis, skaitmeninį kodą paverčiantis analogine įtampa arba srove.

LDO – (*angl. Low Dropout Regulator*) linijinis stabilizatorius, veikiantis, kai įėjimo įtampa tik nedaug (tipiškai 0,1–0,5 V) didesnė už išėjimo.

FLASH – neišsitrinanti atmintis, kurioje saugoma mikrovaldiklio programa; turinys išlieka išjungus maitinimą.

RAM – (*angl. Random Access Memory*) darbinė atmintis laikiniams duomenims programos vykdymo metu; išjungus maitinimą turinys dingsta.

EEPROM – (*angl. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) elektriškai perrašoma neišsitrinanti atmintis nustatymams ir kalibravimo duomenims saugoti, o įrašymo ciklą skaičius ribotas.

1. ĮŽANGA

Sveiki atvykę į nuostabų elektronikos pasaulį! Šis vadovėlis skirtas III–IV gimnazijos klasių mokiniams, kurie nori susipažinti su elektronikos pagrindais, suprasti, kaip veikia svarbiausi komponentai ir išmokti juos taikyti kuriant realias grandines. Elektronika yra visur aplink mus – nuo paprasčiausio telefono įkroviklio iki sudėtingų kompiuterių, medicinos prietaisų ar pramoninių sistemų. Suprasdami elektronikos dėsnius, jūs atveriate duris į kūrybą, praktinius sprendimus ir inovacijas.

Vadovėlio tikslas – suteikti tvirtus teorinius pagrindus ir ugdyti praktinius įgūdžius: atpažinti pagrindinius elektronikos komponentus, suprasti jų veikimo principus, mokėti apskaičiuoti reikiamus parametrus ir sujungti elementus į veikiančias schemas. Kiekvienoje temoje rasite aiškiai pateiktą teoriją, iliustruotus pavyzdžius, skaičiavimus ir schemas, kurios padės žinias pritaikyti praktiškai.

Elektronika – tai mokslo ir technikos sritis, nagrinėjanti elektrinių signalų ir energijos valdymą naudojant elektroninius komponentus. Šiuolaikinės elektroninės sistemos dažniausiai atlieka tris pagrindinius žingsnius: priima informaciją iš aplinkos, ją apdoroja ir pagal nustatytas taisykles suformuoja atsaką. Informacija į sistemą dažniausiai patenka elektrinio signalo pavidalu, kuris gali būti stiprinamas, filtruojamas, lyginamas ar paverčiamas kitu signalu. Galutinis rezultatas gali būti labai paprastas (pavyzdžiui, įjungta lemputė) arba sudėtingas (paleistas variklis, valdomas įrenginys ar perduoti duomenys kitai sistemai). Mokydamiesi elektronikos jūs išmoksite ne tik suprasti, kaip veikia tokie sprendimai, bet ir patys juos kurti.



1.1 pav. Elektronikos sistemos struktūra

1.1 paveiksle matyti, kad bet kuri sistema susideda iš trijų pagrindinių dalių: įėjimo, apdorojimo ir išėjimo grandžių. Įėjimo dalis priima signalą iš aplinkos (mygtuko paspaudimą, jutiklio matavimą, ryšio linijos signalą). Apdorojimo dalyje signalas apdorojamas pagal tam tikrą logiką, o išėjimo dalis suformuoja poveikį aplinkai – valdo apkrovą arba perduoda informaciją toliau.

Kaip naudotis vadovėliu

Vadovėlis suskirstytas į atskiras dalis, kiekviena iš jų nagrinėja skirtingas elektronikos sritis. Jei esate pradedantis, rekomenduojama skaityti nuosekliai, nes vėlesnės temos remiasi ankstesnėmis žiniomis, tačiau galima keliauti tiesiai prie schemų nagrinėjimo, vėliau grįžtant prie atskirų komponentų.

Vadovėlyje pateikiama skirtingo sudėtingumo medžiaga – nuo pagrindinių elektronikos dėsnių ir komponentų iki sudėtingesnių schemų, mikrovaldiklių bei ryšio sąsajų. Nebūtina visas temas iš karto suprasti vienodai išsamiai: pradžioje svarbiausia perprasti pagrindinius veikimo principus, o prie sudėtingesnių temų galima grįžti vėliau, įgijus daugiau teorinių žinių ir praktinės patirties.

Kiekviename skyriuje rasite:

- Teorinį paaiškinimą – kas yra komponentas ir kaip jis veikia.
- Skaičiavimo pavyzdžius – konkrečius uždavinius su sprendimais.
- Schemas ir diagramas – vaizdinę medžiagą, padedančią suprasti veikimo principus.
- Praktinius patarimus – kaip teisingai naudoti komponentus.
- Kontrolinius klausimus – savikontrolei ir žinių įtvirtinimui.

Saugos reikalavimai

Darbas su elektronika gali būti pavojingas, jei nesilaikoma saugos taisyklių. Prieš pradedant bet kokius praktinius darbus, būtina įsisavinti šias pagrindines taisykles:

1. Visada atjunkite maitinimą prieš atliekant pakeitimus grandinėje.
2. Niekada nelieskite plikų laidų, kai grandinė yra įjungta.
3. Naudokite tinkamus matavimo prietaisus (multimetras, osciloskopas).
4. Litavimo metu dėvėkite apsauginius akinius ir naudokite dūmų ištraukėją, dirbkite gerai vėdinamoje patalpoje.
5. Darbai su elektros tinklo įtampa atliekami tik prižiūrint mokytojai ir naudojant tam skirtą izoliuotą įrangą.
6. Naudokite ESD apsaugą* dirbdami su jautriais komponentais.

Paaiškinimas

*ESD apsauga - (angl. *electrostatic discharge*) statinės iškvos apsaugos priemonės.

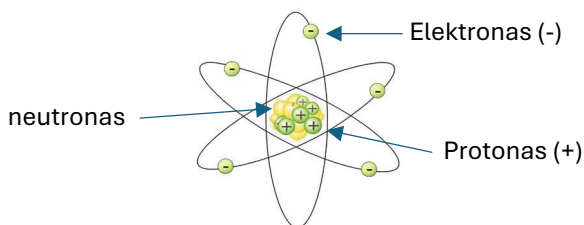
2. ELEKTROS SROVĖ IR ĮTAMPA

Elektros grandinės veikimą apibūdina keli tarpusavyje susiję fizikiniai dydžiai. Norint suprasti, kodėl grandine teka srovė, pirmiausia reikia žinoti, kas yra elektros krūvis, kaip jis juda laidininkuose ir kokios sąlygos būtinos kryptingam krūvininkų judėjimui atsirasti. Elektros srovė nėra vien tik elektronų judėjimas – jos stiprumas parodo, kiek elektros krūvio per tam tikrą laiką pereina laidininko skerspjūviu.

Šiame skyriuje bus nuosekliai pereinama nuo medžiagos sandaros ir elektros krūvio prie pagrindinių elektros grandinės dydžių: srovės stiprio, elektrovaros, įtampos ir elektrinės varžos. Taip pat bus nagrinėjamas Omo dėsnis, susiejantis įtampą, srovę ir varžą. Supratus šiuos dydžius bus galima ne tik paaiškinti paprastos elektros grandinės veikimą, bet ir apskaičiuoti joje tekančią srovę, įtampos kritimą bei parinkti tinkamos varžos elementus.

2.1 Elektros krūvis

Visa mus supanti medžiaga sudaryta iš atomų (2.1.1 pav.). Kiekvienas atomas turi branduolį, kuriame yra protonai ir neutronai, o aplink branduolį juda elektronai. Protonai turi teigiamą elektros krūvį, elektronai – neigiamą, o neutronai krūvio neturi.



2.1.1 pav. Atomo sandara

Įprastomis sąlygomis atomuose protonų ir elektronų skaičius yra vienodas, todėl atomas yra elektriškai neutralus. Tačiau kai kuriose situacijose elektronai gali atsiskirti nuo atomų arba persiskirstyti, tuomet kūnai tampa elektriškai įkrauti:

- Jei kūnas netenka dalies elektronų, jis tampa teigiamai(+) įkrautas.
- Jei kūnas įgyja papildomų elektronų, jis tampa neigiamai(-) įkrautas.

Metaluose elektros krūvį perneša elektronai, nes jie yra lengvi ir silpnai surišti su atomais. Protonai yra atomų branduoliuose ir praktiškai nejuda.

Elektros krūvis žymimas raide q (sutinkamas ir Q žymėjimas) ir matuojamas kulonais (C).

Vienas kulonas atitinka $\sim 6,24 \cdot 10^{18}$ elektronų krūvį.

Elektros krūvio tvermės dėsnis

Uždaroje sistemoje bendras elektros krūvis nekinta. Elektros krūvis negali būti sukurtas ar sunaikintas – jis gali tik persiskirstyti tarp kūnų.

Papildoma informacija

Elektros krūvis yra diskretus, t. y. jis negali turėti bet kokios reikšmės, o egzistuoja tik tam tikrais kiekiais. Mažiausias galimas elektros krūvis vadinamas elementariuoju krūviu.

Elementarusis krūvis yra vieno elektrono elektros krūvis. Elektronas turi neigiamą elementarųjį krūvį, o protonas – tokio pat dydžio, bet teigiamą krūvį.

Elementariojo krūvio modulis yra:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Tai reiškia, kad bet kurio kūno elektros krūvis visada yra elementariojo krūvio kartotinis.

Todėl elektronų skaičius, sudarantis vieną kuloną, apskaičiuojamas taip:

$$N = \frac{1 \text{ C}}{e} \approx 6,24 \cdot 10^{18}.$$

Tai reiškia, kad vienam kulonui elektros krūvio reikia maždaug 6,24 kvintilijono elektronų.

Elektronikoje naudojami ne tik standartiniai SI sistemos dydžiai, žemiau pateikiama lentelė.

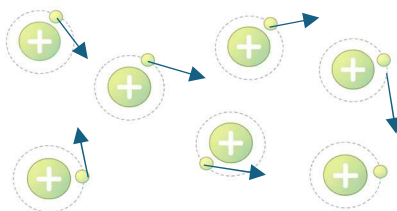
2.1.1 lentelė. Daugikliai naudojami elektronikoje

Daugiklis	Priešdėlis	Žymėjimas	Pavadinimas
10^{18}	eksa	E	kvintilijonas
10^{15}	peta	P	kvadrilijonas
10^{12}	tera	T	trilijonas
10^9	giga	G	milijardas
10^6	mega	M	milijonas
10^3	kilo	k	tūkstantis
10^{-3}	mili	m	tūkstantoji
10^{-6}	mikro	μ	milijonoji
10^{-9}	nano	n	milijardinė
10^{-12}	piko	p	trilijoninė
10^{-15}	femto	f	kvadrilijoninė
10^{-18}	atto	a	kvintilijoninė

2.2 Elektros srovė

Laidininkuose dalis elektronų, esančių tolimiausiose orbitose, yra silpnai susiję su atomų branduoliais. Tokie elektronai gali laisvai judėti medžiagos viduje ir vadinami laisvaisiais elektronais.

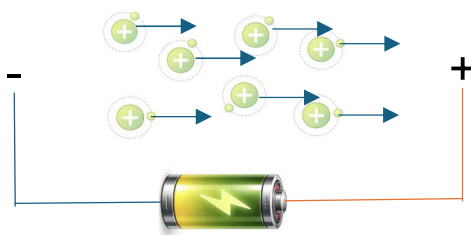
Įprastomis sąlygomis laisvieji elektronai juda chaotiškai, todėl nors judėjimas vyksta, elektros srovė neatsiranda, nes elektronų judėjimas įvairiomis kryptimis tarpusavyje kompensuojasi (2.2.1 pav.).



2.2.1 pav. Chaotiškas elektronų judėjimas

Kai laidininką veikia elektrinis laukas (pavyzdžiui, prijungus jį prie baterijos), laisvieji elektronai pradeda judėti viena vyraujančia kryptimi. Toks kryptingas krūvininkų judėjimas sukuria elektros srovę.

Elektros srovė – tai kryptingas elektros krūvininkų judėjimas (2.2.2 pav.).



2.2.2 pav. Kryptingas elektronų judėjimas

Metaluose elektros srovę sukuria elektronų judėjimas, o kituose laidininkuose (elektrolituose, puslaidininkuose, dujose) srovę gali sudaryti ir kiti krūvininkai.

Nors metaluose elektros srovę sukuria elektronai, judantys nuo neigiamojo poliaus link teigiamojo, pagal tarptautinį susitarimą laikoma, kad elektros srovės kryptis yra priešinga elektronų judėjimo kryptiai – nuo teigiamojo poliaus link neigiamojo.

Ši kryptis vadinama sutartine (konvencine) elektros srovės kryptimi ir yra naudojama schemose, skaičiavimuose bei matavimuose.

2.3 Elektros srovės stipris

Elektros srovės stiprumas parodo, koks elektros krūvio kiekis prateka laidininko skerspjūviu per tam tikrą laiką. Srovės stiprumas žymimas raide I ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$I = \frac{q}{t}$$

čia:

q – elektros krūvis (C),

t – laikas (s).

Srovės stiprumo vienetas yra amperas (A).

Vienas amperas – tai toks srovės stiprumas, kai per vieną sekundę laidininko skerspjūviu praeina vieno kulono elektros krūvis.

Mažos srovės dažnai matuojamos:

- miliamperais (mA),
- mikroamperais (μ A).

$$1 \text{ A} = 1000 \text{ mA} = 1\,000\,000 \mu\text{A}$$

Elektros srovės stiprumas matuojamas ampermetru (multimetru). Ampermetro vidinė varža yra labai maža, todėl jis į grandinę jungiamas nuosekliai.

Pastaba: prijungus ampermetrą tiesiai prie įtampos šaltinio gnybtų lygiagrečiai galima sukelti trumpąjį jungimą ir sudeginti prietaiso saugiklį.

Pavyzdys

Per laiką $t = 300$ s laidininku pratekėjo $q = 30$ C elektros krūvis. Reikia rasti elektros srovės stiprumą.

Sprendimas

$$I = \frac{q}{t} = \frac{30}{300} = 0,1 \text{ A}$$

Atsakymas: elektros srovės stiprumas yra 0,1 A.

Laidininkai ir izoliatoriai

Ne visose medžiagose elektros krūvis gali laisvai judėti. Pagal tai, kaip lengvai krūvininkai juda medžiagoje, medžiagos skirstomos į laidininkus ir izoliatorius (dielektrikus).

Laidininkai – tai medžiagos, kuriose yra daug laisvųjų krūvininkų (dažniausiai elektronų), todėl veikiant elektriniam laukui krūvis gali judėti, o grandinėje gali tekėti elektros srovė. Tipiniai laidininkai yra metalai, taip pat rūgščių, šarmų ir druskų tirpalai, kuriuose srovę perneša jonai.

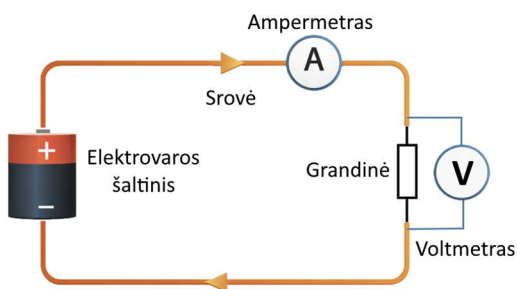
Izoliatoriai (dielektrikai) – tai medžiagos, kuriose laisvųjų krūvininkų beveik nėra, todėl elektros srovė per jas praktiškai neteka. Tokiose medžiagose krūvis dažnai neišsisklaido, o lieka sukauptas paviršiuje – todėl izoliatoriuose dažnai pasireiškia statinė elektra. Izoliatorių pavyzdžiai: stiklas, plastikai, guma, porcelianas, sausas oras.

Svarbu paminėti, kad izoliatoriai nėra „absoliučiai nelaidūs“: esant pakankamai didelei įtampai arba drėgmei, net ir izoliatoriai gali pradėti praleisti srovę (pvz., įvyksta pramušimas arba padidėja paviršinis laidumas).

2.4 Elektrovara ir įtampa

Iki šiol nagrinėjome elektros krūvį ir elektros srovę. Elektros srovė – tai kryptingas krūvininkų judėjimas. Tačiau svarbu suprasti, kad vien laidininko ir laisvųjų elektronų nepakanka: jeigu sujungsime laidininką į uždarą kontūrą, bet neprijungsime jokio energijos šaltinio, laisvieji elektronai judės tik chaotiškai ir ilgainiui neatsiras pastovi kryptinga srovė. Kad srovė tekėtų, krūvininkams turi būti sudarytas potencialų skirtumas – tokia būseną, kai krūvis vienoje grandinės vietoje turi didesnę energiją nei kitoje.

Potencialų skirtumą sukuria elektros energijos šaltinis (baterija, generatorius, saulės elementas ir pan.). Šaltinis nuolat atlieka darbą, kad grandinėje būtų palaikomas energijos skirtumas, dėl kurio krūvininkai gali judėti kryptingai (2.4.1 pav.).



2.4.1 pav. Uždaros grandinės pavyzdys

Šaltinio gebėjimas suteikti energijos krūviui apibūdinamas dydžiu, vadinamu elektrovara (senesnėje literatūroje – elektrovaros jėga). Elektrovara žymima raide E ir nusako energiją, kurią šaltinis suteikia vienam kulonui krūvio, pernešdamas krūvį šaltinio viduje. Todėl elektrovara matuojama voltais (V).

$$E = \frac{A}{q}$$

Čia:

A – šaltinio atliktas darbas (J),

q – krūvis (C).

Pavyzdys

Šaltinis, pernešdamas krūvį savo viduje, atliko darbą $A = 6 \text{ J}$ ir pernešė $q = 2 \text{ C}$. Rasti elektrovarą.

Sprendimas

$$E = \frac{A}{q} = \frac{6}{2} = 3 \text{ V}$$

Atsakymas: elektrovara $E = 3 \text{ V}$.

Kai kalbame ne apie šaltinio atliekamą darbą, o apie bet kuriuos du grandinės taškus (pavyzdžiui, elemento gnybtus, rezistoriaus galus ar lemputės kontaktus), vartojame sąvoką įtampa, dar vadinamą potencialų skirtumu. Įtampa žymima raide U .

Įtampa (U , potencialų skirtumas) tarp dviejų taškų apibrėžiama analogiškai:

$$U = \frac{A}{q}$$

Čia:

A – darbas (energijos pokytis), tenkantis krūvio pernešimui tarp dviejų taškų,

q – krūvis (C).

Įtampa nusako energijos skirtumą vienam kulonui krūvio tarp dviejų pasirinktos grandinės taškų. Įtampa, kaip ir elektrovara, matuojama voltais (V).

Įtampos matavimo prietaisas – voltmestas (multimetras). Kadangi jo varža yra labai didelė ($\geq 1 \text{ M}\Omega$), juo srovė beveik neteka ir jis jungiamas lygiagrečiai.

Papildoma informacija

Elektrovara ir įtampa susijusios, tačiau jos nėra tapatūs dydžiai.

- **Elektrovara E** apibūdina energijos šaltinį: kiek energijos krūvio vienetui suteikia šaltinis savo viduje.
- **Įtampa U** apibūdina grandinės taškus: koks energijos skirtumas krūvio vienetui tarp dviejų taškų grandinėje.

Praktiškai dažniausiai matuojame įtampą tarp šaltinio gnybtų. Kai grandinė neapkrauta (srovė neteka), įtampa tarp gnybtų paprastai būna artima šaltinio elektrovarai. Kai grandinė apkrauta (srovė teka), dalis energijos „paskirstoma“ grandinės elementuose, todėl įtampa tarp šaltinio gnybtų gali skirtis nuo elektrovaros. Šiuos skirtumus vėliau paaiškina šaltinio vidinės savybės (pvz., vidinė varža), tačiau pradžioje pakanka suprasti patį principą: E – šaltinio dydis, U – tarp dviejų taškų matuojamas dydis.

2.5 Elektrinė varža ir Omo dėsnis

Ankstesniuose poskyriuose aptarėme, kad elektrovara E (energijos šaltinio dydis) ir įtampa U apibūdina energijos skirtumą krūvio vienetui, o elektros srovė I nusako, kiek krūvio prateka per laiką. Tačiau praktikoje vien įtampos „turėti“ nepakanka, kad galėtume nuspėti, kokio stiprumo srovė tekės konkrečiu laidininku ar grandinės elementu.

Kai laidininku teka elektros srovė, krūvininkai (metaluose – elektronai, elektrolituose – jonai) juda kryptingai, tačiau jų judėjimas nėra laisvas. Krūvininkai nuolat sąveikauja su medžiagos dalelėmis, gardelės netolygumais, priemaišomis, todėl jų kryptingas judėjimas yra trukdomas. Šis srovės tekėjimo trukdymas grandinėje apibūdinamas dydžiu, vadinamu elektrine varža.

Elektrinė varža R parodo, kiek stipriai grandinės elementas priešinasi srovės tekėjimui. Kuo varža didesnė, tuo, esant toms pačioms sąlygoms, srovė bus mažesnė.

Elektrinė varža

Varžos vienetas yra omas (Ω). Varža lygi 1 omui, jei per elementą teka 1 A srovė, kai įtampa tarp jo gnybtų yra 1 V:

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$

Praktikoje dažnai naudojami ir didesni vienetai:

- $1 \text{ k}\Omega = 1000 \Omega$,
- $1 \text{ M}\Omega = 1\,000\,000 \Omega$.

Laidininko varža priklauso ne tik nuo medžiagos, bet ir nuo jo geometrinių matmenų: ilgesnis laidininkas turi didesnę varžą, o storesnis (didesnio skerspjūvio) – mažesnę. Tai aprašoma formule:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

čia:

- R – varža (Ω),
- ρ – savitoji varža (medžiagos savybė),
- l – laidininko ilgis (m).
- S – skerspjūvio plotas (m^2).



2.5.1 pav. Laidininko matmenys

Savitosios varžos vienetas SI sistemoje yra $\Omega \cdot \text{m}$. Elektronikoje ir elektrotechnikoje dažnai sutiksi patogią formą $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ (nes laidų skerspjūvis dažnai nurodomas mm^2).

2.5.1 lentelė. Metalų savitosios varžos pavyzdžiai

Metalas	Savitoji varža ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)
Sidabras	$1,59 \times 10^{-8}$
Varis	$1,68 \times 10^{-8}$
Aliuminis	$2,65 \times 10^{-8}$
Volframas	$5,61 \times 10^{-8}$
Geležis	$9,71 \times 10^{-8}$
Platina	$1,06 \times 10^{-7}$
Švinas	$2,2 \times 10^{-7}$
Gyvsidabris	$9,8 \times 10^{-7}$
Nichromas	$1,0 \times 10^{-6}$
Konstantanas	$4,9 \times 10^{-7}$

Skirtingos medžiagos turi skirtingą savitąją varžą:

- laidininkai (pvz., varis, aliuminis) – maža ρ , todėl maža R ,
- izoliatoriai (pvz., plastikas, stiklas) – labai didelė ρ , todėl srovė praktiškai neteka,
- puslaidininkiai (pvz., silicis) – tarpinės savybės; varža stipriai priklauso nuo priemaišų, temperatūros ir kt.

Metaluose kylant temperatūrai varža dažniausiai didėja ir nusakoma pagal ryšį:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$$

čia:

- R_0 – varža esant pradinei temperatūrai,
- α – temperatūrinis varžos koeficientas ($1/^\circ\text{C}$),
- ΔT – temperatūros pokytis.

Elektrinis laidumas

Be varžos, kartais patogų vartoti dydį, nusakantį, kaip gerai elementas praleidžia srovę. Jis vadinamas laidumu G ir yra varžos atvirkštinis dydis:

$$G = \frac{1}{R}$$

Laidumo vienetas – simensas (S).

Omo dėsnis

Kai jau suprantame, kas yra varža, galime tiksliai susieti tris pagrindinius dydžius: įtampą U , srovę I ir varžą R .



2.5.2 pav. Omo dėsnio trikampis

Eksperimentai parodė, kad daugeliui laidininkų ir rezistorių (kai temperatūra nekinta) srovės stiprumas yra tiesiogiai proporcingas įtampai. Šis ryšys vadinamas Omo dėsniu:

$$U = I \cdot R$$

Iš jo gauname dvi labai praktiškas formas (žiūrėti į omo dėsnio trikampį):

$$I = \frac{U}{R}, \quad R = \frac{U}{I}$$

Fizinė prasmė:

- didesnė įtampa → didesnė srovė (jei R pastovi),
- didesnė varža → mažesnė srovė (jei U pastovi).

Pastaba: ne visi elementai yra „ominiai“. Pavyzdžiui, kaitrinė lemputė kaista, todėl jos varža kinta, ir priklausomybė tarp U ir I nebūna idealiai tiesinė.

Pavyzdys

Grandine teka $I = 0,25$ A srovė, o įtampa $U = 5$ V. Rasti varžą.

Sprendimas

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5}{0,25} = 20 \, \Omega$$

Atsakymas: Varža $R = 20 \, \Omega$.

Įsidėmėk

- Varža R nusako, kaip stipriai elementas trukdo srovei tekėti.
- Laidininkui: $R = \rho \frac{l}{S}$ (ilgesnis → didesnė R , storesnis → mažesnė R).
- Omo dėsnis: $U = IR$, o $1 \, \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$.

Skiriamasis žinių patikrinimas

1. Iš kokių pagrindinių dalelių sudarytas atomas ir kokius elektros krūvius jis turi?
2. Kodėl atomas įprastomis sąlygomis yra elektriškai neutralus?
3. Koks krūvio matavimo vienetas?
4. Paaiškinkite, kuo skiriasi teigiamas ir neigiamas kūno įsielektrinimas (ką tai reiškia elektronų atžvilgiu).
5. Kas yra elementarusis krūvis ir kokia jo reikšmė?
6. Kodėl sakoma, kad elektros krūvis yra diskretus?
7. Kiek maždaug elektronų atitinka 1 C elektros krūvio?
8. Kas vadinama elektros srove metaluose?
9. Kodėl laisvųjų elektronų chaotiškas judėjimas metale nesukuria elektros srovės?
10. Kokiomis sąlygomis elektronų judėjimas laidininke tampa kryptingas?
11. Kodėl elektros srovės kryptis schemose laikoma priešinga elektronų judėjimo krypčiai?
12. Kas yra elektros srovės stiprumas ir kaip jis apibūdinamas formule $I = \frac{q}{t}$?
13. Kokiais prietaisais matuojamas elektros srovės stiprumas ir kaip jie jungiami grandinėje?
14. Kokie krūvininkai perneša elektros srovę metaluose?
15. Parašykite, ką reiškia SI priešdėliai: kilo (k), mili (m), mikro (μ), nano (n).
16. Užrašykite 2,5 mA amperais ir 470 μ A miliamperais.
17. Kodėl vien uždaro laidininko kontūro nepakanka, kad atsirastų pastovi kryptinga elektros srovė?
18. Apibūrinkite elektrovarą E ir įtampą U formulėmis $E = \frac{A}{q}$ ir $U = \frac{A}{q}$, ir aiškiai įvardykite: ką apibūdina E , o ką – U (kada įtampa tarp šaltinio gnybtų gali būti artima elektrovarai, o kada gali skirtis).
19. Kas yra elektrinė varža R ir ką ji fiziškai reiškia grandinėje?
20. Koks yra varžos vienetas ir ką reiškia ryšys: $1 \Omega = \frac{1V}{1A}$?
21. Nuo ko priklauso laidininko varža? Užrašykite formulę ir paaiškinkite, ką reiškia ρ , l , S .

22. Kaip pasikeis varža, jei laidininko ilgis padvigubės, o skerspjūvis ir medžiaga liks tie patys?
23. Kaip pasikeis varža, jei skerspjūvis padvigubės, o ilgis ir medžiaga liks tie patys?
24. Suformuluokite Omo dėsnį žodžiais ir užrašykite jį formulę.
25. Rezistoriui $R = 200 \, \Omega$ prijungta įtampa $U = 10 \, \text{V}$. Apskaičiuokite srovę I ir nurodykite, kuri formulė buvo naudojama.

3. ENERGIJOS ŠALTINIAI

Kad elektros grandinė galėtų veikti, jai reikalingas energijos šaltinis. Jis sukuria ir palaiko įtampą arba srovę, dėl kurios grandinėje gali kryptingai judėti krūvininkai. Praktikoje energijos šaltiniai nėra idealūs: jų įtampa gali mažėti didėjant apkrovai, atiduodama srovė yra ribota, o dalis energijos prarandama šaltinio viduje. Todėl svarbu suprasti ne tik idealizuotus šaltinių modelius, bet ir tai, kuo nuo jų skiriasi realūs įrenginiai.

Šiame skyriuje bus aptariami idealūs ir realūs įtampos bei srovės šaltiniai, jų voltamperinės charakteristikos ir vidinės varžos įtaka grandinės veikimui. Toliau bus nagrinėjama kintamoji srovė ir transformatorius, leidžiantis keisti kintamosios įtampos dydį bei elektriškai atskirti grandines. Skyriaus pabaigoje bus paaiškinta, kaip iš kintamosios įtampos gaunama elektroniniams įrenginiams reikalinga nuolatinė įtampa, naudojant lyginimo ir filtravimo grandines.

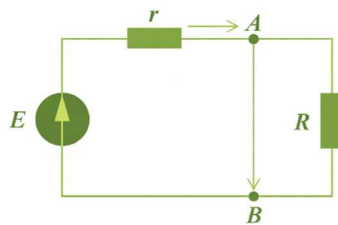
3.1 Idealūs įtampos ir srovės šaltiniai

Įtampos šaltinis

Idealus įtampos šaltinis – dviejų gnybtų „juodoji dėžė“, kuri palaiko pastovią įtampą tarp gnybtų nepriklausomai nuo apkrovos. Jei prijungi varžą R , tuomet srovė per apkrovą:

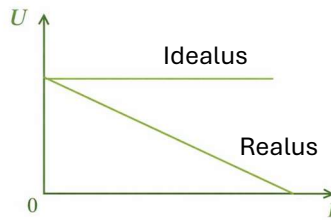
$$I = \frac{V}{R}.$$

Grafiškai tai atrodo taip:



3.1.1 pav. Grandinė su įtampos šaltiniu

Realus įtampos šaltinis elgiasi kiek kitaip nei idealus: jis gali atiduoti tik ribotą (maksimalią) srovę ir elgiasi kaip idealus įtampos šaltinis, kol neviršijama didžiausia leistina srovė (3.1.2 pav.).



3.1.2 pav. Idealaus ir realaus įtampos šaltinio voltamperinės kreivės

Patogus modelis:

- idealus įtampos šaltinis E ,
- nuosekliai prijungta vidinė varža r .

Tada gnybtų įtampa krenta didėjant srovei:

$$U_{out} = E - I \cdot r.$$

Įtampos šaltiniai (stengiasi laikyti pastovią įtampą):

- baterijos (AA, AAA ir kt.), akumuliatoriai (Li-ion 3,7 V, švino 12 V).
- USB maitinimo šaltiniai, telefonų, kompiuterių įkrovikliai.
- Laboratorinis maitinimo šaltinis pastovios įtampos režime (*angl. Constant Voltage (CV)*).



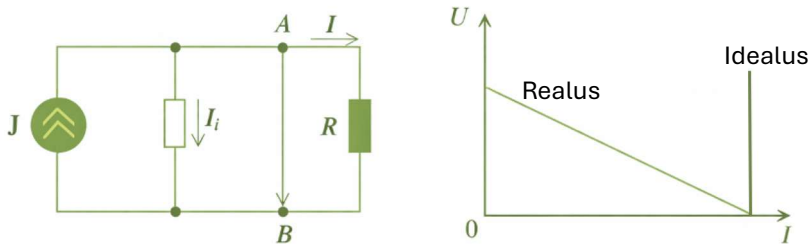
3.1.3 pav. Įtampos šaltinių pavyzdžiai ir baterijos simbolis

Srovės šaltinis

Idealus srovės šaltinis palaiko pastovią srovę per išorinę grandinę nepriklausomai nuo apkrovos varžos. Kad tai įvyktų, idealus šaltinis teoriškai turėtų sukurti bet kokio dydžio įtampą gnybtuose.

Realus srovės šaltinis turi ribas:

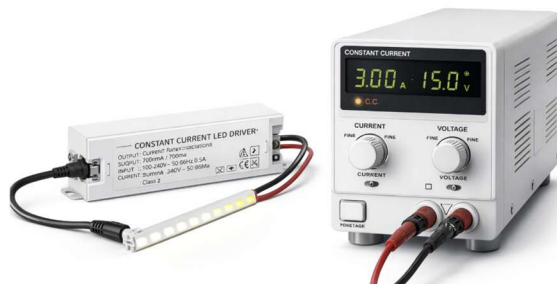
- jis turi didžiausią įtampos vertę, iki kurios šaltinis pajėgia dirbti, kad išlaikytų nustatytą srovę.



3.1.4 pav. Idealaus ir realaus srovės šaltinio volt-ampėrinės kreivės

Srovės šaltiniai (stengiasi laikyti I pastovią):

- LED maitinimo šaltiniai (angl. LED driver) – pvz., 350 mA, 700 mA.
- Laboratorinis maitinimo šaltinis pastovios srovės režime (angl. *constant Current (CC)*).



3.1.5 pav. Srovės šaltinių pavyzdžiai

V-I (volt-amperinės) charakteristikos (labai padeda suprasti)

- Idealus įtampos šaltinis: $V = \text{pastovi}$, grafike tai būtų „horizontali“ charakteristika (įtampa fiksuota, srovė kinta).
- Idealus srovės šaltinis: $I = \text{pastovi}$, grafike „vertikali“ charakteristika (srovė fiksuota, įtampa kinta).

Realiuose šaltiniuose atsiranda „nuolydis“ dėl vidinių varžų (įtampos šaltinis atrodo lyg turėtų nuoseklią varžą, srovės – lyg turėtų lygiagrečią „nutekėjimo“ varžą).

Praktinės pastabos

- Baterija yra gana geras įtampos šaltinis, bet nėra „idealus“.
- Srovės šaltiniai realybėje dažnai daromi aktyviais grandynais (tranzistoriai, operaciniai stiprintuvai).
- Voltmetras idealiai turi turėti begalinę įėjimo varžą, kad per jį netekėtų srovė ir nemažintų matuojamos įtampos.
- Ampermetras idealiai turi turėti nulinę varžą, bet realiai maža varža egzistuoja, todėl įjungtas nuosekliai jis vis tiek šiek tiek keičia grandinę.
- Svarbu: nematuoti įtampos šaltinio srovės prijungus ampermetrą tiesiai prie gnybtų (susidaro trumpas jungimas).

3.2 Transformatorius

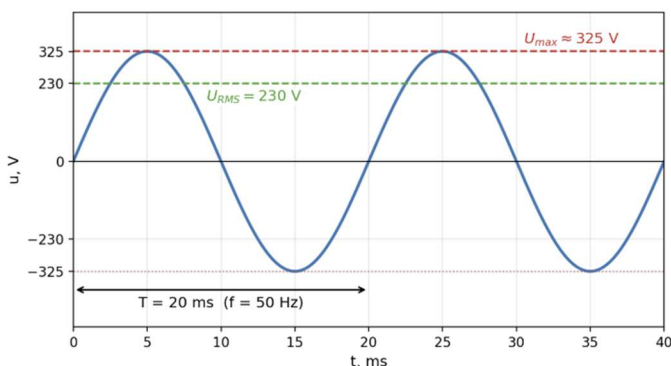
Iki šiol įtamos ir srovės šaltinius nagrinėjome teoriškai – kaip idealius elementus, kurie palaiko pastovią įtampą arba pastovią srovę, tačiau praktikoje elektros energijos šaltiniai nėra abstraktūs elementai, o realūs įrenginiai, tiekiantys energiją konkrečioms sistemoms. Todėl, pereinant nuo teorinių įtamos ir srovės šaltinių modelių, pirmiausia reikia aptarti, kokios rūšies srovė realiai pasiekia vartotoją ir kaip ji pritaikoma techninėms reikmėms.

Didžiąjai daliai buitinių ir pramoninių sistemų energija tiekiamą kintamosios srovės pavidalu. Kintamoji srovė pasižymi tuo, kad jos kryptis periodiškai keičiasi, Lietuvoje tai vyksta 50 kartų per sekundę (dažnis 50 Hz). Toks srovės tipas plačiai naudojamas todėl, kad jis yra patogus techniniu požiūriu: kintamosios srovės įtampą galima efektyviai keisti (žeminti, aukštinti), pritaikant ją skirtingiems įrenginiams.

Kintamoji tinklo įtampa kinta sinusoidės forma (3.2.1 pav.). Per vieną periodą T įtampa pakyla iki didžiausios vertės, nukrenta iki žemiausios ir grįžta atgal. Esant 50 Hz dažniui, periodas trunka $T = 1/f = 20$ ms. Svarbu skirti dvi vertes: amplitudę U_{MAX} ir efektinę vertę U_{RMS} . Efektinė vertė – tai tokia nuolatinės įtamos vertė, kuri rezistoriuje išskirtų tiek pat šilumos kiekį šią kintamoji įtampa, todėl būtent ją nusakoma tinklo įtampa ir prietaisų parametrai. Sinusinei įtampai šios vertės susijusios taip:

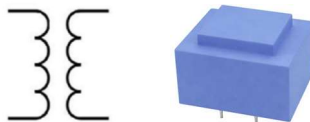
$$U_{MAX} = U_{RMS} \cdot \sqrt{2} \approx 1,41 \cdot U_{RMS}$$

Pavyzdžiui, tinklo 230 V yra efektinė vertė, o įtamos amplitudė siekia $230 \cdot 1,41 \approx 325$ V. Tai svarbu praktikoje: lygintuvo kondensatorius įsikrauna iki amplitudinės, o ne iki efektinės vertės, todėl parenkant komponentus reikia vertinti U_{MAX} .



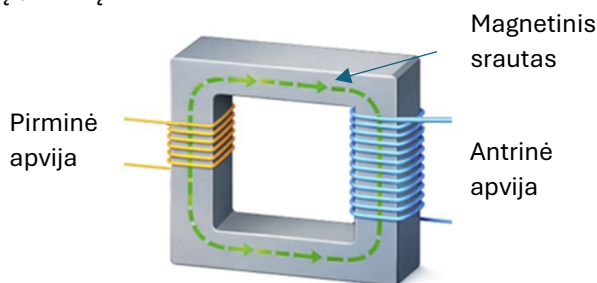
3.2.1 pav. Kintamoji tinklo įtampa kinta sinusoidės forma

Kai kintamosios srovės šaltinio įtampa neatitinka vartotojo poreikių, naudojamas transformatorius. Elektrinis transformatorius keičia kintamosios įtamos didumą ir elektros srovę. Jo veikimas pagrįstas elektromagnetine indukcija. Transformatorių sudaro magnetolaidis ir pirminė bei antrinė apvijos. Pirminė apvija jungiama prie kintamosios įtamos šaltinio, o prie antrinės apvijos jungiami elektros energijos imtuvai.



3.2.2 pav. Transformatoriaus simbolis ir realus vaizdas

Kai per pirminę apviją teka kintamoji srovė, aplink ją susidaro kintamasis magnetinis laukas. Šis laukas šerdyje sukelia elektromagnetinę indukciją, dėl kurios antrinėje apvijoje atsiranda kintamoji įtampa. Tokiu būdu elektros energija perduodama iš pirminės grandinės į antrinę.



3.2.3 pav. Transformatoriaus veikimas (aukštinantysis)

Įtamos dydis antrinėje apvijoje priklauso nuo apvijų vijų skaičiaus santykio. Šis ryšys aprašomas transformatoriaus pagrindine formule:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1},$$

kur

U_1 – pirminės apvijos įtampa,

U_2 – antrinės apvijos įtampa,

N_1 – pirminės apvijos vijų skaičius,

N_2 – antrinės apvijos vijų skaičius.

Jeigu antrinėje apvijoje vijų yra mažiau negu pirminėje, transformatorius mažina įtampą ir jo pavadinimas- **žeminantis** transformatorius. Jeigu antrinėje apvijoje vijų yra daugiau, įtampa padidinama – tai **aukštinantis** transformatorius.

Idealiu atveju transformatoriuje perduodama galia pirminėje ir antrinėje apvijose yra vienoda, todėl srovės stipriai kinta priešingai nei įtampa:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2},$$

kur

I_1 – srovės stipris pirminėje apvijoje,

I_2 – srovės stipris antrinėje apvijoje.

Idealiame transformatoriuje galioja galios tvermės dėsnis:

$$P_1 = P_2 \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2$$

Realiuose transformatoriuose dalis energijos prarandama dėl apvijų varžos ir magnetinių nuostolių šerdyje, tačiau jų veikimo principas išlieka tas pats.

Svarbi transformatoriaus savybė yra ir tai, kad jis užtikrina elektrinę izoliaciją tarp pirminės ir antrinės grandinių, todėl plačiai naudojamas maitinimo šaltiniuose saugumui padidinti.

Pavyzdys

Mokytojas klasėje turi transformatorių, į kurio pirminę apviją paduodama 120 V įtampa. Pirminėje apvijoje yra 300 vijų, o antrinėje – 100 vijų. Kokia bus įtampa antrinėje apvijoje?

Sprendimas

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} = 120 \cdot \frac{100}{300} = \frac{120}{3} = 40 \text{ V}$$

Atsakymas: įtampa $U_2 = 40 \text{ V}$.

Įsidėmėk

- Transformatorius veikia tik su kintama įtampa/srove (AC). Su nuolatine (DC) neveikia: šerdis prisotinama, kaista, gali sudegti.
- Įtampų santykis lygus vijų santykiui: $\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$.
- Srovių santykis atvirkščias vijoms: $\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$.
- Galia (idealiai) ta pati: $P_1 \approx P_2 \rightarrow$ jei įtampa mažėja, srovė didėja (ir atvirkščiai).
- Dažnis svarbus: per mažas dažnis (ar DC) $\rightarrow$ didesnė magnetinė srovė, šildymas, prisotinimas.
- Transformatorius suteikia galvaninę izoliaciją (jei apvijos atskiros), bet ne panaikina pavojaus – didelė srovė antrinėje vis tiek pavojinga.

3.3 Nuolatinės srovės šaltiniai

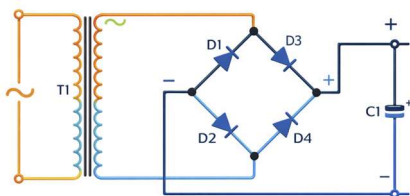
Kaip buvo aptarta ankstesniame skyriuje, kintamoji srovė dažnai naudojama energijai tiekti ir pritaikyti reikiamam įtampos lygiui, tačiau dauguma elektroninių įrenginių negali veikti tiesiogiai iš kintamosios srovės šaltinio. Elektronikos elementams reikalinga nuolatinė srovė, kurios kryptis nekinta, o įtampa turi pastovų poliariskumą. Todėl realiose sistemose kintamoji srovė dažniausiai paverčiama nuolatine. Šiame skyriuje trumpai apžvelgsime pačius principus, o schemų nagrinėjimas ir papildoma informacija bus pateikiama tolesniuose skyriuose.

Nuolatinės srovės šaltiniu vadinamas įrenginys, kuris tiekia pastovios krypties elektros srovę. Tokie šaltiniai gali būti tiek savarankiški energijos šaltiniai, tiek įrenginiai, kurie nuolatinę srovę gauna iš kintamosios, naudodami lyginimo ir stabilizavimo grandines.

Kaip jau minėta ankstesniame poskyryje, vienas paprasčiausių nuolatinės srovės šaltinių yra galvaniniai elementai ir baterijos. Juose elektros energija gaunama cheminės reakcijos metu, o gnybtuose susidaro pastovi įtampa. Tokie šaltiniai dažnai naudojami nešiojamuose įrenginiuose, kur nereikalingas prijungimas prie elektros tinklo.

Plačiai naudojami ir akumulatoriai, kurie, skirtingai nuo vienkartinų baterijų, gali būti daug kartų įkraunami. Akumulatoriai taip pat yra nuolatinės srovės šaltiniai ir dažnai naudojami ten, kur reikalinga didesnė galia arba ilgesnis veikimo laikas. Daugiau nenagrinėsime cheminės baterijų ar akumuliatorių sudėties, o koncentruosimės į elektronikos grandines.

Mums svarbiausia nuolatinės srovės šaltinių grupė – maitinimo šaltiniai, kuriuose nuolatinė srovė gaunama iš kintamosios. Tokiuose šaltiniuose paprastai naudojamas transformatorius, lygintuvas ir filtravimo elementai. Dėl filtravimo nuolatinė įtampa tampa artima pastoviai, o papildomi stabilizavimo grandynai leidžia palaikyti reikiamą įtampos lygį net ir keičiantis apkrovai. Šiame skyriuje aptarsime tik esminį veikimo principą ir pagrindinę grandinę – diodinį tiltelį, sudėtingesnes schemas, tokias, kaip impulsiniai šaltiniai, nagrinėsime kituose skyriuose.



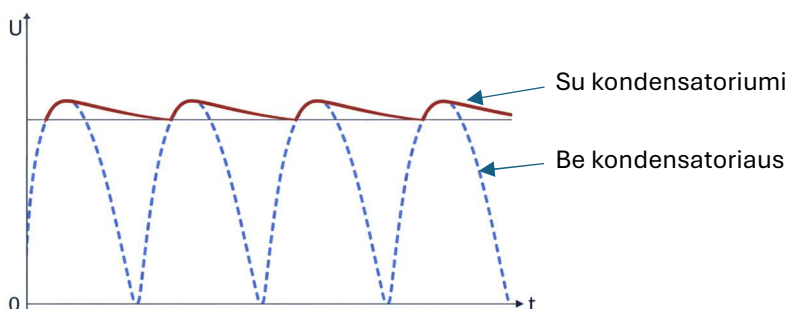
3.3.1 pav. Diodinio tiltelio schema.

Tai yra standartinė dvipusio lyginimo schema su 4 diodais, kuri kintamąją įtampą (AC) paverčia vienos krypties pulsuojančia nuolatine įtampa(DC):

- Teigiamo pusperiodžio metu srovę praleidžia du diodai – D2 ir D3, kiti du – uždaryti.
- Neigiamo pusperiodžio metu srovę praleidžia kita pora diodų – D1 ir D4, likę uždaryti.
- Svarbiausia: apkrovai srovė visada teka ta pačia kryptimi, todėl išėjime gaunama nuolatine įtampa, bet pulsuojanti.

Kiekvienu pusperiodžiu srovė pereina per 2 diodus, todėl išėjimo įtampa sumažėja maždaug 1,2–1,4 V (silicio diodo įtampos kritimas ~0,6–0,7 V kiekvienam diodui).

3.3.2 pav. pateikiama diodinio lygintuvo oscilograma išėjime, kurioje matoma, jog be kondensatoriaus, turime pulsuojančią, išlygintą įtampą (mėlyna punktyrinė linija), dvigubai didesnio dažnio nei įėjimo įtampa – t.y. iš 50 Hz turime 100 Hz. Viršutinė linija (raudona) vaizduoja įtampą išėjime, kai pridėtas kondensatorius. Priklausomai nuo kondensatoriaus talpos ir apkrovos, šios pulsacijos dydis skirsis.



3.3.2 pav. Diodinio tiltelio išėjimo oscilograma.

Skyriaus žinių patikrinimas

1. Kas yra idealus įtampos šaltinis ir kuo jis skiriasi nuo realaus?
2. Kas yra idealus srovės šaltinis ir kodėl realybėje jis turi didžiausios įtampos ribą?
3. Nubraižykite (arba apibūdinkite) idealaus įtampos šaltinio ir idealaus srovės šaltinio volt-amperines charakteristikas.
4. Ką reiškia šaltinio vidinė varža r ir kaip ji paaiškina gnybtų įtampos kritimą didėjant apkrovos srovei?
5. Pateikite po du įtampos ir srovės šaltinių pavyzdžius iš praktikos.
6. Ką reiškia laboratorinio maitinimo šaltinio režimai CV ir CC? Kada šaltinis pats persijungia iš vieno į kitą?
7. Kodėl negalima ampermetro jungti tiesiai prie įtampos šaltinio gnybtų?
8. Kokią varžą idealiu atveju turi voltmetras, o kokią ampermetras? Kodėl?
9. Kuo kintamoji srovė skiriasi nuo nuolatinės? Koks tinklo dažnis Lietuvoje ir ką šis skaičius reiškia?
10. Kokiu fizikiniu reiškiniu pagrįstas transformatoriaus veikimas?
11. Iš kokių pagrindinių dalių sudarytas transformatorius ir kokia kiekvienos paskirtis?
12. Užrašykite transformatoriaus įtampų ir vijų santykio formulę. Kada transformatorius žeminantis, o kada aukštinantis?
13. Kodėl idealiaame transformatoriuje, sumažinus įtampą, srovė padidėja? Su koku dėsniu tai susiję?
14. Transformatoriaus pirminėje apvijoje 600 vijų, antrinėje – 50 vijų. Kokia įtampa antrinėje apvijoje, jei pirminė prijungta prie 230 V tinklo?
15. Kodėl transformatorius neveikia su nuolatine srove ir kas nutiktų jį prijungus prie DC šaltinio?
16. Ką reiškia, kad transformatorius užtikrina galvaninę izoliaciją, ir kodėl tai svarbu saugumui?
17. Kokia diodinio tiltelio paskirtis ir kiek diodų jį sudaro?
18. Kiek diodų vienu metu praleidžia srovę kiekvieno pusperiodžio metu ir kokio dydžio įtampos kritimas dėl to susidaro?
19. Kodėl už diodinio tiltelio pulsacijų dažnis yra 100 Hz, jei tinklo dažnis 50 Hz?

4. PASYVINIAI ELEKTRONIKOS KOMPONENTAI

Elektroninės schemos sudaromos iš įvairių komponentų, kurių kiekvienas atlieka tam tikrą funkciją grandinėje. Vieni elementai tiekia elektros energiją, kiti ją naudoja, riboja srovę, valdo jos tekėjimą arba reaguoja į aplinkos pokyčius, pavyzdžiui, šviesą. Norint suprasti, kaip veikia elektroninė grandinė, pirmiausia reikia susipažinti su dažniausiai naudojamais komponentais, jų paskirtimi ir žymėjimu schemose.

Praktinėje elektronikoje labai svarbu mokėti atpažinti ne tik patį komponentą, bet ir jo simbolį elektros schemoje. Realioje grandinėje matome fizinius elementus – bateriją, lemputę, rezistorių, jungiklį ar šviesos diodą, o schemoje tie patys elementai vaizduojami sutartiniais ženklais. Todėl elektronikos mokymasis visada vyksta dviem etapais: reikia suprasti, kaip komponentas atrodo tikrovėje, ir kartu žinoti, kaip jis žymimas brėžiniuose.

Šiame skyriuje bus aptarti pagrindiniai elektronikos komponentai, su kuriais dažniausiai susiduriama paprastose grandinėse, o tolesniuose skyriuose bus mokomasi šiuos komponentus jungti į grandines.

4.1 Rezistorius

Rezistorius yra vienas pagrindinių ir dažniausiai naudojamų elektronikos komponentų - jo paskirtis yra sudaryti varžą elektros srovei, todėl jo galimos paskirtys:

- riboti srovę,
- sudaryti įtampos kritimą,
- padalyti įtampą tarp grandinės dalių,
- padėti nustatyti kitų komponentų darbo režimą.

Nors rezistorius atrodo labai paprastas elementas, iš tikrųjų jis naudojamas beveik visose elektroninėse schemose ir be jo būtų neįmanomas normalus schemų veikimas.



4.1.1 pav. Rezistoriaus simbolis ir realus vaizdas

Elektronikoje labai svarbus ryšys tarp įtampos, srovės ir varžos.

Paprastam rezistoriui galioja Omo dėsnis, kuris buvo aptartas ankstesniame skyriuje:

$$R = \frac{U}{I}$$

čia:

- R – varža, matuojama omais (Ω),
- U – įtampa, matuojama voltais (V),
- I – srovės stipris, matuojamas amperais (A).

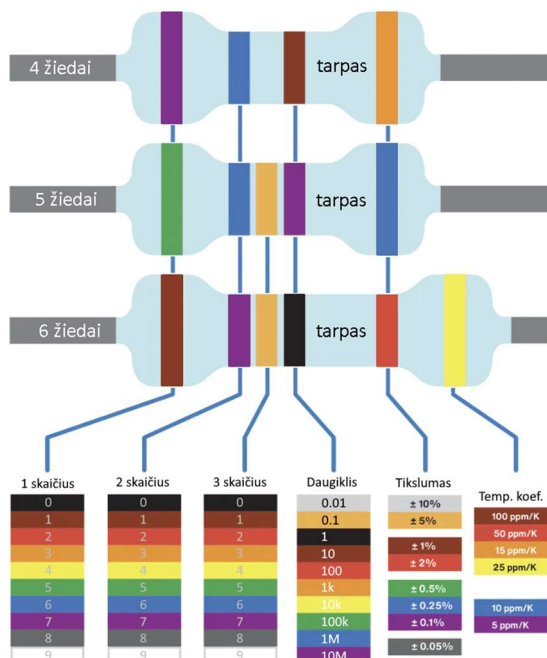
Tai reiškia, kad esant tai pačiai įtampai, didesnės varžos rezistorius praleis mažesnę srovę. Kitaip sakant, kuo didesnė varža, tuo labiau ribojamas srovės tekėjimas.

Pagal korpusą ir litavimo būdą, rezistoriai skirstomi į:

- Išvadiniai (angl. THT – through hole technology).
- Paviršinio montavimo (angl. SMD – surface mount device).

Išvadinių rezistorių spalvinis žymėjimas

Išvadinių rezistorių nominalas apskaičiuojamas pagal spalvinį žymėjimą ant korpuso. Žemiau esančiame paveiksle pateikiamas dažniausiai pasitaikančių rezistorių spalvinis žymėjimas: 4, 5 ir 6 žiedų rezistoriai.



4.1.2 pav. Rezistorių spalvinis žymėjimas

Pavyzdys

Rezistorius turi 5 spalvinius žiedus tokia seka: žalia, mėlyna, juoda, oranžinė, ruda. Koks rezistoriaus nominalas ir paklaida?

Sprendimas

žalia – 5, mėlyna – 6, juoda – 0, daugiklis – 1k, tai nominalas $560\text{ k}\Omega \pm 1\%$.

Atsakymas: $560\text{ k}\Omega \pm 1\%$.

Paviršinio montavimo rezistorių žymėjimas

SMD rezistorių varža dažniausiai žymima skaitmeniniu kodu ant korpuso. Šis kodas parodo nominalią rezistoriaus varžą. Dažniausiai naudojamos dvi sistemos:

- trijų skaitmenų žymėjimas – 5 % rezistoriai,
- keturių skaitmenų žymėjimas – 1 % rezistoriai arba tikslesni.

Trijų skaitmenų žymėjimas

Pirmi du skaitmenys nurodo reikšminius skaitmenis, o trečiasis skaitmuo parodo daugiklį, tai yra, kiek nulių reikia pridėti. Pavyzdžiai:

- Žymėjimas 102: $10 \times 10^2 = 1000\ \Omega = 1\text{ k}\Omega$.
- Žymėjimas 472: $47 \times 10^2 = 4700\ \Omega = 4,7\text{ k}\Omega$.

Keturių skaitmenų žymėjimas

Keturių skaitmenų sistemoje pirmi trys skaitmenys nurodo reikšminius skaitmenis, o paskutinis skaitmuo yra daugiklis. Pavyzdžiai:

- Žymėjimas 1002: $100 \times 10^2 = 10\,000\ \Omega = 10\text{ k}\Omega$.
- Žymėjimas 1103: $110 \times 10^3 = 110\,000\ \Omega = 110\text{ k}\Omega$.

Raidė R žymėjime

Kai rezistoriaus varža yra mažesnė už $10\ \Omega$, vietoje kabelio dažnai naudojama raidė R, pavyzdžiui:

- Žymėjimas 4R7: $4,7\ \Omega$,
- Žymėjimas 0R56: $0,56\ \Omega$.

EIA-96 standartas

Kadangi mažesniuose, 1 % tikslumo paviršinio montavimo rezistoriuose nepakako vietos keturių skaitmenų žymėjimui, buvo pradėtas taikyti EIA-96 standartas. Šiame standarte rezistoriai žymimi dviem skaitmenimis ir viena raide. Tačiau, skirtingai nuo įprasto žymėjimo, čia vien pagal intuiciją varžos nustatyti nebeįmanoma — reikia naudotis specialia lentele, pateikta 4.1.1 lentelėje. Pavyzdys:

- Žymėjimas 01C: $100 \times 100 = 10\ \text{k}\Omega$.
- Žymėjimas 01A: $100 \times 1 = 100\ \Omega$.

4.1.1 lentelė. EIA-96 standarto rezistorių žymėjimas

Skaitinis žymėjimas					
Kodas	Vertė	Kodas	Vertė	Kodas	Vertė
01	100	33	215	65	464
02	102	34	221	66	475
03	105	35	226	67	487
04	107	36	232	68	499
05	110	37	237	69	511
06	113	38	243	70	523
07	115	39	249	71	536
08	118	40	255	72	549
09	121	41	261	73	562
10	124	42	267	74	576
11	127	43	274	75	590
12	130	44	280	76	604
13	133	45	287	77	619
14	137	46	294	78	634
15	140	47	301	79	649
16	143	48	309	80	665
17	147	49	316	81	681
18	150	50	324	82	698
19	154	51	332	83	715
20	158	52	340	84	732
21	162	53	348	85	750
22	165	54	357	86	768
23	169	55	365	87	787
24	174	56	374	88	806
25	178	57	383	89	825
26	182	58	392	90	845
27	187	59	402	91	866
28	191	60	412	92	887
29	196	61	422	93	909
30	200	62	432	94	931
31	205	63	442	95	953
32	210	64	453	96	976

Raidinis žymėjimas	
Kodas	Daugiklis
Z	0.001
Y / R	0.01
X / S	0.1
A	1
B / H	10
C	100
D	1000
E	10000
F	100000

Nepaisant korpuso tipo, likę rezistorių parametrai ir taikymai yra identiški. Rezistoriai gaminami iš įvairių medžiagų ir įvairių konstrukcijų. Jie gali būti angliniai, metalinės plėvelės, vieliniai ir kitų tipų. Praktikoje jų varžos vertės gali būti labai įvairios – nuo labai mažų iki labai didelių. Tačiau vien tik nominalios varžos reikšmės nepakanka, kad galėtume tinkamai pasirinkti rezistorių konkrečiai grandinei, dėl to būtina atsižvelgti ir į kitus parametrus:

- Paklaidą, t.y. rezistoriaus tikslumą.
- Galią – dažniausiai lemia korpuso dydis. Ypač svarbu grandinėse, kuriose rezistorius naudojamas kaip šuntas srovės matavimui.

- Temperatūrinį koeficientą – kaip skiriasi varža nuo nominalios, keičiantis temperatūrai.
- Tipą – anglinį, plėvelinį arba vielinį. Į šį parametrą atsižvelgiama retai, dažniausiai pakanka pirmųjų parametru.

Rezistorių paklaida

Vienas svarbiausių rezistoriaus parametru yra paklaida ir ji parodo, kiek tikroji rezistoriaus varža gali skirtis nuo nominaliosios vertės. Kadangi gaminant komponentus neįmanoma pasiekti visiškai tikslios vertės, reali rezistoriaus varža dažniausiai būna šiek tiek didesnė arba mažesnė už nurodytąją.

Pavyzdžiui, jei rezistorius pažymėtas kaip $1\text{ k}\Omega \pm 5\%$, jo tikroji varža gali svyruoti nuo $950\ \Omega$ iki $1050\ \Omega$. Tai reiškia, kad rezistorius vis dar laikomas tinkamu, jei jo vertė patenka į šias ribas.

Paprastesnėse grandinėse tokia paklaida dažniausiai nėra labai svarbi, nes nedideli varžos nuokrypiai grandinės veikimo pastebimai nepakeičia. Tačiau tiksliuose matavimo, valdymo ar analoginės elektronikos įrenginiuose paklaida tampa daug svarbesnė, todėl tokiais atvejais naudojami tikslesni rezistoriai, pavyzdžiui, su $\pm 1\%$ ar dar mažesne paklaida.

Pavyzdys

Rezistoriaus nominalioji varža yra $4,7\text{ k}\Omega$, o paklaida $\pm 10\%$. Kokia leistina žemiausia varža šiam rezistoriui?

Sprendimas

$$R = 4700 - 4700 \cdot 0,1 = 4230\ \Omega.$$

Atsakymas: $4,23\text{ k}\Omega$.

Rezistorių galia

Ne mažiau svarbi yra ir galia. Per rezistorių tekant srovei, dalis elektros energijos virsta šiluma, todėl rezistorius kaista. Kiek šilumos jis gali saugiai išsklaidyti, nusako jo didžiausia leistina galia. Dažnai naudojami 0,125 W, 0,25 W, 0,5 W, 1 W ir didesnės galios rezistoriai. Jei rezistorius parenkamas per silpnas, jis gali stipriai įkaisti, pakeisti savo parametrus arba net sugesti.

Rezistoriaus išsklaidoma galia apskaičiuojama pagal formules:

$$P = U \cdot I$$

taip pat:

$$P = I^2 R$$

arba

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Todėl projektuojant grandinę neužtenka parinkti vien tik tinkamą varžą – būtina įvertinti ir tai, kokia galia tame rezistoriuje išsisklaidys.

Išvadinių rezistorių galios prasideda nuo 0,05 W, populiariausi yra 0,125 W arba 0,25 W, dėl to dažniausiai galios jiems pakanka. Kadangi vizualiai sunku įvertinti SMD komponentų galias, jos pateikiamos 4.1.2 lentelėje. Toje pačioje lentelėje pateikiamas ir standartinis SMD dydžių žymėjimas su matmenimis (0201, 0402, 0603 ir kt.). Kaip matyti iš 4.1.2 lentelės, komponentų dydžiai vadinami pagal korpuso dydį imperinėje matavimo sistemoje.

4.1.2 lentelė. SMD komponentų dydžių ir galių lentelė

Imperinis	Metrinis	Ilgis (coliai)	Ilgis (mm)	Plotis (coliai)	Plotis (mm)	Aukštis (mm)	Galia (W)
0201	0603	0.024	0.6	0.012	0.3	0.25	1/20 (0.05)
0402	1005	0.04	1	0.02	0.5	0.35	1/16 (0.062)
0603	1608	0.06	1.6	0.03	0.8	0.45	1/10 (0.10)
0805	2012	0.08	2	0.05	1.2	0.45	1/8 (0.125)
1206	3216	0.12	3.2	0.06	1.6	0.55	1/4 (0.25)
1210	3225	0.12	3.2	0.1	2.5	0.55	1/2 (0.50)
1812	4532	0.18	4.5	0.12	3.2	0.55	3/4 (0.75)
2010	5025	0.2	5	0.1	2.5	0.6	3/4 (0.75)
2512	6332	0.25	6.3	0.12	3.2	0.6	1

Rezistoriaus temperatūrinis koeficientas

Nors rezistoriai dažnai laikomi paprastais ir patikimais komponentais, jie nėra idealūs. Jų savybės gali kisti dėl temperatūros, drėgmės, vibracijos, senėjimo, mechaninių apkrovų ar perkrovų. Kai kuriais atvejais šie pokyčiai nėra labai reikšmingi, tačiau tiksliosiose, mažatriukšmės arba didelės galios grandinėse jie tampa svarbūs. Dėl to praktikoje reikia atsižvelgti ne tik į nominaliąją varžą, bet ir į rezistoriaus stabilumą, temperatūrinį koeficientą, patikimumą bei darbo sąlygas.

Temperatūrinis koeficientas parodo, kiek pakinta rezistoriaus varža, temperatūrai pasikeitus 1 °C. Šis dydis paprastai žymimas ppm/°C (milijoninės dalys vienam Celsijaus laipsniui). Kuo temperatūrinis koeficientas mažesnis, tuo rezistorius yra stabilesnis ir mažiau jautrus temperatūros pokyčiams.

Rezistorių duomenų lapuose temperatūrinis koeficientas dažniausiai nurodomas atskaitos temperatūrai 25 °C, tai yra varžos pokytis vertinamas lyginant su nominaliąja varža prie 25 °C. Gamintojai šią 25 °C atskaitą naudoja kaip standartinį palyginimo tašką, nors kai kuriuose specialiuose taikymuose gali būti naudojami ir kiti matavimo intervalai ar metodai.

Pavyzdžiui, jei rezistoriaus temperatūrinis koeficientas yra 100 ppm/°C, tai reiškia, kad jo varža, pakitus temperatūrai 1 °C, pasikeis 100 milijoninių dalių, arba 0,01 % nominaliosios vertės. Tokia priklausomybė ypač svarbi matavimo, etaloninės įtampos, valdymo ir analoginės elektronikos grandinėse, kur net nedidelis varžos pokytis gali turėti įtakos visos sistemos tikslumui.

Pavyzdys

Turime 10 kΩ rezistorių, kurio temperatūrinis koeficientas yra 100 ppm/°C. Kaip pasikeičia rezistoriaus varža, temperatūrai pakilus nuo 25°C iki 75°C?

Sprendimas

$$R = 10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega \cdot \frac{100}{1000000} \cdot 50 = 10\,050 \text{ }\Omega.$$

Atsakymas: padidėja iki 10,05 kΩ.

Kai reikia didesnio tikslumo ir stabilumo, dažnai pasirenkami metalinės plėvelės rezistoriai. Kai reikia išsklaidyti didesnę galią, naudojami vieliniai arba specialūs galios rezistoriai.

Specialūs rezistoriai

Potenciometras

Potenciometras yra kintamosios varžos rezistorius, kurio varžą galima keisti rankiniu būdu. Dažniausiai jis turi tris išvadás: du kraštiniai išvadai prijungti prie varžinio takelio galų, o vidurinis išvadas yra judantis kontaktas, vadinamas slankikliu. Keičiant slankiklio padėtį, kinta varža tarp vidurinio ir kraštinių išvadų.



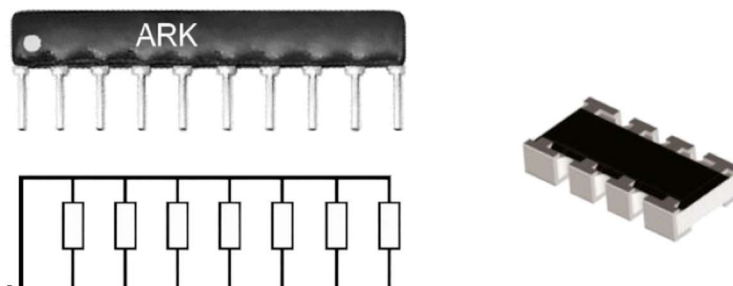
4.1.3 pav. Potenciometro simbolis ir realus vaizdas

Potenciometras gali būti naudojamas dviem pagrindiniais būdais. Kai naudojami visi trys išvadai, jis veikia kaip įtampos daliklis. Kai naudojami tik du išvadai, jis veikia kaip kintamasis rezistorius. Pagal varžos kitimą potenciometrai skirstomi į:

- Tiesiniai - varža kinta tolygiai, proporcingai slankiklio padėčiai
- Logaritminiai - varža kinta netolygiai. Dažniau naudojami garso technikoje.

Rezistorių tinklai

Rezistorių tinklas – tai keli rezistoriai, sujungti viename korpuse. Tokie komponentai naudojami tada, kai schemoje reikia kelių vienodų arba tarpusavyje susijusių rezistorių.



4.1.4 pav. Rezistorių tinklų simbolis ir realus vaizdas

Rezistorių tinklai gali būti įvairių tipų:

- iš kelių atskirų vienodos vertės rezistorių,
- su bendru išvadu,
- sudaryti kaip įtampos daliklių grandinės,
- pritaikyti specialioms loginėms ar matavimo schemoms.

Rezistorių tinklai dažnai naudojami:

- skaitmeninėse schemose,
- loginėse grandinėse,
- indikatorių ir LED valdyme.

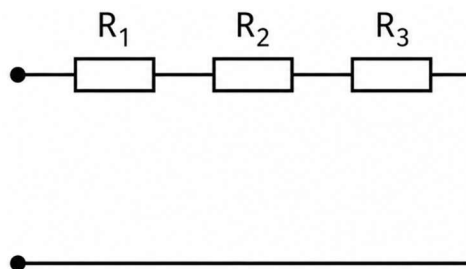
Pagrindinis jų pranašumas tas, kad vienas korpusas užima mažiau vietos negu keli atskiri rezistoriai. Be to, tokiuose tinkluose rezistorių parametrai dažnai būna geriau suderinti tarpusavyje, todėl grandinė veikia stabiliau.

Rezistorių jungimas

Elektrinėse grandinėse rezistoriai gali būti jungiami nuosekliai arba lygiagrečiai. Nuo jungimo būdo priklauso bendra grandinės varža, srovės pasiskirstymas ir įtampos kritimas atskiruose elementuose.

Nuoseklusis rezistorių jungimas

Rezistoriai yra sujungti nuosekliai, kai srovė teka per vieną rezistorių po kito ir tarp jų nėra atsišakojimų. Tokiu atveju per visus rezistorius teka ta pati srovė.



4.1.5 pav. Rezistorių nuoseklaus jungimo schema

Pagrindinės savybės:

- Per visus rezistorius teka ta pati srovė:
 $I = I_1 = I_2 = I_3.$
- Bendra įtampa lygi atskirų įtampų sumai:
 $U = U_1 + U_2 + U_3.$
- Bendra varža lygi visų rezistorių varžų sumai:
 $R = R_1 + R_2 + R_3.$

Sujungus rezistorius nuosekliai, bendra grandinės varža padidėja, nes srovei reikia įveikti kiekvieno rezistoriaus pasipriešinimą vieną po kito. Todėl kuo daugiau rezistorių sujungiama nuosekliai, tuo mažesnė srovė tekės grandine, jei maitinimo įtampa nekinta.

Pavyzdys

Turime nuosekliai sujungtus 3 rezistorius: 110 Ω, 220 Ω, 330 Ω. Kokia bendra grandinės varža?

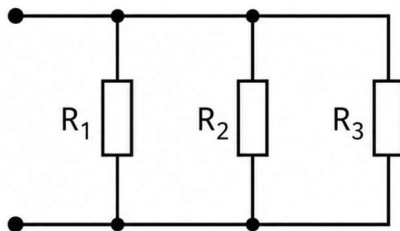
Sprendimas

$$R = 110 + 220 + 330 = 660 \, \Omega.$$

Atsakymas: 660 Ω.

Lygiagrečiasis rezistorių jungimas

Rezistoriai yra sujungti lygiagrečiai, kai jų gnybtai prijungti prie tų pačių dviejų grandinės taškų. Tokiu atveju įtampa visuose rezistoriuose yra vienoda, o srovė pasiskirsto tarp šakų.



4.1.6 pav. Rezistorių lygiagretaus jungimo schema

Pagrindinės savybės:

- Visuose rezistoriuose įtampa vienoda:
 $U = U_1 = U_2 = U_3$
- Bendra srovė lygi šakų srovių sumai:
 $I = I_1 + I_2 + I_3$
- Bendra varža apskaičiuojama pagal atvirkštinių varžų sumą:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Jei lygiagrečiai sujungti tik du rezistoriai, galima naudoti trumpesnę formulę:

$$R_b = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Sujungus rezistorius lygiagrečiai, srovei atsiranda keli keliai tekėti, todėl bendra grandinės varža sumažėja. Bendra varža visada bus mažesnė už mažiausią iš lygiagrečiai sujungtų rezistorių.

Pavyzdys

Turime lygiagrečiai sujungtus 2 rezistorius: 100 Ω, 200 Ω. Kokia bendra grandinės varža?

Sprendimas

$$R = \frac{100 \cdot 200}{100 + 200} = \frac{20000}{300} \approx 66,7 \, \Omega$$

Atsakymas: 66,7 Ω.

Rezistoriaus energija

Elektrinėje grandinėje svarbu ne tik įtampa, srovė ar galia, bet ir energija. Energija parodo, kiek darbo atlieka elektros srovė per tam tikrą laiką. Kitaip tariant, ji nusako, kiek elektros energijos buvo sunaudota arba perduota.

Jei grandinės galia nekinta, energija apskaičiuojama pagal formulę:

$$E = P \cdot t$$

čia:

- E – energija,
- P – galia,
- t – laikas.

Iš šios formulės matyti, kad kuo didesnė galia ir kuo ilgiau prietaisas veikia, tuo daugiau energijos jis sunaudoja.

Pavyzdys

Fizikos klasėje 10 W galios rezistorius veikia 5 sekundes. Kokia bus sunaudota energija?

Sprendimas

$$E = 10 \cdot 5 = 50 \text{ J}$$

Atsakymas: 50 J.

Praktikoje ši formulė padeda suprasti, kiek energijos paverčiama šiluma, šviesa ar mechaniniu darbu. Elektronikoje tai ypač svarbu vertinant, kaip greitai kaista komponentai, kiek energijos sunaudoja grandinė ir kaip parinkti tinkamus elementus konkrečiam darbui.

Tačiau praktikoje, ypač kalbant apie elektros energijos sąnaudas, dažniau naudojami ne džauliai, o vatvalandės (Wh) ir kilovatvalandės (kWh). Todėl dažnai tenka atlikti vienetų konvertavimą.

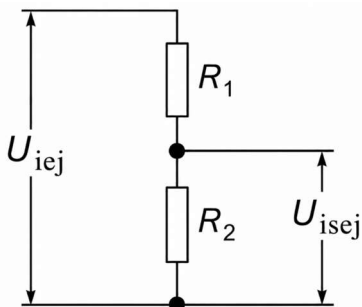
Svarbiausi ryšiai yra šie:

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$$

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

Varžinis daliklis

Įtampos daliklis (angl. voltage divider) – tai viena paprasčiausių ir dažniausiai naudojamų elektronikos grandinių. Ji leidžia iš didesnės įėjimo įtampos gauti mažesnę, proporcingą išėjimo įtampą. Paprasčiausią įtampos daliklį sudaro du rezistoriai, sujungti nuosekliai.



4.1.7 pav. Paprasčiausias varžinis įtampos daliklis

Grandinėje teka ta pati srovė per abu rezistorius, įtampa pasiskirsto proporcingai rezistorių varžoms – didesnė varža „pasiima“ didesnę įtampos dalį (pagal Omo dėsnį: $U = I \cdot R$).

Srovė grandinėje

Kadangi varžos sujungtos nuosekliai, per abi teka ta pati srovė:

$$I = \frac{U_{iej}}{R_1 + R_2}$$

Išėjimo įtampa

Įtampa ties apatiniu rezistoriumi R_2 :

$$U_{isej} = IR_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{iej}$$

Tai reiškia, kad išėjimo įtampa visada yra tam tikra įėjimo įtampos dalis.

4.1.3 lentelė. Dažniausiai naudojami rezistorių nominalai

1.0 Ω	10 Ω	100 Ω	1.0 kΩ	10 kΩ	100 kΩ	1.0 MΩ
1.1 Ω	11 Ω	110 Ω	1.1 kΩ	11 kΩ	110 kΩ	1.1 MΩ
1.2 Ω	12 Ω	120 Ω	1.2 kΩ	12 kΩ	120 kΩ	1.2 MΩ
1.3 Ω	13 Ω	130 Ω	1.3 kΩ	13 kΩ	130 kΩ	1.3 MΩ
1.5 Ω	15 Ω	150 Ω	1.5 kΩ	15 kΩ	150 kΩ	1.5 MΩ
1.6 Ω	16 Ω	160 Ω	1.6 kΩ	16 kΩ	160 kΩ	1.6 MΩ
1.8 Ω	18 Ω	180 Ω	1.8 kΩ	18 kΩ	180 kΩ	1.8 MΩ
2.0 Ω	20 Ω	200 Ω	2.0 kΩ	20 kΩ	200 kΩ	2.0 MΩ
2.2 Ω	22 Ω	220 Ω	2.2 kΩ	22 kΩ	220 kΩ	2.2 MΩ
2.4 Ω	24 Ω	240 Ω	2.4 kΩ	24 kΩ	240 kΩ	2.4 MΩ
2.7 Ω	27 Ω	270 Ω	2.7 kΩ	27 kΩ	270 kΩ	2.7 MΩ
3.0 Ω	30 Ω	300 Ω	3.0 kΩ	30 kΩ	300 kΩ	3.0 MΩ
3.3 Ω	33 Ω	330 Ω	3.3 kΩ	33 kΩ	330 kΩ	3.3 MΩ
3.6 Ω	36 Ω	360 Ω	3.6 kΩ	36 kΩ	360 kΩ	3.6 MΩ
3.9 Ω	39 Ω	390 Ω	3.9 kΩ	39 kΩ	390 kΩ	3.9 MΩ
4.3 Ω	43 Ω	430 Ω	4.3 kΩ	43 kΩ	430 kΩ	4.3 MΩ
4.7 Ω	47 Ω	470 Ω	4.7 kΩ	47 kΩ	470 kΩ	4.7 MΩ
5.1 Ω	51 Ω	510 Ω	5.1 kΩ	51 kΩ	510 kΩ	5.1 MΩ
5.6 Ω	56 Ω	560 Ω	5.6 kΩ	56 kΩ	560 kΩ	5.6 MΩ
6.2 Ω	62 Ω	620 Ω	6.2 kΩ	62 kΩ	620 kΩ	6.2 MΩ
6.8 Ω	68 Ω	680 Ω	6.8 kΩ	68 kΩ	680 kΩ	6.8 MΩ
7.5 Ω	75 Ω	750 Ω	7.5 kΩ	75 kΩ	750 kΩ	7.5 MΩ
8.2 Ω	82 Ω	820 Ω	8.2 kΩ	82 kΩ	820 kΩ	8.2 MΩ
9.1 Ω	91 Ω	910 Ω	9.1 kΩ	91 kΩ	910 kΩ	9.1 MΩ

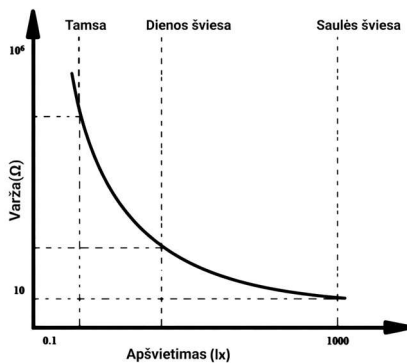
4.2 Fotorezistorius

Fotorezistorius (*angl. LDR - Light Dependent Resistor*) – tai rezistorius, kurio varža priklauso nuo apšvietimo stiprumo. Kuo daugiau šviesos patenka ant jo paviršiaus, tuo jo varža mažėja. Tamsoje LDR varža būna didelė, o apšviestas jis praleidžia srovę lengviau.



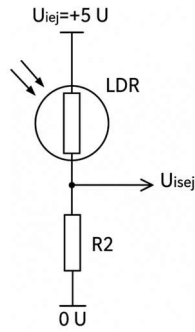
4.2.1 pav. Fotorezistoriaus simbolis ir realus vaizdas

Dažniausiai LDR gaminamas iš šviesai jautrios puslaidininkinės medžiagos, dažnai kadmio sulfido (CdS). Apšvietus šią medžiagą, joje padaugėja laisvųjų krūvininkų, todėl elektrinė varža sumažėja. Kai šviesos mažai, laisvųjų krūvininkų susidaro nedaug, todėl varža išlieka didelė. Toks veikimas vadinamas fotolaidumu.



4.2.2 pav. Fotorezistoriaus varžos priklausomybė nuo apšviestumo

Praktinėse grandinėse fotorezistorius dažniausiai naudojamas ne vienas, o kartu su paprastu rezistoriumi, sudarant įtampos daliklį. Tokiu atveju apšvietimo pokytis paverčiamas įtampos pokyčiu, kurį jau galima matuoti arba perduoti kitai grandinės daliai.



4.2.3 pav. Fotorezistoriaus jungimo schema

Jei LDR sujungtas nuosekliai su rezistoriumi R_2 , išėjimo įtampa gali būti apskaičiuojama taip:

$$U_{isej} = U_{iej} \times \frac{R_2}{R_{LDR} + R_2}$$

Kai apšvietimas padidėja, LDR varža sumažėja, todėl keičiasi ir išėjimo įtampa. Taip šviesos intensyvumas paverčiamas elektriniu signalu.

Fotorezistoriai naudojami:

- automatinėse lauko lempose,
- šviesumo jutikliuose,
- dienos ir nakties aptikimo grandinėse,
- ekranų ar apšvietimo ryškumo valdyme,
- paprastose matavimo ir valdymo sistemose.

Apibendrinant, LDR yra paprastas šviesai jautrus rezistorius, kurio varža mažėja didėjant apšvietimui. Dėl šios savybės jis plačiai naudojamas ten, kur reikia aptikti šviesos lygį ir paversti jį elektriniu signalu.

Pavyzdys

Grandinėje fotorezistorius LDR sujungtas su rezistoriumi $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ kaip įtampos daliklis. Maitinimo įtampa yra 5 V. Kokia įtampa išėjime tamsoje, kai $R_{ldr} = 50 \text{ k}\Omega$?

Sprendimas

$$U_{isej} = U_{iej} \times \frac{R_2}{R_{LDR} + R_2} = 5 \cdot \frac{10}{60} = 0,83 \text{ V}$$

Atsakymas: 0,83 V.

4.3 Kondensatoriai

Kondensatorius yra elektronikos komponentas, skirtas elektriniam krūviui ir energijai kaupti elektriniame lauke. Paprasčiausias kondensatorius sudarytas iš dviejų laidžių plokštelių, atskirtų izoliacine medžiaga, vadinama dielektriku. Kai prie kondensatoriaus prijungiama įtampa, ant vienos plokštelės kaupiasi teigiamas krūvis, o ant kitos – neigiamas.



4.3.1 pav. Kondensatoriaus simboliai ir vaizdai

Kondensatoriaus gebėjimą sukaupti krūvį nusako talpa. Ji žymima raide C ir matuojama faradais (F). Talpa parodo, kiek krūvio kondensatorius sukaupia esant tam tikrai įtampai.

Galima aiškiai parašyti, nuo ko priklauso kondensatoriaus talpa:

- plokštelių ploto S ,
- atstumo tarp plokštelių d ,
- dielektriko savybių.

Tai galima užrašyti formule:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}$$

čia:

- S – plokštelių plotas,
- d – atstumas tarp plokštelių,
- ε – dielektriko elektrinė skvarba,
- ε_0 – vakuumo elektrinė skvarba,
- ε_r – santykinė dielektrinė skvarba.

Iš šios formulės matyti:

- kuo didesnis plokštelių plotas, tuo talpa didesnė;

- kuo mažesnis atstumas tarp plokštelių, tuo talpa didesnė;
- kuo didesnė dielektriko skvarba, tuo talpa didesnė.

Pagrindinis ryšys tarp krūvio, talpos ir įtampos yra:

$$Q = C \cdot U$$

čia:

- Q – elektrinis krūvis,
- C – talpa,
- U – įtampa.

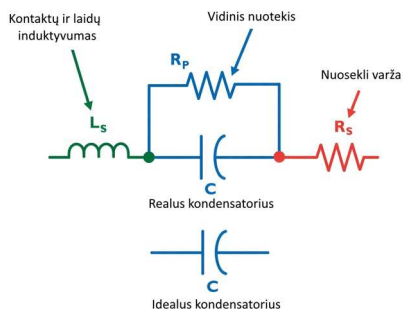
Iš šios formulės matyti, kad kuo didesnė kondensatoriaus talpa arba kuo didesnė įtampa, tuo daugiau krūvio jis gali sukaupti.

Vienas faradas yra labai didelė talpa, todėl praktikoje dažniau naudojami mažesni vienetai:

- mikrofaradas (μF) – $10^{-6} F$,
- nanofaradas (nF) – $10^{-9} F$,
- pikofaradas (pF) – $10^{-12} F$.

Teorijoje dažniausiai nagrinėjamas idealus kondensatorius, tačiau realus kondensatorius turi netobulumų ir pasižymi:

- nuotėkiu, todėl per laiką praranda dalį sukaupto krūvio;
- nuoseklią varžą (ESR), todėl dalis energijos virsta šiluma;
- parazitiniu induktyvumu, kuris atsiranda dėl išvadų ir konstrukcijos.

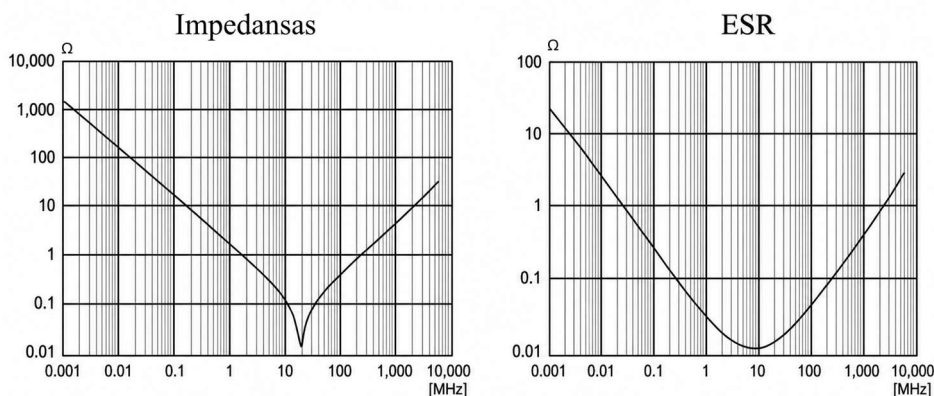


4.3.2 pav. Kondensatoriaus realaus modelio palyginimas su idealiu

Kaip matyti iš aukščiau pateikto paveikslo, realus kondensatorius turi ne tik talpą, bet ir parazitinį induktyvumą bei nuostolius. Dėl to jo elgsena priklauso nuo dažnio. Mažesniuose dažniuose kondensatorius daugiausia veikia kaip talpinis elementas, o didesniuose dažniuose vis labiau pasireiškia jo induktyvumas.

Ties rezonansiniu dažniu kondensatoriaus impedansas yra mažiausias, todėl šiame dažnių ruože jis efektyviausiai slopina maitinimo trikdžius. Kadangi skirtingų talpų ir korpusų kondensatoriai turi skirtingus rezonansinius dažnius, vienas kondensatorius negali vienodai gerai veikti visame dažnių diapazone.

Dėl šios priežasties maitinimo grandinėse, kur gali reikėti slopinti plataus diapazono triukšmus, pavyzdžiui, prie mikrovaldiklių, dažnai naudojami keli skirtingos talpos kondensatoriai. Didesnės talpos kondensatoriai kompensuoja lėtesnius srovės pokyčius, o mažesnės talpos keraminiai kondensatoriai efektyviau slopina aukšto dažnio trikdžius. Taip užtikrinamas stabilus maitinimas ir patikimesnis mikrovaldiklio veikimas.



4.3.3 pav. Kondensatoriaus impedanso ir ekvivalentinės nuosekliosios varžos priklausomybė nuo dažnio. Kondensatoriaus talpa – 0,1 μ F, korpusas – 0805, korpuso induktyvumas – 0,73 nH.

Žemuose dažniuose kondensatorius dažnai elgiasi beveik idealiai, tačiau aukštuose dažniuose, impulsinėse grandinėse ir greituose pereinamuosiuose procesuose jo parazitinės savybės tampa svarbios, todėl aukšto dažnio grandinėms reikia rinktis aukšto dažnio kondensatorius su žemu ESR (*angl. equivalent series resistance*): keraminius (X7R, X7S), tantalinius, specialius aliuminius.

Kaip kondensatoriumi teka srovė?

Skirtingai nuo rezistoriaus, kondensatoriui svarbu ne vien pati įtampa, o tai, kaip greitai ji kinta. Srovė per kondensatorių aprašoma formule:

$$I = C \frac{dU}{dt}$$

Tai reiškia, kad srovė per kondensatorių priklauso nuo įtampos kitimo greičio. Jei įtampa nekinta, idealus kondensatorius nuolatinės srovės nebepraleidžia. Tačiau jei įtampa kinta, kondensatoriumi teka srovė.

Šią savybę galima suprasti taip:

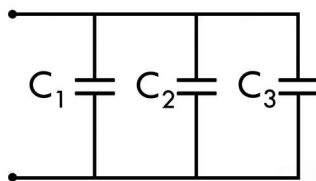
- jei įtampa keičiasi greitai, srovė yra didesnė;
- jei įtampa keičiasi lėtai, srovė mažesnė;
- jei įtampa visai nekinta, srovė lygi nuliui.

Kondensatorių jungimas

Kaip ir rezistoriai, kondensatoriai gali būti jungiami lygiagrečiai ir nuosekliai. Tačiau jų bendros talpos formulės yra priešingos rezistorių formulėms.

Lygiagretusis jungimas

Kai kondensatoriai jungiami lygiagrečiai, jų bendroji talpa lygi atskirų talpų sumai:



4.3.4 pav. Kondensatorių lygiagretus jungimas

$$C_{bendr} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

Taip yra todėl, kad lygiagrečiai sujungti kondensatoriai tarsi padidina bendrą plokštelių plotą, todėl sukaupia daugiau krūvio.

Pavyzdys

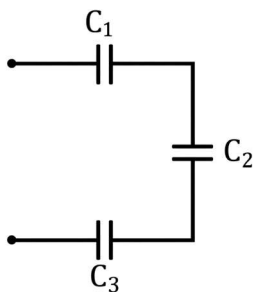
Grandinėje du kondensatoriai sujungti lygiagrečiai: $C_1 = 10 \mu F$ ir $C_2 = 22 \mu F$. Kokia bendra grandinės talpa?

Sprendimas

$$C_{benr} = 10 + 22 = 32 \mu F$$

Atsakymas: $32 \mu F$.

Nuoseklusis jungimas



4.3.5 pav. Kondensatorių nuoseklusis jungimas

Kai kondensatoriai jungiami nuosekliai, jų bendroji talpa apskaičiuojama taip:

$$\frac{1}{C_{bendr}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

Dviejų kondensatorių atveju patogu naudoti sutrumpintą formulę:

$$C_{bendr} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Nuosekliai sujungus kondensatorius, bendroji talpa sumažėja. Tai galima aiškinti tuo, kad toks jungimas tarsi padidina atstumą tarp plokštelių.

Pavyzdys

Grandinėje du kondensatoriai sujungti nuosekliai: $C_1 = 10 \mu F$ ir $C_2 = 20 \mu F$. Kokia bendra grandinės talpa?

Sprendimas

$$C_{bendr} = \frac{10 \cdot 20}{10 + 20} = \frac{200}{30} \approx 6,7 \mu F$$

Atsakymas: $6,7 \mu F$.

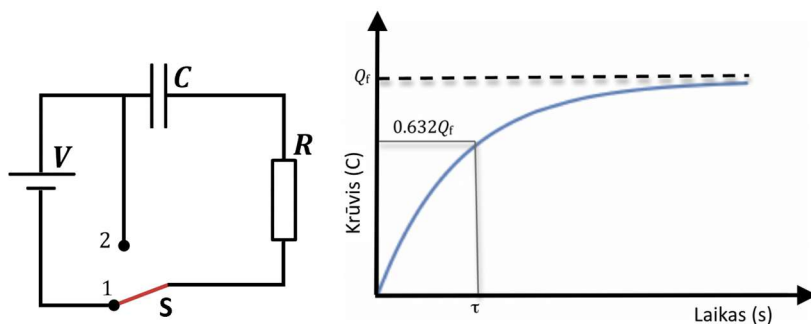
RC grandinės

Kai kondensatorius sujungiamas su rezistoriumi, gaunama RC grandinė. Tokios grandinės labai svarbios elektronikoje, nes jose atsiranda laiko priklausomybės: įtampa ir srovė kinta ne akimirksniu, o palaipsniui.

RC grandinių analizė dažnai atliekama laiko srityje, tai yra nagrinėjama, kaip įtampa ir srovė kinta bėgant laikui.

Kondensatoriaus įsikrovimas

Jei prie maitinimo šaltinio per rezistorių prijungiamas iš pradžių neįkrautas kondensatorius, jo įtampa didėja palaipsniui.



4.3.6 pav. Kondensatoriaus įkrovimo schema ir krūvio augimo kreivė (analogiška įtampai)

Įsikrovimo procesą aprašo formulė:

$$V(t) = V_i(1 - e^{-t/RC})$$

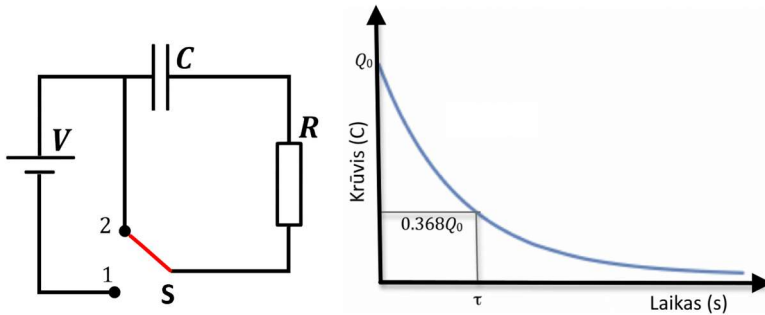
čia:

- V_t – galutinė maitinimo įtampa,
- R – rezistoriaus varža,
- C – kondensatoriaus talpa,
- t – laikas.

Iš pradžių kondensatorius kraunasi greitai, bet artėjant prie galutinės įtampos procesas lėtėja. Teoriškai kondensatorius galutinę įtampą pasiekia tik po begalinio laiko, tačiau praktikoje pakanka kelių laiko konstantų.

Kondensatoriaus išsikrovimas

Jei įkrautas kondensatorius prijungiamas prie rezistoriaus, jis pradeda išsikrauti.



4.3.7 pav. Kondensatoriaus iškrovimo schema ir krūvio kritimo kreivė (analogiška įtampai)

Kondensatoriaus įtampa mažėja ne tiesiškai, o pagal eksponentinį dėsnį:

$$V(t) = V_0 e^{-t/RC}$$

čia:

- V_0 – pradinė įtampa,
- R – rezistoriaus varža,
- C – kondensatoriaus talpa,
- t – laikas.

Tai reiškia, kad pradžioje įtampa mažėja greitai, o vėliau vis lėčiau.

Kadangi srovė susijusi su įtampos kitimu, srovė išsikrovimo metu taip pat mažėja eksponentiškai.

Laiko konstanta

RC grandinės elgseną nusako laiko konstanta:

$$\tau = RC$$

Jei R matuojama omais, o C – faradais, tuomet RC išreiškiama sekundėmis.

Laiko konstanta parodo, kaip greitai vyksta įkrovimo arba iškrovimo procesas:

- per laiką $t = RC$ kondensatoriaus įtampa įkrovimo metu pasiekia maždaug 63 % galutinės vertės;
- iškrovimo metu po laiko $t = RC$ lieka apie 37 % pradinės įtampos.

Praktikoje dažnai taikoma taisyklė, kad po maždaug 5 RC kondensatorius jau gali būti laikomas beveik visiškai įsikrovusiu arba išsikrovusiu, nes skirtumas nuo galutinės vertės tampa labai mažas.

Taip pat svarbu žinoti, kad RC grandinės kilimo laikas nuo 10 % iki 90 % galutinės vertės yra maždaug:

$$t_r \approx 2,2RC$$

Ši formulė dažnai naudojama vertinant impulsinių signalų formą.

Kondensatorius ir signalų formavimas

Kai kondensatorius veikia kintančių signalų grandinėje, jis gali:

- slopinti staigius įtampos pokyčius,
- išlyginti maitinimo pulsacijas,
- atskirti pastoviąją įtampos dedamąją,
- perduoti kintamąją dedamąją,
- formuoti vėlinimus ir trumpus impulsus.

Jei kvadratinis signalas tiekiamas į RC grandinę, išėjimo signalas dažnai tampa nebe stačiakampis, o apvalintų briaunų. Tai vyksta todėl, kad kondensatorius nespėja akimirksniu pakeisti savo įtampos.

Būtent dėl šios savybės RC grandinės naudojamos:

- laiko grandinėse,
- vėlinimo schemose,

- filtravimo grandinėse,
- signalo formavimo mazguose.

Kondensatoriuose sukaupta energija

Be krūvio kaupimo, kondensatorius taip pat kaupia energiją. Ji apskaičiuojama pagal formulę:

$$W = \frac{CU^2}{2}$$

čia:

- W – energija,
- C – talpa,
- U – įtampa.

Tai reiškia, kad kuo didesnė talpa ir kuo didesnė įtampa, tuo daugiau energijos sukaupiama. Ši savybė svarbi maitinimo šaltiniuose, blykstėse, impulsinėse grandinėse ir energijos kaupimo sistemose.

Pavyzdys

Turimas kondensatorius yra $100 \mu F$, jis įkraunamas iki $10 V$ įtampos. Kokia kondensatoriuje sukaupta energija?

Sprendimas

$$W = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 10^2}{2} = \frac{0,01}{2} = 0,005 \text{ J}$$

Atsakymas: $0,005 \text{ J}$.

Kondensatorių tipai

Praktikoje naudojami įvairių tipų kondensatoriai. Dažniausi yra:

- keraminiai,
- plėveliniai,
- elektrolitiniai

Keraminiai kondensatoriai dažniausiai naudojami mažesnėms talpoms ir aukštesniems dažniams. Plėveliniai pasižymi geru stabilumu ir dažnai naudojami ten, kur svarbus tikslumas. Elektrolitiniai kondensatoriai leidžia gauti dideles talpas, todėl dažnai naudojami maitinimo šaltiniuose filtravimui ir energijos kaupimui.

Kai kurie kondensatoriai, ypač elektrolitiniai, yra poliariniai, todėl juos reikia jungti laikantis poliškumo. Netinkamai prijungtas poliarinis kondensatorius gali sugesti.

Kur naudojami kondensatoriai?

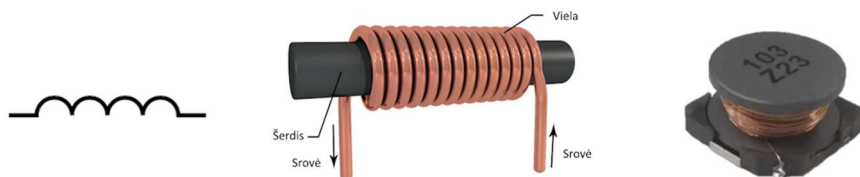
Kondensatoriai elektronikoje naudojami labai plačiai. Jie reikalingi:

- maitinimo šaltinių filtravimui,
- įtampos pulsacijų mažinimui,
- energijos kaupimui,
- signalų perdavimui tarp grandinės pakopų,
- triukšmų slopinimui,
- virpesių ir generatorių grandinėms,
- laiko grandinėms ir vėlinimui.

Todėl kondensatorius yra vienas svarbiausių elektronikos komponentų, ypač ten, kur reikia dirbti su kintančiais signalais ir laiko priklausomybėmis.

4.4 Induktorius

Induktorius – tai elektronikos komponentas, kuris kaupia energiją magnetiniame lauke. Dažniausiai jis sudarytas iš vielos, susuktos į ritę. Kai per ritę teka srovė, aplink ją susidaro magnetinis laukas, kuriame ir sukaupiama energija.



4.4.1 pav. Induktoriaus simbolis ir vaizdai

Svarbiausia indukatoriaus savybė yra induktyvumas L . Jis matuojamas henriais (H).

Induktyvumas apibūdina komponento gebėjimą priešintis srovės pokyčiams grandinėje. Kai srovė bando staigiai pasikeisti, ritė sukuria įtampą, kuri tam pokyčiui priešinasi.

Induktyvumas

Induktyvumas priklauso nuo ritės konstrukcijos ir naudojamos šerdies. Tai nusako formulė:

$$L = \mu \frac{N^2 A}{l}$$

čia:

- L – induktyvumas,
- N – vijų skaičius,
- A – ritės skerspjūvio plotas,
- l – ritės ilgis,
- μ – šerdies magnetinė skvarba.

Ši formulė parodo kelis svarbius dėsningumus:

- kuo daugiau vijų, tuo induktyvumas didesnis,
- kuo didesnis ritės plotas, tuo induktyvumas didesnis,
- kuo trumpesnė ritė, tuo induktyvumas didesnis,
- feromagnetinė šerdis (geležis, feritas) stipriai padidina induktyvumą.

Labai svarbus momentas:

$$L \propto N^2$$

Tai reiškia, kad padvigubinus vijų skaičių, induktyvumas padidėja keturis kartus.

Energija induktoriuje

Induktorius kaupia energiją magnetiniame lauke. Ji apskaičiuojama pagal formulę:

$$W = \frac{1}{2}LI^2$$

čia:

- W – energija (J),
- L – induktyvumas (H),
- I – srovė (A).

Matome, kad energija priklauso nuo srovės kvadrato. Tai reiškia, kad padidinus srovę du kartus, energija padidėja keturis kartus.

Įtampa induktoriuje

Induktorius generuoja įtampą, kai keičiasi srovė.

Šis ryšys aprašomas formule:

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

Tai reiškia:

- kuo greičiau keičiasi srovė, tuo didesnė indukuota įtampa,
- jei srovė nekinta, induktorius elgiasi kaip paprastas laidininkas.

Todėl DC grandinėje po kurio laiko ritė tampa beveik trumpuoju jungimu.

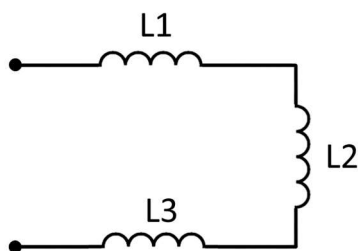
Induktorių jungimas

Kaip ir kondensatoriai, induktoriai gali būti jungiami lygiagrečiai ir nuosekliai. Tačiau jų bendros induktyvumo formulės yra priešingos kondensatorių formulėms ir atitinka rezistorių formules.

Nuoseklus induktorių jungimas

Kai induktoriai jungiami nuosekliai, bendras induktyvumas yra visų induktyvumų suma (analogiška rezistoriui):

$$L_{bendr} = L_1 + L_2 + L_3$$



4.4.2 pav. Nuoseklus induktorių jungimas

Pavyzdys

Turime induktorius, sujungtus nuosekliai: $L_1 = 2 \text{ H}$ ir $L_2 = 3 \text{ H}$. Koks bendras grandinės induktyvumas?

Sprendimas

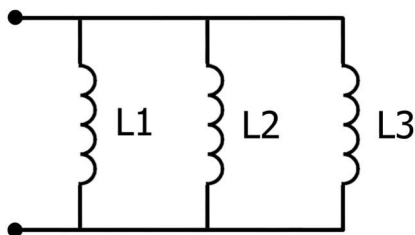
$$L_{bendr} = L_1 + L_2 = 2 + 3 = 5 \text{ H}$$

Atsakymas: 5H.

Lygiagretus induktorių jungimas

Kai induktoriai jungiami lygiagrečiai, bendras induktyvumas skaičiuojamas:

$$\frac{1}{L_{bendr}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$



4.4.3 pav. Lygiagretus induktorių jungimas

Tokiu atveju bendras induktyvumas visada bus mažesnis už mažiausio induktoriaus induktyvumą.

Dviejų induktorių atveju:

$$L_{bendr} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$$

Pavyzdys

Turime induktorius, sujungtus lygiagrečiai: $L_1 = 2$ H ir $L_2 = 3$ H. Koks bendras grandinės induktyvumas?

Sprendimas

$$L_{bendr} = \frac{2 \cdot 3}{2 + 3} = \frac{6}{5} \approx 1,2 \text{ H}$$

Atsakymas: 1,2 H.

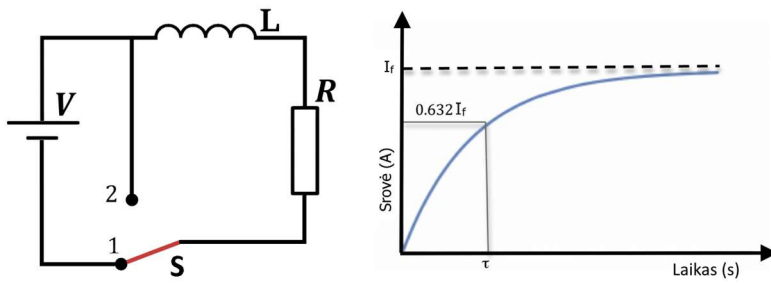
RL grandinės

Kai ritė sujungiama su rezistoriumi, gaunama RL grandinė. Tokios grandinės labai svarbios elektronikoje, nes jose taip pat atsiranda laiko priklausomybės: srovė ir įtampa kinta ne akimirksniu, o palaipsniui.

RL grandinių analizė dažnai atliekama laiko srityje, tai yra nagrinėjama, kaip srovė ir įtampa kinta bėgant laikui.

Ritės srovės didėjimas

Jei prie maitinimo šaltinio per rezistorių prijungiama ritė, srovė joje pradeda didėti palaipsniui. Taip vyksta todėl, kad ritė priešinas staigiam srovės kitimui.



4.4.4 pav. RL grandinės įjungimo schema ir srovės augimo kreivė

Srovės didėjimo procesą aprašo formulė:

$$I(t) = I_f(1 - e^{-tR/L})$$

čia:

- I_f – galutinė nusistovėjusi srovė,
- R – rezistoriaus varža,
- L – ritės induktyvumas,
- t – laikas.

Kadangi galutinė srovė lygi:

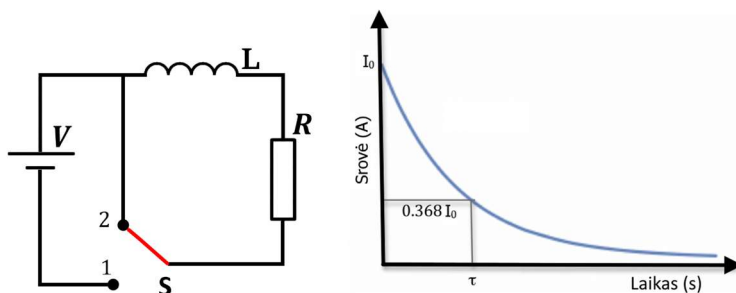
$$I_f = \frac{U}{R}$$

tai matome, kad nusistovėjusioje būsenoje srovę lemia maitinimo įtampa ir grandinės varža.

Iš pradžių srovė didėja greitai, tačiau artėjant prie galutinės vertės jos didėjimas lėtėja. Teoriškai galutinė srovė pasiekama tik po begalinio laiko, tačiau praktikoje pakanka kelių laiko konstantų – 5τ .

Ritės srovės mažėjimas

Jei ritėje jau teka srovė, o maitinimo šaltinis atjungiamas, srovė neišnyksta akimirksniu. Ritė, priešindamasi staigiam srovės sumažėjimui, palaipsniui atiduoda magnetiniame lauke sukauptą energiją.



4.4.5 pav. RL grandinės išjungimo schema ir srovės kritimo kreivė

Srovės mažėjimą aprašo formulė:

$$I(t) = I_0 e^{-t/L}$$

čia:

- I_0 – pradinė srovė,
- R – rezistoriaus varža,
- L – ritės induktyvumas,
- t – laikas.

Tai reiškia, kad pradžioje srovė mažėja greitai, o vėliau vis lėčiau. Taigi ritės srovė mažėja ne tiesiškai, o pagal eksponentinį dėsnį.

Laiko konstanta

RL grandinės elgseną nusako laiko konstanta:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Jei L matuojama henriais, o R omais, tuomet τ išreiškiama sekundėmis.

Laiko konstanta parodo, kaip greitai vyksta srovės augimo arba mažėjimo procesas:

- per laiką $t = \tau = \frac{L}{R}$ srovė didėjimo metu pasiekia maždaug 63 % galutinės vertės;
- mažėjimo metu po laiko $t = \tau$ lieka apie 37 % pradinės srovės.

Praktikoje dažnai taikoma taisyklė, kad po maždaug 5τ srovė gali būti laikoma beveik visiškai nusistovėjusia arba beveik išnykusia, nes skirtumas nuo galutinės vertės tampa labai mažas.

Taip pat svarbu žinoti, kad RL grandinės kilimo laikas nuo 10 % iki 90 % galutinės srovės vertės yra maždaug:

$$t_r \approx 2,2 \frac{L}{R}$$

Ši formulė dažnai naudojama vertinant pereinamuosius procesus ir impulsinių signalų formą.

Induktorių tipai

Praktikoje naudojami įvairių tipų induktoriai. Dažniausi yra:

- oro šerdies induktoriai,
- feritinės šerdies induktoriai,
- geležies miltelių šerdies induktoriai.

Oro šerdies induktoriai dažniausiai naudojami aukštesniems dažniams, nes jie neturi magnetinės šerdies nuostolių ir pasižymi geromis aukštadažnėmis savybėmis. Feritinės šerdies induktoriai leidžia gauti didesnį induktyvumą nedideliame tūryje, todėl dažnai naudojami impulsiniuose maitinimo šaltiniuose ir filtravimo grandinėse. Geležies miltelių šerdies induktoriai pasižymi geru energijos kaupimu ir dažnai naudojami galios elektronikoje.

Skirtingai nei kai kurie kondensatoriai, induktoriai paprastai neturi poliškumo, todėl juos galima jungti bet kuria kryptimi. Tačiau kai kuriose konstrukcijose svarbios šerdies savybės ir ritės konstrukcija, nes jos lemia induktyvumą, nuostolius ir maksimalų leistiną srovės dydį.

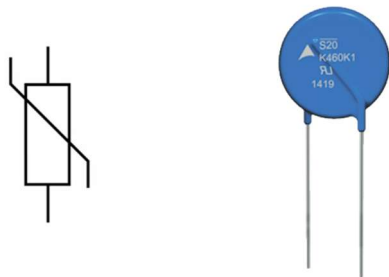
Induktoriai elektronikoje naudojami labai plačiai. Jie reikalingi:

- maitinimo šaltinių filtravimui,
- srovės pulsacijų mažinimui,
- energijos kaupimui impulsinėse grandinėse,
- elektromagnetinių trikdžių slopinimui,
- filtrams ir rezonansinėms grandinėms,
- impulsiniams įtampos keitikliams,
- elektromagnetams ir relėms.

Todėl induktorius yra svarbus elektronikos komponentas, ypač galios elektronikoje ir filtravimo grandinėse, kur reikia valdyti srovės kitimą. Induktorius kaupia energiją magnetiniame lauke ir priešinasi staigiems srovės pokyčiams grandinėje.

4.5 Varistoriai

Varistorius – tai elektronikos komponentas, kurio varža priklauso nuo įtampos. Esant mažai įtampai, varistorius turi didelę varžą ir beveik nepraleidžia srovės. Tačiau kai įtampa viršija tam tikrą ribą, jo varža staigiai sumažėja, todėl jis pradeda praleisti srovę. Dėl šios savybės varistorius dažnai naudojamas kaip apsauginis elementas, saugantis grandines nuo įtampos šuolių.



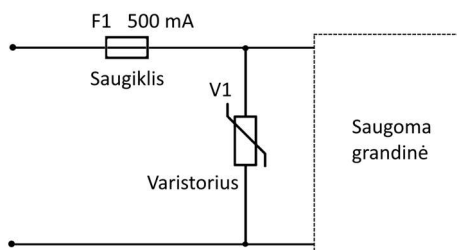
4.5.1 pav. Varistoriaus simbolis ir vaizdas

Veikimo principas

Varistoriaus veikimą galima apibūdinti taip:

- esant normaliai įtampai - varža didelė, srovė maža,
- esant per didelei įtampai - varža labai sumažėja, srovė padidėja.

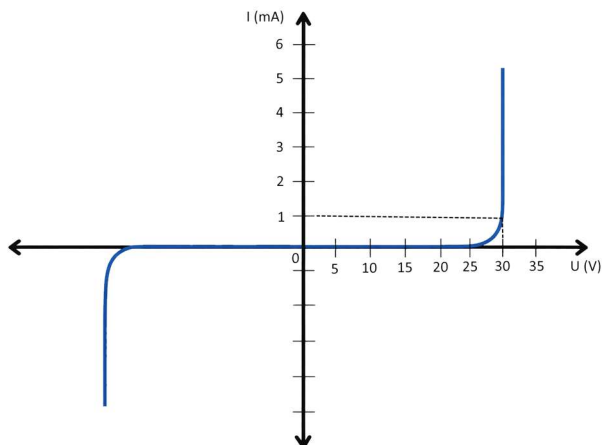
Tai reiškia, kad varistorius „įsijungia“ tik tada, kai įtampa tampa pavojinga.



4.5.2 pav. Tipinė varistoriaus jungimo schema

Kaip matyti iš 4.5.2 paveikslo, tipinėje jungimo schemoje yra 2 pagrindiniai komponentai: saugiklis ir varistorius. Esant pakankamai dideliam arba ilgalaikiam viršįtampiui, varistoriaus varža sumažėja ir juo pradeda tekėti didelė srovė. Jei ši srovė viršija saugiklio leistiną vertę pakankamai ilgą laiką, saugiklis perdega ir atjungia grandinę nuo įtampos šaltinio.

Varistoriaus voltamperinė charakteristika yra netiesinė – tai reiškia, kad srovė neproporcingai priklauso nuo įtamos.



4.5.3 pav. Varistoriaus voltamperinė charakteristika

Dažniausiai naudojami varistorių tipai:

- metalų oksido varistoriai (MOV),
- silicio karbido varistoriai (SiC),
- daugiasluoksniai (MLV).

Plačiausiai naudojami MOV varistoriai, jie gaminami iš cinko oksido ir pasižymi geromis apsauginėmis savybėmis.

Varistorių panaudojimas

Varistoriai naudojami ten, kur reikia apsaugoti įrangą nuo įtamos šuolių:

- maitinimo šaltiniuose,
- tinklo įtamos apsaugos grandinėse,
- buitinėje elektronikoje,
- pramoniniuose įrenginiuose,
- žaibo ir viršįtampių apsaugai.

Renkantis varistorių svarbu atsižvelgti į:

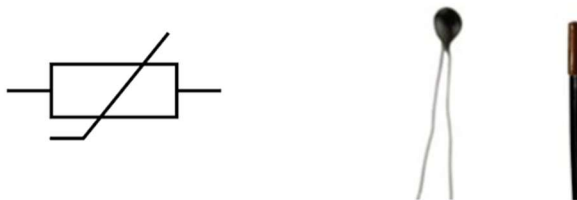
- vardinę įtampą,
- maksimalią sugertą energiją,
- reakcijos greitį,
- leistiną srovę.

Taip pat svarbu žinoti, kad po stiprių viršįtampių varistorius gali palaipsniui degraduoti, todėl kartais jį reikia keisti.

4.6 Temperatūros jutikliai

Temperatūros matavimas yra labai svarbi elektronikos, automatikos ir pramonės sistemų dalis. Daugelio įrenginių veikimas, saugumas ir patikimumas priklauso nuo to, kaip tiksliai galima stebėti ir valdyti temperatūrą. Temperatūros matavimas naudojamas tiek paprastuose buitiniuose prietaisuose, tiek sudėtingose pramoninėse, medicininėse ir mokslinėse sistemose.

Elektronikoje temperatūra dažniausiai matuojama naudojant jutiklius, kurių tam tikras elektrinis parametras kinta priklausomai nuo temperatūros. Dažniausiai kinta elektrinė varža, generuojama įtampa arba puslaidininkinio elemento išėjimo signalas.



4.6.1 pav. Termistoriaus simbolis ir vaizdas

Pagal veikimo principą temperatūros jutikliai gali būti kelių tipų, o kiekvienas jų turi savų privalumų, trūkumų ir taikymo sričių:

- NTC termistoriai (*angl. Negative Temperature Coefficient*) – jų varža, didėjant temperatūrai, mažėja. Tokie jutikliai dažnai naudojami temperatūros matavimui, kompensavimui ir įjungimo srovės ribojimui. Pavyzdžiai: NTC 10k, NTC 1.8k, NTC 100k ir kt.

- PTC termistoriai (*angl. Positive Temperature Coefficient*) – jų varža, didėjant temperatūrai, didėja. Jie dažnai naudojami apsaugos, srovės ribojimo ir perkaitimo kontrolės grandinėse. Pavyzdžiai: PTC saugikliai, KTY81, KTY84 ir kt.
- RTD jutikliai (*angl. Resistance Temperature Detector*) – tai varžiniai temperatūros jutikliai, dažniausiai gaminami iš metalų, kurių varža didėja kylant temperatūrai. Jie pasižymi dideliu tikslumu, stabilumu ir yra plačiai naudojami pramonėje. Pavyzdžiai: PT100, PT1000.
- Termoporos (*angl. Thermocouple*) – tai temperatūros jutikliai, sudaryti iš dviejų skirtingų metalų. Kintant temperatūrai jų sandūroje susidaro termoelektrinė įtampa. Termoporos plačiai naudojamos aukštų temperatūrų matavimui ir pramoninėse sistemose. Pavyzdžiai: K tipo, J tipo, T tipo termoporos.
- Integriniai temperatūros jutikliai – tai mikroschemos, kurios temperatūrą paverčia elektriniu signalu: analogine įtampa, srove arba skaitmeniniu duomenų signalu. Tokie jutikliai dažnai naudojami mikrovaldiklių sistemose, buitinėje elektronikoje ir matavimo įrenginiuose. Pavyzdžiai: LM35, TMP36, DS18B20 ir kt.

Renkantis temperatūros jutiklį, svarbu atsižvelgti į matavimo tikslumą, jautrumą, darbinį temperatūrų diapazoną, reakcijos laiką, kainą, stabilumą ir aplinkos sąlygas. Pavyzdžiui, pramonėje dažniausiai naudojami RTD jutikliai ir termoporos, o paprastesnėse elektronikos grandinėse dažnai pakanka termistorių arba integrinųjų temperatūros jutiklių.

NTC termistoriai

NTC termistoriai dažniausiai naudojami temperatūros matavimui ir kontrolei. Jų veikimo principas pagrįstas tuo, kad kylant temperatūrai medžiagos laidumas didėja, todėl elektrinė varža mažėja. Tokie termistoriai pasižymi dideliu jautrumu, todėl gali tiksliai reaguoti net į nedidelius temperatūros pokyčius.

NTC termistoriai taikomi:

- temperatūros jutikliuose;
- elektroninių grandinių temperatūros kompensavimui;
- baterijų apsaugos sistemose;
- skaitmeniniuose termometruose;
- įjungimo srovės ribojimo grandinėse.

Pagrindinė NTC varžos priklausomybė nuo temperatūros:

$$R_T = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

Kur:

- R_T – varža temperatūroje T ,
- R_0 – nominali varža temperatūroje T_0 ,
- B – medžiagos konstanta,
- T, T_0 – temperatūra kelvinais.

Dažniausiai naudojamas atvejis, kai nominali temperatūra yra 25 °C.

Kadangi daug NTC žymimi, pavyzdžiui, NTC 10k @ 25 °C, dažnai rašoma:

$$R_T = R_{25} \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)}$$

Kur:

- R_{25} – varža prie 25 °C,
- T – temperatūra kelvinais.

Dažniausiai sutinkamos B vertės:

- 10k – 3950,
- 10k – 3435.

Nepaisant to, kad NTC jutikliai aprašomi formulėmis, jos yra supaprastintos ir geriausia turėti tikslių temperatūrų lentelę, tokią kaip pateikta žemiau.

4.6.1 lentelė. NTC 10k jutiklio su B = 3435K tipinė verčių lentelė

Temperatūra, °C	Varža, kΩ	Temperatūra, °C	Varža, kΩ	Temperatūra, °C	Varža, kΩ	Temperatūra, °C	Varža, kΩ	Temperatūra, °C	Varža, kΩ
-30	116.5089	-9	41.1663	12	16.6048	33	7.4541	54	3.6544
-29	110.4932	-8	39.3153	13	15.9475	34	7.1919	55	3.5393
-28	104.8272	-7	37.5587	14	15.3198	35	6.9403	56	3.4284
-27	99.4883	-6	35.8910	15	14.7203	36	6.6987	57	3.3215
-26	94.4558	-5	34.3074	16	14.1475	37	6.4669	58	3.2185
-25	89.7101	-4	32.8029	17	13.6003	38	6.2442	59	3.1191
-24	85.2332	-3	31.3734	18	13.0772	39	6.0304	60	3.0234
-23	81.0082	-2	30.0145	19	12.5771	40	5.8250	61	2.9310
-22	77.0194	-1	28.7225	20	12.0988	41	5.6276	62	2.8419
-21	73.2523	0	27.4936	21	11.6413	42	5.4380	63	2.7559
-20	69.6931	1	26.3245	22	11.2037	43	5.2557	64	2.6729
-19	66.3291	2	25.2119	23	10.7848	44	5.0804	65	2.5929
-18	63.1485	3	24.1527	24	10.3839	45	4.9119	66	2.5156
-17	60.1402	4	23.1442	25	10.0000	46	4.7498	67	2.4410
-16	57.2939	5	22.1835	26	9.6324	47	4.5939	68	2.3690
-15	54.5998	6	21.2682	27	9.2802	48	4.4439	69	2.2994
-14	52.0490	7	20.3959	28	8.9428	49	4.2995	70	2.2322
-13	49.6330	8	19.5644	29	8.6195	50	4.1605	71	2.1673
-12	47.3439	9	18.7714	30	8.3096	51	4.0268	72	2.1046
-11	45.1743	10	18.0151	31	8.0124	52	3.8980	73	2.0440
-10	43.1172	11	17.2935	32	7.7275	53	3.7739	74	1.9854

PTC termistoriai

PTC termistoriai veikia priešingu principu nei NTC – kylant temperatūrai jų varža didėja. Dėl šios savybės jie dažnai naudojami apsaugos grandinėse, nes temperatūrai padidėjus gali apriboti srovę. PTC termistoriai ypač naudingi ten, kur reikia automatinės apsaugos nuo perkaitimo arba viršsrovio.

PTC termistoriai taikomi:

- perkrovos apsaugos grandinėse;
- savaime atsistatančiuose saugikliuose;
- elektros variklių apsaugos sistemose;
- temperatūros kontrolės grandinėse;
- šildymo ir valdymo įrenginiuose.

Pagrindinė PTC varžos priklausomybė nuo temperatūros

Paprastai PTC termistorių varža didėjant temperatūrai didėja. Kai kurių PTC termistorių charakteristika tam tikrame temperatūrų intervale gali būti aprašoma apytikslė tiesine priklausomybe:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0))$$

Kur:

- R_T – varža temperatūroje T ,

- R_0 – nominali varža temperatūroje T_0 ,
- α – temperatūrinis varžos koeficientas,
- T, T_0 – temperatūra Celsijaus laipsniais arba kelvinais, jei koeficientas pateiktas atitinkamai.

Dažniausiai naudojamas atvejis, kai PTC elemento nominali temperatūra yra 25 °C, formulė dažnai rašoma taip:

$$R_T = R_{25} \cdot (1 + \alpha(T - 25))$$

Kur:

- R_{25} – varža prie 25 °C,
- T – temperatūra °C,
- α – temperatūrinis koeficientas.

Svarbu paminėti, kad ne visi PTC termistoriai pasižymi tiesine charakteristika. Kai kurie, ypač keraminiai PTC termistoriai, pasiekus tam tikrą temperatūrą pradeda labai staigiai didinti varžą. Dėl to jų charakteristika dažnai būna netiesinė, o aukščiau pateikta formulė labiau tinka apytiksliam aprašymui arba tam tikram ribotam temperatūrų intervalui.

4.6.2 lentelė. PTC KTY81/110 jutiklio tipinė verčių lentelė

Temperatūra, °C	Varža, Ω	Temperatūra, °C	Varža, Ω
-55	490	50	1209
-50	515	60	1299
-40	567	70	1392
-30	624	80	1490
-20	684	90	1591
-10	747	100	1696
0	815	110	1805
10	886	120	1915
20	961	125	1970
25	1000	130	2023
30	1040	140	2124
40	1122	150	2211

RTD jutikliai

RTD jutikliai (*angl. Resistance Temperature Detector*) yra varžiniai temperatūros jutikliai, kurių veikimas pagrįstas laidininko elektrinės varžos kitimu priklausomai nuo temperatūros. Dažniausiai jie gaminami iš metalų, ypač platinos, nes ši medžiaga pasižymi geru stabilumu, tikslumu ir beveik tiesine charakteristika plačiame temperatūrų diapazone. Kylant temperatūrai RTD jutiklio varža didėja.

RTD jutikliai plačiai naudojami pramonėje, automatikos sistemose, laboratoriniuose matavimuose ir tiksliuose temperatūros kontrolės įrenginiuose. Lyginant su termistoriais, RTD jutikliai paprastai pasižymi didesniu tikslumu, geresniu ilgalaikiu stabilumu ir platesniu darbinės temperatūros diapazonu.

RTD jutikliai taikomi:

- pramoninėse temperatūros matavimo sistemose;
- automatikos ir valdymo įrenginiuose;
- laboratoriniuose ir tiksliuose matavimo prietaisuose;
- šilumos procesų stebėjimo sistemose;
- energetikos, chemijos ir maisto pramonėje.

RTD varžos priklausomybė nuo temperatūros dažnai aprašoma tiesine aproksimacija:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0))$$

Kur:

- R_T – varža temperatūroje T ,
- R_0 – nominali varža temperatūroje T_0 ,
- α – temperatūrinis varžos koeficientas,
- T – temperatūra,
- T_0 – nominali temperatūra.

Dažniausiai naudojamas atvejis, kai nominali temperatūra yra 0 °C, pavyzdžiui, PT100 ir PT1000, dažniausiai apibrėžiami prie 0 °C, todėl dažnai rašoma:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha T)$$

Kur:

- R_0 – varža prie 0 °C,
- T – temperatūra °C,
- α – temperatūrinis varžos koeficientas. $\alpha=0,00385\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Pavyzdžiai

- PT100 – platininis RTD jutiklis, kurio varža prie 0 °C yra 100 Ω ;
- PT1000 – platininis RTD jutiklis, kurio varža prie 0 °C yra 1000 Ω .

RTD jutiklių privalumai

RTD jutikliai pasižymi šiomis svarbiomis savybėmis:

- didelis matavimo tikslumas;
- geras ilgalaikis stabilumas;
- beveik tiesinė charakteristika;
- platus darbinės temperatūros diapazonas;
- geras pakartojamumas.

Dėl šių savybių RTD jutikliai labai plačiai naudojami ten, kur reikalingi tikslūs ir patikimi temperatūros matavimai.

RTD jutiklių trūkumai

Nepaisant privalumų, RTD jutikliai turi ir tam tikrų trūkumų:

- didesnė kaina nei termistorių;
- lėtesnis atsakas kai kuriais atvejais;
- reikia tikslaus varžos matavimo;
- jungiamųjų laidų varža gali turėti įtakos matavimo tikslumui.

Dėl laidų varžos įtakos, PT100 jutikliai dažnai jungiami naudojant 3 arba 4 laidų schemas, kad būtų sumažinta laidų varžos įtaka matavimui.

Priešingai nei prieš tai nagrinėtų temperatūros jutiklių atveju, RTD yra tiesiškiausias iš jų, o tai reiškia, kad beveik visame jutiklio matuojamų temperatūrų diapazone varžos pokytis atitinka vienodą temperatūros pokytį, tačiau net ir tokiu atveju, skaičiavimuose geriausia pasikliauti temperatūrų lentele – pavyzdinė pateikta žemiau esančioje lentelėje.

4.6.3 lentelė. PT1000 jutiklio tipinė verčių lentelė

Temperatūra, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-70	723.30	719.30	715.30	711.30	707.30	703.30	699.30	695.30	691.30	687.30
-60	763.30	759.30	755.30	751.30	747.30	743.30	739.30	735.30	731.30	727.30
-50	803.10	799.10	795.10	791.10	787.20	783.20	779.20	775.20	771.20	767.30
-40	842.70	838.70	834.80	830.80	826.90	822.90	818.90	815.00	811.00	807.00
-30	882.20	878.30	874.30	870.40	866.40	862.50	858.50	854.60	850.60	846.70
-20	921.60	917.70	913.70	909.80	905.90	901.90	898.00	894.00	890.10	886.20
-10	960.90	956.90	953.00	949.10	945.20	941.20	937.30	933.40	929.50	925.50
0	1000.00	1003.90	1007.80	1011.70	1015.60	1019.50	1023.40	1027.30	1031.20	1035.10
10	1039.00	1042.90	1046.80	1050.70	1054.60	1058.50	1062.40	1066.30	1070.20	1074.00
20	1077.90	1081.80	1085.70	1089.60	1093.50	1097.30	1101.20	1105.10	1109.00	1112.90
30	1116.70	1120.60	1124.50	1128.30	1132.20	1136.10	1140.00	1143.80	1147.70	1151.50
40	1155.40	1159.30	1163.10	1167.00	1170.80	1174.70	1178.60	1182.40	1186.30	1190.10
50	1194.00	1197.80	1201.70	1205.50	1209.40	1213.20	1217.10	1220.90	1224.70	1228.60
60	1232.40	1236.30	1240.10	1243.90	1247.80	1251.60	1255.40	1259.30	1263.10	1266.90
70	1270.80	1274.60	1278.40	1282.20	1286.10	1289.90	1293.70	1297.50	1301.30	1305.20
80	1309.00	1312.80	1316.60	1320.40	1324.20	1328.00	1331.80	1335.70	1339.50	1343.30
90	1347.10	1350.90	1354.70	1358.50	1362.30	1366.10	1369.90	1373.70	1377.50	1381.30
100	1385.10	1388.80	1392.60	1396.40	1400.20	1404.00	1407.80	1411.60	1415.40	1419.10

Termoporiniai jutikliai

Termoporiniai jutikliai, dar vadinami termoporomis, yra temperatūros jutikliai, kurių veikimas pagrįstas termoelektriniu reiškiniu. Jie sudaromi iš dviejų skirtingų metalų arba lydinių laidininkų, sujungtų viename gale. Kai šių metalų sandūros temperatūra skiriasi nuo kitų galų temperatūros, grandinėje susidaro labai maža elektrinė įtampa.

Termoporiniai jutikliai plačiai naudojami pramonėje, energetikoje, šildymo sistemose, laboratoriniuose matavimuose ir aukštų temperatūrų stebėjime. Jų pagrindinis privalumas yra platus matavimo diapazonas, paprasta konstrukcija ir galimybė dirbti esant labai aukštai temperatūrai.

Termoporiniai jutikliai taikomi:

- pramoninėse temperatūros matavimo sistemose;
- aukštų temperatūrų krosnyse ir šildymo įrenginiuose;
- energetikos ir metalo apdirbimo procesuose;
- automobilių ir aviacijos sistemose;
- laboratoriniuose ir technologiniuose matavimuose.

Termoporinių jutiklių veikimo principas

Termoporos veikimas pagrįstas tuo, kad dviejų skirtingų metalų sandūroje, esant temperatūrų skirtumui, susidaro termoelektrinė įtampa. Šis reiškinys vadinamas Zebeko efektu.

Vienas termoporos galas paprastai yra matavimo vietoje, todėl vadinamas karštąja sandūra, o kitas galas laikomas žinomos temperatūros aplinkoje arba kompensuojamas elektroniniu būdu, todėl vadinamas šaltąja sandūra. Matuojama įtampa priklauso nuo temperatūrų skirtumo tarp šių sandūrų.

Supaprastintai termoporos įtampa gali būti aprašoma taip:

$$E = S \cdot (T_1 - T_2)$$

Kur:

- E – termoporos generuojama įtampa,
- S – Zebeko koeficientas,
- T_1 – karštosios sandūros temperatūra,
- T_2 – šaltosios sandūros temperatūra.

Reikia pažymėti, kad realių termoporų charakteristika dažniausiai nėra visiškai tiesinė. Tikslesniam temperatūros nustatymui naudojamos kalibravimo lentelės arba standartinės aproksimacijos lygtys. Todėl praktikoje temperatūra dažnai nustatoma ne pagal vieną paprastą formulę, o pagal standartizuotus termoporų duomenis.

Termoporų tipai

- K tipo – chromelio ir aliumelio termopora; viena populiariausių bendro naudojimo termoporų;
- J tipo – geležies ir konstantano termopora;
- T tipo – vario ir konstantano termopora;
- S tipo – platinos ir platinos-rodžio termopora;
- R tipo – platinos ir platinos-rodžio termopora;
- B tipo – aukštų temperatūrų termopora, naudojama pramonėje.

Praktikoje dažniausiai naudojamos K tipo termoporos, nes jos pasižymi plačiu temperatūrų diapazonu ir geru kainos bei savybių santykiu.

Termoporiniai jutikliai pasižymi šiomis svarbiomis savybėmis:

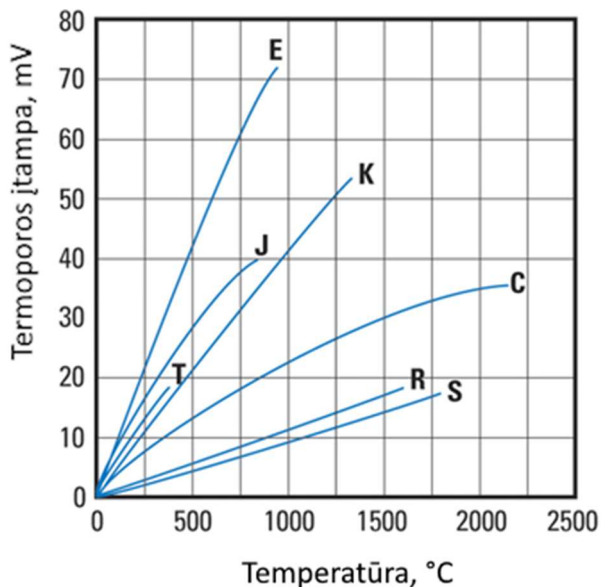
- platus matavimo temperatūrų diapazonas,
- paprasta konstrukcija – pakanka nukirpti termoporinį kabelį ir gale jį suvirinti,
- greitas atsakas į temperatūros pokyčius,
- galimybė dirbti aukštoje temperatūroje,
- mechaninis tvirtumas,
- palankesnė kaina nei kai kurių kitų pramoninių jutiklių.

Dėl šių savybių termoporiniai jutikliai labai plačiai naudojami ten, kur reikia matuoti aukštas temperatūras arba dirbti sudėtingomis sąlygomis.

Nepaisant privalumų, termoporiniai jutikliai turi ir tam tikrų trūkumų:

- maža išėjimo įtampa, todėl dažnai reikia stiprinimo,
- mažesnis tikslumas nei RTD jutiklių,
- netiesinė charakteristika,
- būtina šaltosios sandūros kompensacija,
- matavimą gali veikti elektromagnetiniai trikdžiai.

Todėl tiksliuose matavimo įrenginiuose termoporų signalas dažnai papildomai stiprinamas, filtruojamas ir apdorojamas elektroninėse grandinėse.



4.6.2 pav. Termoporų grafinis palyginimas

Integriniai temperatūros jutikliai

Integriniai temperatūros jutikliai yra puslaidininkiniai temperatūros matavimo elementai, dažniausiai gaminami kaip integriniai grandynai. Jų veikimas pagrįstas puslaidininkinių elementų elektrinių parametrų kitimu priklausomai nuo temperatūros. Tokie jutikliai temperatūrą gali paversti analogine įtampa, srove arba skaitmeniniu signalu, todėl juos patogu naudoti įvairiose elektroninėse matavimo ir valdymo sistemose.

Integriniai temperatūros jutikliai plačiai naudojami mikrovaldiklių sistemose, buitiniuose elektronikos įrenginiuose, kompiuterinėje technikoje, medicinos prietaisuose ir automatikoje. Jie ypač vertinami dėl paprasto prijungimo, mažų matmenų ir to, kad dažnai jau būna sukalibruoti gamykloje.

Integriniai temperatūros jutikliai taikomi:

- mikrovaldiklių ir kitose įterptinėse sistemose,
- buitinėje elektronikoje,
- kompiuterinės technikos temperatūros stebėjime,
- medicinos ir matavimo prietaisuose,
- automatikos ir valdymo sistemose.

Integrinių temperatūros jutiklių veikimo principas

Integrinių temperatūros jutiklių veikimas dažniausiai pagrįstas puslaidininkinių sandūrų savybėmis. Keičiantis temperatūrai, kinta tranzistorių, diodų ar kitų puslaidininkinių elementų elektriniai parametrai, todėl galima nustatyti temperatūrą pagal išėjimo signalą. Priklausomai nuo jutiklio tipo, išėjime gali būti:

- analoginė įtampa,
- analoginė srovė,
- skaitmeninis signalas.

Dėl šios priežasties integriniai temperatūros jutikliai dažnai nereikalauja sudėtingų papildomų grandinių ir gali būti tiesiogiai jungiami prie mikrovaldiklių, valdiklių ar matavimo sistemų.

Pagrindinė išėjimo signalo priklausomybė nuo temperatūros

Analoginių integrinių temperatūros jutiklių išėjimas dažnai aprašomas tiesine priklausomybe:

$$U_T = U_0 + k \cdot T$$

Kur:

- U_T – išėjimo įtampa temperatūroje T ,
- U_0 – pradinė įtampa,
- k – jautrumo koeficientas,
- T – temperatūra.

Kai kuriuose jutikliuose išėjimo signalas gali būti pateikiamas ir srovės pavidalu, o skaitmeniniuose jutikliuose temperatūros reikšmė tiesiog perduodama skaitmeniniu kodu.

Dažniausiai naudojamas atvejis

Vienas iš paprasčiausių analoginių integrinių temperatūros jutiklių yra LM35. Jo išėjimo įtampa proporcinga temperatūrai, o jautrumas paprastai yra 10 mV/°C.

Pastaba: šį jutiklį geriau naudoti tik teigiamų temperatūrų matavimams, priešingu atveju reikės papildomai jungti neigiamą maitinimo šaltinį per rezistorių. Tuomet geriau naudoti TMP36.

$$U_T = 10 \cdot T \text{ mV}$$

Kur:

- U_T – išėjimo įtampa,
- T – temperatūra °C.

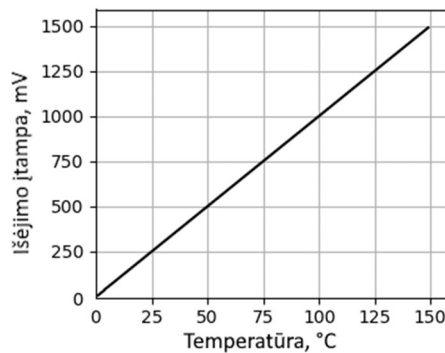
Pavyzdžiui, esant 25 °C temperatūrai, LM35 išėjimo įtampa yra apie:

Kur:

- U_T – išėjimo įtampa,
- T – temperatūra $^{\circ}\text{C}$.

Pavyzdžiui, esant 25 °C temperatūrai, LM35 išėjimo įtampa yra apie:

$$U_T = 10 \cdot 25 = 250 \text{ mV}$$



4.6.3 pav. LM35 įtampos priklausomybė nuo temperatūros

- LM35 – analoginis temperatūros jutiklis, kurio išėjimas proporcingas temperatūrai, labiau tinkamas matuoti teigiamas temperatūras.
- TMP36 – analoginis temperatūros jutiklis, panašus į LM35, tačiau turintis įtampos poslinkį, dėl to galima lengvai matuoti ir neigiamas temperatūras.
- DS18B20 – skaitmeninis temperatūros jutiklis, dažnai naudojamas mikrovaldiklių sistemose.
- LM75 – skaitmeninis temperatūros jutiklis, naudojamas valdymo ir stebėjimo sistemose.
- DHT11 / DHT22 – kompleksiniai jutikliai, matuojantys temperatūrą ir drėgmę.

Skyriaus žinių patikrinimas

1. Kokia rezistoriaus paskirtis grandinėje?
2. Kuo skiriasi THT ir SMD rezistoriai? Kada kuris montavimo būdas patogesnis?
3. Rezistorius pažymėtas žiedais: ruda, juoda, raudona, auksinė. Koks jo nominalas ir paklaida?
4. Ką reiškia SMD rezistoriaus užrašas 473? O užrašas 4R7?
5. Kodėl EIA-96 žymėjimo (pvz., 01C) neįmanoma iššifruoti be lentelės?
6. Rezistoriaus nominalas $2,2\text{ k}\Omega \pm 5\%$. Tarp kokių verčių gali būti tikroji jo varža?
7. Per $100\ \Omega$ rezistorių teka $0,1\text{ A}$ srovė. Kokia galia jame išsisklaido? Ar pakaks $0,25\text{ W}$ rezistoriaus?
8. Ką reiškia temperatūrinis koeficientas $50\text{ ppm}/^\circ\text{C}$? Kuo jis geresnis už $200\text{ ppm}/^\circ\text{C}$?
9. Kur naudojami logaritminiai potenciometrų ir kodėl?
10. Trys rezistoriai – $1\text{ k}\Omega$, $2,2\text{ k}\Omega$ ir $4,7\text{ k}\Omega$ – sujungti nuosekliai. Kokia bendra varža?
11. Du rezistoriai po $1\text{ k}\Omega$ sujungti lygiagrečiai. Kokia bendra varža? Suformuluokite taisyklę, kas atsitinka lygiagrečiai jungiant vienodus rezistorius.
12. Kodėl nuosekliai sujungtų rezistorių varžos sumuojasi, o lygiagrečiai – ne?
13. Elektrinis šildytuvas vartoja 1500 W ir veikia 2 valandas. Kiek energijos jis sunaudoja kilovatvalandėmis ir kiek džauliais?
14. Nubraižykite varžinį daliklį iš R_1 ir R_2 ir užrašykite išėjimo įtampos formulę.
15. Daliklio įėjime 12 V , $R_1 = 10\text{ k}\Omega$, $R_2 = 5\text{ k}\Omega$. Kokia įtampa ant R_2 ?
16. Kaip kinta fotorezistoriaus varža didėjant apšvietimui? Kaip šis pokytis paverčiamas įtampos signalu?
17. Nuo ko priklauso kondensatoriaus talpa? Užrašykite formulę ir paaiškinkite dydžius.
18. Kondensatorius $47\ \mu\text{F}$ įkrautas iki 12 V . Kokį krūvį jis sukaupė? Kiek energijos?
19. Du kondensatoriai po 100 nF sujungti lygiagrečiai, kiti du tokie patys – nuosekliai. Kokios bendros talpos abiem atvejais?
20. Kas yra RC laiko konstanta τ ir ką ji parodo? Kiek procentų galutinės įtampos kondensatorius pasiekia per τ ?
21. Kas yra ESR ir kodėl jis svarbus maitinimo grandinėse?

22. Kokioje formoje energiją kaupia induktorius? Užrašykite energijos formulę.
23. Kodėl induktoriaus srovė negali pasikeisti akimirksniu? Kokia formulė tai aprašo?
24. Padvigubinus ritės vijų skaičių, kiek kartų padidėja induktyvumas?
25. Kokia varistoriaus paskirtis ir kaip jis veikia kartu su saugikliu?
26. Palyginkite NTC, PTC, RTD ir termoporą: kaip kiekvieno varža (ar signalas) kinta kylant temperatūrai ir kur kuris dažniausiai naudojamas?
27. Kodėl PT100 jutikliai dažnai jungiami 3 laidais?

5. KOMUTACINIAI KOMPONENTAI

Komutaciniai elementai yra elektrinių ir elektroninių grandinių komponentai, skirti srovės tekėjimui valdyti. Jų pagrindinė paskirtis – sujungti, atjungti arba perjungti elektrinę grandinę, taip pakeičiant jos darbinę būseną. Šie elementai plačiai naudojami tiek paprastose buitinėse schemose, tiek sudėtingose automatikos sistemose.

Komutaciniai elementai gali būti valdomi įvairiai. Vieni iš jų veikia mechaniniu būdu, kai vartotojas ranka pakeičia jų būseną, pavyzdžiui, paspaudžia mygtuką ar perjungia jungiklį. Kiti veikia elektromechaniškai, kai kontaktų padėtį keičia elektromagnetinis mechanizmas, kaip relėje. Dėl šios priežasties komutaciniai elementai dažniausiai skirstomi į dvi pagrindines grupes:

- mechaninius komutacinius elementus,
- elektromechaninius komutacinius elementus.

Komutaciniai elementai yra labai svarbūs kuriant valdymo, apsaugos ir vartotojo sąsajos grandines. Jie leidžia įjungti ir išjungti įrenginius, pasirinkti darbo režimus, perduoti trumpalaikius valdymo impulsus, keisti grandinės struktūrą arba automatiškai valdyti apkrovas.

Priklausomai nuo paskirties, komutaciniai elementai gali būti montuojami:

- į spausdintinę plokštę per skylutes,
- paviršiniu montavimu ant PCB,
- į panelę ar korpusą,
- ant DIN bėgelio pramoniniuose įrenginiuose.

Komutacinių elementų skirstymas:

- Mygtukai.
- Jungikliai.
- Relės.

5.1 Mygtukai

Mygtukai yra komutaciniai elementai, dažniausiai naudojami tada, kai reikia trumpalaikio valdymo veiksmo arba impulso. Paspaudus mygtuką, jo kontaktai pakeičia būseną, o atleidus mygtukas paprastai grįžta į pradinę padėtį.

Paprasčiausiu atveju yra dvi galimos būsenos:

- NO - grandinė atvira (*angl. Normally Open*), kai kontaktai atjungti ir srovė neteka.
- NC - grandinė uždara (*angl. Normally Closed*), kai kontaktai sujungti ir srovė gali tekėti.



5.1.1 pav. Mygtuko simboliai ir vaizdai

Pagal pradinę kontaktų būseną mygtukai gali būti:

- normaliai atviri,
- normaliai uždari.

Pagal veikimo pobūdį mygtukai gali būti:

- momentiniai,
- fiksuojami.

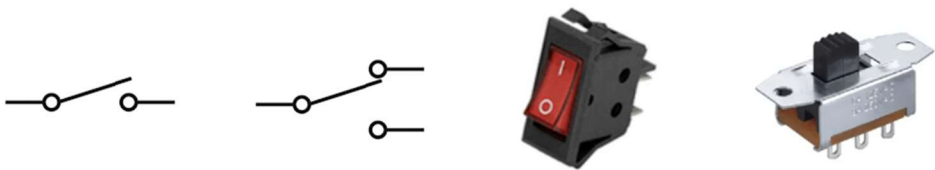
Tai ypač svarbu kuriant valdymo grandines, kur reikalingas paleidimo, stabdymo ar avarinio sustabdymo signalas.

5.2 Jungikliai

Jungikliai yra vieni svarbiausių komutacinių elementų, naudojami elektrinės grandinės įjungimui, išjungimui arba perjungimui. Jų veikimas pagrįstas kontaktų būsenos pakeitimu, todėl jungikliai leidžia valdyti srovės tekėjimą grandinėje. Jie plačiai naudojami buitinėje technikoje, elektroniniuose įrenginiuose, valdymo pultuose ir pramonės sistemose. Mechaniniai komutaciniai elementai yra valdomi tiesioginiu fiziniu poveikiu. Vartotojas paspaudžia, perjungia, pasuka arba pastumia valdymo dalį, ir taip pakeičiama kontaktų būsena.

Šiai grupei priklauso:

- mygtukiniai jungikliai;
- slankikliniai jungikliai;
- svirtiniai jungikliai;
- klavišiniai jungikliai;
- DIP jungikliai;
- rotaciniai DIP jungikliai.



5.2.1 pav. Jungiklio simboliai ir vaizdai

Pagrindinės sąvokos

Norint suprasti jungiklių veikimą, būtina žinoti dvi pagrindines sąvokas:

- poliai - nurodo, kiek atskirų grandinių gali valdyti vienas jungiklis. Jei jungiklis turi vieną polių, jis valdo vieną grandinę. Jei turi du polius, jis vienu metu gali valdyti dvi atskiras grandines.
- kontaktų padėtys - nurodo, tarp kiek skirtingų kontaktų gali būti perjungtas vienas polius. Jei yra viena padėtis, jungiklis tiesiog atidaro arba uždaro vieną grandinę. Jei yra dvi padėtys, jungiklis gali perjungti ryšį tarp dviejų skirtingų kontaktų.

Praktikoje jungikliai dažniausiai žymimi santrumpomis:

- SPST – vienpolis vienpadėtis jungiklis (*angl. Single Pole Single Throw*).
- SPDT – vienpolis dvipadėtis jungiklis (*angl. Single Pole Double Throw*).
- DPST – dvipolis vienpadėtis jungiklis (*angl. Double Pole Single Throw*).
- DPDT – dvipolis dvipadėtis jungiklis (*angl. Double Pole Double Throw*).

Jei polių ar kontaktų padėčių yra daugiau, gali būti naudojami skaitiniai žymėjimai, pavyzdžiui, 3P6T, reiškiantis trijų polių šešių padėčių jungiklį.

Svarbiausios jungiklių savybės parenkant komponentą

Renkantis komutacinį elementą, nepakanka žinoti vien jo tipą. Svarbu įvertinti ir daugelį kitų savybių.

- Dydis - jungikliai gali būti labai mažų matmenų, skirti montuoti tankiose elektroninėse plokštėse, arba dideli, naudojami pramonėje ir galingose sistemose.
- Pradinė būseną:
 - momentiniai – grįžta į pradinę būseną, kai pašalinama išorinė jėga,
 - fiksuojami – išlieka naujoje būsenoje tol, kol vėl būna perjungti.
- Kontaktų tipas:
 - normaliai atviri (NO),
 - normaliai uždari (NC),
 - perjungiamieji.
- Pozicijų skaičius - kai kuriuose komutaciniuose elementuose viename korpuse gali būti keli nepriklausomi jungikliai. Pavyzdžiui, DIP jungiklyje gali būti keli atskiri perjungiami kanalai viename modulyje.
- Įtampos ir srovės ribos.
- Aplinkos veiksniai:
 - atsparumas dulkėms ir drėgmei,
 - IP apsaugos klasė: žymima dviem skaitmenimis: pirmasis – apsauga nuo dulkių, antrasis – nuo vandens (pvz., IP67),
 - atsparumas vibracijai,
 - atsparumas smūgiams,
 - ilgaamžiškumas.

5.3 Elektromagnetinė relė

Relė yra elektromechaninis komutacinis elementas, leidžiantis vienos grandinės signalu valdyti kitos grandinės kontaktus. Skirtingai nuo paprasto rankinio jungiklio, relėje kontaktų padėtį keičia ne vartotojas, o elektromagnetinis mechanizmas.



5.3.1 pav. Relės simbolis ir vaizdas

Relės veikimo principas

Kai per ritę teka srovė, susidaro magnetinis laukas, kuris pritraukia judančią dalį ir pakeičia kontaktų padėtį. Kai srovė išjungiama, spyruoklė sugrąžina kontaktus į pradinę būseną.

Pagrindinės relės dalys yra:

- ritė;
- feromagnetinė šerdis;
- judanti mechaninė dalis;
- kontaktai;
- grąžinamoji spyruoklė.

Relės naudojamos, kai reikia:

- mažos galios signalu valdyti didesnę apkrovą;
- izoliuoti valdymo grandinę nuo apkrovos grandinės;
- automatizuoti įjungimo ir išjungimo procesus;
- įgyvendinti apsaugos ir saugos funkcijas.

Relių privalumai:

- leidžia valdyti galingesnes grandines silpnu signalu;
- suteikia galvaninį atskyrimą;
- tinka įvairioms valdymo schemoms;
- gali būti naudojamos tiek nuolatinės, tiek kintamosios srovės grandinėse.

Relių trūkumai:

- turi judančias mechanines dalis;
- kontaktai laikui bėgant dėvisi;
- veikimas lėtesnis nei puslaidininkinių raktų;
- perjungimo metu gali atsirasti kibirkščiavimas ir triukšmas.

Skyriaus žinių patikrinimas

1. Kokia komutacinių elementų paskirtis grandinėje?
2. Į kokias dvi pagrindines grupes skirstomi komutaciniai elementai pagal valdymo būdą?
3. Ką reiškia mygtuko kontaktų būsenos NO ir NC? Kuo jos skiriasi?
4. Kuo skiriasi momentinis mygtukas nuo fiksuojamo? Pateikite po panaudojimo pavyzdį.
5. Kodėl avarinio stabdymo grandinėse dažniausiai naudojami NC kontaktai? (Pagalvokite, kas nutinka nutrūkus laidui.)
6. Ką jungiklio apibūdinime reiškia „polius“ ir ką – „kontaktų padėtis“?
7. Iššifruokite santrumpas SPST, SPDT, DPST ir DPDT.
8. Kokį jungiklį pasirinktumėte, jei vienu judesiu reikia perjungti dvi atskiras grandines tarp dviejų padėčių?
9. Kas yra DIP jungiklis ir kur jis dažniausiai naudojamas?
10. Ką nurodo IP apsaugos klasė?
11. Paaiškinkite elektromagnetinės relės veikimo principą. Iš kokių pagrindinių dalių ji sudaryta?
12. Kokias dvi svarbias funkcijas relė atlieka valdymo grandinėje (užuomina: galia ir izoliacija)?
13. Kodėl relė leidžia 3,3 V mikrovaldiklio signalu įjungti 230 V apkrovą? Kas fiziškai atskiria šias dvi grandines?

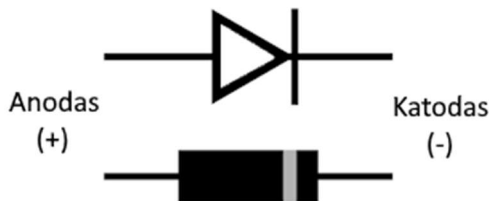
6. AKTYVINIAI ELEKTRONIKOS KOMPONENTAI

Aktyviniai elektronikos komponentai yra tokie komponentai, kurie gali valdyti elektros srovę, įtampą arba signalą ir kurių veikimas dažniausiai grindžiamas išoriniu maitinimu arba puslaidininkinėmis savybėmis. Skirtingai nuo pasyviųjų komponentų, tokių kaip rezistoriai, kondensatoriai ar induktoriai, aktyviniai komponentai ne tik reaguoja į elektrinį signalą, bet ir gali jį valdyti, formuoti, perjungti, stiprinti arba generuoti.

Aktyviniai komponentai sudaro labai svarbią šiuolaikinės elektronikos dalį. Jie naudojami maitinimo šaltiniuose, signalų apdorojimo grandinėse, ryšio sistemose, automatikoje, apšvietimo įrenginiuose, matavimo prietaisuose ir skaitmeninėje elektronikoje. Prie aktyvinių komponentų paprastai priskiriami diodai, tranzistoriai, tiristoriai, simistoriai, optoporos, integriniai grandynai ir kiti puslaidininkiniai elementai.

6.1 Diodai

Diodas yra puslaidininkinis elektronikos komponentas, dažniausiai turintis du išvadus — anodą ir katodą. Pagrindinė diodo savybė yra ta, kad jis srovę gerai praleidžia viena kryptimi, o priešinga kryptimi ją blokuoja. Dėl to diodai naudojami srovės lyginimui, grandinių apsaugai, signalų formavimui, šviesos spinduliavimui bei šviesos aptikimui.



6.1.1 pav. Diodo simbolis ir vaizdas (juostelė rodo katodą, t.y. –)

Diodo veikimas pagrįstas p–n sandūra. Kai diodas prijungiamas tiesiogine kryptimi, tai yra kai anodas yra teigiamesnio potencialo nei katodas, barjeras sandūroje sumažėja ir srovė pradeda tekėti. Kai diodas prijungiamas atbuline kryptimi, barjeras padidėja ir srovė praktiškai neteka, išskyrus labai mažą nuotėkio srovę.

Diodo sandara ir veikimo principas

Pagrindinė diodo dalis yra p–n sandūra, susidariusi tarp dviejų skirtingai legiruotų puslaidininkio sričių:

- p srities, kurioje dauguma krūvininkų yra skylės,
- n srities, kurioje dauguma krūvininkų yra elektronai.

Tarp šių sričių susidaro pereinamoji zona, vadinama nuskurdinimo sritimi. Šioje srityje susidaro elektrinis laukas, kuris trukdo laisvam krūvininkų judėjimui.

Kai diodas jungiamas tiesiogine kryptimi:

- anodas prijungiamas prie teigiamo poliaus,
- katodas prijungiamas prie neigiamo poliaus,
- nuskurdinimo sritis susiaurėja,
- srovė pradeda tekėti.

Kai diodas jungiamas atbuline kryptimi:

- anodas prijungiamas prie neigiamo poliaus,
- katodas prijungiamas prie teigiamo poliaus,
- nuskurdinimo sritis išsiplečia,
- srovė beveik neteka.

Diodo voltamperinė charakteristika

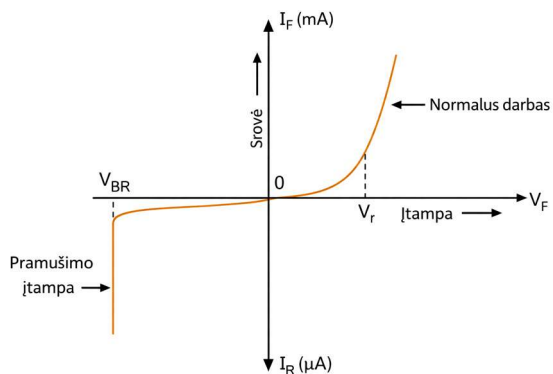
Diodo srovės priklausomybė nuo įtampos yra netiesinė. Idealiai ji aprašoma Šoklio lygtimi:

$$I = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

Kur:

- I – diodo srovė,
- I_S – atbulinė soties srovė,
- V_D – įtampa diodo galuose,
- n – idealumo koeficientas,
- V_T – šiluminė įtampa.

Sutartiname diodo žymėjime srovės kryptis laikoma sutampančia su kryptimi nuo anodo į katodą. Atbuline kryptimi per diodą teka tik labai maža srovė, dažniausiai matuojama mikroamperais (μA) arba net nanoamperais (nA), todėl įprastomis sąlygomis ji dažnai laikoma lygi nuliui. Tačiau atbulinei įtampai pasiekus pramušimo ribą, atbulinė srovė staiga padidėja. Jei ši srovė nėra apribojama, diodas gali perkaisti ir sugesti. Todėl elektrinėse grandinėse diodo atbulinė įtampa neturi viršyti leistinos pramušimo įtampos.



6.1.2 pav. Diodo volt-ampėrinė charakteristika

Svarbiausi diodų parametrai, kurie turi būti įvertinti parenkant diodą konkrečiai grandinei:

- maksimali tiesioginė srovė,
- maksimali atbulinė įtampa,
- tiesioginės krypties įtampos kritimas,
- atbulinė nuotėkio srovė,
- persijungimo greitis,
- sklaidos galia,
- darbinė temperatūra.

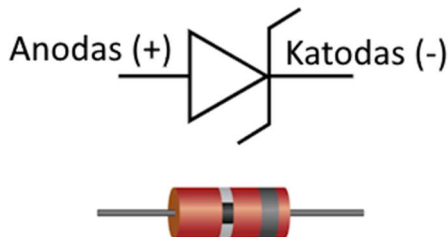
Įsidėmėk

Praktikoje pakanka žinoti, kad:

- silicio diodas tiesiogine kryptimi pradeda atsidaryti maždaug nuo 0,6–0,7 V,
- germanio diodas — nuo maždaug 0,2–0,3 V,
- Schottky diodas — nuo maždaug 0,2–0,4 V.

6.2 Stabilitronai

Stabilitronas, dar vadinamas Zener diodu, yra specialus puslaidininkinis diodas, skirtas darbui atbulinės krypties pramušimo srityje. Skirtingai nuo paprasto diodo, kurio atbulinis pramušimas laikomas nepageidaujamu reiškiniu, stabilitronas yra specialiai sukonstruotas taip, kad šioje srityje galėtų dirbti saugiai ir palaikyti beveik pastovią įtampą.



6.2.1 pav. Stabilitrono simbolis ir vaizdas (juostelė rodo –)

Stabilitronai grandinėse montuojami taip, kad dirbtų būtent pramušimo įtampos srityje. Kadangi pramušimo srityje srovė gali smarkiai padidėti, stabilitronas visada jungiamas su nuosekliu srovę ribojančiu rezistoriumi. Toks jungimas leidžia išnaudoti pagrindinę stabilitrono savybę – gebėjimą palaikyti beveik pastovią įtampą net tada, kai srovė kinta gana plačiose ribose.

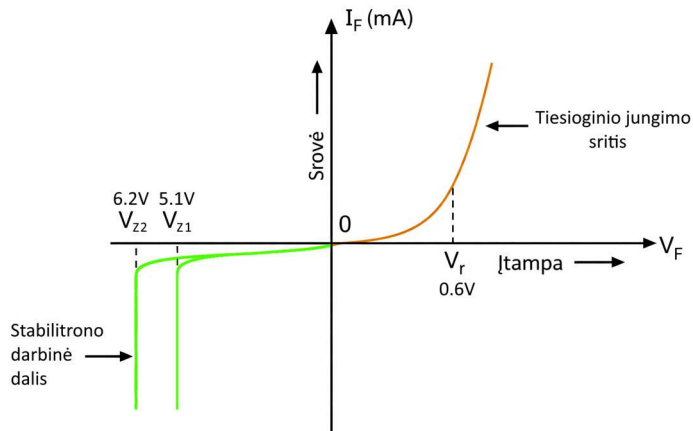
Dėl šios savybės stabilitronai plačiai naudojami maitinimo šaltinių stabilizatoriuose, įtampos etaloninėse grandinėse, apsaugos ir ribojimo schemose.

Stabilitrono veikimo principas

Tiesiogine kryptimi stabilitronas veikia panašiai kaip paprastas diodas. Kai anodo potencialas tampa didesnis už katodo, diodas pradeda atsidaryti, o įtampos kritimas jo galuose paprastai yra apie 0,3–0,7 V, priklausomai nuo diodo tipo ir medžiagos.

Tačiau pagrindinis stabilitrono darbo režimas yra atbulinė kryptis. Kai stabilitronas prijungiamas atbulai, iki tam tikros įtampos per jį teka tik labai maža atbulinė srovė. Ši srovė paprastai yra labai maža ir įprastomis sąlygomis gali būti laikoma beveik lygi nuliui. Tačiau atbulinei įtampai pasiekus tam tikrą ribą – stabilizavimo įtampą V_Z , stabilitronas pereina į pramušimo sritį.

Šioje srityje net gana stipriai kintant srovei, įtampa stabilitrono galuose kinta labai nedaug. Būtent dėl to stabilitronas naudojamas kaip įtampos stabilizavimo elementas.



6.2.2 pav. Stabilitrono volt-amperinė charakteristika

Stabilitrono voltamperinė charakteristika panaši į paprasto diodo charakteristiką tiesiogine kryptimi, tačiau atbulinėje srityje turi aiškią stabilizavimo sritį.

- Tiesiogine kryptimi stabilitronas laidyti pradeda kaip paprastas diodas.
- Atbuline kryptimi iki pramušimo įtampos per jį teka tik labai maža srovė.
- Pasiekus stabilizavimo įtampą V_Z , atbulinė srovė pradeda sparčiai didėti, tačiau įtampa stabilitrono galuose išlieka beveik pastovi.

Tai reiškia, kad stabilitrono darbinė sritis yra būtent atbulinės krypties pramušimo sritis. Joje:

$$U_Z \approx \text{const}$$

Per stabilitroną tekančiai srovei kintant gana plačiose ribose ΔI , įtampos pokytis ΔU išlieka nedidelis. Šis reiškinys ir sudaro stabilizavimo efekto pagrindą.

Dinaminė varža

Kadangi stabilizavimo srityje įtampa nėra visiškai nekintanti, stabilitrono darbą galima apibūdinti dinamine varža. Ji nusakoma taip:

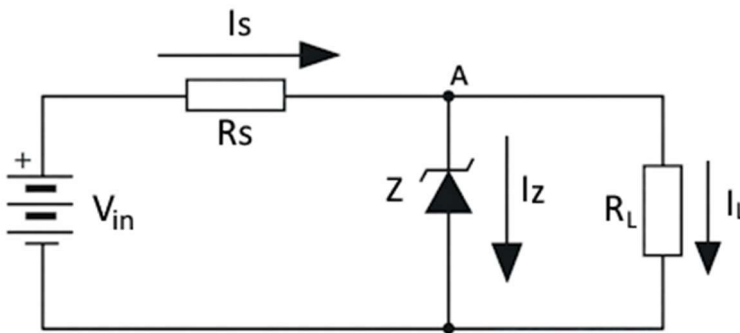
$$r_z = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

Kur:

- r_z – stabilitrono dinaminė varža,
- ΔU – įtampos pokytis stabilitrono galuose,
- ΔI – srovės pokytis.

Kuo dinaminė varža mažesnė, tuo geresnės stabilizavimo savybės, nes įtampa mažiau priklauso nuo srovės kitimo.

Stabilitrono jungimas grandinėje



6.2.3 pav. Stabilitrono jungimo schema

Stabilitronas paprastai jungiamas atbuline kryptimi, t. y.:

- katodas jungiamas prie teigiamesnio potencialo,
- anodas – prie neigiamesnio potencialo arba žemės.

Paprasčiausioje įtampos stabilizavimo grandinėje stabilitronas jungiamas lygiagrečiai apkrovai, o prieš jį nuosekliai įjungiamas rezistorius R_s , ribojantis srovę.

Tokioje grandinėje:

- įėjimo įtampa – V_{in} ,
- išėjimo įtampa – V_{out} ,
- stabilitrono įtampa – V_Z ,

- srovė per rezistorių – I_S ,
- apkrovos srovė – I_L ,
- stabilitrono srovė – I_Z .

Srovių ryšys aprašomas formule:

$$I_S = I_L + I_Z$$

Jeigu stabilitronas dirba stabilizavimo srityje, tada galima laikyti, kad:

$$V_{out} \approx V_Z$$

6.3 Šviesos diodai (šviestukai)

Šviesos diodas, dar vadinamas LED (*angl. Light Emitting Diode*), yra puslaidininkinis diodas, kuris tekant tiesioginei srovei skleidžia šviesą. Skirtingai nuo paprasto diodo, kurio pagrindinė paskirtis yra srovės laidumas viena kryptimi, LED diodo pagrindinė funkcija yra elektros energiją paversti šviesos energija.

Šviesos diodai plačiai naudojami elektronikoje, buitinėje technikoje, apšvietimo sistemose, indikacijoje, ekranuose, signalizacijoje ir optinėse ryšio grandinėse. Jie pasižymi mažu energijos suvartojimu, ilgaamžiškumu, greitu veikimu ir nedideliais matmenimis.



6.3.1 pav. Šviesos diodo simbolis ir vaizdai

Šviesos diodo veikimo principas

LED diodo veikimas pagrįstas elektroluminescencijos reiškiniu. Kai diodas jungiamas tiesiogine kryptimi, per p–n sandūrą pradeda tekėti srovė. Elektronams ir skylėms rekombinuojant sandūroje, dalis energijos išsiskiria ne šilumos, o šviesos pavidalu.

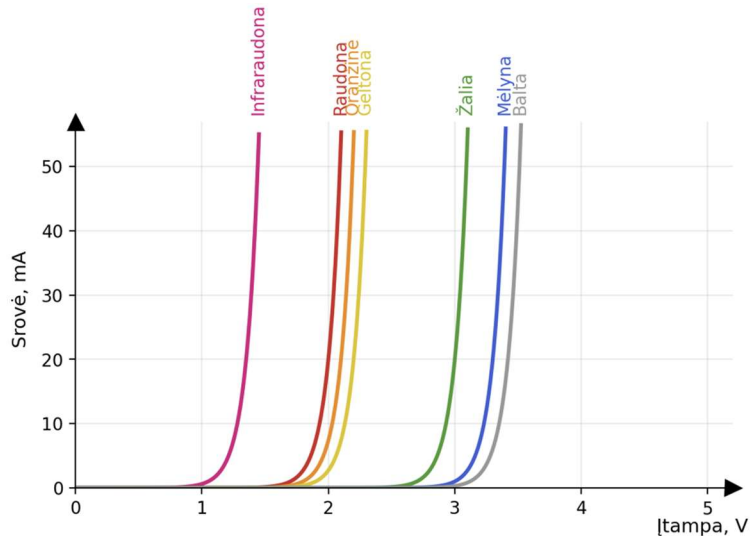
Skleidžiamos šviesos spalva priklauso nuo puslaidininkinės medžiagos savybių ir jos draudžiamosios juostos pločio. Dėl to skirtingi LED diodai gali skleisti skirtingos spalvos šviesą:

- raudoną,
- geltoną,
- žalią,
- mėlyną,
- baltą,
- infraraudonąją,
- ultravioletinę.

Baltos spalvos LED dažniausiai gaminami naudojant mėlyną šviesos diodą ir fosforinį sluoksnį, kuris dalį spinduliuotės paverčia kitų bangos ilgių šviesa.

LED voltamperinė charakteristika

Šviesos diodo voltamperinė charakteristika yra netiesinė, panaši į paprasto diodo charakteristiką. Tiesiogine kryptimi srovė pradeda sparčiai didėti pasiekus tam tikrą slenkstinę įtampą, o atbuline kryptimi LED, kaip ir paprastas diodas, srovę beveik blokuoja.



6.3.2 pav. Šviesos diodo voltamperinės charakteristikos

Skirtingai nuo paprasto silicio diodo, LED tiesioginės krypties įtampos kritimas priklauso nuo jo spalvos ir medžiagos. Dažniausios apytikslės vertės (esant ~20 mA srovei):

- infraraudonas LED – apie 1,2–1,5 V,
- raudonas LED – apie 1,8–2,2 V,
- oranžinis ir geltonas LED – apie 2,0–2,2 V,
- žalias LED – apie 2,0–3,4 V (senesnės technologijos ~2,1 V, šiuolaikiniai ryškūs ~3,0 V),
- mėlynas LED – apie 3,0–3,6 V,
- baltas LED – apie 3,0–3,6 V, nes tai mėlynas LED su fosforo sluoksniu, todėl jo charakteristika beveik sutampa su mėlyno LED charakteristika.

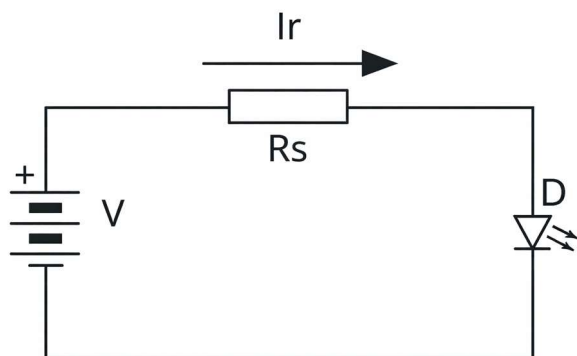
Bendra taisyklė: kuo trumpesnis spinduliuojamos šviesos bangos ilgis, tuo didesnės draudžiamosios juostos reikia ir tuo didesnį įtampą kritimas.

LED darbinė srovė dažniausiai būna nuo kelių miliamperų iki kelių dešimčių miliamperų, priklausomai nuo paskirties.

LED jungimas grandinėje

Šviesos diodas visada jungiamas tiesiogine kryptimi, t. y.:

- anodas jungiamas prie teigiamo potencialo,
- katodas – prie neigiamo potencialo arba žemės.



6.3.3 pav. Šviesos diodo jungimo schema

Labai svarbu, kad LED negali būti jungiamas tiesiai prie įtampos šaltinio be srovės ribojimo. Grandinėje būtina naudoti nuosekliai jungiamą rezistorių, kuris riboja srovę ir apsaugo LED nuo sugadinimo.

Tipinėje grandinėje naudojami šie dydžiai:

- maitinimo įtampa – V ,
- LED įtampos kritimas – V_F ,
- LED srovė – I_r ,
- nuoseklus rezistorius – R_s .

Rezistoriaus vertė apskaičiuojama pagal formulę:

$$R = \frac{V - V_F}{I_r}$$

Kur:

- R – rezistoriaus varža,
- V – maitinimo įtampa,
- V_F – LED tiesioginės krypties įtampos kritimas,
- I_r – pageidaujama LED srovė.

Pavyzdys

Turime grandinę, kurios maitinimo šaltinio įtampa $V_{in} = 5\text{ V}$, raudono LED įtampos kritimas $V_F = 2\text{ V}$ ir norima srovė $I_r = 10\text{ mA}$. Apskaičiuokite, kokio nominalo nuoseklaus rezistoriaus reikia tokiai grandinei.

Sprendimas

$$R = \frac{5 - 2}{0.01} = \frac{3}{0.01} = 300\ \Omega$$

Atsakymas: $300\ \Omega$. Praktikoje parenkame artimiausią nominalą – $330\ \Omega$.

LED šviesos stiprumas ir srovė

Kuo didesnė srovė teka per LED, tuo paprastai intensyvesnė yra skleidžiama šviesa. Tačiau srovė negali viršyti leistinos ribos, nes LED gali perkaisti ir sugesti, dėl to net ir radus LED aprašyme didžiausią srovės nominalą, reikia kritiškai įvertinti aušinimo poreikį.

Pagrindiniai LED parametrai:

- tiesioginės krypties įtampos kritimas V_F ,
- nominali tiesioginė srovė $I_F = I_r$,
- maksimali atbulinė įtampa – dažniausiai 5 V ,
- šviesos stipris,
- spalva arba bangos ilgis,
- spinduliavimo kampas,
- maksimali galia,
- darbinė temperatūra.

Jei kalbama apie galingesnius LED, papildomai svarbus ir šiluminis režimas.

Šviesos diodai pasižymi daugeliu privalumų:

- mažas energijos suvartojimas,
- ilgas tarnavimo laikas,
- greitas įjungimas ir išjungimas,
- nedideli matmenys,
- didelis mechaninis patikimumas,
- platus spalvų pasirinkimas,
- tinkami tiek indikacijai, tiek apšvietimui.

Dėl šių savybių LED tapo vienais plačiausiai naudojamų optoelektroninių komponentų.

Nepaisant privalumų, LED turi ir tam tikrų trūkumų:

- būtina riboti srovę,
- jautrūs perkaitimui,
- ryškumas priklauso nuo srovės ir temperatūros,
- atbulinė įtampa paprastai yra maža,
- galingesniems LED reikia papildomo aušinimo.

6.4 Tranzistoriai

Tranzistorius yra vienas svarbiausių elektronikos elementų. Jis naudojamas tada, kai reikia valdyti srovę, stiprinti signalą arba įjungti / išjungti grandinę.

Paprasčiausiai tranzistorių galima įsivaizduoti kaip elektroninį vožtuvą: mažu poveikiu vienoje vietoje galima valdyti didesnį elektros srautą kitoje vietoje.

Tai labai svarbu elektronikoje, nes dažnai reikia, kad:

- silpnas signalas valdytų stipresnį signalą,
- mažos galios grandinė valdytų didesnės galios grandinę,
- automatinė sistema galėtų įjungti ar išjungti apkrovą.

Būtent dėl šios priežasties tranzistoriai naudojami beveik visur: stiprintuvuose, kompiuteriuose, valdikliuose, jutikliuose, maitinimo grandinėse ir daugelyje kitų įrenginių.

Nors tranzistorių rūšių yra daugiau (darlingtono, IGBT ir kiti), nagrinėsime 2 pagrindines grupes:

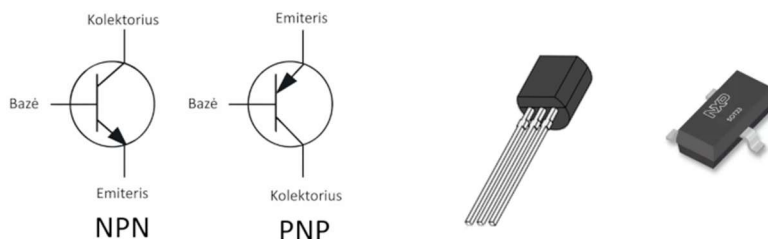
- Dvipoliai (dvikrūviai) tranzistoriai – valdomi srove.
- Lauko tranzistoriai – valdomi įtampa.

Dvipoliai tranzistoriai

Tranzistorius turi tris išvadus:

- kolektorių (K),
- bazę (B),
- emiterį (E).

Schemose tranzistoriai vaizduojami specialiais ženklais ir yra 2 tipų: npn ir pnp.



6.4.1 pav. Tranzistoriaus simboliai ir vaizdai

Raidės *n* ir *p* nurodo puslaidininkio sluoksnių tipus. Šie du tranzistorių tipai skiriasi tuo, kad juose srovė teka priešingomis kryptimis. Sutartiniuose schemų žymėjimuose srovės kryptį parodo rodyklė prie emiterio.

Elektronikoje yra priimta taip žymėti įtampas:

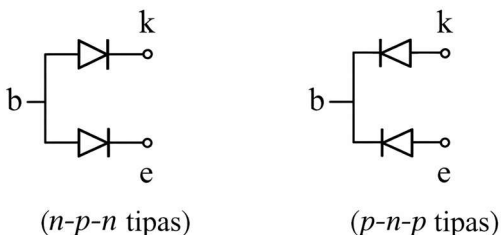
- tranzistoriaus išvado įtampa 0V atžvilgiu žymima vienu indeksu, pavyzdžiui, U_k – kolektoriaus įtampa,
- įtampa tarp dviejų išvadų žymima dviem indeksais, pavyzdžiui, U_{be} – įtampa tarp bazės ir emiterio,
- jei abu indeksai vienodi, tai reiškia maitinimo šaltinio įtampą, prijungtą prie to išvado, pavyzdžiui, U_{kk} – kolektoriaus maitinimo įtampa.

n-p-n tipo tranzistoriui galioja tokios taisyklės:

1) Kolektoriaus įtampa turi būti bent 1–2 V didesnė už emiterio įtampą, t. y.

$$U_{ke} > 1\text{ V}$$

2) Į bazės–emiterio (b–e) ir bazės–kolektoriaus (b–k) sandūras galima žiūrėti kaip į diodus.



6.4.2 pav. Tranzistoriaus supaprastintas modelis

Dažniausiai:

- bazės–emiterio „diodas“ būna atviras, todėl srovė juo teka tiesiogine kryptimi;
- bazės–kolektoriaus „diodui“ dažniausiai būna prijungta atbulinė įtampa.

3) Kiekvienas tranzistorius turi savo leistinas ribas:

- maksimalią kolektoriaus srovę I_k ,
- maksimalią bazės srovę I_b ,
- maksimalią įtampą U_{ke} .

Jei šios ribos viršijamos, tranzistorius gali perkaisti ir sugesti.

Taip pat svarbūs ir kiti parametrai:

- tranzistoriaus išsklaidomas galingumas

$$P = I_k U_{ke}$$

- leistina bazės–emiterio atbulinė įtampa,
- dažninės savybės,
- kiti techniniai parametrai.

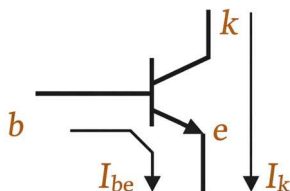
4) Jei pirmosios trys sąlygos tenkinamos, tuomet tranzistoriaus kolektoriaus srovė I_k yra tiesiogiai proporcinga bazės srovei I_b :

$$I_k = \beta \cdot I_b$$

Čia β – tranzistoriaus srovės stiprinimo koeficientas. Dažniausiai laikoma, kad jo reikšmė yra apie 100, nors praktiškai ji gali būti maždaug nuo 50 iki 250.

Tai yra pagrindinė tranzistoriaus savybė: nedidele bazės srove galima valdyti daug didesnę kolektoriaus srovę.

Emiterio srovė lygi bazės ir kolektoriaus srovių sumai:



6.4.3 pav. Tranzistoriaus srovės

$$I_e = I_b + I_k = (1 + \beta)I_b$$

Kadangi bazės srovė maža palyginus su kolektoriaus srove, praktiškai dažnai laikoma, kad:

$$I_e \approx I_k$$

Dabar grįžkime prie antrojo punkto. Kadangi bazės–emiterio sandūra veikia panašiai kaip diodas, negalima per daug didinti įtampos tarp bazės ir emiterio U_{be} . Kaip ir diode, kai bazės potencialas emiterio atžvilgiu tampa didesnis maždaug 0,6–0,7 V, bazės srovė I_b pradeda greitai didėti.

Todėl dirbančiame tranzistoriuje paprastai laikoma, kad:

$$U_b \approx U_e + 0,6V$$

Tai, kad kolektoriaus srovė:

$$I_k = \beta \cdot I_b$$

atsiranda tekant bazės srovei, nors bazės–kolektoriaus sandūrai yra prijungta atbulinė įtampa, paaiškinama sudėtingais fizikiniais procesais tranzistoriaus viduje. Šiame skyriuje jų detaliau nenagrinėsime.

Visos aukščiau aptartos n-p-n tranzistoriaus taisyklės galioja ir p-n-p tranzistoriui, tik šiuo atveju įtampų poliariškumas yra priešingas.

Parenkant komponentus schemoje, svarbiausi tranzistoriaus parametrai yra:

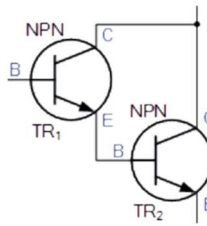
- srovės stiprinimo koeficientas β (*angl.* h_{fe}),
- maksimali kolektoriaus srovė I_k (*angl.* I_C),
- maksimali kolektoriaus–emiterio įtampa U_{ke} (*angl.* U_{CE}),
- išsklaidomas galingumas P ,

Darlingtono tranzistoriai

Kartais dvipolio tranzistoriaus nuolatinės srovės stiprinimo koeficientas yra per mažas, kad būtų galima tiesiogiai valdyti apkrovos srovę ar įtampą. Tokiais atvejais naudojami keli tranzistoriai. Paprastai mažos galios įėjimo tranzistorius įjungia arba išjungia didesnės galios išėjimo tranzistorių.

Siekiant maksimaliai padidinti signalo stiprinimą, du tranzistoriai sujungiami į vadinamąją sudėtinio stiprinimo (Darlingtono) schemą. Tokiu atveju bendras stiprinimas yra abiejų tranzistorių stiprinimo sandauga.

$$\beta_{bendras} = \beta_1 \cdot \beta_2$$



6.4.4 pav. Darlingtono tranzistoriaus sandara

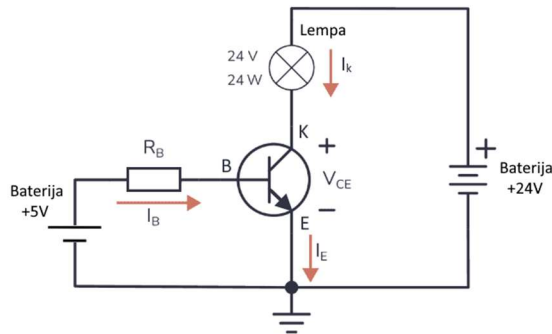
Darlingtono tranzistorių tipai:

- abu tranzistoriai NPN;
- abu tranzistoriai PNP;
- kombinuotas NPN + PNP.

Tai leidžia pasiekti labai dideles stiprinimo reikšmes ir valdyti dideles kolektoriaus sroves, lyginant su vienu tranzistoriumi.

Pavyzdys

Pateiktoje schemeje apskaičiuokite bazės mažiausią rezistoriaus nominalą, kad pavyktų įjungti lempą. Tranzistoriaus stiprinimo koeficientas lygus 100.



Sprendimas

Bazės – emiterio sandūra veikia kaip diodas, tad R_b bus pajungtas nuosekliai šiam diodui:

$$I_b = \frac{U_{bat} - U_{be}}{R_b} = \frac{5 - 0,7}{R_b}; \quad I_k = \frac{P_{lempa}}{U_{lempa}} = \frac{24}{24} = 1 \text{ A}; \quad I_b = \frac{I_k}{\beta} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ A};$$

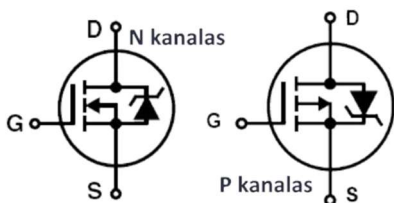
Norint įjungti lempą, kuriai reikia 1A, mums reikia 0,01 A Bazės srovės, tad R_b bus lygi:

$$R_b = \frac{U_{bat} - U_{be}}{I_b} = \frac{5 - 0,7}{0,01} = 430 \Omega;$$

Atsakymas: reikia varžos, kurios dydis 430 Ω .

Lauko tranzistoriai

Lauko tranzistoriai (*angl. Field-Effect Transistors, FET*) yra puslaidininkiniai prietaisai, skirti srovei valdyti elektriniu lauku. Skirtingai nuo dvipolių sandūros tranzistorių (BJT), kurie yra valdomi srove, lauko tranzistoriai yra valdomi įtampa. Tai reiškia, kad srovės tekėjimą tarp dviejų pagrindinių elektrodų kontroliuoja įtampa, prijungta prie valdančiojo elektrodo. Tame pačiame korpuse dažniausiai yra ir apsauginis diodas, matomas paveiksle žemiau.



6.4.5 pav. Lauko tranzistoriaus simboliai (MOSFET)

FET veikimo principas grindžiamas tuo, kad užtūros įtampa sukuria elektrinį lauką, kuris keičia puslaidininkinio kanalo laidumą. Dėl šios priežasties lauko tranzistoriai pasižymi labai didele įėjimo varža, mažu valdymo galios poreikiu ir plačiu taikymu tiek analoginėse, tiek skaitmeninėse grandinėse.

Pagrindiniai lauko tranzistoriaus išvadai yra šie:

- užtūra (*Gate, G*) – valdymo elektrodas. Dvipoliame tranzistoriuje tai atitinka bazę.
- ištaka (*Source, S*) – elektrodas, iš kurio krūvininkai patenka į kanalą. Dvipoliame tranzistoriuje tai atitinka emiterį.
- santaka arba drenas (*Drain, D*) – elektrodas, į kurį krūvininkai nuteka iš kanalo. Dvipoliame tranzistoriuje tai atitinka kolektorių.

Praktikoje dažniausiai vartojami terminai užtūra, ištaka ir drenas, todėl toliau bus laikomasi būtent šios terminijos, tačiau plačiojoje literatūroje dažniausiai sutinkami angliški terminai.

Palyginti su BJT, lauko tranzistoriai turi keletą svarbių privalumų:

- visų pirma, jų įėjimo varža yra labai didelė, todėl jie beveik neapkrauna signalo šaltinio.
- pasižymi mažesniu triukšmu.
- pasižymi geresniu šiluminiu stabilumu.

Dėl šių savybių MOSFET tranzistoriai tapo pagrindiniu šiuolaikinių mikroprocesorių, atminties grandynų ir galios elektronikos elementu.

Tačiau kai kuriose srityse BJT vis dar turi pranašumų, pavyzdžiui, kai reikalingas didelis srovės stiprinimas arba tam tikrose analoginėse schemose, kur svarbus geras tiesiškumas. Todėl tiek FET, tiek BJT išlieka svarbūs, tačiau jų paskirtys dažnai skiriasi.

Pagrindinės lauko tranzistorių rūšys

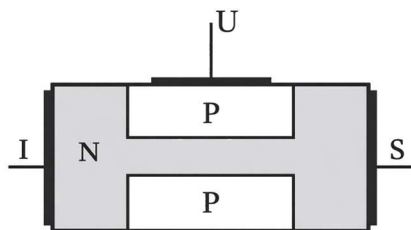
Plačiausiai elektronikoje nagrinėjamos dvi pagrindinės lauko tranzistorių šeimos:

1. JFET – sandūriniai arba valdančiosios PN sandūros lauko tranzistoriai (*angl. Junction Field-Effect Transistor*);
2. MOSFET – metalo–oksido–puslaidininkio lauko tranzistoriai (*angl. Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*).

Plačiau klasifikuojant dar išskiriami MESFET, HEMT, TFT, ISFET ir kiti specializuoti variantai, tačiau klasikinėje elektronikoje pagrindinis dėmesys skiriamas būtent JFET ir MOSFET tranzistoriams. Mes orientuosimės į MOSFET tipo lauko tranzistorius.

JFET

Valdančiosios PN sandūros lauko tranzistorius (JFET) yra vienas paprasčiausių lauko tranzistorių tipų, kuriame srovė valdoma atvirkštine kryptimi įjungta p–n sandūra tarp užtūros ir kanalo. Dažniausiai naudojami N kanalo JFET, nes jie patogesni grandinėse su teigiama maitinimo įtampa. Tranzistoriaus struktūroje laidus kanalas jungia ištaką ir santaką, o šalia jo suformuota priešingo laidumo sritis sudaro užtūrą. Keičiant užtūros–ištakos įtampą, kinta išsekinto sluoksnio plotis: didinant neigiamą įtampą kanalas siaurėja, jo varža didėja, o santakos srovė mažėja. Kai ši įtampa pasiekia atkirtos įtampą, kanalas visiškai užsidaro ir srovė nustoja tekėti. Didėjant santakos–ištakos įtampai, tranzistorius pereina iš ominės į soties sritį, kur srovė tampa beveik nepriklausoma nuo santakos įtampos ir daugiausia priklauso nuo užtūros įtampos. JFET pasižymi labai didele įėjimo varža, todėl jo išėjimo srovė faktiškai valdoma įėjimo įtampa.



6.4.6 pav. JFET tranzistoriaus supaprastinta sandara

JFET būna:

- N kanalo,
- P kanalo.

Kadangi jų veikimas yra analogiškas, tik su priešingomis poliarizavimo sąlygomis, dažniausiai aiškinimui pasirenkamas N kanalo JFET.

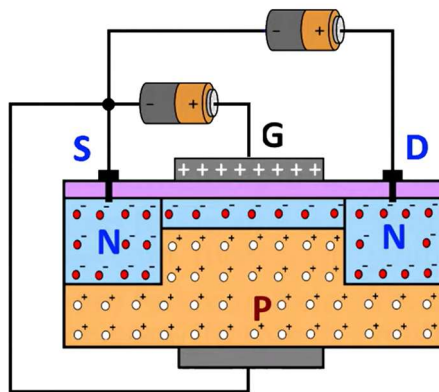
MOSFET

MOSFET tranzistoriuje užtūra nuo puslaidininkio atskirta plonu dielektriniu sluoksniu, paprastai silicio dioksidu. Dėl šios izoliacijos į užtūrą praktiškai neteka nuolatinė srovė, todėl MOSFET įėjimo varža yra ypač didelė.

MOSFET skirstomi į dvi pagrindines grupes:

- indukuotojo kanalo arba didinimo veiksenos (*angl. enhancement mode*) MOSFET,
- pradinio kanalo arba nusodinimo veiksenos (*angl. depletion mode*) MOSFET.

Šiuolaikinėje elektronikoje populiariausi yra indukuotojo kanalo N kanalo MOSFET, nes jie geriausiai tinka loginiams ir galios komutavimo režimams.



6.4.7 pav. MOSFET tranzistoriaus sandara ir veikimo iliustracija

MOSFET veikimo principas

MOSFET veikimas priklauso nuo užtūros–ištakos įtamos U_{GS} ir dreno–ištakos įtamos U_{DS} , tačiau jo valdymas grindžiamas ne sandūros išsekimo srities plėtimu, o kanalo susidarymu arba jo laidumo kitimu elektrinio lauko poveikyje.

Toliau nagrinėjamas N kanalo indukuotojo kanalo MOSFET, nes jis yra svarbiausias praktikoje.

Kai $V_{GS} < U_{TH}$, laidus kanalas dar nesusidaro, todėl tranzistorius uždarytas. Kai U_{GS} viršija slenkstinę įtampą U_{TH} , po užtūra susidaro inversinis kanalas, kuriuo gali tekėti dreno srovė.

MOSFET darbo sritys

N kanalo indukuotojo kanalo MOSFET skiriamos trys darbo sritys:

- Atkirtimo sritis

$$\begin{aligned}U_{GS} &< U_{TH} \\ I_D &\approx 0\end{aligned}$$

Šioje srityje laidus kanalas nesusidaro, todėl srovė tarp ištakos ir santakos praktiškai neteka. Tranzistorius yra išjungtas ir veikia kaip atvira grandinė.

- Ominė (linijinė) sritis

$$U_{GS} > U_{TH}, U_{DS} < U_{GS} - U_{TH}$$

Šioje srityje tarp ištakos ir santakos susidaro laidus kanalas. MOSFET elgiasi kaip įtampa valdomas rezistorius, kurio varža priklauso nuo užtūros–ištakos įtamos U_{GS} . Didėjant U_{GS} , kanalas platinėja, jo varža mažėja, o srovė didėja.

- Soties sritis

$$U_{GS} > U_{TH}, U_{DS} \geq U_{GS} - U_{TH}$$

Šioje srityje kanalas ties santaka susiaurėja (įvyksta „prispaudimas“), todėl srovė tampa beveik nepriklausoma nuo santakos–ištakos įtamos U_{DS} ir daugiausia priklauso nuo užtūros–ištakos įtamos U_{GS} . Tranzistorius veikia kaip stiprinantis elementas.

Svarbiausi praktiniai MOSFET parametrai yra:

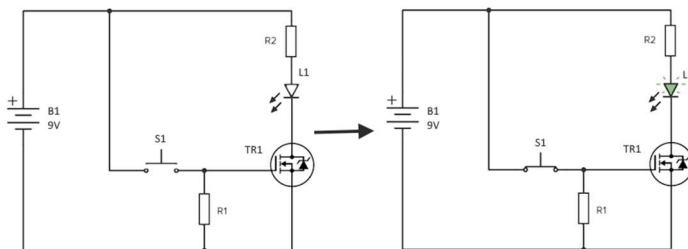
- įėjimo varža R_{in} – labai didelė;
- kanalo varža $R_{DS(on)}$ – varža tarp santakos ir ištakos, kai tranzistorius įjungtas;
- slenkstinė įtampa U_{TH} – užtūros ir ištakos įtampa, nuo kurios MOSFET pradeda atsiverti;
- didžiausia santakos–ištakos įtampa $U_{DS(max)}$ – didžiausia leistina įtampa tarp santakos ir ištakos;
- didžiausia užtūros–ištakos įtampa $U_{GS(max)}$ – didžiausia leistina įtampa tarp užtūros ir ištakos;
- didžiausia santakos srovė I_D – didžiausia leistina srovė per tranzistorių;
- didžiausias išsklaidomas galingumas P_D – galia, kurią tranzistorius gali saugiai išsklaidyti;
- užtūros talpa – svarbi perjungimo greičiui, nes užtūra veikia panašiai kaip kondensatorius.

MOSFET yra pagrindiniai šiuolaikinės elektronikos tranzistoriai. Jie naudojami:

- skaitmeninėse loginėse grandinėse,
- mikroprocesoriuose ir atmintyse,
- analoginiuose jungikliuose,
- impulsiniuose maitinimo šaltiniuose,
- variklių valdikliuose,
- galios keitikliuose.

Ypač svarbūs yra galios MOSFET, kurie dėl didelio efektyvumo ir greito perjungimo tapo pagrindiniais komutavimo elementais galios elektronikoje.

Turime 9V bateriją, tranzistorių BS170, šviesos diodą ir 2 rezistorius. Panagrinėkime kaip veikia tranzistorius praktiškai ir kam skirtas kiekvienas komponentas.



- LED įjungimas. Kad L1 šviestų, juo turi tekėti srovė, t.y. grandinė turi būti uždaryta. Kol jungiklis S1 nenuspaustas, tranzistorius TR1 yra uždarytas ir juo srovė neteka. Nuspaudus jungiklį, užtūros (G) kondensatorius įkraunamas ir tranzistorius atsidaro, juo pradeda tekėti srovė ir L1 pradeda šviesti.
- LED išjungimas. Jei nebūtų R1, užtūros-ištakos (C_{GS}) kondensatorius liktų įsikrovęs ir tranzistorius liktų atsidaręs, kol dėl savaiminio nuotėkio jis išsikrautų. Šioje grandinėje R1 užtikrina, kad užtūros kondensatorius išsikrautų, kai jungiklis S1 bus atjungtas.
- Praktikoje svarbu U_{th} vertė ir kanalo varža. Šio konkretaus tranzistoriaus dokumentacijoje randame šias vertes (gamintojo duomenys):

Gate Threshold Voltage ($V_{DS} = V_{GS}$, $I_D = 1.0 \text{ mA}$)	$V_{GS(th)}$	0.8	2.0	3.0	Vdc
Static Drain-Source On Resistance ($V_{GS} = 10 \text{ Vdc}$, $I_D = 200 \text{ mA}$)	$r_{DS(on)}$	–	1.8	5.0	Ω

Matome, kad slenkstinė įtampa U_{th} yra iki 3,0 V. Tai reiškia, kad maždaug nuo šios įtampos tranzistoriaus kanalas pradeda atsidarinėti, tačiau dar nėra visiškai atidarytas. Gamintojas nurodo, kad esant 10 V užtūros-ištakos įtampai kanalo varža yra ne didesnė kaip 5 Ω . Mūsų grandinėje naudojama 9 V valdymo įtampa yra pakankama tranzistoriui patikimai atidaryti. Didžiausia leistina užtūros-ištakos įtampa šiam tranzistoriui yra $\pm 20 \text{ V}$, todėl 9 V jos neviršija.

- Praktikoje labai svarbi ir kanalo varža, kadangi pilnai atsidarius tranzistoriui, jo galia bus lygi $P = I \cdot U = I^2 \cdot R$, dėl to neįvertinus varžos ir apskaičiavus didesnę galimą srovę, tranzistorius perkais ir sudegs.

- Jei reikėtų apskaičiuoti LED rezistorių, kad jis šviestų ir vartotų 10 mA, vertintume atidaryto kanalo varžą $5\ \Omega$, tuomet imame, kad žalias šviesos diodas užsidega nuo 2 V ir gauname:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{9-2}{R_2+R_{tr}} = \frac{7}{R_2+5}; R_2 = \frac{7}{I} - 5 = \frac{7}{0,01} - 5 = 695\ \Omega.$$

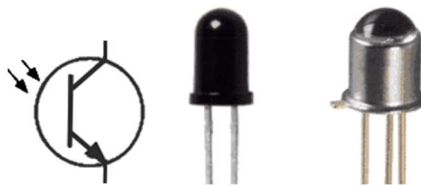
Artimiausias realus nominalas yra $680\ \Omega$.

6.5 Fototranzistoriai

Fototranzistorius – tai puslaidininkinis įtaisas, kuris veikia kaip šviesa valdomas jungiklis arba stiprintuvas. Nors jis savo sandara primena paprastą dvipolį tranzistorių (BJT), pagrindinis skirtumas yra tas, kad fototranzistoriaus bazė yra jautri šviesai. Jis yra gerokai jautresnis už fotodiodą, nes pasižymi vidiniu srovės stiprinimo koeficientu.

Sandara

Fototranzistorius susideda iš trijų sluoksnių (NPN arba PNP), tačiau dažniausiai jis turi tik du išvadus: kolektorių ir emiterį. Bazės terminalas paprastai nėra išvedamas į išorę (nors būna modelių su trimis kojelėmis, kur bazė naudojama darbiniam taškui nustatyti).



6.5.1 pav. Fototranzistoriaus simbolis ir vaizdai

Realioji sudėtis:

- Šviesos langelis: prietaiso korpuse yra skaidrus sluoksnis arba lęšis, kuris sufokusuoja šviesą į bazės-kolektoriaus sandūrą.
- Medžiagos: dažniausiai gaminami iš silicio, tačiau siekiant didesnio efektyvumo naudojamos ir tokios medžiagos kaip galio arsenidas (heterosandūros konstrukcija).

Veikimas

Fototranzistoriaus veikimas pagrįstas vidiniu fotoelektriniu efektu. Kai fotonai patenka į puslaidininkio bazės sritį, jie generuoja elektronų ir skylių poras. Dėl to atsiranda bazės srovė I_B .

Kadangi tranzistorius turi srovės stiprinimą, ši nedidelė šviesos sukurta bazės srovė yra sustiprinama, todėl tarp kolektoriaus ir emiterio pradeda tekėti žymiai didesnė srovė I_C :

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

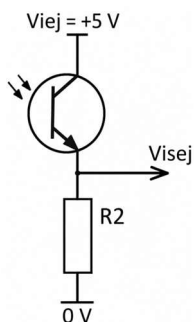
Kadangi I_B priklauso nuo apšvietimo, tai:

$$I_C \sim \text{šviesos intensyvumas}$$

Todėl kuo stipresnė šviesa, tuo didesnė kolektoriaus srovė.

Fototranzistorius dažniausiai naudojamas su atjungta baze (bazės išvadas nejungiamas), todėl šviesa tampa vieninteliu valdymo veiksnio. Kai kuriais atvejais bazė gali būti papildomai valdoma išoriškai, kad būtų galima reguliuoti jautrumą.

Dėl vidinio stiprinimo fototranzistorius yra keliasdešimt ar net apie 100 kartų jautresnis nei paprasti šviesos jutikliai. Fototranzistoriaus standartinis jungimas pateiktas paveikslėlyje žemiau.



6.5.2 pav. Fototranzistoriaus jungimo schema

Darbo režimai

Fototranzistorius gali veikti dviem pagrindiniais režimais:

- Aktyvusis (linijinis) režimas, kolektoriaus srovė yra proporcinga šviesos intensyvumui.
Naudojamas, kai reikia matuoti šviesos lygį.
- Raktinis (jungiklio) režimas
Tranzistorius yra:

- uždarytas (tamsoje), arba
- soties būsenoje (stipri šviesa).

Naudojamas skaitmeninėse sistemose, pavyzdžiui, objektų aptikimui.

Privalumai:

- didelė išėjimo srovė dėl vidinio stiprinimo;
- didelis jautrumas šviesai;
- paprasta konstrukcija ir nedidelė kaina;
- gali būti naudojamas tiek analoginiuose, tiek skaitmeniniuose įrenginiuose.

Trūkumai:

- tamsioji srovė – net ir tamsoje teka nedidelė srovė;
- lėtesnis veikimas dėl vidinių talpų;
- ribotas darbo dažnis (netinka labai aukšto dažnio grandinėms);
- jautrumas temperatūrai ir trikdžiams.

Taikymo sritys

Fototranzistoriai plačiai naudojami:

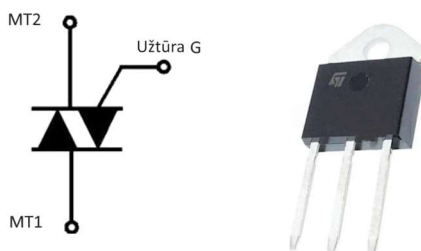
1. Optinėse porose (optoporos) – elektriniam grandinių atskyrimui;
2. Objektų aptikimo sistemose – konvejeriuose, skaičiavimo įrenginiuose;
3. Saugos sistemose – šviesos barjeruose, signalizacijose;
4. Nuotolinio valdymo sistemose – infraraudonųjų spindulių signalams priimti;
5. Automatinio apšvietimo sistemose – gatvių ar patalpų apšvietimo valdymui.

6.6 Simistoriai

Simistorius (*angl. TRIAC*) yra puslaidininkinis trijų išvadų elementas, skirtas kintamosios srovės valdymui. Skirtingai nuo tiristoriaus, kuris praleidžia srovę tik viena kryptimi, simistorius gali praleisti srovę abiem kryptimis, todėl yra labai tinkamas kintamosios srovės grandinėms.

Simistorius turi tris išvadás:

- MT1 (pirmasis pagrindinis išvadas),
- MT2 (antrasis pagrindinis išvadas),
- G (valdymo elektrodas – užtūra).



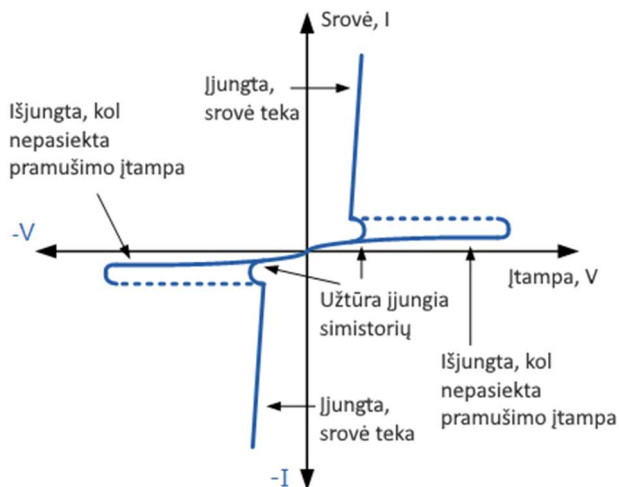
6.6.1 pav. Simistoriaus simbolis ir vaizdas

Veikimo principas

Simistorius veikia kaip jungiklis:

- Kai valdymo elektrodui (G) paduodamas impulsas → simistorius atsidaro.
- Per jį pradeda tekėti srovė tarp MT1 ir MT2.
- Atsidaręs jis lieka laidas net ir pašalinus valdymo signalą.

Simistorius užsidaro tik tada, kai srovė nukrenta žemiau tam tikros ribos (laikymo srovės), kas natūraliai įvyksta kiekvieno kintamosios srovės pusperiodžio pabaigoje.



6.6.2 pav. Simistoriaus voltamperinė charakteristika

Simistorius gali būti valdomas:

- tiek teigiama,
- tiek neigiama valdymo įtampa,

ir gali praleisti srovę abiem kryptimis.

Tai reiškia, kad vienas simistorius gali pakeisti du priešingai sujungtus tiristorius.

Veikimo režimai

Simistorius gali būti įjungiamas keturiais būdais (priklausomai nuo srovės ir valdymo signalo poliariškumo), tačiau praktiškai dažniausiai naudojami du pagrindiniai režimai:

- teigiamas valdymo signalas,
- neigiamas valdymo signalas.

Praktikoje kintamosios srovės grandinėje simistorius:

- įsijungia gavęs valdymo impulsą,
- praleidžia srovę per visą pusperiodį,
- automatiškai išsijungia, kai srovė tampa lygi nuliui,
- kitame pusperiodyje vėl gali būti įjungiamas.

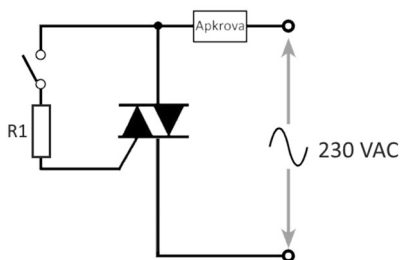
Todėl jis leidžia valdyti:

- visą galią,
- arba tik dalį galios (fazinis valdymas).

Simistoriai naudojami:

- apšvietimo reguliatoriuose (dimeriuose),
- elektrinių variklių valdyme,
- šildymo įrenginiuose,
- buitinėje technikoje (pvz., skalbimo mašinose),
- galios reguliavimo grandinėse.

Nors simistorius gali būti naudojamas kaip galios reguliatorius, šiame skyriuje nagrinėjame tik paprastą išjungimą-įjungimą, tipinė schema pateikiama žemiau. Valdant rezistyvines apkrovas dažnai naudojamos optoporos su nulinės įtampos perjungimu (*angl. zero cross detection*).



6.6.3 pav. Tipinė simistoriaus jungimo schema

Pagrindiniai simistoriaus parametrai į kuriuos reikėtų atsižvelgti projektuojant grandinę:

1. Didžiausia uždaros būsenos įtampa U_{DRM}/U_{RRM} : turi būti didesnė už darbinę tinklo įtampą ir galimus viršįtampius.
2. Didžiausia darbinė srovė I_T : parodo, kokią srovę simistorius gali saugiai praleisti.
3. Užtūros įjungimo srovė I_{GT} : mažiausia užtūros srovė, reikalinga simistoriui įjungti.
4. Laikymo srovė I_H : mažiausia srovė, kuriai esant simistorius lieka atsidaręs.

5. Įtampos kritimas atsidarius V_{TM} : tai įtampos kritimas ant simistoriaus laidžioje būsenoje. Nuo jo priklauso galios nuostoliai ir kaitimas:

$$P \approx V_{TM} \cdot I$$

6. Didžiausias išsklaidomas galingumas P_D : parodo, kiek šilumos simistorius gali saugiai išsklaidyti.

Priklausomai nuo korpuso dydžio, litavimo tipo, šie parametrai gali skirtis gana ženkliai.

6.7 Optoporos

Optopora (angl. *Optocoupler* / *Opto-isolator*) – tai elektroninis komponentas, skirtas perduoti signalą tarp dviejų grandinių be tiesioginio elektrinio ryšio, naudojant šviesą. Optoporos viduje viename korpuse yra sumontuoti du elementai: šviesos šaltinis, dažniausiai infraraudonųjų spindulių šviesos diodas – LED ir šviesos imtuvas: fototranzistorius, fotodiodas arba fototiristorius.



6.7.1 pav. Optoporos simbolis ir vaizdas

Veikimas yra gana paprastas:

1. Įėjimas: į LED paduodama srovė, jis pradeda šviesti korpuso viduje.
2. Perdavimas: šviesa keliauja per skaidrų dielektrinį sluoksnį (izoliatorių).
3. Išėjimas: šviesos imtuvas (pvz., fototranzistorius) fiksuoja šviesą ir pradeda leisti srovę išėjimo grandinėje.

Svarbiausia yra tai, kad abi grandinės yra galvaniskai atskirtos. Tai reiškia, kad jei išėjimo pusėje įvyks trumpasis jungimas ar 230 V įtampos šuolis, jei optopora bus teisingai parinkta ir teisingai suprojektuota grandinė, mikrovaldiklis liks saugus.

Srovės perdavimo koeficientas (angl. CTR – current transfer ratio)

Svarbiausias optoporos parametras yra srovės perdavimo koeficientas:

$$CTR = \frac{I_C}{I_F} \cdot 100\%$$

kur:

- I_F – LED srovė,
- I_C – išėjimo (kolekoriaus) srovė.

CTR rodo, kiek stipriai signalas „perduodamas“ per optoporą.

Pvz.: jei $CTR = 100\%$, tada $I_C \approx I_F$. Jei $CTR = 200\%$, tada išėjimo srovė gali būti dvigubai didesnė, jei neriboja išorinė grandinė.

Galvaninis atskyrimas

Optoporos pagrindinė paskirtis – apsauga ir izoliacija:

- tarp įėjimo ir išėjimo nėra elektrinio kontakto;
- gali atlaikyti dideles įtampas (iki kelių kV);
- apsaugo nuo:
 - viršįtampių,
 - triukšmų,
 - „žemės kilpų“.

Signalas perduodamas tik šviesa, ne srove.

Greitis ir dažninės savybės

- Dažniausiai sutinkamos lėtos optoporos:
 - su fototranzistoriumi,
 - dažniausiai iki ~10–100 kHz,
 - naudojamos valdymui, relėms, maitinimo šaltiniams.
- buitinėje elektronikoje retai sutinkamos greitos optoporos:
 - su fotodiodu ar specialia struktūra,
 - gali veikti MHz diapazone,
 - naudojamos duomenų perdavimui.

Greitį riboja:

- vidinės talpos,
- tranzistoriaus prisotinimas.

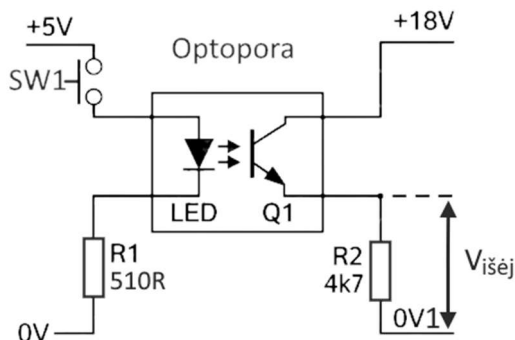
Optoporų tipai pagal sandarą:

- Su fotodiodu.
- Su fototranzistoriumi.
- Su darlingtono grandine.
- Su simistoriumi.
- Su nulinio aptikimo grandine.
- Kita.

Tipinis optoporos jungimas

Pirminėje grandinėje yra maitinimo šaltinis, rezistorius ir diodas, tad žinodami įtampos kritimą diodo tiesiogine kryptimi galime apskaičiuoti tekančią srovę: $I_F = \frac{5-1.2}{510} = 7,5 \text{ mA}$.

Jei žinome, kad prie šios pirminės srovės CTR yra 600%, tai antrinė didžiausia galima srovė $I_C = I_F \cdot CTR = 7,5 \text{ mA} \cdot 6 = 45 \text{ mA}$. Kadangi maitinimo šaltinis yra 18 V, tai didžiausia galima įtampa ir bus 18 V ir tranzistorius bus soties režime.



6.7.2 pav. Tipinė optoporos jungimo schema

Kaip jau minėta anksčiau, šioje grandinėje yra išorinis ribojimas, t.y. rezistorius ir 18V maitinimo šaltinis, kuris riboja ir neleidžia tekėti 45 mA srovei.

Didžiausia srovė per R2 gali būti:

$$I_{R2(max)} \approx \frac{18}{4700} \approx 3,83 \text{ mA}$$

Išvada: optopora teoriškai galėtų valdyti 45 mA, bet ši grandinė leidžia tik apie 3,83 mA, todėl tranzistorius pereina į sotį.

Optoporos naudojamos:

- impulsiniuose maitinimo šaltiniuose (grįžtamasis ryšys);
- mikrovaldiklių apsaugai;
- galios elektronikoje;
- triukšmingų signalų izoliavimui;
- simistorių ir relių valdymui.

6.8 Kieto kūno relės

Kieto kūno relė (*angl. Solid State Relay, SSR*) arba puslaidininkinė relė – tai elektroninis jungiklis, kuris leidžia valdyti didelės galios grandines naudojant mažos galios signalą ir neturi jokių judančių mechaninių dalių. Kadangi ši puslaidininkinė relė labiau panaši į optoporą, ši dalis specialiai perkelta po šio skyriaus. Priešingai nei standartinės elektromechaninės relės, kurios naudoja rites, magnetinius laukus ir judančius kontaktus, SSR neturi jokių judančių dalių, dėl to perjungimų skaičius yra gerokai didesnis.



6.8.1 pav. Kieto kūno relės simbolis ir vaizdai

Kaip ir optopora, SSR sudaryta iš 3 pagrindinių dalių:

1. Įėjimo dalis

- šviesos diodas (LED);

- dažnai su srovę ribojančiu rezistoriumi.

2. Izoliacija

- dielektrikas, kuris perduoda signalą šviesa.

3. Išėjimo dalis

- AC SSR: simistorius arba tiristoriai (SCR);
- DC SSR: tranzistoriai arba MOSFET.

Signalas perduodamas: elektra → šviesa → elektra.

Veikimo principas

- kai pirmine grandine teka srovė - LED įsižiebia,
- optoporos išėjimas suveikia,
- įjungiamas galios puslaidininkis,
- apkrova prijungiama prie maitinimo.
- Kai pirminė grandinė nutrūksta, SSR išsijungia (AC atveju – perėjimą).

Pagrindinė lygtis (taikoma didesnei daliai SSR)

Iėjimo LED srovė:

$$I_F = \frac{U_{in} - U_F}{R}$$

kur:

- $U_F \approx 1,2 \text{ V(LED)}$,
- R – ribojantis rezistorius.

Privalumai

Kieto kūno relės turi šiuos svarbius privalumus:

- neturi judančių dalių, todėl beveik nesusidėvi;
- veikia tyliai;
- persijungia greitai;
- nesukelia kontaktų kibirkščiavimo ir kontaktų virpesių;
- užtikrina galvaninį atskyrimą tarp valdymo ir galios grandinių;
- yra atsparios vibracijai ir smūgiams;
- gali atlikti labai daug persijungimų.

Kadangi SSR neturi mechaninių kontaktų, jų leistinas persijungimų skaičius yra labai didelis. Praktikoje jis dažnai siekia milijonus ar net dešimtis milijonų persijungimų, o daugeliu atvejų tarnavimo laikas labiau priklauso nuo temperatūros ir darbo sąlygų negu nuo paties persijungimų skaičiaus.

Palyginimui, elektromagnetinių relių kontaktų tarnavimo laikas paprastai būna gerokai mažesnis.

SSR naudojamos:

- mikrovaldiklių valdomose sistemose;
- šildymo įrenginiuose;
- apšvietimo valdyme;
- variklių valdyme;
- pramoninėse automatikos sistemose

Skyriaus žinių patikrinimas

1. Kuo aktyviniai komponentai skiriasi nuo pasyviųjų?
2. Kokie yra diodo išvadai ir kuria kryptimi diodas praleidžia srovę?
3. Kas atsitinka, kai diodo atbulinė įtampa viršija pramušimo ribą?
4. Kuo stabilitronas skiriasi nuo paprasto diodo ir kokioje srityje jis dirba?
5. Kodėl stabilitronas visada jungiamas su nuosekliu rezistoriumi?
6. Kodėl LED negalima jungti tiesiai prie įtampos šaltinio be rezistoriaus?
7. Apskaičiuokite nuoseklaus rezistoriaus varžą, kai maitinimas 12 V, mėlyno LED įtampos kritimas 3,2 V, o norima srovė 15 mA.
8. Kokie yra dvipolio tranzistoriaus išvadai ir kuo skiriasi npn nuo pnp?
9. Ką reiškia stiprinimo koeficientas β ir koks ryšys sieja bazės ir kolektoriaus sroves?
10. Tranzistoriaus $\beta = 150$, bazės srovė 0,2 mA. Kokia kolektoriaus srovė?
11. Kodėl bazės–emiterio sandūrą galima laikyti diodu ir ką tai reiškia bazės įtampai?
12. Kas yra Darlingtono schema ir koks jos bendras stiprinimo koeficientas?
13. Kuo lauko tranzistorius skiriasi nuo dvipolio valdymo požūriu? Įvardykite MOSFET išvadus.
14. Kokia rezistoriaus tarp užtūros ir ištakos paskirtis MOSFET jungimo scheme?
15. Kuo simistorius skiriasi nuo tiristoriaus ir kada jis užsidaro, jei valdymo signalas jau pašalintas?
16. Kaip veikia optopora ir ką parodo jos srovės perdavimo koeficientas CTR?
17. Iš kokių trijų dalių sudaryta kieto kūno relė (SSR)? Palyginkite ją su elektromagnetine rele.

7. INTEGRINIAI GRANDYNAI

Integriniai grandynai yra vieni svarbiausių šiuolaikinės elektronikos elementų. Jie naudojami beveik visuose elektroniniuose įrenginiuose – nuo paprastų valdymo schemų iki kompiuterių, ryšio sistemų ir matavimo prietaisų. Integrinis grandynas – tai viename nedideliame puslaidininkio kristale suformuota daugybė tarpusavyje sujungtų elektroninių elementų: tranzistorių, diodų, rezistorių ir kitų struktūrų.

Pagrindinis integrinių grandynų privalumas yra tas, kad jie leidžia sudėtingas elektronines funkcijas atlikti mažame tūryje, patikimai ir ekonomiškai. Naudojant integrinius grandynus sumažėja įrenginių matmenys, energijos sąnaudos, padidėja veikimo greitis ir patikimumas. Dėl šių savybių integriniai grandynai tapo šiuolaikinės elektronikos pagrindu.

Pagal paskirtį integriniai grandynai gali būti labai įvairūs. Vieni jų skirti analoginiams signalams stiprinti ir apdoroti, kiti – loginiams veiksams atlikti, duomenims saugoti, skaičiavimams vykdyti arba skaitmeniniams ir analoginiams signalams keisti. Todėl šiame skyriuje bus nagrinėjamos svarbiausios integrinių grandynų grupės: operaciniai stiprintuvai, komparatoriai, loginiai elementai, ADC ir DAC keitikliai, stabilizatoriai, atmintys bei procesoriai.

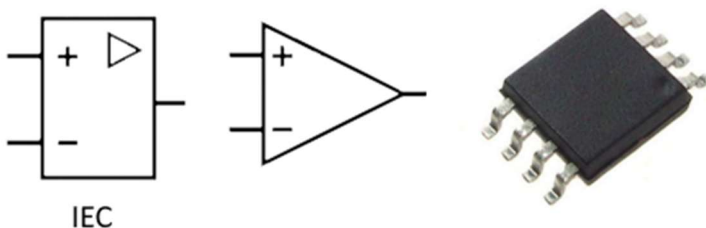
Šio skyriaus tikslas – supažindinti su integrinių grandynų paskirtimi, pagrindiniais veikimo principais ir jų taikymu praktinėse elektronikos schemose. Supratęs šių grandynų veikimą, lengviau analizuoti sudėtingesnes elektronines sistemas ir suvokti, kaip iš paprastų funkcinių blokų sudaromi šiuolaikiniai elektroniniai įrenginiai.

7.1 Operaciniai stiprintuvai

Operacinis stiprintuvas (OS) – tai labai didelio stiprinimo diferencialinis stiprintuvas, skirtas įvairioms analoginių signalų apdorojimo operacijoms atlikti. Jis stiprina dviejų įėjimo signalų skirtumą, todėl vadinamas diferencialiniu stiprintuvu.

Operaciniai stiprintuvai plačiai naudojami elektronikoje, nes jų pagalba galima sudaryti įvairias grandines: stiprintuvus, kartotuvus, sumatorius, komparatorius, filtrus, generatorius, integratorius, diferencijatorius, srovės šaltinius ir kitas schemas.

Istoriškai operacinis stiprintuvas kilo iš diferencialinio stiprintuvo, tačiau pasižymi daug didesniu įtampos stiprinimo koeficientu. Atvirojo stiprinimo režime jo stiprinimo koeficientas dažnai siekia: $K = 10^4 \dots 10^6$.



7.1.1 pav. Operacinio stiprintuvo simboliai ir realus vaizdas

Paveiksle pateikiami du simboliai: pirmasis oficialus IEC 60617 standarto simbolis, antrasis – senesnis, bet vis dar labai dažnai sutinkamas schemose, nes didesnei daliai yra labiau įprastas.

Pastaba. Kartais sukeičiami įėjimai vietomis, kad schema atrodytų gražiau.

Operacinio stiprintuvo žymėjimas

Schemose operacinis stiprintuvas vaizduojamas trikampių su dviem įėjimais ir vienu išėjimu. Įėjimai žymimi taip:

- „+“ – neinvertuojantis įėjimas;
- „-“ – invertuojantis įėjimas.

Jei teigiamo poliškumo signalas paduodamas į neinvertuojantį įėjimą, išėjimo įtampa taip pat didėja teigiama kryptimi. Jei tas pats signalas paduodamas į invertuojantį įėjimą, išėjime gaunama priešingo poliškumo įtampa.

Operacinis stiprintuvas pasižymi:

- labai didelė įėjimo varža,
- maža išėjimo varža,
- galimybė dirbti plačiame išėjimo įtampų diapazone, kurį riboja maitinimo šaltiniai.

Praktiškai OS dažniausiai maitinamas dviem priešingų poliškumų įtampomis, pavyzdžiui: +12 V ir –12 V, todėl jo išėjimo įtampa gali kisti beveik visame šiame intervale.

Operacinis stiprintuvas stiprina įėjimų įtampų skirtumą:

$$U_{i\bar{s}} = K_0(U_+ - U_-)$$

čia:

- U_+ – neinvertuojančio įėjimo įtampa,
- U_- – invertuojančio įėjimo įtampa,
- K_0 – atvirojo stiprinimo koeficientas.

Kadangi K_0 yra labai didelis, net labai mažas įėjimo įtampų skirtumas gali sukelti didelį išėjimo signalą.

Grįžtamasis ryšys

Dėl labai didelio stiprinimo koeficiento operacinis stiprintuvas dažniausiai naudojamas su grįžtamuju ryšiu. Kai grandinė dirba stabilu tiesiniu režimu ir stiprintuvas nėra prisotintas, išėjimo įtampa nusistovi tokia, kad įėjimų įtampų skirtumas būtų labai mažas, o idealiu atveju laikoma, kad jis lygus 0V:

$$U_+ \approx U_-$$

Tai yra viena svarbiausių taisyklių, analizuojant daugumą operacinių stiprintuvų schemų.

Pagrindinės idealiojo operacinio stiprintuvo savybės

Analizuojant schemas dažnai naudojamas idealiojo operacinio stiprintuvo modelis, kai daroma prielaida, kad:

- įtampos stiprinimo koeficientas yra labai didelis;
- įėjimo varža yra labai didelė, todėl į įėjimus srovė beveik neteka:

$$I_+ \approx 0, I_- \approx 0$$

- išėjimo varža yra labai maža, dėl to galima jungti sąlyginai didelę apkrovą prie operacinio stiprintuvo išėjimo;
- esant grįžtamajam ryšiui galioja sąlyga:

$$U_+ \approx U_-$$

Šios taisyklės leidžia labai supaprastinti schemų analizę.

Operacinių stiprintuvų taikymas

Naudojant operacinius stiprintuvus galima sudaryti daugybę naudingų grandinių:

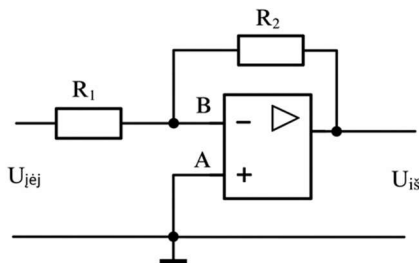
- sumatorius,
- integratorius,
- diferencijatorius,
- aktyviuosius filtrus,
- komparatorius,
- logaritminius stiprintuvus,
- srovės šaltinius.

Tačiau pagrindinės ir dažniausiai sutinkamos yra šios:

- invertuojantis stiprintuvas,
- neinvertuojantis stiprintuvas,
- įtampos kartotuvas.

Toliau bus nagrinėjamos tik svarbiausios operacinių stiprintuvų schemos.

Invertuojantis stiprintuvas



7.1.2 pav. Invertuojančio stiprintuvo pavyzdinė schema

Invertuojančiame stiprintuve įėjimo įtampa paduodama į invertuojantį įėjimą per rezistorių R_1 , o išėjimas su invertuojančiu įėjimu sujungtas grįžtamojo ryšio rezistoriumi R_2 . Neinvertuojantis įėjimas dažniausiai prijungiamas prie žemės.

Kadangi:

$$U_+ = 0$$

tai dėl neigiamojo grįžtamojo ryšio gauname:

$$U_- \approx 0$$

Vadinasi, invertuojančio įėjimo taškas turi beveik nulinį potencialą, nors tiesiogiai su žeme nesujungtas. Toks taškas vadinamas „*virtualiąja žeme*“.

Kadangi į operacinio stiprintuvo įėjimą srovė beveik neteka (didelė įėjimo varža, $M\Omega$ eilės), tai srovės per rezistorius R_1 ir R_2 yra vienodos:

$$I_1 = I_2$$

Todėl:

$$\frac{U_{\text{i}\acute{e}j}}{R_1} = -\frac{U_{i\grave{s}}}{R_2}$$

Iš čia gaunama invertuojančio stiprintuvo formulė:

$$U_{i\grave{s}} = -\frac{R_2}{R_1} U_{\text{i}\acute{e}j}$$

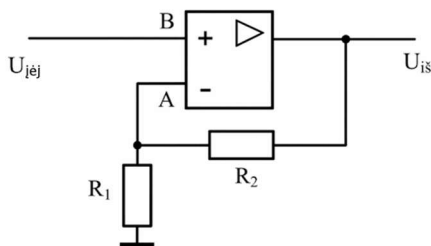
Stiprinimo koeficientas:

$$K = \frac{U_{i\grave{s}}}{U_{\text{i}\acute{e}j}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Neigiamas ženklas rodo, kad išėjimo signalas yra priešingo poliškumo negu įėjimo signalas.

Šios schemos įėjimo varža $R_{\text{i}\acute{e}j} = R_1$, o išėjimo varža $R_{i\grave{s}}$ yra maža – lygi operacinio stiprintuvo išėjimo varžai. Praktiškai R_1 ir R_2 imamos iš intervalo 1-100 k Ω . Schemos trūkumas yra tas, kad norint gauti didelį stiprinimo koeficientą, reikia mažinti R_1 , dėl ko sumažėja schemos įėjimo varža $R_{\text{i}\acute{e}j}$, o tai nėra gerai, nes apkrauna grandinę prieš operacinį stiprintuvą.

Neinvertuojantis stiprintuvas



7.1.3 pav. Neinvertuojančio stiprintuvo pavyzdinė schema

Neinvertuojančiame stiprintuve įėjimo signalas paduodamas į neinvertuojantį įėjimą. Į invertuojantį įėjimą per rezistorių daliklį grąžinama dalis išėjimo įtampos.

Kadangi esant neigiamajam grįžtamajam ryšiui:

$$U_- \approx U_+ = U_{\text{įėj}}$$

o įtampa invertuojančiame įėjime lygi išėjimo įtampos daliai (varžinis daliklis), gauname:

$$U_{\text{įėj}} = U_{\text{iš}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Iš čia:

$$U_{\text{iš}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_{\text{įėj}}$$

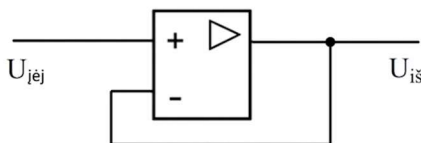
Taigi neinvertuojančio stiprintuvo stiprinimo koeficientas yra:

$$K = \frac{U_{\text{iš}}}{U_{\text{įėj}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Šio stiprintuvo išėjimo signalas yra to paties poliškumo kaip ir įėjimo signalas.

Svarbi šios schemos savybė – labai didelė įėjimo varža, nes signalas paduodamas tiesiai į operacinio stiprintuvo įėjimą, o išėjimo varža labai maža – lygi operacinio stiprintuvo išėjimo varžai.

Įtampos kartotuvas



7.1.4 pav. Kartotuvo pavyzdinė schema

Įtampos kartotuvas yra neinvertuojančio stiprintuvo atvejis, kai:

$$R_2 = 0, R_1 \rightarrow \infty$$

Tada stiprinimo koeficientas lygus vienetui:

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1$$

Vadinasi:

$$U_{iš} = U_{įėj}$$

Nors toks stiprintuvas įtampos nedidina, jis yra labai naudingas kaip buferis, nes turi:

- labai didelę įėjimo varžą;
- labai mažą išėjimo varžą.

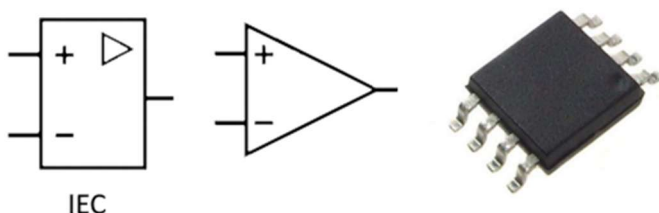
Todėl kartotuvas leidžia sujungti dvi grandines taip, kad viena jų beveik neapkrautų kitos.

Santrauka

Operacinis stiprintuvas yra didelio stiprinimo diferencialinis stiprintuvas, kuris dažniausiai naudojamas su neigiamuoju grįžtamuoju ryšiu. Pagrindinės jo savybės – labai didelė įėjimo varža, maža išėjimo varža ir gebėjimas palaikyti labai mažą įėjimų įtampų skirtumą. Dėl to operaciniai stiprintuvai plačiai naudojami įvairiose analoginėse schemose: stiprintuvuose, kartotuvuose, filtrų, komparatorių ir srovės šaltinių grandinėse.

7.2 Komparatoriai ir Šmito trigeriai

Komparatorius – tai elektroninė grandinė, kuri palygina (*angl. compare*) dvi įtampas ir išėjime parodo, kuri iš jų yra didesnė. Schemos simbolis nesiskiria nuo operacinio stiprintuvo.



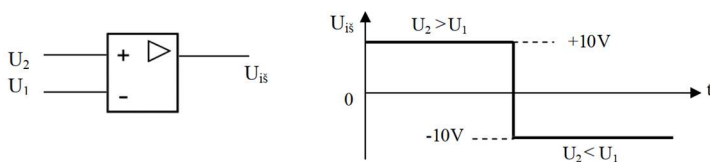
7.2.1 pav. Komparatoriaus simboliai ir realus vaizdas

Paprasčiausiu komparatoriumi gali būti laikomas operacinis stiprintuvas be grįžtamojo ryšio. Skirtingai nuo stiprintuvo, komparatorius čia dirba ne tiesiniu režimu, o kaip sprendimo priėmėjas: jis nustato, ar viena įtampa didesnė už kitą.

Komparatorius turi du įėjimus:

- neinvertuojantį +;
- invertuojantį –.

Jis lygina šių įėjimų įtampas.



7.2.2 pav. Komparatoriaus veikimo atvaizdavimas (maitinamas $\pm 10\text{ V}$)

Jeigu neinvertuojančiame įėjime įtampa yra didesnė negu invertuojančiame, išėjimo įtampa persijungia į loginį 1:

$$U_+ > U_- \Rightarrow U_{is} = 1 = +10\text{ V}$$

Jeigu invertuojančiame įėjime įtampa yra didesnė, išėjimas persijungia į loginį 0.

$$U_+ < U_- \Rightarrow U_{is} = 0 = -10\text{ V}$$

Taigi komparatorius tiesiog persijungia tarp dviejų kraštinių būsenų, tad jei komparatoriaus maitinimas būtų 0 V ir +15 V, loginiai lygiai būtų tokie patys: 0 V ir 15 V. Kai kurių komparatorių išėjimo grandinė yra „atviras kolektorius“, tuomet naudojame išorinį rezistorių ir bet kokią įtampą, kuri neviršija komparatoriaus maitinimo įtamos.

Kodėl komparatorius persijungia taip staigiai?

Operacinis stiprintuvas turi labai didelį stiprinimo koeficientą. Todėl net ir labai mažas skirtumas tarp įėjimų sukelia didelį išėjimo pokytį. Dėl to komparatoriaus išėjimas labai greitai pereina iš vienos būsenos į kitą.

Todėl komparatoriaus perdavimo charakteristika yra labai stati: pereinamoji sritis labai siaura.

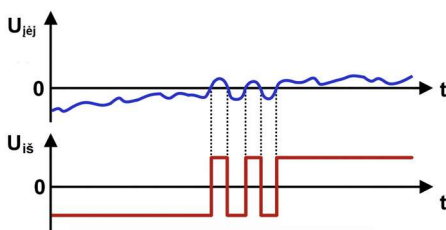
Kuo komparatorius skiriasi nuo stiprintuvo?

Analizuojant stiprintuvus su neigiamuoju grįžtamoju ryšiu dažnai taikoma sąlyga:

$$U_+ \approx U_-$$

Tačiau komparatoriui ši taisyklė netaikoma, nes jis dažniausiai dirba be grįžtamojo ryšio ir jo išėjimas sąmoningai pereina į sotį. Todėl komparatorius naudojamas ne signalui tiksliai stiprinti, o nustatyti, ar signalas viršijo tam tikrą ribą.

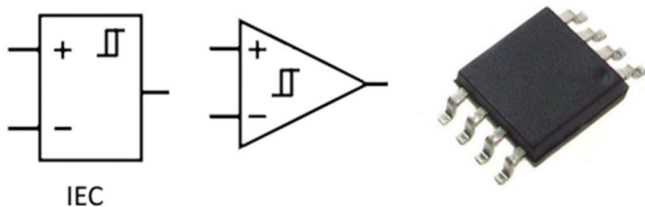
Paprasto komparatoriaus trūkumas yra tas, kad kai įėjimo įtampa būna labai arti lyginimo ribos, net mažas triukšmas gali priversti išėjimą kelis kartus persijungti.



7.2.3 pav. Komparatoriaus atsparumas triukšmui

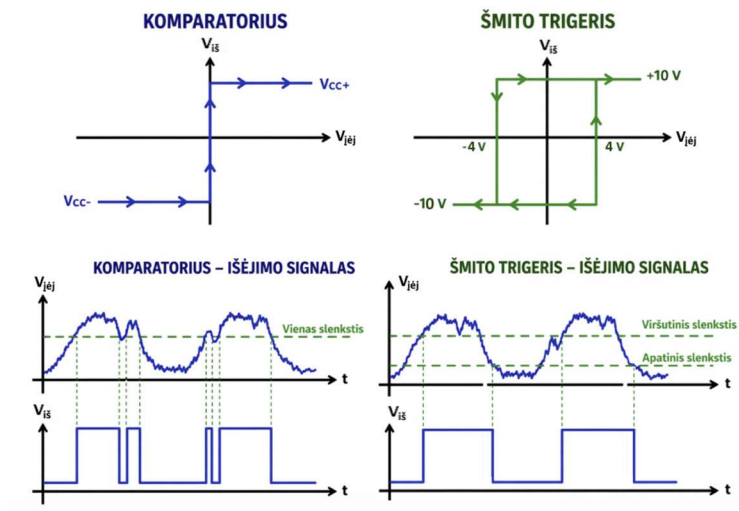
Šiai problemai spręsti naudojamas Šmito trigeris – komparatorius su histereze. Jis turi dvi skirtingas persijungimo ribas, todėl išėjimas tampa daug stabilesnis ir nebereaguoja į smulkius triukšmo svyravimus.

Išėjimo įtampos nereikalingą „šokinėjimą“ galima pašalinti, į stiprintuvą įvedus teigiamą grįžtamąjį ryšį, todėl Šmito trigerį galima suprojektuoti patiems arba imti jau paruoštą komponentą. Schemos simbolis nuo komparatoriaus skiriasi tik histerezės simboliu.



7.2.4 pav. Šmito trigerio simboliai ir realus vaizdas

Komparatoriaus palyginimas su Šmito trigeriu:



7.2.5 pav. Komparatoriaus palyginimas su Šmito trigeriu

Paprastas komparatorius:

- turi vieną persijungimo ribą;
- yra labai jautrus triukšmui;
- ties slenksčiu gali „šokinėti“.

Šmito trigeris:

- turi dvi persijungimo ribas;
- yra daug atsparesnis triukšmui;
- duoda švarų, stabilų išėjimo signalą.

Šmito trigeriai naudojami ten, kur signalai būna triukšmingi arba lėtai kinta:

- mygtukų signalų formavime,
- jutiklių grandinėse,
- lėtai kintančių analoginių signalų pavertime į skaitmeninius,
- impulsų formavimo schemose,
- trikdžių šalinime prieš skaitmeninius jėjimus.

Taigi, kai signalas yra „švarus“ ir greitai kinta, dažnai pakanka paprasto komparatoriaus. Tačiau kai signalas triukšmingas arba lėtai pereina per slenkstį, patikimiau naudoti Šmito triggerį, nes jis užtikrina stabilesnį ir aiškesnį išėjimo signalą.

7.3 Loginiai elementai

Ankstesniuose skyriuose nagrinėtose grandinėse jėjimo ir išėjimo signalai galėjo kisti tolygiai tam tikrame įtampų intervale. Tokie signalai vadinami analoginiais, nes jų vertė gali įgyti daugybę tarpinių reikšmių. Tačiau elektronikoje plačiai naudojami ir skaitmeniniai signalai, kuriuose svarbios tik dvi būsenos – žemas ir aukštas lygis, atitinkantys logines reikšmes 0 ir 1.

Skaitmeninės schemos leidžia patikimai apdoroti, perduoti ir saugoti informaciją, nes jos yra atsparesnės triukšmams negu analoginės sistemos. Būtent todėl kompiuteriuose, valdymo įrenginiuose ir daugelyje šiuolaikinių elektroninių sistemų informacija apdorojama dvejetainiu pavidalu. Paprasčiausi skaitmeninių schemų blokai yra loginiai elementai, atliekantys pagrindines logines operacijas su dvejetainiais signalais.

Loginės būsenos

Skaitmeninėse schemose svarbiausios yra tik dvi būsenos: įjungta ir išjungta. Pavyzdžiui, tranzistorius gali būti uždarytas, kai srovė beveik neteka, arba atviras, kai srovė teka. Dėl to tokiose schemose naudojami du pagrindiniai įtampos lygiai: ŽEMAS ir AUKŠTAS. Jie atitinka dvi logines reikšmes – 0 ir 1.

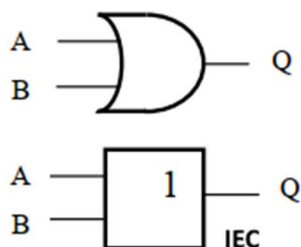
Svarbu suprasti, kad ŽEMAS ir AUKŠTAS lygiai nėra tik vienas tikslus skaičius. Dažniausiai jie telpa į tam tikrus leistinus intervalus. Pavyzdžiui, kai kuriose TTL technologijos mikroschemose ŽEMU lygiu laikoma maždaug 0–0,4 V įtampa, o AUKŠTU lygiu — maždaug 2,4–5 V.

Tokie intervalai reikalingi todėl, kad realios mikroschemas niekada nebūna visiškai vienodos. Jų darbui gali turėti įtakos temperatūra, apkrova, maitinimo įtampos svyravimai ir įvairūs trikdžiai. Tačiau jei šie trikdžiai nėra per dideli ir nepaverčia 1 į 0 arba 0 į 1, schema veikia teisingai. Tada sakome, kad ji yra atspari triukšmams.

Loginiai elementai

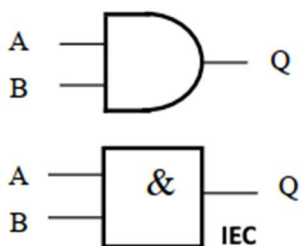
Žemiau pateikiami pagrindiniai loginiai elementai su savo būvių lentelėmis. Naujose schemose naudojame IEC standartus atitinkančius simbolius, tačiau senose schemose dar daug kur sutinkami senieji simboliai.

ARBA (angl. OR)



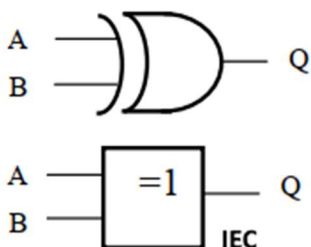
A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

IR (angl. AND)



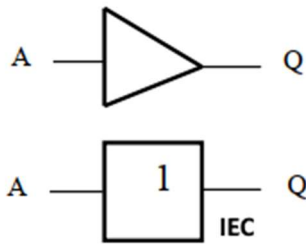
A	B	Q
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Išskirtinis ARBA (angl. XOR)



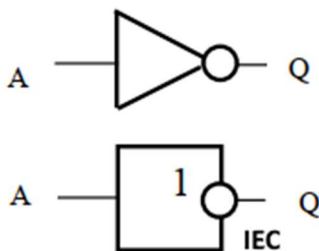
A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Buferis arba kartotuvas



A	Q
0	0
1	1

Kiekvienas iš šių elementų gali būti invertuotas – išėjime (Q) pridėdame rutuliuką, pavyzdžiui neiginys NE (angl. NOT):



A	Q
0	1
1	0

Invertuotų elementų Q būsenos yra priešingos atitinkamų neinvertuotų elementų Q būsenoms.

Santrauka

Loginiai elementai yra pagrindiniai skaitmeninių schemų blokai, apdorojantys dvi logines būsenas – 0 ir 1. Jie atlieka paprasčiausias logines operacijas, tokias kaip IR, ARBA, išskirtinis ARBA ir NE, todėl iš jų galima sudaryti sudėtingesnes skaitmenines sistemas. Skaitmeninės schemas veikia patikimai todėl, kad naudoja aiškiai apibrėžtus žemo ir aukšto lygio signalus ir yra atsparios nedideliams trikdžiams. Supratus loginių elementų veikimą, lengviau perprasti, kaip dirba kompiuteriai ir kiti elektroniniai įrenginiai.

7.4 Keitikliai ADC/DAC

Elektronikoje dažnai tenka dirbti ir su analoginiais, ir su skaitmeniniais signalais. Daugelis realiame pasaulyje matuojamų dydžių, pavyzdžiui, garso signalas, temperatūra, šviesos stipris ar slėgis, kinta tolygiai, todėl yra analoginiai. Tačiau kompiuteriai, mikrovaldikliai ir kitos skaitmeninės sistemos informaciją apdoroja dvejetainiu pavidalu, tai yra nuliais ir vienetais. Dėl šios priežasties reikia įtaisų, kurie leistų analoginius signalus paversti skaitmeniniais, o skaitmeninius – vėl analoginiais.

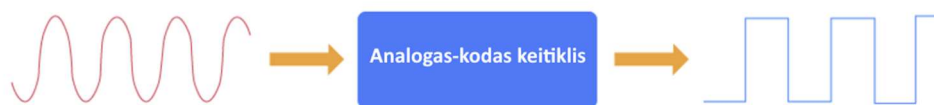
Tokį keitimą atlieka du pagrindiniai įtaisai:

- analogas-kodas keitiklis (*angl. ADC*),
- kodas-analogas keitiklis (*angl. DAC*).

Šiame skyriuje nenagrinėsime skirtingų keitiklių topologijų (nuoseklaus priartėjimo – SAR, Sigma-delta ir pan.) ar sudėtingų keitiklio parametrų (triukšmų lygio, reikšminių bitų ir pan.), bus aptartas bendras veikimo principas.

Analogas-kodas keitiklis (ADC)

ADC yra įtaisas, kuris analoginį signalą paverčia skaitmeniniu kodu. Jo įėjime paprastai būna tolygiai kintanti įtampa, o išėjime gaunamas dvejetainis skaičius, atitinkantis tos įtampos dydį. Kitaip tariant, ADC „išmatuoja“ analoginę įtampą ir priskiria jai artimiausią skaitmeninę reikšmę.



7.4.1 pav. ADC iliustracija

Tokio keitiklio veikimas grindžiamas tuo, kad visas matuojamų įtampų intervalas padalijamas į baigtinį skaičių lygių. Kuo daugiau tokių lygių, tuo tiksliau analoginis signalas gali būti pavaizduotas skaitmeniniu kodu. Ši savybė vadinama skiriamąja geba (*angl. resolution*) ir dažniausiai nusakoma bitais.

Rezoliucija apskaičiuojama 2^n , pavyzdžiui: 8 bitų ADC gali sudaryti $2^8 = 256$ skirtingus lygius, o 10 bitų – $2^{10} = 1024$ lygius.

Jei turime 12 bitų ADC keitiklį, kurio maitinimo įtampa yra 5 V, o atraminė įtampa (*angl. reference*) yra 4,096 V, vieno bito vertė yra:

$$\frac{4,096 \text{ V}}{2^{12}} = \frac{4096 \text{ mV}}{4096} = 1 \text{ mV}$$

Tai yra teoriškai mažiausia vertė, kurią galime išmatuoti, arba mažiausias tokio dydžio pokytis analoginiame signale, kurį gali aptikti keitiklis. Taigi 3,015 V signalą toks ADC keitiklis paverstų skaitine verte – 3015. Pakeitus keitiklį su kitokia rezoliucija arba atramine įtampa, šie skaičiai pasikeistų.

Taip pat verta pabrėžti, kad vieno bito vertė, arba LSB žingsnis, dar nereiškia absoliutaus matavimo tikslumo. Idealojo ADC atveju didžiausia kvantavimo paklaida paprastai siekia apie $\pm 0,5$ LSB, nes tikroji analoginė vertė visada suapvalinama iki artimiausio leistino skaitmeninio lygio. Todėl kuo didesnė ADC skiriamoji geba, tuo mažesnis šis žingsnis ir tuo tiksliau galima aprašyti analoginį signalą.

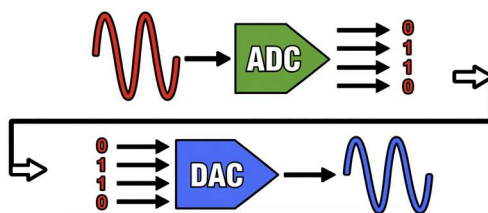
ADC veikime svarbus ne tik įtampos padalijimas į lygius, bet ir mėginių ėmimas (*angl. sampling*). Analoginis signalas nėra stebimas nenutrūkstamai – keitiklis tam tikrais laiko momentais paima jo vertę ir paverčia ją skaitmeniniu kodu. Todėl, matuojant greitai kintančius signalus, labai svarbi mėginių ėmimo sparta. Pagal Nyquisto teoremą, kad signalas būtų teisingai atvaizduotas, mėginių ėmimo dažnis turi būti bent du kartus didesnis už didžiausią matuojamo signalo dažnį.

ADC plačiai naudojami matavimo technikoje, mikrovaldiklių sistemose, garso įrašymo įrenginiuose, jutiklių grandinėse ir visur, kur analoginę informaciją reikia perduoti ar apdoroti skaitmeniniu būdu.

Kodas-analogas keitiklis (DAC)

DAC atlieka priešingą veiksmą ADC – skaitmeninį kodą paverčia analoginiu signalu. Jo įėjime pateikiamas dvejetainis skaičius, o išėjime gaunama jam proporcinga įtampa arba srovė. Taip skaitmeninė sistema gali valdyti analoginius įrenginius arba atkurti analoginį signalą.

Pavyzdžiui, jeigu mikrovaldiklis DAC įėjime suformuoja tam tikrą skaitmeninį kodą, DAC išėjime sukuria atitinkamą įtampą. Kuo didesnė skaitmeninė reikšmė, tuo didesnė paprastai būna išėjimo įtampa. Ir šiuo atveju svarbi skiriamoji geba: kuo daugiau bitų turi DAC, tuo mažesniais žingsniais galima keisti išėjimo signalą. Pagrindiniai parametrai, pateikti ADC dalyje, galioja ir DAC.



7.4.2 pav. ADC ir DAC iliustracija

DAC naudojami garso atkūrimo įrenginiuose, valdymo sistemose, generatoriuose, automatikos įrangoje ir kitose schemose, kur reikia iš skaitmeninių duomenų gauti analoginį poveikį.

7.5 Įtampos stabilizatoriai ir keitikliai

Elektroninėms schemoms nepakanka vien tik elektros energijos šaltinio – joms reikia ir tinkamos, stabilios ir reikiamo dydžio įtampos. Daugelis elektroninių komponentų gali veikti tik tam tikrame įtampos intervale, todėl maitinimo grandinėse naudojami įvairūs įtampos keitimo ir stabilizavimo būdai. Praktikoje dažniausiai sutinkami:

- linijiniai stabilizatoriai,
- impulsiniai DC/DC keitikliai.

Linijiniai stabilizatoriai paprastai pasižymi paprasta sandara, mažu triukšmu ir lengvu naudojimu, tačiau dalį energijos išsklaido šilumos pavidalu. Impulsiniai keitikliai dirba efektyviau, todėl labiau tinka didesnėms srovėms ir nešiojamai aparatūrai, tačiau jų grandinės yra sudėtingesnės ir dažniau sukuria daugiau trikdžių.

Linijiniai stabilizatoriai

Linijinis stabilizatorius palaiko pastovią išėjimo įtampą, nors įėjimo įtampa ar apkrova gali kisti. Tokiose schemose perteklinė įtampa „krinta“ ant reguliuojančio elemento, todėl išskiriama šiluma, kuri dažniausiai yra nepageidaujama. Jei skirtumas tarp įėjimo ir išėjimo įtampos yra didelis, o apkrovos srovė nemaža, linijinis stabilizatorius gali stipriai kaisti. Nenaudinga galia skaičiuojama:

$$P = I \cdot U_{kr}$$

čia:

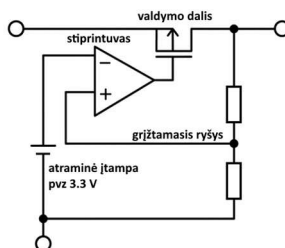
I – tekanti srovė,

U_{kr} – įtampa, susidariusi („krentanti“) ant keitiklio,

LDO stabilizatorius

LDO (angl. *Low Dropout Regulator*) yra linijinio stabilizatoriaus rūšis, galinti veikti net tada, kai skirtumas tarp įėjimo ir išėjimo įtampos yra labai mažas. Kitaip tariant, LDO gali stabilizuoti įtampą net tuomet, kai įėjimo įtampa tik truputį didesnė už reikiamą išėjimo įtampą.

Supaprastinta vidinė LDO sandara pateikta paveiksle žemiau. Tokių reguliatorių yra įvairių, kurie skiriasi tiek pagal srovę (nuo kelių mA iki A), tiek pagal įtampą (1,2 V, 1,8 V, 3,3 V ir t.t.).



7.5.1 pav. Supaprastinta LDO vidinė sandara

Šio tipo keitikliai naudojami įrenginiams, kur labai svarbi žema kaina ir ypatingai baterijomis maitinamuose įrenginiuose, nes leidžia ilgiau panaudoti energijos šaltinį. Pavyzdžiui, jeigu reikia gauti 3,3 V išėjimo įtampą iš 3,7 V ličio akumuliatoriaus, LDO dažnai būna patogus sprendimas. Vis dėlto, nors LDO yra patogus ir tylus elektrine prasme, jo naudingumo koeficientas vis tiek priklauso nuo įėjimo ir išėjimo įtampų skirtumo.

Kiti įtampos stabilizatoriai

Praeitoje dalyje aptarti LDO stabilizatoriai ypač naudingi tada, kai skirtumas tarp įėjimo ir išėjimo įtampos yra nedidelis. Tačiau kai įėjimo įtampa yra gerokai didesnė už reikiamą išėjimo įtampą, LDO privalumai tampa mažiau svarbūs, o praktikoje dažnai naudojami ir kiti linijiniai stabilizatoriai. Tokiais atvejais pasirenkami arba fiksuotos išėjimo įtampos stabilizatoriai, pavyzdžiui, 7805, arba reguliuojami stabilizatoriai, kurių išėjimo įtampa nustatoma išoriniais rezistoriais. Vienas seniausių, plačiausiai paplitusių ir iki šiol dažnai naudojamų reguliuojamų stabilizatorių yra LM317 (arba naujesnės modifikacijos).

Kai elektronei schemai reikia stabilios maitinimo įtampos, vienas paprasčiausių sprendimų yra linijinis stabilizatorius. Jo paskirtis – palaikyti beveik pastovią išėjimo įtampą, net jei kinta įėjimo įtampa arba apkrova. Tokie stabilizatoriai yra paprasti naudoti, nereikalauja sudėtingų išorinių grandinių ir sukuria palyginti mažai elektrinių trikdžių, todėl ilgą laiką buvo vieni svarbiausių maitinimo grandinių elementų.

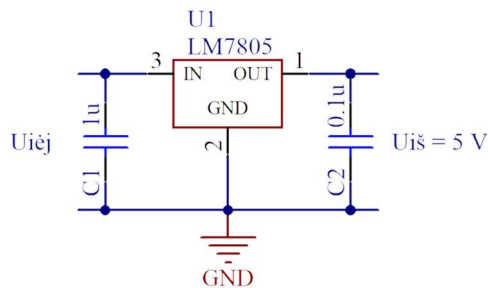
Fiksuotos įtampos stabilizatoriai turi iš anksto nustatytą išėjimo įtampą. Vieni žinomiausių yra 78xx serijos stabilizatoriai, kur paskutiniai du skaitmenys paprastai nurodo išėjimo įtampą. Pavyzdžiui:

- LM7805 – 5 V
- LM7809 – 9 V
- LM7812 – 12 V

Tokie stabilizatoriai patogūs tuo, kad jų naudojimas labai paprastas: pakanka prijungti įėjimą, žemę ir išėjimą, o tinkamai parinkus įėjimo įtampą gaunama stabili reikiamos vertės išėjimo įtampa. Dėl šio paprastumo jie ilgą laiką buvo plačiai naudojami įvairiuose maitinimo šaltiniuose, valdymo schemose, mokomuosiuose bandymuose ir pramoninėje elektronikoje.

Tačiau fiksuotos įtampos stabilizatoriai turi ir trūkumų. Svarbiausias jų trūkumas yra tas, kad išėjimo įtampa negali būti keičiama – reikia rinktis konkretų modelį pagal pageidaujamą įtampą. Be to, kaip ir visi linijiniai stabilizatoriai, jie perteklinę galią išsklaido šilumos pavidalu. Todėl kai skirtumas tarp įėjimo ir išėjimo įtampos yra didelis, o apkrovos srovė nemaža, stabilizatorius gali stipriai kaisti.

LM7805 stabilizatorius



7.5.2 pav. LM 7805 standartinis panaudojimas

Kad stabilizatorius 7805 veiktų teisingai, jo įėjimo įtampa turi būti didesnė už 5 V tam tikru minimaliu skirtumu (tikrinti konkretaus komponento aprašymą). Be to, praktinėse schemose prie įėjimo ir išėjimo paprastai jungiami kondensatoriai, kurie pagerina stabilumą ir sumažina trukdžius. Nors šiandien daugelyje mažos galios įrenginių 5 V maitinimui vis dažniau naudojami impulsiniai keitikliai arba LDO, 7805 vis dar išlieka paprastas ir aiškus mokomasis pavyzdys.

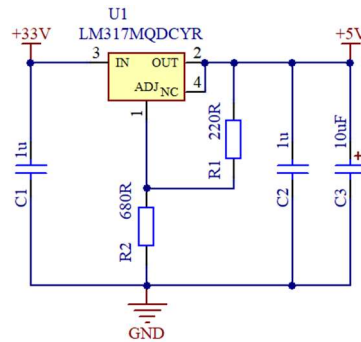
Reguliuojami įtampos stabilizatoriai

Kai reikia ne vienos konkrečios įtampos, o galimybės ją pasirinkti, naudojami reguliuojami linijiniai stabilizatoriai. Jų išėjimo įtampa nustatoma išoriniais rezistoriais. Toks sprendimas patogus laboratoriniuose maitinimo šaltiniuose,

universalesnėse maitinimo schemose ir tais atvejais, kai vienu stabilizatoriumi norima gauti skirtingas išėjimo įtampas.

LM317 stabilizatorius

LM317 yra klasikinis reguliuojamas linijinis stabilizatorius. Jis leidžia nustatyti išėjimo įtampą išorine rezistorių grandine. Pagrindinė jo idėja yra ta, kad mikroschema palaiko beveik pastovų etaloninį įtampos skirtumą tarp išėjimo ir reguliavimo išvado, todėl parinkus du rezistorius galima apskaičiuoti norimą išėjimo įtampą.



7.5.3 pav. LM 317 standartinis panaudojimas

LM317 išėjimo įtampa dažniausiai išreiškiama formule:

$$U_{i\dot{s}} \approx 1,25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Tikslesnėje išraiškoje dar įvertinama ir nedidelė reguliavimo išvado srovė, tačiau daugelyje praktinių atvejų mokomajai analizei pakanka supaprastintos formulės.

Dažnai vienas rezistorius parenkamas pastovus, o kitas gali būti keičiamas. Taip gaunamas reguliuojamos įtampos šaltinis. Dėl šios savybės LM317 ilgą laiką buvo labai mėgstamas tiek mėgėjų, tiek profesionalų grandinėse.

LM317 privalumai:

- paprastas naudojimas;
- galimybė reguliuoti išėjimo įtampą;
- pakankamai geras stabilumas;
- įdiegtos apsaugos nuo perkrovos ir perkaitimo;
- platus praktinis pritaikymas.

LM317 trūkumai

Kaip ir kiti linijiniai stabilizatoriai, LM317 turi ir trūkumų. Pagrindinis jų – mažesnis naudingumo koeficientas, kai įėjimo įtampa yra daug didesnė už išėjimo įtampą. Tokiu atveju didelė dalis galios virsta šiluma:

$$P \approx (U_{in} - U_{i\check{s}}) \cdot I$$

Tai reiškia, kad esant didesniai įtampų skirtumui ir didesnei apkrovos srovei LM317 gali stipriai kaisti, todėl dažnai reikia aušinimo – radiatoriaus. Dėl to jis nėra pats tinkamiausias sprendimas ten, kur ypač svarbus energijos taupymas.

Praktinė pastaba

Nors 7805, LM317 ir panašūs stabilizatoriai yra labai paprasti ir patikimi, juos naudojant visada reikia įvertinti du dalykus:

- ar įėjimo įtampa pakankama stabilizavimui;
- kiek galios išsisklaidys šilumos pavidalu.

Jeigu srovė didelė arba įėjimo ir išėjimo įtampų skirtumas labai didelis, praktiškėsnis sprendimas dažnai būna impulsinis DC/DC keitiklis. Tačiau kai svarbu paprastumas, maži trikdžiai ir lengvas pritaikymas, linijiniai stabilizatoriai vis dar išlieka labai naudingi.

Prie linijinių maitinimo šaltinių priskiriami ir šunto reguliatoriai, tokie kaip TL431, LM4040 ir kiti, kurie naudojami atraminėms įtampoms formuoti (ADC, DAC ir t.t.), tačiau jų plačiau neapžvelgsime.

Renkantis stabilizatorių dažniausiai vertinama:

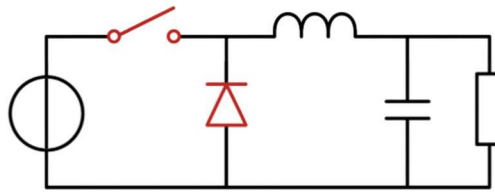
- įėjimo įtampos diapazonas,
- reikiama išėjimo įtampa,
- maksimali išėjimo srovė,
- išsklaidoma galia ir aušinimas,
- kritimo įtampa,
- išėjimo įtampos tikslumas ir stabilumas,
- mažiausia apkrovos srovė – jei ji nepasiekama, gali dirbti nestabiliai,
- apsaugos funkcijos - trumpojo jungimo, viršįtampių ir kitos apsaugos,
- korpusas (SMD ar išvadinis) ir išoriniai komponentai (kiek papildomų komponentų reikia).

Impulsiniai DC/DC keitikliai

Kai reikia didesnio efektyvumo, dažniausiai naudojami DC/DC keitikliai. Jie nekeičia perteklinės energijos į šilumą taip, kaip linijiniai stabilizatoriai, o perduoda energiją porcijomis, naudodami jungiklinį veikimo režimą, rites, kondensatorius ir valdymo grandines. Dėl to jų naudingumo koeficientas paprastai būna daug didesnis. Impulsinių keitiklių rūšių ir topologijų yra daug, bet čia nagrinėsime 2 pagrindinius ir vieną kombinuotą:

- Žeminantysis (*angl. Buck*) keitiklis;
- Aukštinantysis (*angl. Boost*) keitiklis;
- Žeminantysis- aukštinantysis (*angl. Buck-Boost*) keitiklis.

Žeminantysis (Buck) keitiklis



7.5.4 pav. Buck topologija

Buck keitiklis yra žeminantysis DC/DC keitiklis. Jis naudojamas tada, kai reikia iš didesnės nuolatinės įtampos gauti mažesnę ir reikia didesnių srovių, kurių negalima gauti naudojant linijinius keitiklius. Pavyzdžiui, iš 12 V galima gauti 5 V arba 3,3 V.

Buck keitiklis yra impulsinis žeminantysis keitiklis, todėl jo veikimas skiriasi nuo linijinių stabilizatorių. Jis nemažina įtampos „sudegindamas“ perteklinę energiją šilumos pavidalu, o perduoda energiją į apkrovą mažomis porcijomis. Dėl to buck keitikliai pasižymi didesniu naudingumo koeficientu ir mažesniais galios nuostoliais.

Pagrindiniai buck keitiklio elementai yra jungiklis (dvipolis arba lauko tranzistorius), diodas, induktyvumo elementas (ritė, droselis), kondensatorius ir apkrova. Jungiklis periodiškai įjungiamas ir išjungiamas dideliu dažniu. Taip susidaro impulsinis procesas, kurio metu energija tai kaupiama ritėje, tai perduodama į apkrovą.

Veikimas, kai jungiklis įjungtas

Kai jungiklis sujungiamas, įėjimo įtampa prijungiama prie ritės ir apkrovos grandinės. Tuo metu srovė per ritę pradeda didėti, nes ritė kaupia energiją magnetiniame lauke. Diodas šioje fazėje paprastai yra užblokuotas. Apkrova maitinama iš šaltinio, o kartu energija kaupiama ir ritėje.

Veikimas, kai jungiklis išjungtas

Kai jungiklis išjungiamas, tiesioginis ryšys su įėjimo šaltiniu nutrūksta. Tačiau srovė per ritę negali staiga nutrūkti, nes ritė palaiko srovės tekėjimą ta pačia kryptimi - išlaisvinama energija, sukaupta ritėje, per diodą perduodama į apkrovą ir kondensatorių. Šioje fazėje ritė atiduoda dalį savo energijos, o srovė per ją pradeda mažėti.

Taigi buck keitiklio veikimas vyksta dviem pakaitiniais etapais:

- vienu metu ritė kaupia energiją,
- kitu metu ritė ją atiduoda apkrovai.

Būtent dėl tokio veikimo išėjime galima gauti mažesnę įtampą negu įėjime.

Išėjimo įtampos valdymas

Buck keitiklio išėjimo įtampa valdoma keičiant jungiklio įjungimo ir išjungimo laiko santykį. Šis santykis vadinamas darbo ciklu (*angl. duty cycle*). Jei jungiklis įjungtas ilgiau, į apkrovą perduodama daugiau energijos ir išėjimo įtampa didėja. Jei jungiklis įjungtas trumpiau, perduodama mažiau energijos ir išėjimo įtampa mažėja.

Idealizuotu atveju buck keitikliui galioja apytikslė priklausomybė:

$$U_{i\bar{s}} \approx D \cdot U_{in}$$

čia:

- $U_{i\bar{s}}$ – išėjimo įtampa,
- U_{in} – įėjimo įtampa,
- D – darbo ciklas.

Pavyzdžiui, labai paprastai žiūrint, jei įėjimo įtampa yra 12 V, o darbo ciklas 0,5, tuomet idealioje grandinėje išėjimo įtampa būtų apie 6 V.

Ritės ir kondensatoriaus paskirtis

Ritė buck keitiklyje yra labai svarbus elementas, nes ji neleidžia srovei kisti staiga. Ji kaupia energiją ir vėliau ją atiduoda apkrovai, todėl srovė tampa tolygesnė.

Kondensatorius išėjime mažina įtampos pulsacijas. Kadangi jungiklis dirba impulsiniu režimu, be kondensatoriaus išėjimo įtampa labai svyruotų. Kondensatorius padeda „išlyginti“ šiuos svyravimus ir palaikyti pastovesnę įtampą apkrovoje.

Todėl:

- ritė lygina srovę,
- kondensatorius lygina įtampą.

Diodo paskirtis

Diodas buck keitiklyje sudaro kelią srovei tada, kai pagrindinis jungiklis yra išjungtas. Jis leidžia ritės srovei toliau tekėti į apkrovą. Jei diodo nebūtų, srovės nutrūkimas sukeltų didelius įtampos šuolius ir grandinė veiktų netinkamai.

Praktinėse schemose vietoje diodo kartais naudojamas antras valdomas tranzistorius. Toks sprendimas vadinamas sinchroniniu buck keitikliu. Jis sumažina nuostolius ir leidžia pasiekti dar didesnę naudingumo koeficientą.

Kodėl buck keitiklis yra efektyvus?

Linijinis stabilizatorius sumažina įtampą išsklaidydamas perteklinę galią šilumos pavidalu. Tuo tarpu buck keitiklis didžiąją dalį energijos perduoda į apkrovą, todėl nuostoliai paprastai būna mažesni. Dėl šios priežasties buck keitikliai labai tinka ten, kur reikia maitinti didesnės srovės apkrovas ir svarbu taupyti energiją.

Tai ypač svarbu:

- baterijomis maitinamuose įrenginiuose,
- mikrovaldiklių ir procesorių maitinime,
- ryšio moduluose,
- LED tvarkyklėse,
- automatikos ir galios elektronikos sistemose.

Buck keitiklio privalumai

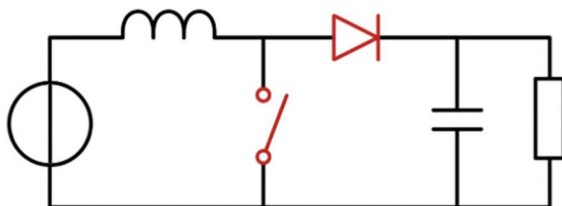
- didelis naudingumo koeficientas;
- mažesnis šilumos išskyrimas;
- galimybė maitinti didesnės srovės apkrovas;
- mažesni energijos nuostoliai nei linijiniuose stabilizatoriuose.

Dėl to buck keitikliai šiandien yra vieni dažniausiai naudojamų maitinimo keitiklių skaitmeninėje elektronikoje.

Pagrindiniai trūkumai:

- sudėtingesnė schema;
- impulsiniai trikdžiai;
- pulsacijos išėjime.

Aukštinantysis Boost keitiklis



7.5.5 pav. Boost topologija

Boost keitiklis yra impulsinis aukštinantysis DC/DC keitiklis. Jis naudojamas tada, kai iš mažesnės nuolatinės įtampos reikia gauti didesnę. Pavyzdžiui, iš 3,7 V akumuliatoriaus galima suformuoti 5 V ar dar didesnę įtampą. Skirtingai nuo linijinių stabilizatorių, boost keitiklis neveikia išsklaidydamas perteklinę energiją šilumos pavidalu, bet perduoda energiją į apkrovą impulsiniu būdu, todėl pasižymi didesniu naudingumo koeficientu.

Kaip ir Buck, taip ir Boost pagrindiniai keitiklio elementai yra jungiklis, ritė, diodas, kondensatorius ir apkrova. Jungiklis periodiškai įjungiamas ir išjungiamas dideliu dažniu. Dėl tokio veikimo ritėje tai kaupiama energija, tai perduodama į apkrovą, ir išėjime gaunama didesnė įtampa negu įėjime.

Veikimas, kai jungiklis įjungtas – ritė įkraunama

Kai jungiklis sujungiamas, ritė prijungiama prie įėjimo šaltinio ir per ją pradeda didėti srovė. Tuo metu ritė kaupia energiją savo magnetiniame lauke. Diodas šioje fazėje paprastai yra užblokuotas, todėl energija į išėjimą beveik netiekama. Apkrovą tuo momentu maitina išėjimo kondensatorius.

Veikimas, kai jungiklis išjungtas – ritė iškraunama

Kai jungiklis išjungiamas, srovė per ritę negali staiga nutrūkti. Todėl ritė ima palaikyti srovės tekėjimą ta pačia kryptimi ir jos įtampa prisideda prie įėjimo šaltinio įtampos. Tuomet energija per diodą perduodama į kondensatorių ir apkrovą. Būtent dėl šio ritės ir šaltinio įtampų susidėjimo išėjimo įtampa tampa didesnė už įėjimo įtampą.

Taigi boost keitiklio veikimas taip pat vyksta dviem etapais:

- vienu metu ritė kaupia energiją;
- kitu metu ritė atiduoda energiją į apkrovą kartu padidindama išėjimo įtampą.

Išėjimo įtampos valdymas

Boost keitiklio išėjimo įtampa valdoma keičiant jungiklio įjungimo ir išjungimo laiko santykį, vadinamą darbo ciklu. Jei jungiklis įjungtas ilgiau, ritėje sukaupiama daugiau energijos, todėl išėjimo įtampa didėja. Jei jungiklis įjungtas trumpiau, perduodama mažiau energijos ir išėjimo įtampa mažėja.

Idealizuotu atveju Boost keitikliui galioja apytikslė priklausomybė:

$$U_{i\check{s}} \approx \frac{U_{i\check{e}j}}{1 - D}$$

čia:

- $U_{i\check{s}}$ – išėjimo įtampa,
- $U_{i\check{e}j}$ – įėjimo įtampa,
- D – darbo ciklas.

Iš šios formulės matyti, kad didėjant darbo ciklui išėjimo įtampa taip pat didėja.

Ritės ir kondensatoriaus paskirtis

Ritė Boost keitiklyje kaupia energiją, kai jungiklis įjungtas, ir atiduoda ją apkrovai, kai jungiklis išjungtas. Ji yra pagrindinis elementas, leidžiantis padidinti įtampą.

Kondensatorius išėjime mažina įtampos pulsacijas ir padeda palaikyti pastovesnę įtampą apkrovoje. Kadangi apkrova dalį laiko maitinama iš kondensatoriaus, jis yra labai svarbus stabiliam boost keitiklio darbui.

Todėl galima sakyti, kad:

- ritė kaupia ir perduoda energiją;
- kondensatorius lygina išėjimo įtampą.

Diodo paskirtis

Diodas leidžia energijai tekėti iš ritės į išėjimą tada, kai jungiklis yra išjungtas. Jis neleidžia išėjimo kondensatoriui išsikrauti atgal per ritę ar šaltinį. Praktinėse schemose vietoje diodo kartais naudojamas antras valdomas tranzistorius. Toks sprendimas vadinamas sinchroniniu boost keitikliu ir leidžia sumažinti nuostolius.

Kodėl boost keitiklis yra efektyvus?

Boost keitiklis gali padidinti įtampą nepatirdamas tokių didelių šilumos nuostolių kaip linijiniai sprendimai. Didžioji dalis energijos perduodama į apkrovą per ritę, todėl tokie keitikliai yra efektyvūs ir tinkami baterijomis maitinamiems įrenginiams.

Jie dažnai naudojami:

- nešiojamuose įrenginiuose;
- USB maitinimo grandinėse;
- LED tvarkyklėse;
- jutiklių ir valdymo sistemose;
- ten, kur turima maža įėjimo įtampa, bet reikia didesnės išėjimo įtampos.

Boost keitiklio privalumai:

- galimybė iš mažos įtampos gauti didesnę;
- didelis naudingumo koeficientas;
- mažesni šilumos nuostoliai nei linijiniuose sprendimuose;
- tinkamumas baterijomis maitinamoms sistemoms.

Boost keitiklio trūkumai

Kaip ir kiti impulsiniai keitikliai, boost keitiklis turi ir trūkumų. Jo schema yra sudėtingesnė negu linijinio stabilizatoriaus, o dėl impulsinio veikimo atsiranda daugiau trikdžių ir išėjimo pulsacijų. Be to, netinkamai parinkus komponentus ar darbo režimą, gali padidėti nuostoliai ir sumažėti stabilumas.

Pagrindiniai trūkumai:

- sudėtingesnė schema;
- impulsiniai trikdžiai;
- išėjimo įtampos pulsacijos;
- didesni reikalavimai ritės, diodo, kondensatoriaus ir jungiklio parinkimui.

Buck-boost keitikliai

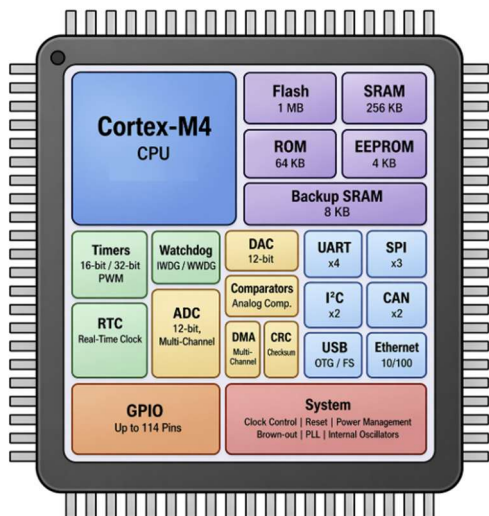
Kai kuriais atvejais įėjimo įtampa gali būti kartais didesnė, o kartais mažesnė už norimą išėjimo įtampą. Tada naudojami Buck-Boost tipo keitikliai, galintys ir mažinti, ir didinti įtampą. Tokie sprendimai ypač naudingi įrenginiuose, maitinamuose iš akumuliatorių, kurių įtampa išsikraunant kinta.

Pavyzdžiui naudojant 1vnt. ličio jonų celę, kurios įtampa keičiasi ribose 2,8 V – 4,2 V, labai naudinga suprojektuoti Buck-Boost keitiklį, kuris palaiko 3,3 V procesoriaus maitinimui.

Kadangi tai yra Buck ir Boost išvestinis keitiklis, jo giliau nenagrinėsime, nes visos savybės tokios pačios, kaip Buck ir Boost keitiklių.

7.6 Mikrovaldikliai

Mikrovaldiklis yra nedidelė programuojama mikroschema, kurioje viename korpuse sujungti pagrindiniai skaitmeninės sistemos elementai: procesorius, atmintis ir įvairūs įvesties bei išvesties įrenginiai. Kitaip tariant, mikrovaldiklis yra tarsi mažas kompiuteris, skirtas valdyti konkrečią elektroninę sistemą. Jis gali nuskaityti jautiklių signalus, apdoroti informaciją ir valdyti kitus įrenginius: šviesos diodus, ekranus, variklius, reles, ryšio modulius ir kt.



7.6.1 pav. Mikrovaldiklio tipinė sandara

Mikrovaldikliai plačiai naudojami buitinėje technikoje, automatikos sistemose, matavimo prietaisuose, ryšio įrangoje, transporto elektronikoje ir įvairiuose įterptiniuose įrenginiuose. Jų paskirtis paprastai yra ne atlikti universalius skaičiavimus, kaip asmeniniame kompiuteryje, o vykdyti konkrečią programą ir valdyti konkretų procesą.

Mikrovaldiklių įvairovė

Mikrovaldiklių yra labai daug, jie skiriasi savo sandara, sparta, atminties dydžiu, išvadų skaičiumi ir vidiniais periferiniais moduliais. Skirtingi gamintojai naudoja skirtingas architektūras ir komandų sistemas. Plačiai paplitusios procesorių šeimos yra: PIC, 8051, ARM Cortex-M, RISC-V ir kt.

Vieni mikrovaldikliai būna labai paprasti, skirti nedidelėms valdymo užduotims, kiti – gerokai sudėtingesni, turintys daug atminties, didelį darbo dažnį, ryšio sąsajas ir specializuotus modulius. Todėl konkretus mikrovaldiklis pasirenkamas pagal tai, kokias funkcijas turi atlikti būsima sistema.

Nors skirtingi mikrovaldikliai nevienodi, dauguma jų turi panašias pagrindines dalis:

- centrinį procesorių - CPU;
- programos atmintį - FLASH;
- darbinę atmintį - RAM;
- neišsitrinančią duomenų atmintį EEPROM;
- įvesties ir išvesties išvadus – I/O;
- laikmačius ir skaitiklius - TIMERS;
- ryšio modulius – UART, SPI, I2C, I3C, CAN, Ethernet, USB;
- maitinimo ir valdymo grandines – DC/DC, watchdog.

Programos atmintis – Flash

Flash atmintyje saugoma mikrovaldiklio programa. Tai neišsitrinanti atmintis, todėl joje įrašyta programa išlieka ir išjungus maitinimą. Įjungus mikrovaldiklį, procesorius pradeda vykdyti instrukcijas būtent iš šios atminties.

Kuo didesnė Flash atmintis, tuo sudėtingesnę programą galima įrašyti. Paprastose sistemose pakanka kelių kilobaitų, o sudėtingesniuose mikrovaldikliuose jos gali būti šimtai kilobaitų ar net megabaitų.

Darbinė atmintis – RAM

RAM atmintis naudojama laikiniems duomenims saugoti programos vykdymo metu. Joje laikomi kintamieji, tarpiniai skaičiavimo rezultatai, duomenų masyvai, ryšio buferiai ir kiti laikinai reikalingi duomenys.

RAM turinys išnyksta, kai išjungiamas maitinimas. Todėl ši atmintis skirta tik darbui programos vykdymo metu.

Neišsitrinanti duomenų atmintis – EEPROM

Kai kuriuose mikrovaldikliuose yra ir EEPROM atmintis. Ji naudojama tokiems duomenims, kuriuos reikia išsaugoti net išjungus maitinimą, bet kuriuos programa kartais turi pakeisti. Pavyzdžiui, joje galima laikyti nustatymus, kalibravimo reikšmes, skaitiklius ar kitą konfigūracijos informaciją.

EEPROM yra patogi tuo, kad duomenis galima keisti programiškai, tačiau įrašymo ciklų skaičius paprastai būna ribotas, todėl ji nenaudojama labai dažnai kintantiems duomenims. Ciklų skaičius siekia nuo 100 000 iki kelių milijonų.

Jei mikrovaldiklis neturi vidinės EEPROM atminties, tuomet lituojama papildoma mikroschema, kuri per ryšio sąsają komunikuoja su procesoriumi (SPI, I2C).

Mikrovaldiklio išvadai

Mikrovaldiklis su išoriniu pasauliu bendrauja per išvadus. Jie gali būti įvairios paskirties:

- Maitinimo išvadai (Vcc, Vdd). Per juos mikrovaldikliui tiekama darbinė įtampa ir prijungiama žemė (0V). Daugelyje schemų prie maitinimo išvadų būtina jungti blokavimo kondensatorius.
- Įvesties ir išvesties išvadai. Didelė dalis mikrovaldiklio išvadų yra bendrosios paskirties įvesties ir išvesties išvadai (*angl. general purpose input output - GPIO*). Jie gali būti naudojami: signalams nuskaityti, šviesos diodams valdyti, mygtukams prijungti.

Programiškai galima nustatyti, ar konkretus išvadas dirbs kaip įėjimas, ar kaip išėjimas.

Specialios paskirties išvadai

Dalis išvadų dažnai turi ir papildomas funkcijas. Tie patys išvadai gali būti naudojami kaip:

- laikmačių įėjimai ar išėjimai;
- ADC įėjimai, DAC išėjimai;
- PWM signalų išėjimai;
- SPI, I²C, UART, Ethernet ir kitų sąsajų linijos.

Todėl projektuojant grandinę visada reikia tikrinti konkretaus mikrovaldiklio išvadų paskirtį.

Maitinimo kondensatoriai

Mikrovaldiklio maitinimui labai svarbūs blokavimo arba atjungimo kondensatoriai. Jie jungiami kuo arčiau mikrovaldiklio maitinimo išvadų. Jų paskirtis – sumažinti

trumpalaikius įtampos svyravimus ir triukšmus, atsirandančius mikrovaldikliui persijungiant tarp skirtingų darbo būsenų.

Dažniausiai prie kiekvienos maitinimo poros jungiami nedidelės talpos, pavyzdžiui, 100 nF keraminiai kondensatoriai. Be jų, grandinėje dažnai naudojami ir didesnės talpos kondensatoriai, kurie padeda stabilizuoti visos schemos maitinimą.

Jei šių kondensatorių nėra arba jie įrengti netinkamai, mikrovaldiklis gali veikti nestabiliai, persikrauti arba netinkamai vykdyti programą.

Reset grandinė

Mikrovaldiklis turi turėti galimybę patikimai pradėti darbą nuo žinomos būsenos. Tam naudojamas reset signalas. Kai reset išvadas aktyvuojamas, mikrovaldiklis sustabdo įprastą darbą ir grįžta į pradinę būseną. Tada programa vėl pradedama vykdyti nuo pradžios.

Reset grandinė reikalinga tam, kad įjungus maitinimą mikrovaldiklis startuotų teisingai. Kai kuriais atvejais naudojama paprasta RC grandinė, kitais – vidinė reset sistema arba speciali priežiūros mikroschema. Dažnai reset išvadas taip pat naudojamas programuojant mikrovaldiklį arba atliekant rankinį paleidimą.

Netinkamai suformuotas reset signalas gali lemti nestabilių paleidimų arba neteisingą programos vykdymą.

Kvarcinis rezonatorius ir taktinis signalas

Kad mikrovaldiklis galėtų vykdyti instrukcijas, jam reikalingas taktinis signalas. Jis nustato, koku greičiu dirba procesorius ir vidiniai moduliai. Taktinis signalas gali būti gaunamas iš įvairių šaltinių:

- vidinio RC generatoriaus;
- išorinio kvarcinio rezonatoriaus;
- keraminio rezonatoriaus;
- išorinio generatoriaus.

Kvarcinis rezonatorius naudojamas tada, kai reikia tikslesnio ir stabilesnio dažnio. Tai ypač svarbu ryšio sistemose, laikmačių tikslumui ir tada, kai mikrovaldiklis turi tiksliai skaičiuoti laiką. Prie kvarco paprastai jungiami ir papildomi kondensatoriai pagal gamintojo rekomendacijas.

Paprastesnėse sistemose gali pakakti vidinio generatoriaus, tačiau jo tikslumas paprastai būna mažesnis.

Vidiniai periferiniai moduliai

Šiuolaikiniai mikrovaldikliai dažnai turi daug integruotų periferinių modulių, todėl nereikia naudoti papildomų mikroschemų. Dažniausiai sutinkami:

- ADC – analoginiams signalams matuoti,
- PWM moduliai – impulsų pločio moduliacijai,
- laikmačiai ir skaitikliai – laikui matuoti ir impulsams skaičiuoti,
- UART – nuosekliajam ryšiui,
- SPI ir I²C – ryšiui su kitais lustais,
- sargybinis laikmatis (*watchdog*) – apsaugai nuo programos užstrigimo.

Šie moduliai leidžia mikrovaldikliui ne tik vykdyti programą, bet ir tiesiogiai valdyti sudėtingesnius procesus.

Programavimas

Mikrovaldiklis veikia tik tada, kai į jo programos atmintį įrašoma programa. Ji paprastai rašoma aukšto lygio kalbomis, pavyzdžiui, C, o vėliau sukompiliuojama į mašininį kodą. Programa įrašoma naudojant specialią programavimo sąsają.

Po įrašymo mikrovaldiklis programą vykdo savarankiškai. Dėl to jis tampa valdymo sistemos „smegenimis“.

Skyriaus žinių patikrinimas

1. Kas yra integrinis grandynas ir kokie jo pagrindiniai privalumai, palyginti su schema iš atskirų komponentų?
2. Kas yra operacinis stiprintuvas ir ką reiškia, kad jis stiprina dviejų įėjimų skirtumą?
3. Išvardykite idealiojo operacinio stiprintuvo savybes.
4. Užrašykite invertuojančio ir neinvertuojančio stiprintuvo stiprinimo koeficientų formules. Kuo skiriasi jų ženklai?
5. Neinvertuojančiame stiprintuve $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 90 \text{ k}\Omega$. Koks stiprinimo koeficientas?
6. Kam naudojamas įtampos kartotuvai, jei jo stiprinimas lygus 1?
7. Kas yra Šmito trigeris ir kaip histerezė padeda prieš triukšmą?
8. Ką reiškia komparatoriaus išėjimas „atviras kolektorius“ ir ko jam reikia papildomai?
9. Kuo skaitmeninis signalas skiriasi nuo analoginio?
10. Sudarykite loginių elementų IR, ARBA ir XOR būvių lenteles dviem įėjimams.
11. Kokią funkciją atlieka ADC ir kokią DAC?
12. Kas yra ADC skiriama geba? Kiek lygių turi 8 bitų ir 12 bitų keitikliai?
13. Kaip veikia linijinis stabilizatorius ir kur dingsta perteklinė galia?
14. Linijinis stabilizatorius iš 12 V daro 5 V, apkrovos srovė 0,5 A. Kokia galia virsta šiluma?
15. Kokią išėjimo įtampą duoda LM7805, LM7812? Ką nurodo paskutiniai du skaitmenys?
16. Kas yra darbo ciklas D ir kokia idealaus buck keitiklio išėjimo įtampos formulė? Kokia įtampa gaunama iš 24 V, kai $D = 0,25$?
17. Kuo boost keitiklis skiriasi nuo buck ir kokia jo išėjimo įtampos formulė?
18. Kada reikalingas buck-boost keitiklis? Pateikite pavyzdį su ličio jonų elementu.
19. Kuo skiriasi FLASH, RAM ir EEPROM atmintys pagal paskirtį ir duomenų išlikimą?
20. Kokia reset grandinės paskirtis įjungiant maitinimą?
21. Kada vietoj vidinio RC generatoriaus naudojamas kvarcinis rezonatorius?

8. PRAKTINIS SCHEMŲ NAGRINĖJIMAS

Iki šiol buvo nagrinėti pagrindiniai elektronikos komponentai ir integriniai grandynai, tokie kaip rezistoriai, kondensatoriai, diodai, tranzistoriai, operaciniai stiprintuvai, komparatoriai, maitinimo grandinės, mikrovaldikliai ir kiti elementai. Tačiau realiose elektroninėse sistemose šie elementai veikia ne atskirai, o sujungiami į įvairias schemas, kuriose kiekvienas komponentas atlieka tam tikrą paskirtį. Todėl, susipažinus su pavienių elementų savybėmis ir veikimo principais, tolesnis žingsnis yra schemų nagrinėjimas.

Schemas nagrinėjimas apima ne tik jos simbolių atpažinimą, bet ir visos grandinės veikimo supratimą. Analizuojant schemą svarbu nustatyti, kokią funkciją atlieka atskiri elementai, kaip tarpusavyje susijusios grandinės dalys, koku keliu sklinda signalai ir kaip formuojami, stiprinami, filtruojami ar valdomi elektriniai dydžiai. Tokia analizė leidžia teorines žinias pritaikyti praktikoje ir geriau suprasti realių elektroninių įrenginių sandarą.

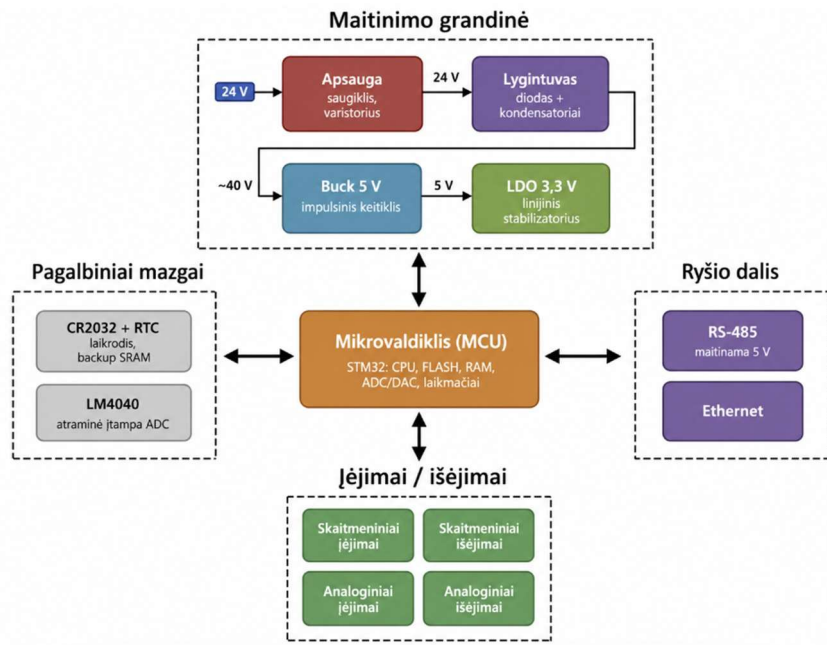
Siekiant išmokti atpažinti realių schemų veikimą, šiame skyriuje bus nagrinėjamas plačiai pramonėje taikomas įrenginys – programuojamas loginis valdiklis (*angl. programmable logic controller - PLC*). Šis prietaisas pasirinktas todėl, kad jo sandaroje galima rasti daugelį anksčiau aptartų elektroninių grandinių: maitinimo šaltinius, apsaugos mazgus, įėjimų ir išėjimų grandines, signalų apdorojimo dalis, mikrovaldiklio ar procesoriaus aplinką bei kitus funkcinis blokus. Nagrinėjant atskiras PLC schemas bus galima nuosekliai susieti teorines žinias apie elektronikos komponentus su jų praktiniu taikymu sudėtingame techniniame įrenginyje.

8.1 Valdiklio sandara

Kadangi nagrinėsime visus PLC mazgus, pirmiausia reikia susipažinti su jo sandara. Valdiklis nėra vien tik procesorius ar viena atskira schema – tai iš daugelio tarpusavyje susijusių mazgų sudarytas elektroninis įrenginys, kuriame kiekviena dalis atlieka konkrečią funkciją. Todėl šiame poskyryje bus nagrinėjami pagrindiniai PLC sandaros elementai ir jų paskirtis.

Pagrindiniai valdiklio mazgai (grafinis vaizdas pateiktas 8.1.1 paveiksle):

- maitinimo grandinės – iš pramoninio 24 V maitinimo suformuoja stabilias 5 V ir 3,3 V įtampas;
- procesoriaus dalis – mikrovaldiklis su atmintimi, laikrodžiu ir pagalbinėmis grandinėmis;
- įėjimų ir išėjimų grandinės – jungia valdiklį su jutikliais ir vykdykliais;
- ryšio sąsajos – leidžia keistis duomenimis su kitais įrenginiais;
- pagalbiniai mazgai – apsaugos, indikacijos, laiko skaičiavimo grandinės.



8.1.1 pav. PLC valdiklio blokinė schema

Susipažinus su bendra valdiklio sandara, bus lengviau suprasti tolesniuose skyriuose nagrinėjamas atskiras elektronines schemas ir jų paskirtį visoje sistemoje. Tokia apžvalga sudarys pagrindą nuosekliai analizuoti, kaip iš atskirų elektronikos grandinių sukuriamas vientisas ir praktiškai veikiantis valdiklis.

8.2 Maitinimo šaltiniai

Kiekvienas projektas prasideda nuo reikalavimų. Mūsų valdikliui jie tokie:

- Valdiklis turi maitintis iš 24 V pramoninio maitinimo šaltinio.
- Kadangi pramoninis maitinimas gali būti tiek AC, tiek DC, reikia lyginimo grandinės, bet kadangi norime vieningo 0V visame PLC, aukojaime efektyvumą ir naudojame tik vieną diodą ir didelės talpos kondensatorių. Jei šaltinis bus $24 \text{ VAC} \pm 20\%$, didžiausia DC maitinimo įtampa mūsų keitikliui gali būti

$$U = 24 \cdot 1,2 \cdot 1,41 - 0,6 \approx 40 \text{ V. Čia } 0,6 \text{ V – kritimas ant diodo.}$$

- Tikimės, kad valdiklis vartos daugiausia 5 W, tai srovė bus iki 0,2 A.

- Renkamės impulsinį Buck keitiklį, nes su linijiniu reikėtų mažiausiai 7 W radiatoriaus ir galingo reguliatoriaus.
- Kadangi maitinimo šaltinis bus impulsinis – reikia parinkti kondensatorių su kuo mažesniu nuosekliu ekvivalentiniu rezistoriumi, taip vadinamą „Low ESR“.
- Temperatūrinis režimas: nuo -40°C iki 70°C .

Pagal visus norimus parametrus – išsirinkome keitiklį TLE8366, kurio srovė su dideliu rezervu – 1,8 A, įtampa iki 45 V.

Lyginimo grandinė

Pirmiausia projektuojame lyginimo grandinę – diodas su kondensatoriumi.

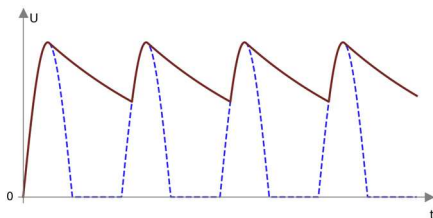
Reikia apskaičiuoti kondensatoriaus talpą, kad įtampos pulsavimas nebūtų labai didelis ir impulsinis keitiklis galėtų normaliai veikti. Iš formulių:

$C = \frac{Q}{U}$ ir $I = \frac{Q}{t}$, gauname $C = \frac{I \cdot t}{U}$. Kadangi tai yra vienpusis lyginimas, laikas, kai kondensatorius išsikrovinė, bus 20 ms, vartojama vidutinė srovė 200 mA, leidžiame 3 V pulsaciją, tuomet:

$$C = \frac{0,2 * 0,02}{3} = 1333 \mu\text{F}$$

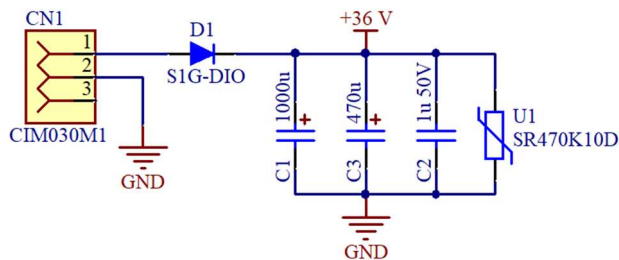
Pasirenkame artimą didesnę nominalią 1470 μF , t.y. naudosime du elektrolitinius kondensatorius:

- 1000 μF ir 50 V, Low ESR.
- 470 μF ir 50 V, Low ESR.



8.2.1 pav. Išlyginta įtampa už diodo.

Elektrolitiniai kondensatoriai, nors ir mažos nuosekliosios varžos, vis tiek blogai filtruoja aukšto dažnio triukšmus, todėl projektuojame keraminį 1 μF kondensatorių, kurio įtampa turi būti ne mažesnė kaip 50 V:



8.2.2 pav. Diodinis lygintuvas

Kai kondensatoriai parinkti, pasirenkame nuosekliai jungiamą S1G diodą, kurio vardinė srovė yra 1 A, o didžiausia atbulinė įtampa – 400 V. Diodas D1 veikia kaip lygintuvas ir kartu kaip aukojamas apsaugos elementas: įvykus trumpajam jungimui valdiklyje arba viršįtampiui, kai suveikia varistorius U1, diodas D1 perkaista ir perdega, taip nutraukdamas grandinę.

Apsauga nuo viršįtampių

Nuo trumpų įtampos šuolių (pvz., komutuoiant galingus įrenginius tame pačiame tinkle) grandinę saugo varistorius (žr. 4.5 skyrių). Jį renkamės pagal darbinę įtampą, o sugeriamos energijos kiekis – bent 5 J. Įvykus viršįtampiui varistoriaus varža staigiai sumažėja ir jis nukreipia energiją pro save, apsaugodamas tolesnę grandinę. Žemiau esančiame paveiksle pateiktas pavyzdinis varistoriaus aprašymas. Pagal mūsų projektuojamą grandinę parenkamasis tinkamiausias varistoriaus modelis – pažymėta raudonai.

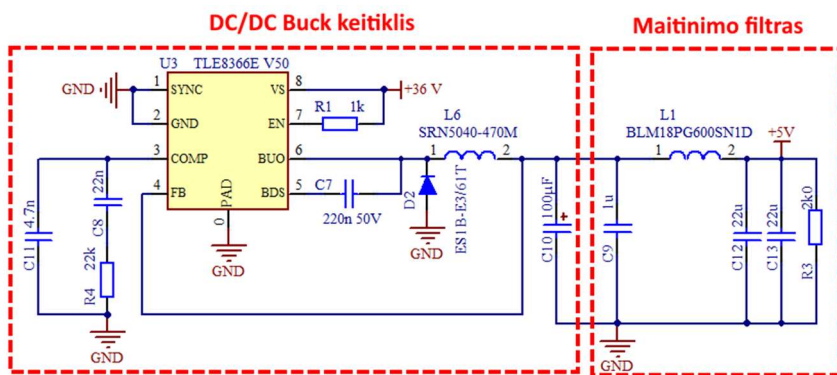
Part Number	Maximum Allowable Voltage		Varistor Voltage		Withstanding Surge Current (8/20 μ s)	Max. Clamping Voltage (8/20 μ s)		Maximum Energy		Typical Capacitance	Safety Approval	
	Acrms	DC	DC Volts		1 time	Vc	Ip	2ms	10/1000 μ s	@1kHz		
	Volts	Volts	Min	Max	Amps	Volts	Amps	Joules		pF		
SR180K10D□□	11	14	16	20	500	36	5	1.5	2.1	6000	△	◇
SR220K10D□□	14	18	20	24	500	43	5	2	2.5	5000	△	◇
SR270K10D□□	17	22	24	30	500	53	5	2.5	3	4000	△	◇
SR330K10D□□	20	26	30	36	500	65	5	3	4	3500	△	◇
SR390K10D□□	25	31	35	43	500	77	5	3.5	4.6	3100	△	◇
SR470K10D□□	30	38	42	52	500	93	5	4.5	5.5	2800	△	◇
SR560K10D□□	35	45	50	62	500	110	5	5.5	7	2400	△	◇

8.2.3 pav. Varistoriaus charakteristikos (originalus gamintojo aprašymas)

Impulsinis Buck keitiklis

Iš išlygintos ~40 V įtampos reikia gauti 5 V. Renkamės impulsinį Buck keitiklį (žr. 7.5 skyrių), nes linijinis stabilizatorius šioje vietoje netinka: ant jo kristų $(40 - 5) \text{ V} \cdot 0,2 \text{ A} = 7 \text{ W}$ galios, todėl reiktų didelio radiatoriaus, o naudingumo koeficientas būtų vos ~12 %.

Pagal reikalavimus (įėjimo įtampa iki 45 V, srovė su atsarga) pasirinktas TLE8366 keitiklis – jo didžiausia srovė 1,8 A, įėjimo įtampa iki 45 V. Kadangi keitiklis impulsinis, visi jo kondensatoriai turi būti žemos ekvivalentinės nuoseklosios varžos (angl. *Low ESR*). Schemą braižome griežtai pagal gamintojo dokumentacijos rekomendacijas, neeksperimentuojame su kompensavimo ir filtravimo grandinėmis, o perkeliame iš duomenų lapo.



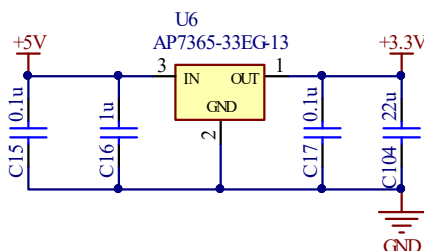
8.2.4 pav. Impulsinio maitinimo šaltinio schema

Keletas svarbių šios schemos sprendimų iš praktikos:

- diodas D2 – Schottky (žr. 6.1 skyrių), nes jo mažesnis įtampos kritimas reiškia mažesnius nuostolius,
- droselis parenkamas pagal leistiną srovę, o jo varža turi būti kuo mažesnė,
- visi komponentai – SMD, kad išvengtume papildomo induktyvumo išvaduose,
- išėjime – feritinis žiedas ir kondensatoriai, papildomai filtruojantys paties keitiklio keliamus triukšmus,
- R3 (2 kΩ) užtikrina mažiausią apkrovą, kad keitiklis dirbtų stabiliai net tada, kai likusios grandinės nevartoja srovės. Naujesniems keitikliams tokios apkrovos nebereikia, tad ją galima ir praleisti – tai papildomas vartotojas ir šiluma, bet iš praktikos žinome, kad taip sudaroma stabilesnė grandinė.

LDO stabilizatorius procesoriui

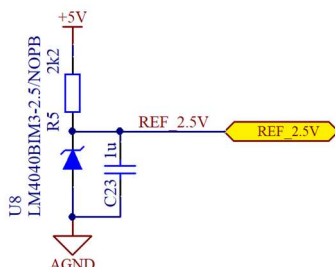
Iš 5 V, kurie maitins RS-485 sąsają, procesoriui dar reikia 3,3 V. Kadangi įtampų skirtumas mažas (1,7 V), o procesoriaus srovė nedidelė, čia puikiai tinka LDO stabilizatorius (žr. 7.5 skyrių). Jį renkamės pagal kainą, stabilumą ir reikalingų išorinių komponentų kiekį – pasirinktas AP7365:



8.2.5 pav. LDO stabilizatorius procesoriaus maitinimui

Atraminė įtampa ADC ir DAC

Analoginiams keitikliams (žr. 7.4 skyrių) reikia tikslios ir temperatūroje stabilios atraminės įtampos – maitinimo 3,3 V tam netinka, nes jos vertė „plaukioja“ keičiantis apkrovai ir yra daug triukšmų. Tam naudojame šunto reguliatorių LM4040 (2,5 V) su nuosekliu rezistoriumi:



8.2.6 pav. Šunto reguliatorius ADC ir DAC

Geriausia praktika – papildomą kondensatorių prie šunto geriau statyti kuo arčiau procesoriaus kojelių. Apie tai bus paminėta procesoriaus dalyje.

8.3 Procesoriaus parinkimas

Projektuojant valdiklį vienas svarbiausių etapų yra tinkamo procesoriaus arba mikrovaldiklio parinkimas. Rinkoje yra daug skirtingų gamintojų ir architektūrų sprendimų, tačiau šiame projekte buvo nuspręsta rinktis iš rinkos lyderių siūlomų

mikrovaldiklių. Pagrindinis kriterijus buvo noras naudoti plačiai paplitusią, našią ir gerai palaikomą ARM architektūrą, todėl pasirinkimas buvo nukreiptas į STM32 šeimą.

Įvertinus skaičiavimo galią, periferinių modulių gausą, atminties išteklius, kūrimo įrankių prieinamumą ir pramoninį pritaikomumą, pasirinkta STM32H7 serija. Šie mikrovaldikliai pasižymi dideliu našumu, plačiomis komunikacijos galimybėmis ir pakankamais resursais sudėtingesnėms valdymo, ryšio bei signalų apdorojimo užduotims atlikti. Todėl jie tinka kuriamam PLC tipo valdikliui, kuriame vienu metu reikia valdyti įėjimus, išėjimus, ryšio sąsajas ir kitus sistemos mazgus.

Atmintys

Pasirinktas procesorius turi pakankamai vidinės atminties:

- FLASH – programai, kuri bus rašoma C programavimo kalba (gali būti assembleriu, C++ ar C#, Python, priklausomai nuo kompiliatoriaus).
- SRAM – duomenims, kurie naudojami skaičiavimuose.
- „Backup SRAM“ – nustatymams, todėl papildomų atminties mikroschemų neprireikė.
- Jei vidinės EEPROM ar FLASH nepakaktų, prie procesoriaus per SPI arba I²C sąsają būtų jungiama išorinė atminties mikroschema (žr. 7.6 skyrių).

Realus laiko laikrodis ir baterija

Valdiklyje norime turėti kalendorių, todėl reikalingas realaus laiko laikrodis (RTC), o jam – baterija, palaikanti veikimą dingus maitinimui. Projektuojame CR2032 baterijos lizdą, kad išsikrovusią bateriją po 5–10 metų būtų galima pakeisti. Ta pati baterija išsaugo ir „Backup SRAM“ turinį, kad išjungus maitinimą nedingtų nustatymai.

Kondensatoriai maitinimo grandinėje

Mikrovaldiklių, kaip ir kitų procesorių, veikimas pagrįstas sinchroniškai persijungiančiais loginiais elementais, trigeriais ir kitomis skaitmeninėmis grandinėmis. Šie elementai sudaryti iš tranzistorių, kurie elektroninėse grandinėse dažniausiai veikia kaip jungikliai, t. y. gali būti įjungti arba išjungti.

Kai mikrovaldiklis veikia, jo vidinės loginės grandinės periodiškai keičia būsenas. Kiekvieno tokio persijungimo metu trumpam padidėja suvartojama srovė. Pavyzdžiui, jeigu mikrovaldiklio darbo dažnis yra 100 MHz, vieno periodo trukmė siekia 10 ns, todėl srovės pokyčiai vyksta labai trumpais laiko intervalais. Jei maitinimo šaltinis

nespėja pakankamai greitai kompensuoti šių trumpalaikių srovės poreikio padidėjimų, maitinimo įtampa gali sumažėti. Per didelis įtampos kritimas gali lemti netinkamą mikrovaldiklio veikimą arba jo būsenos praradimą.

Praktikoje maitinimo šaltinis negali idealiai greitai reaguoti į kiekvieną trumpą srovės impulsą. Maitinimo grandinėje esantys laidininkai, takeliai ir jungtys turi parazitinę varžą bei induktyvumą, todėl greiti srovės pokyčiai sukelia papildomus įtampos svyravimus. Dėl šios priežasties vien maitinimo šaltinio dažnai nepakanka stabiliai įtampai palaikyti, ypač aukštesniuose dažniuose. Realūs maitinimo šaltiniai geriausiai kompensuoja palyginti lėtus apkrovos pokyčius, tačiau trumpiems, aukšto dažnio srovės impulsams reikalingos papildomos priemonės.

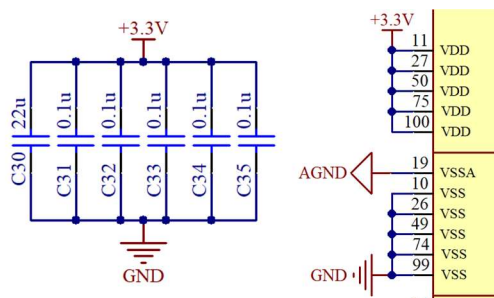
Tam prie mikrovaldiklio maitinimo išvadų jungiami kondensatoriai. Jie turi būti montuojami kuo arčiau maitinimo kojų, kad būtų sumažinta takelių varža ir induktyvumas. Tokie kondensatoriai atlieka dvi pagrindines funkcijas:

- filtruoja maitinimo įtampos triukšmą;
- veikia kaip vietinis elektros krūvio rezervuaras. Staiga padidėjus mikrovaldiklio srovės poreikiui, dalis energijos trumpam tiekama iš šalia esančio kondensatoriaus, todėl maitinimo įtampa išlieka stabilesnė.

Kondensatorių efektyvumas priklauso ne tik nuo jų talpos, bet ir nuo realių parametrų:

- ekvivalentinės nuosekliosios varžos,
- ekvivalentinio nuosekliojo induktyvumo,
- korpuso tipo bei išdėstymo spausdintinėje plokštėje.

Todėl praktinėse schemose dažnai naudojami keli skirtingos talpos kondensatoriai. Didesnės talpos kondensatoriai kompensuoja lėtesnius ir didesnės energijos srovės pokyčius, o mažos talpos keraminiai kondensatoriai efektyviau slopina aukšto dažnio trikdžius. Tokiu būdu pasiekiamas stabilesnis maitinimas platesniame dažnių diapazone.



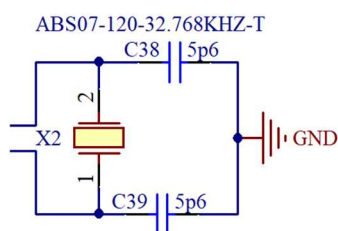
8.3.1 pav. Mikrovaldiklio kondensatorių pavyzdys

Kvarcinis rezonatorius

Šis valdiklis turi veikti plačiame temperatūrų diapazone, taip pat turi patikimai veikti RS-485 ir Ethernet ryšiai, todėl vidinio RC generatoriaus jau nepakanka – turime naudoti du kvarcinius rezonatorius:

- Pagrindinis kvarcinis rezonatorius 25 MHz, užtikrinantis pagrindinio procesoriaus ir periferinių įrenginių darbą. Šis dažnis vidinėmis PLL grandinėmis gali būti padidintas iki 480 MHz.
- Laikroдинis kvarcinis rezonatorius 32,768 kHz, nuo jo dirba realaus laiko laikrodis (angl. real time clock - RTC).

Abiejų rezonatorių jungimo schema yra vienoda, tik gali skirtis kondensatorių nominalai. STM32 procesoriaus laikroдинio kvarco įėjimas yra labai mažos galios, todėl jam tiko ne visi kvarciniai rezonatoriai. Dėl to pasirinktas specialus rezonatorius, kuriam reikia 5,6 pF kondensatorių. 25 MHz kvarcui naudojame 18 pF kondensatorius.



8.3.2 pav. Kvarcinio rezonatoriaus pajungimas

Reset signalas

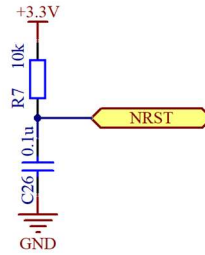
Įjungus mikrovaldiklio maitinimą, jis negali patikimai pradėti veikti iš karto. Tuo momentu maitinimo įtampa dar kyla, o vidinių registrų ir grandinių būsenos gali būti neapibrėžtos. Kad mikrovaldiklis pradėtų darbą tvarkingai, pirmiausia reikia nustatyti jo pradinę būseną. Tam naudojamas reset signalas.

Reset signalo paskirtis – trumpam sustabdyti mikrovaldiklio darbą po maitinimo įjungimo. Per tą laiką maitinimo įtampa turi pakilti iki reikiamos vertės, stabilizuotis, o vidinės mikrovaldiklio grandinės pasiruošti darbui. Tik tada reset signalas panaikinamas ir mikrovaldiklis pradeda vykdyti programą nuo pradžios.

Dažniausiai reset įėjimas būna aktyvus žemame lygyje. Tai reiškia, kad kol reset linijoje yra loginis nulis, mikrovaldiklis laikomas pradinėje būsenoje ir programa nevykdoma. Kai reset linija pakyla į loginį vienetą, mikrovaldiklis paleidžiamas.

Paprastose schemose reset signalui formuoti gali būti naudojama RC grandinė, sudaryta iš rezistoriaus ir kondensatoriaus. Įjungus maitinimą, kondensatorius pradeda krautis, todėl reset įtampa kyla ne iš karto, o palaipsniui. Dėl šio uždelimo

mikrovaldiklis kurį laiką lieka reset būsenoje. Kai kondensatoriaus įtampa pasiekia reikiamą lygį, reset būseną nutraukiama ir mikrovaldiklis pradeda darbą.



8.3.3 pav. Reset grandinės pajungimas

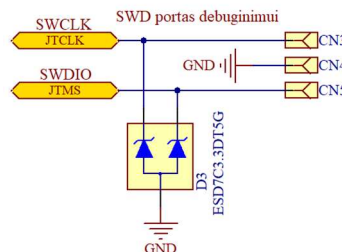
Tokia RC grandinė yra paprasta ir pigi, tačiau ji nėra labai tiksli. Uždelsimo trukmė priklauso nuo rezistoriaus ir kondensatoriaus parametrų, temperatūros bei maitinimo įtamos kilimo greičio. Jei maitinimo įtampa kyla per lėtai arba darbo metu trumpam sumažėja, paprasta RC grandinė gali nesuformuoti teisingo reset signalo. Todėl patikimesnėse sistemose dažnai naudojamos specialios reset valdymo mikroschemos, kurios tiksliau stebi maitinimo įtampą ir paleidžia mikrovaldiklį tik tada, kai darbo sąlygos yra tinkamos.

Programos įrašymo sąsaja

Kol mikrovaldiklyje nėra jokios programos, ją reikia įrašyti per standartinį prievadą – JTAG arba SWD. Taupydami plokštės vietą pasirinkome SWD, nes jam pakanka dviejų signalų:

- SWDIO – duomenys,
- SWCLK – taktinis signalas.

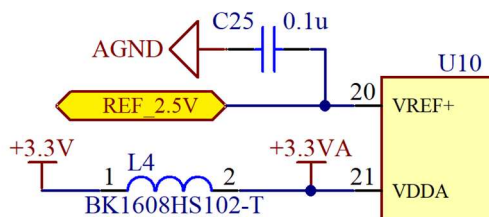
SWD leidžia ne tik įrašyti programą, bet ir derinti: stabdyti vykdymą, peržiūrėti registrus, eiti per programą žingsniais. Sąsajos linijos apsaugotos ESD diodais (ESD7C3.3), kad prijungiant programatorių statinis krūvis nepažeistų procesoriaus.



8.3.4 pav. SWD programavimo prievado schema

Liko kelios smulkios, bet svarbios vietos:

- Analoginės dalies maitinimas VDDA jungiamas per feritinį žiedą, kuris neleidžia skaitmeninės dalies triukšmams patekti į ADC matavimus. Ši įtampa „maitina“ procesoriaus vidinę analoginę dalį: ADC ir DAC periferinius modulius.
- Atraminė įtampa VREF+ blokuojama keraminiu kondensatoriumi kuo arčiau procesoriaus kojelės. Naudojant DAC ir ADC, ši įtampa bus atraminė įtampa, kurios atžvilgiu bus matuojamas ADC signalas ir formuojamas DAC išėjimas.
- BOOT0 kojelė per 100 kΩ rezistorių jungiama prie GND, kad procesorius startuotų iš FLASH atminties pradžios. Norint kitų variantų – skaityti aprašymą.
- Vidiniams įtampos reguliatoriams tarp VCAP kojelių ir GND reikia po 2,2 μF žemos ESR keraminių kondensatorių. Kadangi procesorius mažas – šie kondensatoriai netilpo į korpusą, juos reikia jungti išorėje.



8.3.5 pav. Analoginės dalies maitinimo ir atraminės įtampos grandinės

8.4 Ryšio sąsajos

Pramonėje valdikliai retai dirba pavieniui – jie keičiasi duomenimis su jutikliais, dažnio keitikliais, operatoriaus pultais ir viršesnėmis sistemomis. Šiame valdiklyje numatytos dvi pagrindinės sąsajos:

- RS-485,
- Ethernet.

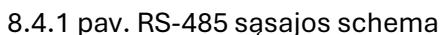
Rinkoje taip pat paplitusios CAN, KNX, DALI sąsajos bei belaidžiai sprendimai (Wi-Fi, LoRa, Zigbee), tačiau jų šiame projekte nenaudosime.

Ethernet duomenis perduoda vytos poros kabeliu – tuo pačiu, kuriuo jungiami kompiuteriai ir maršrutizatoriai. Kaip ir RS-485 atveju, signalai perduodami diferencinėmis poromis, todėl ryšys atsparus trikdžiams. Standartinis segmento ilgis

Skiriasi ir tinklo sandara. RS-485 įrenginiai jungiami vienas paskui kitą į bendrą magistralę, o Ethernet naudoja žvaigždės topologiją: kiekvienas įrenginys atskiru kabeliu jungiamas prie komutatoriaus (*angl. switch*), kuris paketus persiunčia tik reikiamam gavėjui. Dėl to Ethernet tinklą lengva plėsti – naujam valdikliui tereikia laisvo komutatoriaus prievado.

Parametras	RS-485	Ethernet
Greitis	dešimtys–šimtai kbit/s	100 Mbit/s – 1 Gbit/s
Atstumas	iki ~1200 m (mažu greičiu)	iki 100 m vienam segmentui
Topologija	magistralė – įrenginiai vienoje linijoje	žvaigždė – per komutatorių
Laidai	2 laidai (vyta pora)	4–8 laidai (vytų porų kabelis, RJ45)
Signalai	diferenciniai	diferenciniai
Izoliacija	papildoma (jei reikia)	integruota (skiriamasis transformatorius)
Grandinės sudėtingumas	vienas keitiklio lustas	PHY + transformatorius + programinė TCP/IP steka
Tipinis protokolas	Modbus RTU	Modbus TCP
Tipinis panaudojimas	jutikliai, skaitikliai, dažnio keitikliai	ryšys su SCADA, konfigūravimas naršykle

RS-485 – nors ir labai sena, tačiau vis dar plačiai pramonėje naudojama nuosekliojo ryšio sąsaja, skirta patikimam duomenų perdavimui didesniais atstumais ir triukšmingoje aplinkoje. Ji naudoja diferencinius signalus, todėl yra atsparesnė elektromagnetiniams trikdžiams negu paprastesnės nuosekliosios sąsajos. RS-485 dažnai naudojama jutiklių, valdiklių, dažnio keitiklių ir kitų pramoninių įrenginių tarpusavio ryšiui, ypač tada, kai viena linija reikia sujungti kelis įrenginius.



Iš praktikos žinoma, kad 3,3 V maitinami RS-485 keitikliai kai kuriais atvejais būna jautresni trikdžiams ir ne visada patikimai veikia kartu su kitais įrenginiais, kuriuose naudojami 5 V keitikliai. Dėl šios priežasties šiame valdiklyje RS-485 grandinė projektuojama naudojant +5 V maitinimą. Tačiau tokiu atveju būtina patikrinti mikrovaldiklio USART / UART sąsajos loginių lygių suderinamumą: RxD įėjimas turi saugiai priimti 5 V signalą, o mikrovaldiklio TxD ir DE išėjimų 3,3 V lygis turi būti pakankamas aukštam keitiklio įėjimo lygiui suformuoti. Pasirinktame STM32 mikrovaldiklyje šios sąlygos tenkinamos.

Projektuojame du kondensatorius: vieną didesnį, 22 μ F, kaip papildomą talpą, o kitą – 0,1 μ F, kuo arčiau maitinimo kojelės, blokavimui.

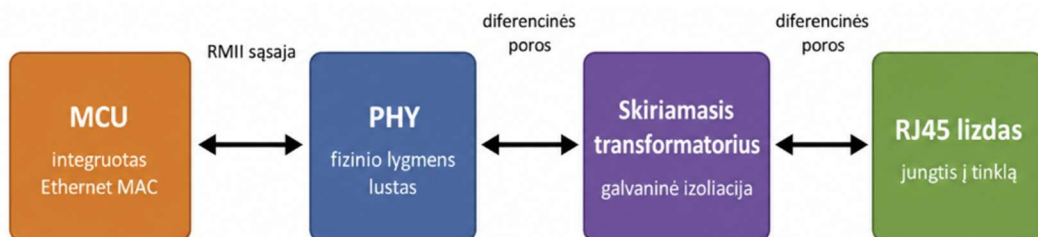
Keitiklio kojelių paskirtis (8.4.1 pav.):

- RO (angl. *Receiver Output*) – iš RS-485 linijos priimtas signalas procesoriui,
- DI (angl. *Driver Input*) – procesoriaus siunčiamas signalas į liniją,
- DE ir RE (angl. *Driver / Receiver Enable*) – valdo, ar keitiklis šiuo metu siunčia, ar priima. RS-485 yra pusiau duplexo sąsaja: tuo pačiu metu galima tik siųsti arba tik priimti.

Schemoje taip pat matome apsaugos elementus: nuoseklius 10 Ω rezistorius, ESD apsaugos diodus prie linijos gnybtų ir pakėlimo bei nuleidimo rezistorius, kurie palaiko apibrėžtą linijos būseną, kai niekas nesiunčia. Prie maitinimo – du kondensatoriai: 22 μ F talpai ir 100 nF blokavimui kuo arčiau maitinimo kojelės. Ilgos linijos galuose papildomai gali būti jungiamas 120 Ω terminavimo rezistorius, kad signalas neatsispindėtų nuo linijos galo.

Ethernet sąsaja

Ethernet leidžia valdiklį prijungti prie kompiuterių tinklo – tada jį galima konfigūruoti naršykle ar sujungti su gamyklos valdymo sistema. Ryšio grandinę sudaro keli blokai:



8.4.2 pav. Ethernet sąsajos blokinė schema

Pats mikrovaldiklis turi integruotą MAC (angl. *Media Access Control*) bloką, kuris tvarko duomenų paketus. Fizinį signalų perdavimą kabeliu atlieka atskira PHY mikroschema, pavyzdžiui, LAN8742, su procesoriumi sujungta RMII sąsaja. Tarp PHY mikroschemos ir RJ45 lizdo būtinas skiriamasis transformatorius – jis galvaniskai izoluoja valdiklio grandinę nuo kabelio, neperduoda nuolatinės įtampos ir padeda slopinti bendrojo režimo trikdžius. Dažnai transformatorius jau būna integruotas RJ45 lizde – tokie lizdai žymimi „with magnetics“.

PHY mikroschema atlieka daugiau nei vien signalų vertimą. Užmezgant ryšį ji su kitu tinklo įrenginiu automatiškai susidera greitį ir duplexą (angl. *auto-negotiation*), koduoja duomenis perdavimui kabeliu ir valdo lizdo šviesos diodus: žalias „Link“ rodo, kad fizinis ryšys užmegztas, o mirksintis „Activity“ – kad tinklu keliauja duomenys. Tai pirmieji indikatoriai, į kuriuos žiūrima diagnozuojant tinklo problemas.

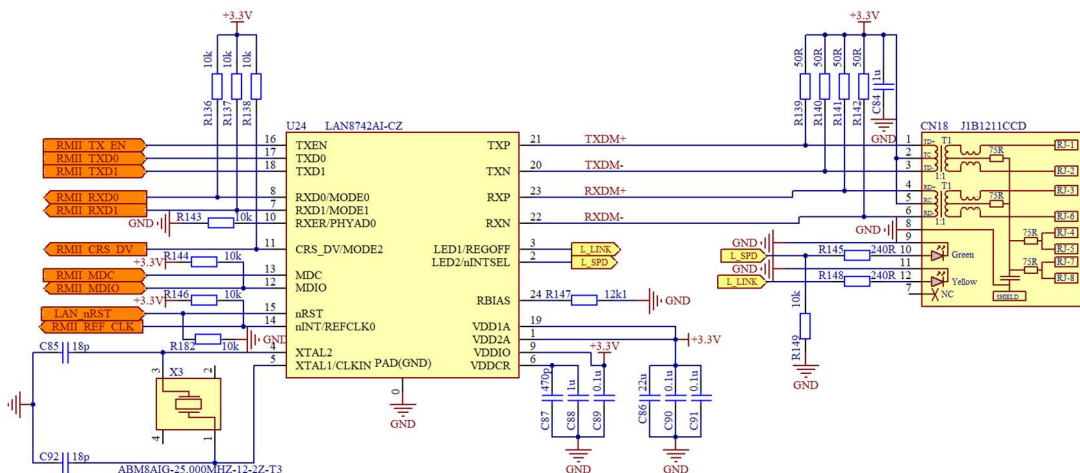
Su procesoriumi PHY sujungiama MII arba RMII sąsaja. Valdikliuose dažniausiai renkama RMII (angl. *Reduced MII*) – ji dirba su 50 MHz taktiniu signalu ir užima perpus mažiau procesoriaus kojelių.

Kiekvienas Ethernet įrenginys privalo turėti unikalų MAC adresą – 48 bitų numerį, pagal kurį jį atpažįsta tinklas. Gamintojai adresų blokus perka centralizuotai, todėl serijinėje gamyboje MAC adresas dažnai laikomas atskiroje mažoje EEPROM mikroschemoje arba įrašomas į procesorių programavimo metu ir vėliau rekomenduojama jo nekeisti.

Vien aparatinės dalies Ethernet ryšiui nepakanka – procesoriuje turi veikti TCP/IP protokolų stekas (mikrovaldikliams įprasta nemokama LwIP biblioteka). Žiūrint OSI lygmenis, virš TCP lygmens, pramonėje dažniausiai dirba Modbus TCP protokolas duomenų mainams su kitais valdikliais bei SCADA sistemomis, o konfigūravimui valdikliai neretai turi ir nedidelį integruotą tinklalapį, pasiekiamą naršykle.

Trasuojant plokštę Ethernet grandinei taikomi griežtesni reikalavimai nei lėtiems signalams: diferencinių porų takeliai vedami greta vienas kito ir vienodo ilgio, po jais paliekamas vientisas „žemės“ poligonas, o skiriamąjo transformatoriaus kabelio pusė laikoma atskirta nuo valdiklio žemės – kad kabeliu atkeliavę trikdžiai neturėtų kelio į vidines grandines.

Dabar pažiūrėkime, kaip visa tai atrodo realioje mūsų valdiklio schemoje (8.4.3 pav.), ir pereikime per ją dalimis – nuo procesoriaus pusės iki pat RJ45 lizdo.



8.4.3 pav. Ethernet sąsajos elektrinė schema

Pagrindinė schemos dalis – PHY mikroschema LAN8742A, su procesoriumi sujungta:

- RMII sąsaja (duomenų siuntimas į Ethernet liniją): TXD0/TXD1 ir TXEN linijomis duomenys siunčiami, RXD0/RXD1 ir CRS_DV – priimami.
- PHY registrų rašymui ir skaitymui: MDC ir MDIO yra valdymo sąsaja, kuria procesorius skaito ir rašo PHY registrus. Per šiuos registrus keičiami nustatymai, pvz., PHY adresas, LED veikimas, greitis ir kita.
- REF_CLK linija į mikrovaldiklį perduodamas 50 MHz taktinis signalas, kurio frontai sinchronizuoja duomenų siuntimą.
- nRST – PHY paleidimas iš naujo.

Prie RMII linijų matome jau matytą sprendimą – 10 kΩ pakėlimo rezistorius (R136–R138, R144, R146). Dalis PHY kojų turi dvigubą paskirtį: paleidimo momentu mikroschema nuskaito jų lygius kaip konfigūraciją (MODE0–MODE2, PHYAD0), todėl rezistoriai čia ne tik palaiko apibrėžtą būseną, bet ir nustato PHY darbo režimą bei adresą. R143 su 10 kΩ į žemę parenka PHY adresą 0.

Tikslų taktinį dažnį užtikrina 25 MHz kvarcinis rezonatorius X3 su 18 pF kondensatoriais (C85, C92) – jungimo schema tokia pati, kokią matėme prie procesoriaus 8.3 skyriuje. RBIAS kojelei reikalingas tikslus 12,1 kΩ rezistorius R147 – jis nustato vidinių srovės šaltinių etaloną, todėl jo nominalo keisti negalima. Maitinimo kojelės VDD1A, VDD2A, VDDIO ir vidinio reguliatoriaus VDDCR blokuojamos kondensatorių grupėmis (C86–C91) – kiekvienai maitinimo kojelei po keraminį kondensatorių kuo arčiau lusto.

Diferencinės poros TXP/TXN ir RXP/RXN į RJ45 lizdą CN18 eina per 50 Ω derinimo rezistorius (R139–R142), kurie kartu su C84 sudaro linijos suderinimą. Pats lizdas

J1B1211CCD – „with magnetics”: jo viduje jau įmontuoti skiriamieji transformatoriai T1 (santykis 1:1), suteikiantys galvaninę izoliaciją, o nenaudojamos kabelio poros ir ekranas užbaigiami $75\ \Omega$ rezistoriais su kondensatoriumi – taip kabeliu atkeliavę sinfaziniai trikdžiai nukreipiami į korpusą, o ne į schemą.

Lizde integruoti ir du indikaciniai šviesos diodai: žalias rodo užmegztą ryšį (L_LINK), geltonas – greitį (L_SPD). Juos per $240\ \Omega$ srovės ribojimo rezistorius (R145, R148) valdo pati PHY mikroschema – tai tie patys LED skaičiavimai, kuriuos darėme 6.3 skyriuje, tik čia srovę leidžia ne procesorius, o PHY.

Kai schema teisingai nubraižyta ir plokštė tinkamai sutrasuota, lieka programavimo dalis, bet tai ne šio skyriaus apimtyje.

8.5 Įėjimai ir išėjimai

Įėjimų ir išėjimų grandinės sujungia valdiklį su realiu valdomu procesu. Per įėjimus valdiklis gauna informaciją iš mygtukų, jungiklių, jutiklių, matavimo keitiklių ir kitų įrenginių, o per išėjimus valdo reles, kontaktorius, vožtuvus, variklius, indikatorius bei kitus įtaisus.

Pramoniniuose valdikliuose įėjimai ir išėjimai paprastai skirstomi į keturias pagrindines grupes:

- DI – skaitmeniniai įėjimai (*angl. Digital Input*);
- DO – skaitmeniniai išėjimai (*angl. Digital Output*);
- AI – analoginiai įėjimai (*angl. Analog Input*);
- AO – analoginiai išėjimai (*angl. Analog Output*).

Skaitmeninės grandinės apdoroja dvi būsenas – loginį nulį ir loginį vienetą. Pavyzdžiui, mygtukas gali būti nepaspaustas arba paspaustas, o galinis jungiklis – neaktyvus arba aktyvus.

Analoginės grandinės apdoroja tolygiai kintančius signalus, pavyzdžiui, 0–10 V įtampą, 4–20 mA srovę ar temperatūros jutiklio signalą.

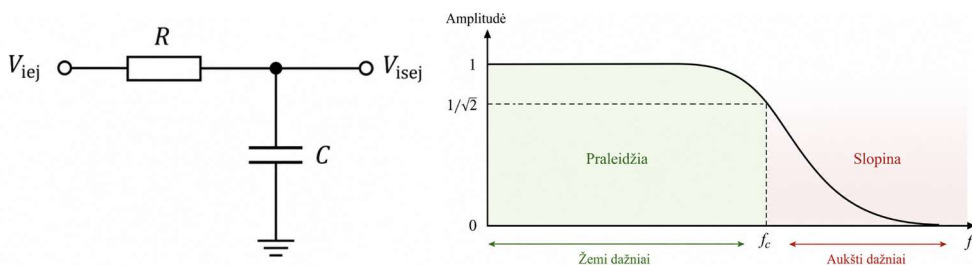
Kadangi prie valdiklio prijungiami išoriniai kabeliai ir įrenginiai, įėjimų ir išėjimų grandinės taip pat turi atlikti apsaugos bei signalų suderinimo funkcijas. Jos gali riboti srovę, keisti įtampos lygį, filtruoti trikdžius, užtikrinti galvaninę izoliaciją ir apsaugoti mikrovaldiklį nuo viršįtampių, elektrostatinių išlydžių bei neteisingo prijungimo.

Filtrų pradmenys

Prieš pradėdami plačiau panagrinėti jėjumus ir išėjimus, trumpai aptarsime bazines filtrų savybes ir jų sandarą, kadangi filtravimo grandines naudosime tiek jėjimuose, tiek išėjimuose. Pramoninių kabelių signalai niekada nebūna idealiai švarūs – prie jų prisideda relių kibirkščiavimo, variklių ir impulsinių keitiklių trikdžiai, todėl beveik kiekviename jėjime rasime filtrą. Paprasčiausias filtras – jau pažįstama RC grandinė (žr. 4.3 skyrių).

Žemųjų dažnių (angl. low-pass) filtras – praleidžia žemus dažnius

Šiame filtre rezistorius jungiamas nuosekliai, o kondensatorius – į GND: lėtai kintantis naudingas signalas praeina beveik nepakitęs, o greitai trikdžių šuoliai nuteka per kondensatorių ir procesoriaus nepasiekia.



8.5.1 pav. Žemųjų dažnių filtras (angl. low-pass)

Jo ribinis dažnis apskaičiuojamas:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

čia:

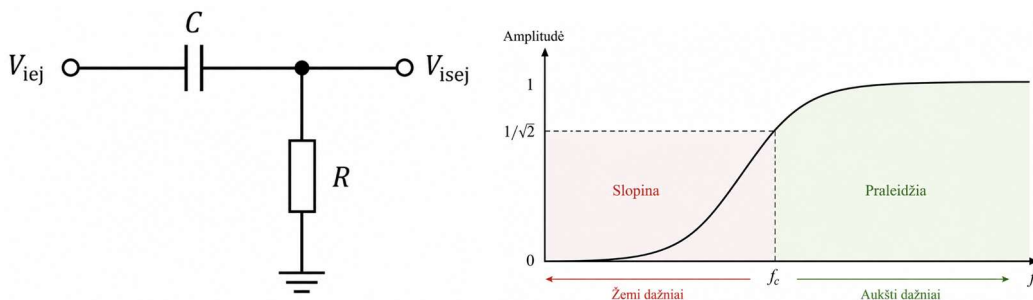
- f_c – ribinis dažnis,
- R – varža,
- C – kondensatoriaus talpa.

Skaitmeniniuose jėjimuose žemųjų dažnių filtras gali slopinti trumpus trikdžių impulsus ir mechaninių kontaktų atšokimą. Analoginiuose jėjimuose jis sumažina matavimo triukšmą ir riboja į ADC patenkančio signalo dažnių juostą.

Per didelė filtro laiko konstanta gali pernelyg sulėtinti signalą, todėl filtro parametrai turi būti parenkami pagal reikiamą jėjimo reakcijos greitį.

Aukštųjų dažnių (angl. high-pass) filtras – praleidžia aukštus dažnius

Aukštųjų dažnių filtras praleidžia greitai kintančią signalo dalį, tačiau slopina nuolatinę dedamąją ir lėtus signalo pokyčius.



8.5.2 pav. Aukštųjų dažnių filtras (*angl. high-pass*)

Tokie filtrai jėgimų grandinėse naudojami rečiau negu žemųjų dažnių filtrai. Jie gali būti naudojami:

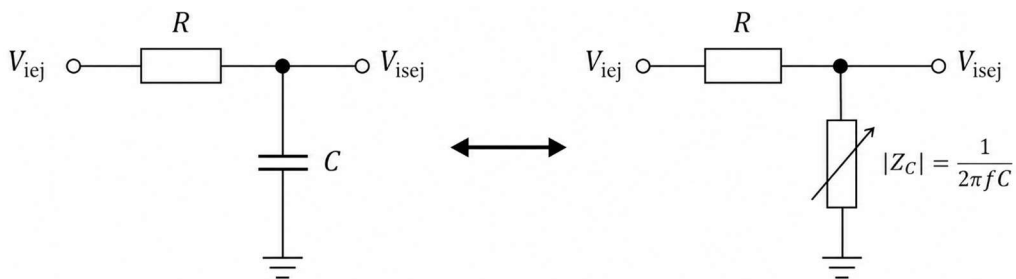
- impulsams ir staigiems signalo pokyčiams aptikti,
- nuolatinei įtampos dedamajai pašalinti,
- kintamosios signalo dalies atskyrimui,
- tam tikrų jutiklių ar ryšio signalų formavimui.

Aukštųjų dažnių RC filtro ribinis dažnis taip pat apskaičiuojamas formule:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Skirtumas yra tik rezistoriaus ir kondensatoriaus sujungimo tvarka.

Apibendrinant filtrų bazines žinias, galima pasakyti, kad į filtrą galima žiūrėti kaip į įtampos daliklį, kuriame vienas „rezistorius“ priklauso nuo dažnio. Ši priklausomybė aprašoma impedansu (supaprastintai tai laikome varža): kondensatoriui $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$, o induktoriui $Z_L = j\omega L$. Todėl keičiantis dažniui keičiasi įtampos pasiskirstymas tarp grandinės elementų, o kartu ir tai, kurie dažniai praleidžiami, o kurie slopinami. Šis principas galioja tiek žemųjų, tiek aukštųjų dažnių filtrams, nepriklausomai nuo to, ar jie sudaryti su kondensatoriumi, ar su induktoriumi.



8.5.3 pav. Filtro supaprastinta analogija

Pateiktame pavyzdyje matomas filtras, kurio rezistorius į GND priklauso nuo dažnio atvirkštine proporcija – kylant dažniui, jo impedansas (varža) mažėja, dėl to išėjimo signalas mažėja, nes didesnė dalis „krinta“ ant tikrosios varžos.

Skaitmeniniai įėjimai (angl. DI – digital input)

Prie skaitmeninių įėjimų jungiami mygtukai, galiniai jungikliai, relių kontaktai, indukciniai, optiniai ir kiti dvejetainį signalą formuojantys jutikliai. Skaitmeninis įėjimas turi atpažinti dvi būsenas: signalas neaktyvus – loginis 0, signalas aktyvus – loginis 1. Retai, tačiau pasitaiko, kad loginis 1 yra – 0 V, o loginis 0 yra – 24 V.

Pramoninėse sistemose dažniausiai naudojami 24 V signalai, nes didesnė signalų įtampa yra atsparesnė elektromagnetiniams trikdžiams ir įtampos kritimui ilguose kabeliuose. Orientaciniu atveju įtampa iki maždaug 5 V laikoma loginiu nuliui, o didesnė nei maždaug 11 V – loginiu vienetu. Tikslios perjungimo ribos priklauso nuo pasirinktos įėjimo grandinės ir taikomo pramoninio standarto.

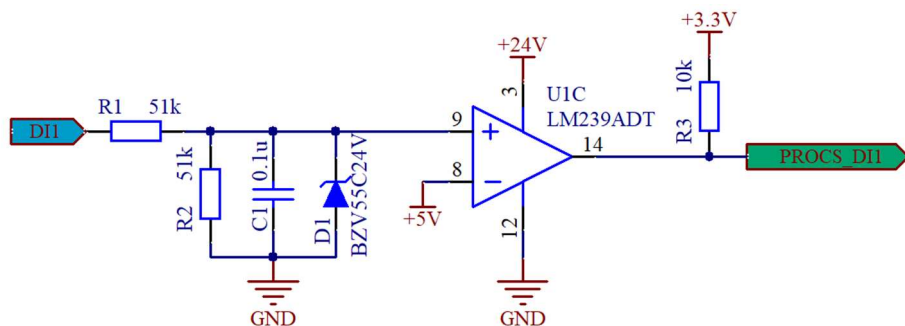
Mikrovaldiklio įėjimai paprastai veikia 3,3 V (mūsų pavyzdys) arba 5 V įtampa, todėl 24 V signalo negalima prijungti tiesiogiai ir įėjimo grandinė turi:

- sumažinti signalo įtampą,
- apriboti srovę,
- apsaugoti nuo viršįtampių,
- nuslopinti trumpus trikdžių impulsus,
- suformuoti aiškų loginį signalą.

Neizoliuotas įėjimas su komparatoriumi

Paprastoje neizoliuotoje grandinėje naudojamas rezistorių daliklis, apsauginis stabilitronas, kondensatorius ir komparatorius. Parinkus tinkamus nominalus, komparatoriaus galima apskritai atsisakyti, tačiau tuomet perjungimo riba priklausytų nuo procesoriaus įėjimo slenksčių, kurie duomenų lapuose apibrėžti tik

plačiais intervalais ir kinta priklausomai nuo maitinimo įtampos bei temperatūros. Komparatorius leidžia slenkstį nustatyti patiems tiksliai ir stabiliai, o prireikus – pridėti ir histerezę.



8.5.4 pav. DI schema su komparatoriumi

Šioje grandinėje 24 V skaitmeninis signalas DI1 pirmiausia patenka į rezistorių R1, o toliau į mazgą, iš kurio signalas apdorojamas keliais būdais. Rezistoriai R1 ir R2 sudaro įtampos daliklį, kuris sumažina išorinę jėgimo įtampą iki komparatoriui tinkamo lygio. Kadangi abu rezistoriai yra vienodi – po 51 kΩ, į komparatoriaus neinvertuojantį jėimą patenka maždaug pusė DI1 įtampos. Rezistorių nominalus parinkome tokius, kad jie neapkrautų jutiklio išėjimo. Realiai nominalas parenkamas nuo 10 kΩ iki 100 kΩ, nes mažesnis nominalas per daug apkraus jutiklį, o didesnis – bus mažiau atsparus trukdžiams.

Kondensatorius C11 (0,1 μF) kartu su rezistoriais R1 ir R2 sudaro žemųjų dažnių filtrą. Kondensatoriaus matoma ekvivalentinė varža (Thevenino teorema):

$$R_1 \parallel R_2 = 25,5 \text{ k}\Omega,$$

todėl filtro laiko konstanta lygi $\tau \approx R \cdot C \approx 2,55 \text{ ms}$, o ribinis dažnis:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{6,28 \cdot 2,55} = 62 \text{ Hz}$$

Tai reiškia, kad kelių milisekundžių ir trumpesni trikdžių impulsai bus pastebimai nuslopinti. Esant poreikiui, matome, kad kondensatorių galima didinti bent 10 kartų ir net daugiau, tačiau reikia atsižvelgti į tai, kad jėjimas bus fiksuojamas po uždelsimo.

Stabilitronas D1 (BZX55C24V) atlieka apsaugos nuo viršįtampių funkciją. Jei į DI1 jėjimą patektų per didelė įtampa, stabilitronas pradėtų leisti per save srovę ir apribotų įtampą ties saugia riba, taip apsaugodamas komparatoriaus jėjimą. Kadangi komparatorius maitinamas iš 24 V, pridėjus daliklį iš 2, gauname, kad schemai pavojinga įtampa yra didesnė nei 48 V. Kadangi tai pakankamai aukšta įtampa, stabilitrono galima ir nedėti.

Toliau signalas tiekiamas į LM239 komparatoriaus neinvertuojantį įėjimą. Į invertuojantį įėjimą paduodama +5 V atraminė įtampa, todėl komparatorius palygina sumažintą įėjimo signalą su šia nustatyta riba. Kadangi įėjimo įtampa dalinama iš dviejų, komparatorius persijungia tada, kai išorinis DI signalas pasiekia maždaug:

$$U_{DI} \approx 2 \cdot 5 = 10 \text{ V}$$

Taigi apytikriai galima laikyti, kad:

- kai $DI1 < 10 \text{ V}$, išėjime bus viena loginė būseną,
- kai $DI1 > 10 \text{ V}$, išėjime bus kita loginė būseną.

Svarbu tai, kad LM239 turi atviro kolektoriaus išėjimą, todėl jis pats negali aktyviai suformuoti aukšto loginio lygio. Dėl to išėjime naudojamas R3 (10 kΩ) rezistorius į +3,3 V, kuris veikia kaip pull-up rezistorius. Jis užtikrina, kad komparatoriaus išėjimas PROCS_DI1 būtų suderinamas su 3,3 V mikrovaldiklio logika.

Tokiu būdu ši grandinė:

- sumažina 24 V signalą iki saugaus lygio,
- filtruoja trikdžius,
- apsaugo nuo viršįtampių,
- ir suformuoja aiškų 3,3 V loginį signalą procesoriui.

Skaitmeniniai išėjimai (angl. DO – digital output)

Skaitmeninis išėjimas atlieka priešingą darbą nei įėjimas – procesoriaus signalą (+3,3 V) paverčia 24 V signalu, galinčiu valdyti relę, kontaktorių, indikatorius ar kito įrenginio įėjimą. Procesoriaus kojėlė duoda tik 3,3 V ir kelis miliamperus, todėl tarp jos ir 24 V apkrovos reikalinga stiprinimo pakopa.

Skaitmeniniai išėjimai dažniausiai būna:

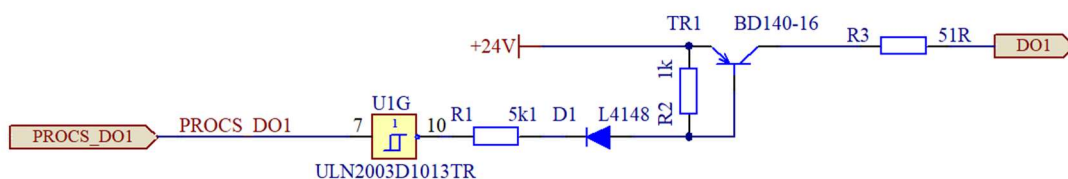
- tranzistoriniai – greitai, skirti nuolatinės srovės apkrovoms,
- reliniai – universalesni, gali valdyti AC ir DC apkrovas, bet yra lėtesni, jų perjungimų skaičius ribotas (~1 mln. kartų), o kiekvienas išėjimas kainuoja daugiau,

- kietakūniai (SSR) – neturi mechaninių kontaktų ir tinka dažnam perjungimui.

Tranzistoriniai išėjimai dar skirstomi į:

- srovę tiekiančius (*angl. PNP, sourcing*) – aktyvioje būsenoje į apkrovą paduoda teigiamą maitinimo įtampą,
- srovę priimančius (*angl. NPN, sinking*) – aktyvioje būsenoje apkrovą sujungia su GND.

Žemiau nagrinėjama aukštos pusės (*angl. sourcing*) išėjimo grandinė: apkrova jungiama tarp DO1 gnybto ir žemės, o įjungtas išėjimas jai paduoda +24 V – taip pramonėje jungiama dažniausiai. Projektuojant relinį arba SSR išėjimą, relė arba SSR projektuojama vietoje pagrindinio tranzistoriaus TR1.



8.5.5 pav. DO schema su PNP tranzistoriumi

Procesoriaus signalas PROCES_DO1 perduodamas į vieną ULN2003 tranzistorių matricos kanalą. ULN2003 šioje grandinėje veikia kaip buferis ir srovės imtuvas: procesoriui nereikia tiesiogiai valdyti 24 V grandinės ar tiekti PNP tranzistoriaus bazei reikalingos srovės. Norint sutaupyti, jį galima pakeisti tranzistoriumi, tačiau projektuojant daugiau kanalų, didėja komponentų skaičius, o tai padidina litavimo kainą.

Kai PROCES_DO1 signalas yra aukšto loginio lygio, ULN2003 vidinis Darlingtono tranzistorius įsijungia ir per rezistorių R1 (5,1 kΩ) bei diodą D1 patraukia tranzistoriaus TR1 bazę žemyn. Kai PNP tranzistoriaus bazės įtampa tampa maždaug 0,7 V mažesnė už emiterio įtampą, BD140 pradeda atsidarinti ir prijungia +24 V maitinimą prie DO1 išėjimo.

Rezistorius R1 riboja bazės valdymo srovę. Apytikriai ją galima įvertinti:

$$I_{R1} \approx \frac{24 - U_{BE} - U_{D1} - U_{CE(ULN)}}{5,1 \text{ k}\Omega}$$

Jeigu laikome, kad $U_{BE} \approx 0,7 \text{ V}$, diodo įtampos kritimas yra apie 0,7 V, o įjungto ULN2003 išėjime lieka apie 1 V:

$$I_{R1} \approx \frac{24 - 0,7 - 0,7 - 1}{5,1 \text{ k}\Omega} \approx 4,2 \text{ mA}.$$

Dalis šios srovės teka per R2, todėl reali BD140 bazės srovė bus maždaug 3–4 mA. Leistina apkrovos srovė turi būti tikrinama pagal tranzistoriaus stiprinimo koeficientą, soties įtampą, išskiriamą galią ir šiluminį režimą.

Rezistorius R2 (1 kΩ) sujungia tranzistoriaus bazę su emiteriu ir užtikrina, kad TR1 būtų patikimai išjungtas, kai ULN2003 kanalas nelaidus. Tai ypač svarbu procesoriaus paleidimo ir reset metu, kai jo išvado būseną gali būti neapibrėžta. R2 taip pat padeda greičiau pašalinti bazėje sukauptą krūvį ir išjungti tranzistorių.

Diodas D1 (LL4148) atskiria bazės valdymo grandinę nuo ULN2003 išėjimo ir neleidžia nepageidaujamai atgalinei srovei tekėti į valdymo grandinę. Jo tiesioginės įtampos kritimas turi būti įvertintas skaičiuojant bazės srovę.

Kai PROCS_DO1 signalas tampa žemo loginio lygio, ULN2003 kanalas išsijungia. Rezistorius R2 pakelia bazę iki +24 V, todėl bazės ir emiterio įtampos tampa beveik vienodos, TR1 užsidaro, o DO1 gnybtas pereina į didelės varžos būseną.

Taigi grandinės būsenos yra tokios:

- PROCS_DO1 = 0 – ULN2003 išjungtas, TR1 išjungtas, DO1 netiekia įtampos;
- PROCS_DO1 = 1 – ULN2003 įjungtas, TR1 įjungtas, DO1 tiekia apkrovai +24 V.

Rezistorius R3 (51 Ω) riboja trumpalaikę išėjimo srovę, sumažina kabelio bei talpinės apkrovos įjungimo srovės impulsus ir veikia kaip saugiklis. Tačiau dėl jo apkrovos srovei didėjant mažėja išėjimo įtampa:

$$U_{DO1} \approx 24 - U_{CE(sat)} - I_{apkrovos} R_3.$$

Pavyzdžiui, kai srovė yra 50 mA:

$$U_{R3} = 0,05 \cdot 51 \approx 2,55 \text{ V}.$$

Rezistoriuje išskiriama galia apskaičiuojama:

$$P_{R3} = I^2 R_3 = 0,05^2 \cdot 51 \approx 0,13 \text{ W}.$$

Todėl R3 nominalas, galia ir leistinas išėjimo srovės diapazonas turi būti parenkami kartu. Šis rezistorius nėra visavertė apsauga nuo ilgalaikio trumpojo jungimo – patikimam pramoniniam išėjimui gali būti reikalingas elektroninis srovės ribotuvas, saugiklis arba specializuota apsaugota išėjimo mikroschema. Tačiau suprojektavus išvadinį rezistorių (atspausnį perkaitimui) ir parinkus jo galią 0,25 W, jis tinkamai

riboja trumpojo jungimo srovę iki 50 mA. Jei trumpasis jungimas ilgalaikis, rezistorius perkaista ir nudega.

Tokiu būdu ši grandinė:

- suderina 3,3 V procesoriaus signalą su 24 V išėjimo grandine,
- sustiprina valdymo signalą,
- suformuoja srovę tiekiantį PNP tipo išėjimą,
- užtikrina, kad paleidimo metu išėjimas liktų išjungtas,
- iš dalies riboja srovės impulsus.

Analoginiai jėjimai (angl. AI – analog input)

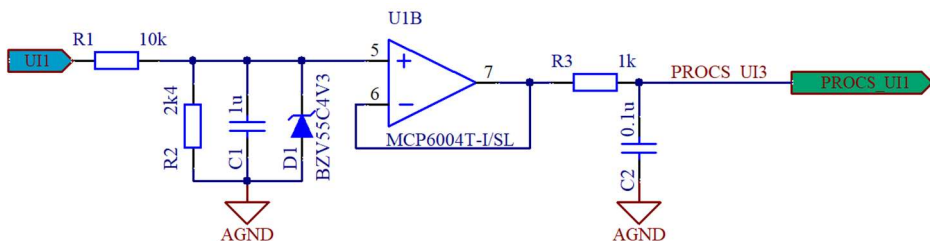
Skaitmeninis jėjimas atsako tik į klausimą, ar signalas yra, ar jo nėra, o analoginis jėjimas matuoja: kokia temperatūra, slėgis, skysčio lygis, sklendės padėtis ar kitas fizikinis dydis. Jutiklio signalas yra tolydžiai kintantis, o procesoriaus ADC keitiklis (žr. 7.4 skyrių) jį paverčia skaitine reikšme.

Analoginio jėjimo grandinei keliami griežtesni reikalavimai nei skaitmeninei. Svarbu ne tik apsaugoti procesorių, bet ir kuo mažiau pakeisti matuojamą signalą, nes rezistorių paklaidos, triukšmas, įtampos kritimai ir atraminės įtampos netikslumas tiesiogiai virsta matavimo paklaida.

Pramonėje dažniausiai naudojami du analoginių signalų standartai:

- 0–10 V: jutiklis išduoda matuojamam dydžiui proporcingą įtampą. Sprendimas paprastas ir nebrangus, tačiau ilguose kabeliuose signalą gali paveikti elektromagnetiniai trikdžiai, įtampos kritimai ir skirtingi įrenginių žemės potencialai.
- 4–20 mA – jutiklis reguliuoja srovę uždaroje kilpoje. Kol neviršyta siųstuvo leistina apkrovos varža, kabelio ilgis ir laidų varža matavimo rezultatui daro labai mažą įtaką. Mažiausia normali reikšmė yra 4 mA, todėl 0 mA gali reikšti nutrūkusį kabelį arba jutiklio gedimą. Valdiklio pusėje srovę tiksliai šunto rezistoriumi paverčiama įtampa.

Mūsų prietaise projektuojame tik 0–10 V analoginio jėjimo grandinę, o norėdami tiksliai priimti 4–20 mA jutiklių signalus, prie gnybtų pajungsime 500 Ω tikslų rezistorių (0.25–1 % ir 25–50 ppm), kuris srovės signalą pavers įtampos signalu diapazone 2–10 V.



8.5.6 pav. AI schema su operaciniu stiprintuvu

Pateiktoje schemoje 0–10 V signalas U_{I1} pirmiausia patenka į rezistorių daliklį, sudarytą iš $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ir $R_2 = 2,4 \text{ k}\Omega$. Jis sumažina įėjimo įtampą iki procesoriaus ADC tinkamo lygio.

Daliklio koeficientas:

$$k = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2,4}{10 + 2,4} \approx 0,194$$

Todėl, kai įėjime yra 10 V:

$$U_{\text{dal}} = 10 \cdot 0,194 \approx 1,94 \text{ V}$$

Taigi 0–10 V signalas sumažinamas iki maždaug 0–1,94 V diapazono. Programoje pradinė įėjimo įtampa gali būti atkurta:

$$U_{UI1} \approx U_{\text{ADC}} \cdot 5,17$$

Pavyzdžiui, ADC išmatavus 1,5 V, tikroji įėjimo įtampa yra:

$$U_{UI1} \approx 1,5 \cdot 5,17 \approx 7,76 \text{ V}$$

Kondensatorius $C_1 = 1 \text{ }\mu\text{F}$ kartu su rezistoriais R_1 ir R_2 sudaro žemųjų dažnių filtrą. Kondensatoriaus matoma ekvivalentinė varža:

$$R_{\text{ekv}} = R_1 \parallel R_2 \approx 1,94 \text{ k}\Omega$$

Filtro laiko konstanta:

$$\tau = R_{\text{ekv}} C_1 \approx 1,94 \text{ ms}$$

Ribinis dažnis:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{\text{ekv}} C_1} \approx 82 \text{ Hz}$$

Filtras praleidžia lėtai kintančius procesų signalus, bet slopina kabeliuose atsirandantį aukštesnio dažnio triukšmą ir trumpus impulsinius trikdžius. Po staigaus įtampos pokyčio signalui beveik visiškai nusistovėti reikia maždaug penkių laiko konstantų:

$$5\tau \approx 9,7 \text{ ms}$$

Stabilitronas D1 (BZV55C4V3) atlieka 2 funkcijas:

1. Apsaugai nuo viršįtampių. Normaliame 0–10 V diapazone jis nelaidus, nes daliklio išėjime gaunama ne daugiau kaip 1,94 V.
2. Ši schema pritaikoma ir skaitmeniniam jėjimui, tad turi apriboti įtampą, kad neviršytų operacinio stiprintuvo maitinimo įtampos, kai jėjime 24 V.

Operacinis stiprintuvas MCP6004 prijungtas kaip įtampos kartotuvas. Jo stiprinimo koeficientas lygus vienetui:

$$U_{i\text{š}} \approx U_i$$

Nors signalas nestiprinamas, operacinis stiprintuvas veikia kaip buferis: beveik neapkrauna rezistorių daliklio ir su maža išėjimo varža patikimai valdo procesoriaus ADC jėjimą.

Rezistorius $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ ir kondensatorius $C_2 = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$ sudaro papildomą filtrą tiesiai prieš ADC:

$$\tau_2 = R_3 C_2 = 0,1 \text{ ms}$$
$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi R_3 C_2} \approx 1,59 \text{ kHz}$$

Šis filtras slopina aukšto dažnio trikdžius ir atskiria operacinio stiprintuvo išėjimą nuo ADC vidinio mėginių ėmimo kondensatoriaus. Bendrą jėjimo reakcijos greitį daugiausia lemia pirmasis filtras su C_1 .

Tokiu būdu grandinė:

- sumažina 0–10 V signalą iki ADC tinkamo diapazono,
- apsaugo nuo viršįtampių,
- filtruoja trikdžius,
- buferiu atskiria jutiklio grandinę nuo ADC,
- leidžia procesoriui tiksliai išmatuoti analoginio signalo vertę.
-

Analginiai išėjimai (angl. AO – analog output)

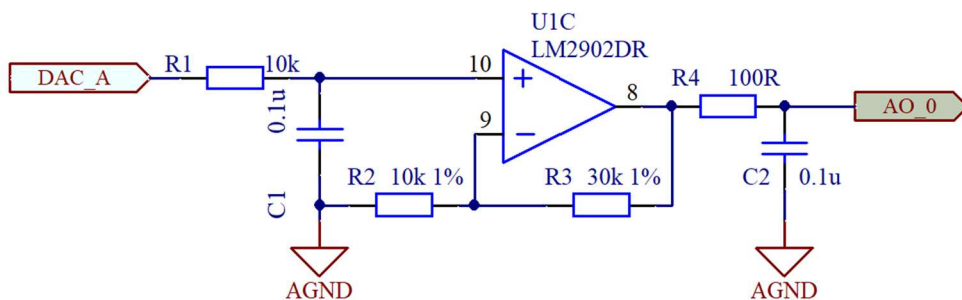
Skaitmeninis išėjimas gali apkrovą tik įjungti arba išjungti, o analoginis išėjimas suformuoja tolygiai kintantį valdymo signalą. Juo galima nustatyti dažnio keitiklio greitį, proporcinio vožtuvo padėtį, galios regulatoriaus lygį ar perduoti nustatytą reikšmę kitam valdikliui.

Dažniausiai pramonėje naudojami analoginių išėjimų standartai:

- 0–10 V: paprastas įtampos signalas, dažnai naudojamas dažnio keitikliams, pavaroms ir vožtuvams valdyti,
- 4–20 mA – srovės signalas, tinkamas ilgiems kabeliams ir triukšmingai aplinkai, valdikliuose naudojamas rečiau.

Kadangi dažniausiai pakanka turėti 0-10 V išėjimą valdiklyje, projektuosime būtent jį. Procesoriaus DAC keitiklis paprastai suformuoja tik 0–2,5 V arba 0–3,3 V signalą ir todėl negali tiesiogiai valdyti pramoninio 0–10 V įėjimo. Mūsų atveju, procesoriaus V_{ref} buvo maitinamas iš 2,5 V atraminės įtampos šaltinio, todėl tokia didžiausia įtampa ir bus išduodama iš procesoriaus DAC kojelės, o AO pateikta schema šią įtampą stiprins iki reikiamo 0-10 V lygio.

Todėl tarp DAC ir išorinio AO gnybto naudojamas operacinis stiprintuvas, kuris padidina signalo amplitudę, sumažina išėjimo varžą ir atskiria procesorių nuo išorinės apkrovos.



8.5.7 pav. AO schema

Pateiktoje schemoje procesoriaus DAC signalas DAC_A pirmiausia perduodamas per rezistorių $R_1 = 10\text{ k}\Omega$. Kondensatorius $C_1 = 0,1\text{ }\mu\text{F}$ kartu su R_1 sudaro žemųjų dažnių filtrą, kuris slopina DAC triukšmą, staigius laiptelius ir aukšto dažnio trikdžius.

Filtro laiko konstanta:

$$\tau_1 = R_1 C_1 = 10\text{ k}\Omega \cdot 0,1\text{ }\mu\text{F} = 1\text{ ms}$$

Ribinis dažnis:

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \approx 159 \text{ Hz}$$

Todėl grandinė gerai tinka lėtai kintantiems pramoniniams valdymo signalams, tačiau greitai DAC pokyčiai išėjime bus sušvelninami.

Operacinis stiprintuvas LM2902 sujungtas kaip neinvertuojantis stiprintuvas. Rezistorius $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ jungia invertuojantį įėjimą su AGND, o $R_3 = 30 \text{ k}\Omega$ sudaro neigiamo grįžtamojo ryšio grandinę.

Stiprinimo koeficientas:

$$K = 1 + \frac{R_3}{R_2} = 1 + \frac{30}{10} = 4$$

Taigi operacinio stiprintuvo išėjimo įtampa yra:

$$U_{i\text{š}} = 4U_{\text{DAC}}$$

Jeigu DAC išėjimo diapazonas yra 0–2,5 V, grandinė suformuos:

$$0\text{--}2,5 \text{ V} \cdot 4 = 0\text{--}10 \text{ V}$$

Pavyzdžiui, kai DAC išėjime yra 1,5 V:

$$U_{\text{AO}} = 1,5 \cdot 4 = 6 \text{ V}$$

R_2 ir R_3 naudojami 1 % tikslumo, nes jų santykio paklaida tiesiogiai veikia analoginio išėjimo stiprinimą ir galutinę įtampos paklaidą. Tikslesniam išėjimui galima naudoti 0,1 % rezistorius ir programinį kalibravimą.

Išėjimo filtras

Rezistorius $R_4 = 100 \Omega$ ir kondensatorius $C_2 = 0,1 \mu\text{F}$ sudaro papildomą žemųjų dažnių filtrą išėjime, kurio laiko konstanta:

$$\tau_2 = R_4 C_2 = 100 \Omega \cdot 0,1 \mu\text{F} = 10 \mu\text{s}$$

Ribinis dažnis:

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi R_4 C_2} \approx 15,9 \text{ kHz}$$

Šis filtras daugiausia slopina aukšto dažnio trikdžius. Rezistorius R4 taip pat izoliuoja operacinio stiprintuvo išėjimą nuo C2 ir kabelio talpos, todėl sumažėja operacinio stiprintuvo nestabilumo ar svyravimų tikimybė. Rezistorius taip pat riboja operacinio stiprintuvo išėjimo srovę, kad esant trumpajam jungimui, operacinis stiprintuvas nesudegtų.

Praktinės pastabos

Operacinis stiprintuvas turi būti maitinamas įtampa, kuri leistų jo išėjimui pasiekti 10 V. LM2902 nėra „rail-to-rail“ išėjimo stiprintuvas, todėl jo maitinimo įtampa turi būti aukštesnė už didžiausią pageidaujamą AO įtampą. Šioje sistemoje tam naudojamas 12 V maitinimas.

AO išėjimas skirtas valdyti didelės įėjimo varžos įrenginius, pavyzdžiui, dažnio keitiklio ar kito valdiklio 0–10 V įėjimą. Jis nėra skirtas tiesiogiai maitinti mažos varžos apkrovas, reles ar variklius. Jei reikia didesnės išėjimo srovės arba apsaugos nuo trumpojo jungimo, naudojama papildoma galios pakopa arba specializuota analoginio išėjimo mikroschema.

Tokiu būdu ši grandinė:

- filtruoja DAC signalą,
- iš 0–2,5 V suformuoja 0–10 V signalą,
- sumažina išėjimo varžą,
- slopina aukšto dažnio trikdžius,
- ir apsaugo operacinį stiprintuvą nuo talpinės išorinės apkrovos.

Skyriaus žinių patikrinimas

1. Iš kokių pagrindinių funkcinių mazgų sudarytas PLC valdiklis?
2. Kokią paskirtį valdiklyje atlieka maitinimo grandinės?
3. Kodėl nagrinėjame valdiklyje reikalinga lyginimo grandinė?
4. Apskaičiuokite didžiausią išlygintą įtampą, kai maitinimo šaltinis yra 24 V AC, o galima įtampos paklaida siekia +20 %.
5. Kodėl 40 V įtampą sumažinti iki 5 V ekonomiškiau impulsiniu, o ne linijiniu stabilizatoriumi?
6. Kiek galios šilumos pavidalu išskirtų linijinis stabilizatorius, jei jo įėjime būtų 40 V, išėjime 5 V, o srovė siektų 0,2 A?
7. Ką reiškia kondensatoriaus savybė „Low ESR“ ir kodėl ji svarbi impulsiniame keitiklyje?
8. Kokią funkciją maitinimo įėjime atlieka varistorius?
9. Kodėl impulsinio keitiklio droselis turi būti parenkamas ne tik pagal induktyvumą, bet ir pagal leistiną srovę bei vidinę varžą?
10. Kokią funkciją Buck keitiklio išėjime atlieka feritinis žiedas ir kondensatoriai?
11. Kokie pagrindiniai kriterijai vertinami renkantis mikrovaldiklį PLC valdikliui?
12. Kokią paskirtį atlieka FLASH, SRAM ir „Backup SRAM“ atmintys?
13. Kodėl šiame valdiklyje naudojami du kvarciniai rezonatoriai?
14. Kokią funkciją atlieka mikrovaldiklio reset signalas?
15. Kaip paprasta RC grandinė gali suformuoti reset uždelimą?
16. Kuo skiriasi SWDIO ir SWCLK signalai?
17. Kokius veiksmus, be programos įrašymo, galima atlikti per SWD sąsają?
18. Kodėl analoginės dalies maitinimas VDDA dažnai jungiamas per feritinį žiedą?
19. Kokią funkciją atlieka VREF+ išvadas?
20. Kodėl RS-485 sąsaja atspari elektromagnetiniams trikdžiams?
21. Kodėl RS-485 vadinama pusiau duplexo sąsaja?
22. Ką reiškia RJ45 lizdo žymėjimas „with magnetics“?
23. Kam kiekvienam Ethernet įrenginiui reikalingas unikalus MAC adresas?
24. Kuo skiriasi žemųjų ir aukštųjų dažnių filtrai?

25. Kaip apskaičiuojamas paprasto RC filtro ribinis dažnis?
26. Kodėl į filtrą galima žiūrėti kaip į įtampos daliklį?
27. Kaip keičiantis dažniui kinta kondensatoriaus impedansas?
28. Kaip keičiantis dažniui kinta induktoriaus impedansas?
29. Kodėl žemųjų dažnių filtras dažnai naudojamas jutiklių įėjimuose?
30. Kokią įtaką signalo reakcijos greičiui turi didesnė RC filtro laiko konstanta?
31. Kokie įrenginiai dažniausiai jungiami prie skaitmeninių įėjimų?
32. Kodėl 24 V DI signalo negalima tiesiogiai jungti prie 3,3 V mikrovaldiklio?
33. Kuo DO skiriasi nuo DI?
34. Kokias apkrovas galima valdyti skaitmeniniu išėjimu?
35. Kuo analoginis įėjimas skiriasi nuo skaitmeninio įėjimo?
36. Kokie fizikiniai dydžiai dažniausiai matuojami analoginiais įėjimais?

9. DARBO PRIEMONĖS

Elektronikos darbai prasideda ne nuo schemos, o nuo tvarkingos ir tinkamai paruoštos darbo vietos. Net ir paprastas litavimo ar matavimo darbas bus sunkus, jei trūks apšvietimo, tinkamų įrankių ar saugumo priemonių. Tinkamos darbo priemonės leidžia dirbti greičiau, tiksliau ir saugiau, sumažina komponentų sugadinimo riziką, o atliktas darbas būna kokybiškesnis.

Pradedančiajam dažnai atrodo, kad svarbiausia turėti tik lituoklį. Tačiau praktiškai ne mažiau svarbūs yra ir pagalbinių įrankiai: pincetas, atsuktuvai, multimetras, laboratorinis maitinimo šaltinis, o sudėtingesniems darbams – ir osciloskopas. Visi šie įrankiai sudaro darbo aplinką, kurioje galima ne tik surinkti grandinę, bet ir ją patikrinti, derinti bei diagnozuoti gedimus.

Elektroniko darbo vietai keliami paprasti, bet svarbūs reikalavimai. Stalas turi būti tvirtas, jo paviršius – atsparus karščiui arba uždegtas silikoniniu ar antistatiniu kilimėliu. Būtinai geras apšvietimas: litavimo kokybę reikia matyti, todėl prie bendro apšvietimo pridedama stalinė lempa, dar geriau – su didinamuoju stiklu. Patalpa turi būti vėdinama, nes lituojant garuoja fliusas. Dirbant su mikroschemomis naudojama ESD apsauga – antistatinis kilimėlis ir ant riešo dedama įžeminta apyrankė, nukreipianti statinį krūvį nuo jautrių komponentų. Ir galiausiai – tvarka: įrankiai turi savo vietas, smulkūs komponentai – dėžutės su skyreliais, o ant stalo nelieka degių daiktų.

Minimalus darbo priemonių rinkinys

Pradedančiajam pakanka santykinai nedidelio, bet apgalvoto priemonių rinkinio. Minimalų komplektą sudaro:

- litavimo stotelė,
- lydmetalis ir fliusas,
- lydmetalio nusiurbiklis arba litavimo juosta,
- dūmų nutraukėjas arba bent vietinis vėdinimas,
- atsuktuvai,
- pincetas,
- multimetras,
- laboratorinis maitinimo šaltinis.

Jei planuojama ne tik lituoti, bet ir rimčiau nagrinėti signalus bei derinti grandines, labai naudinga turėti ir osciloskopą. Jis nėra absoliučiai būtinai pačiai pradžiai, tačiau labai praverčia mokantis suprasti, kaip grandinė veikia realybėje.



9.1 pav. Elektroniko darbo vieta

Litavimo stotelė ir litavimo priemonės

Litavimo stotelė yra pagrindinis elektronikos darbų įrankis. Ji leidžia reguliuoti antgalio temperatūrą ir išlaikyti ją stabilią darbo metu. Tai daug patogiau ir saugiau nei paprastas nereguliuojamas lituoklis.

Elektronikoje dažniausiai naudojami 20–80 W galios litavimo įrankiai su temperatūros reguliavimu. Smulkiems darbams paprastai pakanka 320–370 °C temperatūros. Per žema temperatūra apsunkina litavimą, o per aukšta gali pažeisti takelius ar komponentus.

Lydmetalio

Lydmetalio – tai palyginti žemoje temperatūroje lydomas metalų lydinys, kuriuo sudaroma elektrinė ir mechaninė jungtis tarp komponento išvado ir spausdintinės plokštės aikštelės. Elektronikoje dažniausiai naudojama vielos pavidalo lydmetalio ritė. Vielos viduje paprastai būna viena ar kelios flusos šerdys, todėl lydmetaliumi tirpstant flusos iš karto valo paviršius ir padeda išlydytam metalui juos sudrėkinti.

Lydmetalio sudėtis nurodoma cheminiais elementų simboliais ir jų masės dalimis. Pavyzdžiui:

- Sn – alavas;
- Pb – švinas;
- Ag – sidabras;
- Cu – varis.

Žymėjimas Sn63Pb37 reiškia, kad lydmetalyje yra 63 % alavo ir 37 % švino. SAC305 lydinį sudaro maždaug 96,5 % alavo, 3 % sidabro ir 0,5 % vario; pavadinimas SAC sudarytas iš elementų simbolių *Sn–Ag–Cu*.

Švininis lydmetalis

Senesnėje elektronikoje ir remonto darbuose dažnai sutinkami Sn60Pb40 ir Sn63Pb37 lydmetalai. Jie gerai teka, lengvai sudrėkina varinius paviršius ir leidžia patogiai lituoti palyginti žemesnėje temperatūroje. Dėl šių savybių švininis lydmetalas ilgą laiką buvo pagrindinis elektronikos gamyboje ir iki šiol mėgstamas mokantis lituoti.

Tačiau švinas yra pavojinga medžiaga. Dirbant su švininiu lydmetaliu būtina:

- nevalgyti ir negerti prie darbo stalo,
- neliesti veido neplautomis rankomis,
- baigus darbą kruopščiai nusiplauti rankas,
- rinkti lydmetalo likučius ir neišmesti jų su buitinėmis atliekomis,
- reguliariai valyti darbo paviršių.

Svarbu suprasti, kad pagrindinė rizika lituojant kyla ne dėl švino „garų“ – įprasto litavimo temperatūroje švinas reikšmingai negaruoja. Didesnę riziką kelia lydmetalo dalelės ir nuo rankų į organizmą galintys patekti švino likučiai. Litavimo dūmus daugiausia sudaro kaitinamo fliuso garai, todėl dūmų ištraukimas reikalingas tiek naudojant švininį, tiek bešvinį lydmetalių.

Bešvinis lydmetalis

Šiuolaikinėje elektronikos gamyboje dažniausiai naudojami bešviniai lydiniai. Vienas labiausiai paplitusių yra SAC305, sudarytas iš alavo, sidabro ir vario. Taip pat naudojami pigesni alavo ir vario lydiniai, pavyzdžiui, Sn99,3Cu0,7.

Bešviniai lydmetalai paprastai lydosi aukštesnėje temperatūroje nei tradiciniai alavo ir švino lydiniai. Dėl to lituojant reikia geresnės temperatūros kontrolės, pakankamos galios litavimo stotelės ir aktyvesnio fliuso. Per ilgai kaitinant galima lengviau pažeisti plokštės takelius, jungtis ar temperatūrai jautrius komponentus. Moksliniuose SAC305 tyrimuose šis lydinys apibrėžiamas kaip Sn–3Ag–0,5Cu, o aukštesnė lydymosi temperatūra, palyginti su Pb–Sn lydmetaliais, minima kaip vienas iš bešvinio proceso technologinių skirtumų.

Bešvinė litavimo siūlė dažnai būna ne tokia blizgi kaip švininė. Matinis paviršius savaime dar nereiškia blogos jungties. Jungtis turi būti tolygi, gerai sudrėkinusi aikštelę ir komponento išvadą, be plyšių, gumulų ar nepageidaujamų tiltelių.

RoHS direktyva

Europos Sąjungos RoHS direktyva riboja pavojingų medžiagų naudojimą elektros ir elektroninėje įrangoje. Jos tikslas – mažinti pavojų žmonių sveikatai ir aplinkai bei palengvinti elektronikos atliekų perdirbimą. Šiuo metu direktyva riboja dešimt medžiagų, tarp jų šviną, gyvsidabrį, kadmį ir chromą. Daugumai į ES rinką tiekiamų elektros ir elektroninių gaminių šie reikalavimai yra privalomi, išskyrus aiškiai nustatytas išimtis.

Leistina švino koncentracija yra ne daugiau kaip 0,1 % pagal masę vienalytėje medžiagoje. Todėl RoHS reikalavimus atitinkantis lydmetalis negali būti įprastas SnPb lydinys, kuriame švino yra kelios dešimtys procentų. Vis dėlto RoHS nėra absoliutus švino draudimas: direktyvos prieduose numatytos konkrečios išimtis tam tikroms medžiagoms, komponentams ir specialioms naudojimui sritims.

Praktikoje tai reiškia:

- naujas komercinis elektronikos gaminy, skirtas ES rinkai, dažniausiai turi būti gaminamas bešvinio procesu,
- remontuojant seną įrangą galima rasti švininių litavimo siūlių,
- specializuotai įrangai gali būti taikomos RoHS išimtis,
- mokymosi ar prototipavimo metu švininis lydmetalis gali būti naudojamas, tačiau būtina laikytis saugos reikalavimų ir toks gaminy nebūtinai galės būti pateikiamas rinkai kaip RoHS atitinkantis.

Lydmetalio pasirinkimas

Mokymuisi ir bendriems elektronikos darbams patogiau rinktis 0,5–1,0 mm skersmens lydmetalio vielą su vidine fliuso šerdimi. Plonesnė viela patogesnė SMD komponentams, o storesnė – didesniems išvadams, jungtims ir laidams.

Ant ritės arba pakuotės reikėtų patikrinti:

- lydinio sudėtį,
- vielos skersmenį,
- fliuso tipą ir jo kiekį,
- ar lydmetalis atitinka RoHS,

- gamintojo rekomenduojamą litavimo temperatūrą,
- ar fliuso likučius reikia nuplauti.



9.2 pav. Lydmetalis

Negalima spręsti apie lydmetalį tik pagal užrašą „lead free“. Skirtingi bešviniai lydiniai skiriasi tekėjimu, darbine temperatūra, mechaninėmis savybėmis ir kaina. Vienam lydiniiui tinkama litavimo temperatūra bei fliusas nebūtinai bus optimalūs kitam.

Fliusas

Fliusas pagerina lydmetalio sukibimą ir pašalina oksidų sluoksnį nuo litavimo paviršių. Po litavimo likę fliuso likučiai gali būti lipnūs, kaupti dulkes, sugerti drėgmę ir ilgainiui pabloginti grandinės izoliacines savybes, todėl juos rekomenduojama nuvalyti.

Valymui geriausia naudoti izopropilo alkoholį (IPA), pageidautina 90 % ar didesnės koncentracijos, ir minkštą šepetėlį. Po valymo plokštė turi visiškai išdžiūti prieš įjungiant maitinimą.



9.3 pav. Kanifolija ir fliusas

Galima naudoti ir neplaunamą fliusą (angl. *no-clean flux*), kurio likučiai įprastomis sąlygomis gali būti paliekami ant plokštės. Tačiau jautriose analoginėse, didelės varžos, aukštos įtampos ar drėgnoje aplinkoje veikiančiose grandinėse net ir tokį fliusą geriau nuvalyti. Paprastas buitinis spiritas nerekomenduojamas, nes jame gali būti vandens ir kitų priemaišų.

Kanifolija

Kanifolija yra viena iš paprasčiausių fluso formų. Ji dažnai naudojama mokymosi tikslais, nes yra nebrangi ir pakankamai efektyvi. Tačiau praktikoje dažnai patogiau naudoti skystą arba gelinį flusą.

Litavimo vietoje turi būti:

- litavimo stotelė su laikikliu,
- antgalio valymo kempinėle arba žalvario drožlių valiklis,
- lydmetalis,
- flusas,
- dūmų nutraukimas,
- vieta karšties ar ką tik prilituotiems komponentams.

Litavimo metu antgalis turi būti švarus, o detalė kaitinama tiek, kiek reikia, bet ne per ilgai. Teisingai suformuotas litavimo taškas yra blizgus, lygus ir tvirtai sujungia komponentą su plokšte.

Lydmetalio šalinimas

Litavimo darbai neapsiriboja vien naujų jungčių sudarymu – dažnai reikia pašalinti seną lydmetalį, išlituoti komponentą ar ištaisyti klaidą. Tam naudojamos dvi pagrindinės priemonės:

- lydmetalio nusiurbiklis,
- litavimo juosta.



9.4 pav. Lydmetalio šalinimo priemonės

Lydmetalio nusiurbiklis – tai spyruoklinis arba vakuuminis įrankis, skirtas išlydytam lydmetalui greitai pašalinti. Jis ypač naudingas išlituojant išvadinius komponentus.

Litavimo juosta – tai varinė pinta juostelė, sugerianti išlydytą lydmetalį. Ji ypač patogi taisant smulkias litavimo vietas arba šalinant lydmetalo perteklių nuo takelių.

Abi priemonės padeda tvarkingai atlikti taisymus ir sumažina riziką pažeisti spausdintinės plokštės takelius.

Dūmų nutraukimas

Lituojant išsiskiria dūmai, kuriuose yra fluso garų ir smulkių dalelių. Nors trumpalaikis kontaktas nėra labai pavojingas, ilgainiui tokie dūmai gali dirginti kvėpavimo takus ir akis. Todėl darbo vietoje svarbu turėti bent paprastą dūmų nutraukimo sprendimą.



9.5 pav. Dūmų nutraukėjas (paprastas variantas)

Paprasčiausias variantas – mažas ventiliatorius su anglies filtru, pastatytas šalia litavimo vietos. Geresnis sprendimas – specialus dūmų nutraukėjas, kuris dūmus traukia nuo litavimo vietos ir filtruoja juos per keičiamą filtrą. Svarbu suprasti, kad ventiliatorius be filtro tik paskleidžia dūmus po patalpą, todėl jis nėra visavertis sprendimas. Geriausia, kai dūmai iš karto pašalinami nuo darbo zonos.

Atsuktuvai

Atsuktuvai reikalingi ne tik korpusams atidaryti, bet ir gnybtams prisukti, jutikliams prijungti, moduliams montuoti. Elektronikoje dažniausiai naudojami:

- plokštieji atsuktuvai,
- kryžminiai atsuktuvai,
- mažų dydžių tikslieji atsuktuvai.



9.6 pav. Atsuktuvai

Dirbant su automatikos ir elektronikos įrenginiais, svarbu naudoti tinkamo dydžio atsuktuvą. Per didelis ar per mažas atsuktuvas gadina varžto galvutę ir apsunkina darbą.

Naudinga turėti ir izoliuotų atsuktuvų rinkinį, ypač jei dirbama su maitinimo grandinėmis ar valdymo spintomis.

Pincetas

Pincetas ypač svarbus dirbant su smulkiais komponentais: rezistoriais, kondensatoriais, SMD mikroschemomis. Jis leidžia tiksliai paimti detalę, prilaikyti ją litavimo metu ir išvengti darbo pirštais ten, kur per mažai vietos.



9.7 pav. Pincetai

Elektronikoje dažniausiai naudojami:

- tiesūs pincetai,
- lenkti pincetai,
- antimagnetiniai pincetai.

Smulkiems darbams pincetas dažnai tampa ne mažiau svarbus už patį lituoklį.

Kąstukai (kandiklis)

Kąstukai – tai smulkūs kirpimo įrankiai, skirti laidams, komponentų išvadams ir plastikinėms juostelėms kirpti. Elektronikoje jie naudojami beveik nuolat: nukirpti rezistoriaus ar kondensatoriaus išvadą po litavimo, patrumpinti laidą, atskirti komponentą nuo juostos ar tvarkingai pašalinti nereikalingą išvado galą. Nors įrankis atrodo paprastas, nuo jo kokybės labai priklauso darbo tikslumas ir rezultato tvarkingumas.



9.8 pav. Kąstukai

Elektronikos darbams dažniausiai naudojami šoniniai kąstukai (angl. *side cutters*), o tiksliesiems darbams – lygiai kerpantys kąstukai (angl. *flush cutters*). Paprasti šoniniai kąstukai palieka kiek aštresnį ir labiau išsikišusį pjūvio galą, o lygiai kerpantys leidžia nukirpti išvadą arti plokštės paviršiaus. Todėl montuojant ar taisant elektronines grandines patogesni būtent flush tipo kąstukai.

Gerai kąstukai turi būti:

- aštrūs,
- tiksliai susiglaudžiančiomis briaunomis,
- patogiai laikomi rankoje,
- su spyruokle, kuri po paspaudimo pati atveria rankenas.

Tokie kąstukai leidžia dirbti greičiau ir mažiau vargina ranką.

Naudojant kąstukus svarbu kirpti tik tai, kam jie skirti. Smulkūs elektronikos kąstukai netinka storai vielai, plienui, vinims ar kitiems kietiems daiktams, nes taip galima išlaužti pjūvio briaunas. Elektronikoje jie dažniausiai naudojami:

- komponentų išvadams trumpinti,
- ploniems variniams laidams kirpti,
- plastikinėms tvirtinimo juostelėms nukirpti,
- perteklinėms montavimo detalėms pašalinti.

Kerpant komponento išvadą po litavimo, verta jį prilaikyti pirštu arba pincetu, kad nukirptas galiukas nenulėktų. Tai svarbu ne tik tvarkai, bet ir saugumui – smulkūs metalo gabalėliai gali patekti į akis ar likti ant darbo stalo.

Reikia prisiminti, kad per arti plokštės nukirptas išvadas atrodo tvarkingai, tačiau kirpti reikia atsargiai, kad nebūtų pažeistas litavimo taškas ar takelis. Ypač atsargiai reikia dirbti su trapiais komponentais ir tankiai sumontuotomis plokštėmis.

Taigi kštukai yra vienas iš paprasčiausių, bet būtinų elektroniko darbo įrankių. Jie padeda darbą atlikti švariai, tiksliai ir profesionaliai.

Multimetras

Multimetras yra pagrindinis matavimo prietaisas elektronikoje. Juo galima matuoti:

- įtampą,
- srovę,
- varžą,
- grandinės vientisumą,
- dažnai ir diodus, talpą ar tranzistorių parametrus.

Multimetras leidžia greitai patikrinti, ar grandinė maitinama, ar nėra nutrūkusio laido, ar komponentas nėra sugedęs. Tai pirmasis prietaisas, kurį verta paimti ieškant gedimo.



9.9 pav. Multimetras

Pradedančiajam svarbiausia išmokti:

- teisingai pasirinkti matavimo režimą,
- žinoti, kada matuojama nuosekliai, o kada lygiagrečiai,
- nepainioti įtampos ir srovės matavimo lizdų – galima sudeginti prietaisą ar saugiklį.

Multimetro lizdai ir režimai

Juodas matavimo laidas beveik visada jungiamas į COM lizdą. Raudono laido lizdas pasirenkamas pagal atliekamą matavimą:

- V, Ω , Hz, diodo simboliu pažymėtas lizdas naudojamas įtampai, varžai, dažniui, tęstinumui ir diodams matuoti.
- mA arba μ A lizdas naudojamas mažoms srovėms matuoti.
- 10 A arba 20 A lizdas naudojamas didesnėms srovėms matuoti.

Baigus matuoti srovę, raudoną laidą reikia grąžinti į įtampos ir varžos matavimo lizdą. Jei laidas paliekamas srovės lizde ir bandoma matuoti įtampą, gali susidaryti trumpasis jungimas.

Dažniausiai naudojami multimetro režimai:

- **V $\overline{\rule{0.5em}{0.4pt}}$** – nuolatinės įtampos matavimas,
- **V $\sim$** – kintamosios įtampos matavimas,
- **A $\overline{\rule{0.5em}{0.4pt}}$** – nuolatinės srovės matavimas,
- **A $\sim$** – kintamosios srovės matavimas,
- **Ω** – varžos matavimas,
-  – laidų ir jungčių vientisumo tikrinimas,
-  – diodų ir šviesos diodų tikrinimas.

Jei multimetras neturi automatinio matavimo diapazono parinkimo, pradžioje pasirenkamas didesnis diapazonas, o vėliau jis mažinamas, kol gaunamas patogiai skaitomas rezultatas.

Įtampos matavimas

Įtampa matuojama tarp dviejų grandinės taškų, todėl multimetras jungiamas lygiagrečiai matuojamam elementui arba maitinimo šaltiniui.

Matuojant nuolatinę įtampą:

1. Juodą laidą prijunkite prie COM lizdo.
2. Raudoną laidą prijunkite prie V/ Ω lizdo.
3. Pasirinkite nuolatinės įtampos režimą V $\overline{\rule{0.5em}{0.4pt}}$.
4. Juodą zondą prijunkite prie žemesnio potencialo taško, dažniausiai GND arba 0 V.

5. Raudonu zonu palieskite matuojamą tašką.

Jei zondai prijungti atvirkščiai, ekranas paprastai rodys neigiamą reikšmę. Tai nereiškia, kad multimetras sugedęs – tik sukeistas matavimo poliškumas.

Matuojant įtampą grandinės nutraukti nereikia.

Srovės matavimas

Srovė matuojama kitaip negu įtampa. Multimetras turi būti įjungtas taip, kad visa matuojama srovė tekėtų per jį, todėl jis jungiamas nuosekliai su apkrova.

Srovės matavimo eiga:

1. Išjunkite grandinės maitinimą.
2. Juodą laidą palikite COM lizde.
3. Raudoną laidą prijunkite prie tinkamo srovės lizdo.
4. Pasirinkite srovės matavimo režimą.
5. Nutraukite grandinę pasirinktoje vietoje ir į tarpą įjunkite multimetrą.
6. Įjunkite maitinimą ir stebėkite rezultatą.

Jei numatoma srovė nežinoma, matavimą geriau pradėti nuo didžiausios srovės lizdo ir diapazono. Įsitikinus, kad srovė maža, galima pereiti prie jautresnio mA diapazono.

Ampermetro negalima jungti tiesiai tarp maitinimo šaltinio teigiamojo ir neigiamojo gnybtų. Srovės matavimo režime multimetrom vidinė varža yra labai maža, todėl taip prijungus susidaro trumpasis jungimas.

Tęstinumo testas

Tęstinumo testas naudojamas patikrinti:

- ar laidas nenutrūkęs,
- ar jungiklio kontaktai susijungia,
- ar litavimo jungtis turi elektrinį kontaktą,
- ar tarp dviejų grandinės vietų nėra netikėto trumpojo jungimo.

Prieš atliekant tęstinumo testą grandinė turi būti išjungta. Multimetras tarp dviejų taškų siunčia nedidelę testavimo srovę ir, jei varža maža, skleidžia garsinį signalą.

Garsinis signalas reiškia, kad tarp taškų yra mažos varžos jungtis (dažniausiai $< 30 \Omega$). Jis nebūtinai reiškia idealiai nulinę varžą, todėl abejotinais atvejais verta pažiūrėti ir į ekraną rodomą reikšmę.

Diodo testas

Diodo testavimo režimu multimetras parodo tiesioginės krypties įtampos kritimą.

Tikrinant paprastą silicio diodą:

- pasirinkite diodo testavimo režimą,
- raudoną zondą prijunkite prie anodo,
- juodą zondą prijunkite prie katodo,
- tvarkingas diodas tiesiogine kryptimi dažniausiai rodytų apie 0,5–0,8 V,
- sukeitus zondus vietomis, ekrane paprastai bus rodoma OL arba labai didelė reikšmė.

Šviesos diodo įtampos kritimas dažniausiai būna didesnis ir priklauso nuo jo spalvos. Kai kurie šviesos diodai tikrinimo metu gali silpnai šviesti.

Jei diodas abiem kryptimis rodo beveik nulinę reikšmę, jis tikriausiai yra pramuštas. Jei abiem kryptimis rodoma OL (*angl. overload*), diodas gali būti nutrūkęs.

Osciloskopas

Osciloskopas leidžia matyti ne vien skaičių, o signalo formą laike. Tai ypač svarbu, kai reikia:

- stebėti impulsinius signalus,
- tikrinti laikrodinius signalus,
- analizuoti triukšmą,
- matyti filtrų veikimą,
- vertinti maitinimo pulsacijas,
- derinti ryšio sąsajas.

Jei multimetras parodo, kad „yra 5 V“, tai osciloskopas gali parodyti, ar tie 5 V yra švarūs, ar juose pilna triukšmo, pulsacijų ar trikdžių.



9.10 pav. Osciloskopas

Osciloskopu taip pat galima išmatuoti signalo amplitudę, periodą, dažnį, impulsų trukmę ir įvertinti, ar signalas neviršija leistinų įtampų ribų. Prieš matuojant svarbu tinkamai prijungti sondą, pasirinkti tinkamą įtampų daliklio režimą, pavyzdžiui, $\times 1$ arba $\times 10$, ir teisingai nustatyti laiko bei įtampų mastelius.

Ypač atsargiai reikia jungti osciloskopo žemės gnybtą, nes daugumos stalinių osciloskopų jis yra sujungtas su apsauginiu įžeminimu. Netinkamai prijungus žemę galima sukelti trumpąjį jungimą ir sugadinti matuojamą grandinę. Todėl osciloskopas yra labai naudingas, tačiau juo reikia naudotis suprantant matavimo grandinės elektrinius ryšius.

Laboratorinis maitinimo šaltinis

Laboratorinis maitinimo šaltinis leidžia grandinę maitinti kontroliuojama įtampa ir stebėti ar riboti jos vartojamą srovę, kartais ir galią. Tai daug saugiau nei jungti eksperimentinę grandinę tiesiai prie atsitiktinio maitinimo šaltinio.



9.11 pav. Laboratorinis maitinimo šaltinis

Pagrindiniai laboratorinio maitinimo šaltinio privalumai:

- reguliuojama išėjimo įtampa,
- reguliuojamas srovės ribojimas,
- apsauga nuo perkrovos ir trumpojo jungimo.
- galimybė stebėti įtamos ir srovės reikšmes.

Laboratorinis maitinimo šaltinis paprastai veikia dviem režimais:

- CV (angl. *Constant Voltage*) režimu – kai palaikoma nustatyta įtampa.
- CC (angl. *Constant Current*) režimu – kai palaikoma nustatyta srovė.

CV (angl. *Constant Voltage*) režimu šaltinis palaiko nustatytą įtampą, o srovė priklauso nuo prijungtos grandinės. CC (angl. *Constant Current*) režimu šaltinis riboja srovę iki nustatytos reikšmės. Jei grandinė bando vartoti daugiau srovės, šaltinis sumažina išėjimo įtampą ir neleidžia viršyti nustatytos ribos.

Pavyzdžiui, nustačius 5 V įtampą ir 100 mA srovės ribą, tvarkinga grandinė, vartojanti 40 mA, veiks CV režimu. Jei dėl klaidos grandinė bandys vartoti daugiau nei 100 mA, šaltinis pereis į CC režimą, o išėjimo įtampa sumažės.

Elektronikos darbų kokybė labai priklauso nuo tinkamai parinktos darbo vietos ir priemonių. Tvarkingas stalas, geras apšvietimas, dūmų nutraukimas ir tinkami įrankiai leidžia dirbti saugiai bei tiksliai. Pagrindinį komplektą sudaro litavimo stotelė, lydmetalis, flusas, lydmetalio šalinimo priemonės, atsuktuvai, kštukai, pincetas, multimetras ir laboratorinis maitinimo šaltinis. Sudėtingesniems derinimo darbams labai naudingas ir osciloskopas ar net mikroskopas. Kiekviena iš šių priemonių atlieka savo vaidmenį, o kartu jos sudaro visavertę elektronikos darbo vietą.

Skyliaus žinių patikrinimas

1. Kokie pagrindiniai reikalavimai keliama saugiai ir patogiai elektroniko darbo vietai?
2. Kuo litavimo stotelė pranašesnė už paprastą nereguliuojamą lituoklį ir kokią žalą gali sukelti netinkamai parinkta temperatūra?
3. Paaiškinkite lydmetalio žymėjimus Sn63Pb37. Kokie metalai sudaro šį lydinį?
4. Kokį pagrindinį reikalavimą elektronikos gaminiams nustato RoHS direktyva ir kodėl įprastas SnPb lydmetalis dažniausiai jos neatitinka?
5. Kodėl dirbant su švininiu lydmetaliumi būtina plauti rankas, nors įprasto litavimo metu švinas reikšmingai negaruoja?
6. Kokią funkciją litavimo metu atlieka flusas ir kada jo likučius rekomenduojama nuvalyti izopropilo alkoholiu?
7. Kuo skiriasi lydmetalio nusiurbiklio ir litavimo juostos veikimas? Nurodykite, kuri priemonė patogesnė išlituojant išvadinį komponentą, o kuri – valant smulkią aikštelę.
8. Kodėl paprastas ventiliatorius be filtro nėra visavertė litavimo dūmų šalinimo priemonė?
9. Kodėl smulkiomis elektronikos kirpimo replėmis negalima kirpti plieninės vielos ar kitų kietų medžiagų?
10. Atliekant gedimo paiešką reikia patikrinti, ar maitinimo šaltinio išėjime yra stabilūs 5 V įtampa su nedidele pulsacija. Kokius matavimus atliktumėte multimetru, o kokius – osciloskopu?
11. Kodėl pirmą kartą įjungiant naujai surinktą grandinę laboratoriniame maitinimo šaltinyje nustatomas srovės ribojimas? Paaiškinkite, kas vyksta grandinėje atsiradus trumpajam jungimui.

10. LITAVIMAS

Litavimas – tai komponentų jungimas išlydytu lydmetaliu. Gera litavimo jungtis yra ne tik mechaniškai tvirta, bet ir patikimai laidė elektrai, o prasta jungtis – dažniausia savadarbių įrenginių gedimų priežastis. Šiame skyriuje išmoksime taisyklingai lituoti išvadinius (THT) ir paviršinio montavimo (SMD) komponentus.

Darbo vietos paruošimas

Prieš pradėdant lituoti:

1. Paruoškite vėdinamą darbo vietą ir įjunkite dūmų ištraukėją.
2. Pasirūpinkite geru apšvietimu – litavimo kokybę reikia matyti.
3. Naudokite ESD apsaugą: antistatinį kilimėlį ir apyrankę, ypač dirbdami su mikroschemomis.
4. Susidėkite priemones pasiekiamoje vietoje: lituoklį stove, lydmetalį, fliusą, kandiklį, pincetą, drėgną kempinę antgaliui valyti.
5. Užsidėkite apsauginius akinius ir įsitikinkite, kad ant stalo nėra degių daiktų.
6. Nustatykite lituoklio temperatūrą: ~320–350 °C bešviniam lydmetalui, ~300–330 °C šviną turinčiam.

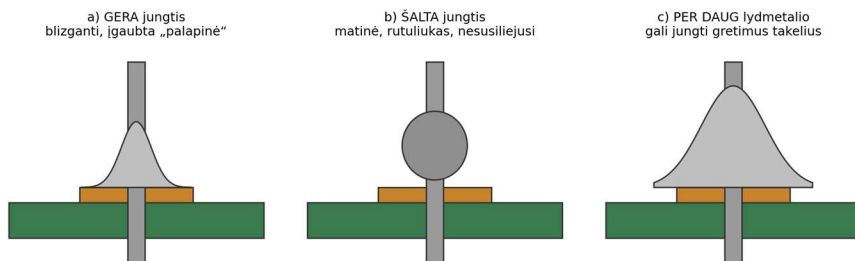
Litavimo eiga

Išvadinio (THT) komponento litavimas:

1. Įkiškite komponentą į kiaurymę ir, jei reikia, truputį praskėskite išvadus, kad komponentas neiškristų.
2. Nuvalykite antgalį ir padenkite jį lašeliu šviežio lydmetalio – taip pagerinsite šilumos perdavimą.
3. Priglauskite antgalį taip, kad jis vienu metu liestų ir aikštelę, ir komponento išvadą. Palaikykite 1–2 sekundes, kad abu paviršiai įšiltų.
4. Pridėkite lydmetalio vielutę prie įkaitintos jungties – ne prie antgalio! Lydmetalio turi lydėti nuo jungties šilumos ir laisvai aptekėti aplink išvadą.
5. Kai lydmetalio pasklis, pirmiausia atitraukite vielutę, o dar po akimirkos – lituoklį.
6. Leiskite jungčiai sustingti nejudinant – kelios sekundės. Tada kandikliu nukirpkite išvado perteklių virš jungties.

Visa operacija trunka 2–4 sekundes. Jei jungtis nepavyko, geriau leisti jai atvėsti ir lituoti iš naujo su lašeliu fluso, nei ilgai „virinti“ – perkaitusi aikštelė gali atšokti nuo plokštės.

Jungties kokybė



10.1 pav. Litavimo jungties kokybė: a) gera, b) šalta, c) per daug lydmetalio

Gera THT jungtis primena blizgančią įgaubtą „palapinę“ aplink išvadą (10.1 pav., a). Dažniausios klaidos:

- šalta jungtis (b) – lydmetalis buvo lydomas ant antgalio ir tik užlašintas ant nepakankamai įkaitintos jungties. Ji matinė, grublėta, lydmetalis nesusiliejęs su aikštele. Tokia jungtis gali veikti, bet po kurio laiko ims trūkinėti. Taisymas: lašelis fluso ir perlituoti,
- per daug lydmetalio (c) – didelis išgaubtas gumulas, po kuriuo nesimato, ar lydmetalis apskritai susiliejo su aikštele, be to, jis gali siekti gretimą takelį ir sudaryti trumpąjį jungimą. Perteklius nusiurbiamas.
- per mažai lydmetalio – jungtis laikosi tik ant plonos plėvelės ir mechaniškai silpna.

Po litavimo jungtis apžiūrima su lupa, o įtarus prastą kontaktą – patikrinama multimetro tęstinumo (*angl. buzzer*) testu.

SMD litavimo pagrindai

Paviršinio montavimo komponentai (žr. 4.1 skyrių) lituojami kiek kitaip, bet dviejų išvadų korpusai (rezistoriai, kondensatoriai, diodai) rankomis lituojami net lengviau nei atrodo:

1. Alavuokite vieną aikštelę – uždėkite ant jos nedidelį lydmetalio lašelį.
2. Pincetu uždėkite komponentą ir, lituokliu pašildę alavuotą aikštelę, „įsodinkite“ vieną komponento galą į išlydytą lydmetalį.

3. Patikrinkite, ar komponentas guli lygiai, tada prilituokite antrąją galą įprastu būdu.
4. Jei reikia, pirmąją jungtį perlituokite su lašeliu fluso.

Mikroschemos su daug kojelių lituojamos pradedant nuo dviejų priešingų kampų kojelių – jos užfiksuoja korpusą, o tada lituojamos likusios. Flusas čia ne prabanga, o būtinybė: jis neleidžia lydmetaliui sujungti gretimų kojelių.

Atlitavimas

Komponentui nuimti ar lydmetaliu pertekliui pašalinti naudojamos dvi priemonės:

- nusiurbimo pynė – varinės pynės juostelė, kuri, priglauta prie įkaitintos jungties, sugeria išlydytą lydmetalių kapiliariniu būdu,
- nusiurbimo pompa – spyruoklinis „švirkštas“, kuris staigiu įtraukimu nusiurbia išlydytą lydmetalių iš kiaurymės.

Dviejų išvadų SMD komponentas nuimamas pakaitomis šildant abu galus arba plačiu antgaliu iš karto per abi jungtis. Svarbiausia taisyklė – neplėšti komponento jėga: jei lydmetalis dar neišsilydė, kartu su komponentu atplėšite ir aikštelę.

Sauga lituojant

1. Lituoklio antgalis įkaista virš 300 °C – imkite tik už rankenos, o nenaudojamą lituoklį visada statykite į stovą.
2. Dėvėkite apsauginius akinius: tykšta flusas, šauna kerpamos kojelės.
3. Dirbkite vėdinamoje vietoje su dūmų ištraukėju.
4. Baigę darbą plaukite rankas – ypač jei liėtėte šviną turintį lydmetalių.
5. Karštą plokštę dėkite ant karščiui atspaus pagrindo, ne ant plastikinio stalo.

Skyriaus žinių patikrinimas

1. Kodėl lydmetalis pridedamas prie jungties, o ne prie lituoklio antgalio?
2. Kaip atpažinti šaltą jungtį ir kaip ją pataisyti?
3. Kokia tvarka lituojamas dviejų išvadų SMD komponentas?
4. Kam naudojama nusiurbimo pynė?

11. SCHEMŲ SIMULIACIJA

Šiame vadovėlyje pagrindiniu simulatoriumi rekomenduojama naudoti Falstad Circuit Simulator. Jis veikia interneto naršyklėje, yra paprastas ir leidžia iš karto matyti, kaip grandinėje kinta įtampos bei teka srovės. Srovės kryptis ir stipris vaizduojami judančiais taškais, o skirtingos įtampos – spalvomis. Programoje pateikta daug paruoštų schemų, todėl ji ypač tinkama Omo dėsnio, RC ir RL grandinių, filtrų, diodų, tranzistorių, operacinių stiprintuvų bei loginių elementų veikimui nagrinėti. Galima naudoti ir atskirai įdiegiamą neprisijungus veikiančią versiją.

EveryCircuit taip pat skirtas vaizdžiai ir intuityviai mokytis elektronikos. Simuliacijos metu tiesiog schemoje animuojamos įtampos, srovės ir krūviai, o komponentų parametrus galima keisti nestabdant bandymo. Programa leidžia nagrinėti analogines ir skaitmenines grandines, stebėti signalus virtualiu osciloskopu bei sudaryti dažnines charakteristikas. Ji veikia interneto naršyklėje ir mobiliuosiuose įrenginiuose, tačiau nemokamoje versijoje savo kuriamos schemos dydis ribojamas, todėl sudėtingesniems darbams gali reikėti mokamos versijos.

Sudėtingesnėms analoginėms grandinėms rekomenduojama TINA-TI. Tai SPICE pagrindu veikiantis simulatorius, kuriuo galima atlikti nuolatinės srovės darbo taško, pereinamųjų procesų ir dažninę analizę. Jame galima naudoti virtualius matavimo prietaisus, pasirinkti skirtingas signalo formas, stebėti įtampas ir signalų grafikus. TINA-TI labiausiai tinka operacinių stiprintuvų, aktyviųjų filtrų, stabilizatorių ir kitų analoginių grandinių tyrimui. Programa yra nemokama „Texas Instruments“ pateikiama TINA versija, tačiau ją reikia įdiegti kompiuteryje.

Pradedantiesiems siūloma pirmiausia naudoti Falstad, nes jame lengviausia suprasti grandinės veikimo principą ir greitai keisti komponentų nominalus. EveryCircuit tinka, kai norima dar vaizdesnės animacijos arba dirbti telefonu ir planšetiniu kompiuteriu. TINA-TI verta rinktis tuomet, kai jau reikia tikslesnės SPICE analizės ir realesnių elektronikos komponentų modelių.

Nepriklausomai nuo pasirinktos programos, simuliacijos rezultatus reikia vertinti kritiškai. Simulatorius skaičiuoja pagal komponentų modelius ir ne visada įvertina kontaktų varžas, komponentų paklaidas, laidų induktyvumą, elektromagnetinius trikdžius ar netinkamą grandinės surinkimą. Todėl, kai įmanoma, simulatoriuje išbandytą schemą rekomenduojama surinkti realiai, išmatuoti jos parametrus ir palyginti rezultatus.

12. LABORATORINIAI DARBAI

Teorinės žinios padeda suprasti elektronikos dėsnius ir numatyti, kaip turėtų veikti grandinė, tačiau tik praktinis bandymas parodo, kaip ji veikia iš tikrųjų. Realiuose komponentuose pasireiškia nominalų paklaidos, įtampos kritimai, triukšmas, parazitinės varžos ir kiti veiksniai, kurių supaprastintuose skaičiavimuose dažnai nevertiname. Todėl laboratorinių darbų metu svarbu ne tik sujungti pateiktą schemą, bet ir iš anksto apskaičiuoti laukiamus rezultatus, juos išmatuoti, palyginti bei paaiškinti atsiradusius skirtumus.

Atlikdami praktinius darbus mokiniai mokysis saugiai naudotis laboratoriniu maitinimo šaltiniu, multimetru, osciloskopu ir kitomis priemonėmis, savarankiškai surinkti grandines, pastebėti jungimo klaidas ir vertinti matavimo rezultatus. Dalis darbų gali būti atliekama simulatoriuje, tačiau, kai įmanoma, verta juos pakartoti ir realioje grandinėje – taip geriausiai atsiskleidžia skirtumas tarp idealaus modelio ir tikro elektroninio įrenginio.

Laboratorinių darbų sąrašas (platesnis darbų aprašymas – atskirame dokumente):

1. Omo dėsnis, varžinis daliklis ir realus įtampos šaltinis

Patikrinti Omo dėsnį, išmatuoti srovę ir įtampos pasiskirstymą nuoseklojoje grandinėje. Sudaryti varžinį daliklį ir palyginti apskaičiuotą išėjimo įtampą su išmatuota verte. Papildomai ištirti, kaip daliklio išėjimo įtampa pasikeičia prijungus apkrovą, ir įvertinti realaus įtampos šaltinio vidinės varžos įtaką.

Apima: Omo dėsnį, rezistorius, jų paklaidą ir galią, varžinį daliklį bei realų įtampos šaltinį.

2. Kondensatoriaus įkrovimas ir RC grandinė

Stebėti kondensatoriaus įkrovimo ir iškrovimo procesus, apskaičiuoti grandinės laiko konstantą:

$$\tau = RC$$

Apskaičiuotą laiko konstantą palyginti su išmatuota verte. Bandymą pakartoti pakeitus rezistoriaus arba kondensatoriaus nominalą ir įvertinti, kaip tai veikia kondensatoriaus įkrovimo greitį.

Apima: kondensatorių, RC grandinę, laiko konstantą ir eksponentinį įtampos kitimą.

3. RC žemųjų ir aukštųjų dažnių filtrai

Sudaryti žemųjų ir aukštųjų dažnių RC filtrus. Signalo generatoriumi arba simulatoriumi keisti įėjimo signalo dažnį žemiau ir aukščiau apskaičiuoto ribinio dažnio. Išmatuoti įėjimo bei išėjimo signalų amplitudes ir pagal rezultatus sudaryti filtro dažninės charakteristikos taškus.

Apima: impedansą, žemųjų ir aukštųjų dažnių filtrus, ribinį dažnį, amplitudės slopinimą bei fazės pokytį.

4. Induktoriaus ir RL grandinės tyrimas

Stebėti srovės didėjimą ir mažėjimą RL grandinėje. Iširti įtampos impulsą, atsirandantį atjungus relės ritę, ir palyginti signalą, kai apsauginis diodas prijungtas ir kai jo nėra.

Apima: induktorių, RL grandinę, elektromagnetinę relę ir induktyviosios apkrovos apsaugą.

5. Fotorezistoriaus ir NTC termistoriaus charakteristikos

Išmatuoti fotorezistoriaus varžą esant skirtingam apšvietimui ir NTC termistoriaus varžą esant skirtingai temperatūrai. Abu jutiklius įjungti į varžinio daliklio grandinę ir stebėti išėjimo įtampos pokyčius. Pagal matavimo rezultatus sudaryti jutiklių charakteristikas.

Apima: fotorezistorių, NTC termistorių, varžinį daliklį ir analoginio signalo formavimą.

6. Diodinis lygintuvas ir įtampos filtravimas

Naudojant tik saugų izoliuotą 6–12 V AC šaltinį, sudaryti vienus arba tiltelinį lygintuvą. Osciloskopu stebėti signalo formą prieš lygintuvą, už jo ir prijungus filtravimo kondensatorių. Keisti apkrovą bei kondensatoriaus talpą ir matuoti išlygintos įtampos pulsacijas.

Apima: transformatorių, diodus, lygintuvą, filtravimo kondensatorių ir maitinimo įtampos pulsacijas.

7. Stabilitronas ir šviesos diodas

Pirmoje darbo dalyje sudaryti stabilitroninį įtampos ribotuvą ir ištirti jo išėjimo įtampą keičiantis maitinimo įtampai bei apkrovai. Antroje dalyje apskaičiuoti šviesos diodo srovę ribojantį rezistorių ir patikrinti LED srovės bei ryškumo priklausomybę.

Apima: stabilitroną, šviesos diodą, srovės ribojimą ir komponentų galios skaičiavimą.

8. Dvipolis tranzistorius kaip jungiklis

Dvipoliu tranzistoriumi valdyti šviesos diodą arba mažą relę. Apskaičiuoti bazės rezistorių, išmatuoti bazės ir kolektoriaus srovės bei nustatyti tranzistoriaus kolektoriaus ir emiterio sotes įtampą. Palyginti paprasto dvipolio tranzistoriaus ir Darlingtono junginio veikimą.

Apima: BJT tranzistorių, srovės stiprinimo koeficientą, sotes režimą, Darlingtono tranzistorių ir relės valdymą.

9. MOSFET ir PWM apkrovos valdymas

MOSFET tranzistoriumi valdyti LED juostą, mažą nuolatinės srovės variklį arba kitą žemos įtampos apkrovą. Keičiant PWM signalo darbo ciklą stebėti apkrovai perduodamos vidutinės galios, LED ryškumo arba variklio greičio pokyčius.

Apima: lauko tranzistorių, PWM valdymą, vartų grandinę, galios nuostolius ir induktyviosios apkrovos apsaugą.

10. Optopora ir galvaninė izoliacija

Sudaryti grandinę, kurioje vienos maitinimo sistemos signalas per optoporą valdo kitą elektriškai atskirtą grandinę. Apskaičiuoti optoporos šviesos diodo rezistorių, išmatuoti įėjimo ir išėjimo srovės bei įvertinti srovės perdavimo koeficientą CTR.

Papildomai simulatoriuje galima palyginti optoporos, fototranzistoriaus ir kieto kūno relės veikimo principus.

Apima: optoporą, fototranzistorių, galvaninę izoliaciją, CTR koeficientą ir SSR veikimo principą.

11. Operacinio stiprintuvo grandinės

Sudaryti įtampos kartotuvo ir neinvertuojančio stiprintuvo grandines. Išmatuoti įėjimo bei išėjimo signalus, patikrinti apskaičiuotą stiprinimo koeficientą ir nustatyti, kas atsitinka bandant gauti išėjimo įtampą, viršijančią operacinio stiprintuvo galimybes.

Apima: operacinį stiprintuvą, neigiamą grįžtamąjį ryšį, buferį, stiprinimo koeficientą ir išėjimo sotį.

12. Komparatorius, Šmito trigeris ir mygtuko kontaktų atšokimas

Komparatoriumi palyginti kintamą įėjimo įtampą su nustatyta atramine įtampa. Stebėti nestabilų persijungimą, kai įėjimo signalas yra arti slenksčio, tada pridėti teigiamą grįžtamąjį ryšį ir suformuoti histerezę. Papildomai osciloskopu stebėti mechaninio mygtuko kontaktų atšokimą ir jį slopinti RC filtru arba Šmito trigeriu.

Apima: komparatorių, perjungimo slenkstį, histerezę, Šmito trigerį ir mechaninių kontaktų filtravimą.

13. Loginiai elementai ir atminties grandinė

Patikrinti AND, OR, NOT, NAND ir NOR loginių elementų tiesos lenteles. Iš NAND arba NOR elementų sudaryti RS trigerį ir parodyti, kad ši grandinė gali išsaugoti ankstesnę loginę būseną.

Apima: loginius lygius, loginius elementus, tiesos lenteles, grįžtamąjį ryšį ir paprasčiausią atminties grandinę.

14. ADC, DAC ir mikrovaldiklis

Potenciometro arba temperatūros jutiklio signalą nuskaityti mikrovaldiklio ADC keitikliu. Gautą skaitmeninį kodą perskaičiuoti į įtampą ir rezultatą parodyti ekrane arba nuosekliajame terminale. DAC keitikliu arba filtruotu PWM signalu suformuoti analoginę išėjimo įtampą.

Papildomai ištirti, kaip matavimo rezultatą veikia ADC skiriamoji geba, atraminė įtampa, kvantavimas ir įėjimo signalo triukšmas.

Apima: ADC, DAC, PWM, atraminę įtampą, kvantavimą ir mikrovaldiklio programavimą.

13. Baigiamasis žodis

Šioje knygoje susipažinote su pagrindiniais elektronikos dėsniais, svarbiausiais komponentais, jų veikimo principais ir taikymu elektroninėse grandinėse. Išmokote atpažinti schemų elementus, suprasti įtampos, srovės ir varžos ryšį, nagrinėti paprastas grandines bei naudotis pagrindinėmis matavimo ir darbo priemonėmis. Šios žinios yra pagrindas, kuriuo remiantis galima pereiti prie sudėtingesnių elektronikos sistemų kūrimo.

Tačiau elektronikos geriausiai išmokstama ne vien skaitant. Tikrasis supratimas atsiranda tada, kai schema surenkama, išmatuojami jos signalai, randama klaida ir išsiaiškinama, kodėl rezultatas skiriasi nuo teorinio skaičiavimo. Todėl kviečiame nebijoti eksperimentuoti, naudotis simulatoriais, atlikti laboratorinius darbus ir savarankiškai kurti nedidelius projektus. Net ir neveikianti schema yra vertinga mokymosi dalis, jei pavyksta nustatyti jos gedimo priežastį.

Šios knygos tęsinys bus skirtas praktinei elektronikai ir realių įrenginių kūrimui. Jame numatoma išsamiau nagrinėti schemų projektavimą ir simuliaciją, mikrovaldiklių programavimą, jutiklių bei vykdyklių prijungimą, signalų matavimą, spausdintinių plokščių projektavimą ir surinkimą. Teorinės žinios bus taikomos kuriant veikiančius projektus – nuo paprastų indikatorių ir automatinių valdiklių iki duomenis renkančių bei tarpusavyje komunikuojančių sistemų.

Elektronika yra sritis, kurioje visada lieka ką atrasti. Kiekvienas naujas komponentas, matavimas ar savarankiškai sukurta schema plečia supratimą ir suteikia galimybę idėją paversti realiai veikiančiu įrenginiu. Tegul ši knyga tampa ne mokymosi pabaiga, o pradžia tolesniam keliui į praktinę elektroniką, programavimą ir kūrybinę inžineriją!

Literatūra ir šaltiniai

Užsienio literatūra

1. Horowitz P., Hill W. *The Art of Electronics*. 2nd & 3rd ed. Cambridge University Press.
2. Kleitz W. *Digital Electronics: A Practical Approach*. 5th ed. Pearson / Prentice Hall.
3. Scott H. *Designing Electronics That Work*.
4. Pressman A. I., Billings K., Morey T. *Switching Power Supply Design*. 3rd ed. McGraw-Hill, 2009.
5. Castilla M. (red.). *Control Circuits in Power Electronics*. IET Power and Energy Series 72, 2016.
6. Smith D. *Circuit Analysis for Complete Idiots*, 2023.
7. Brown G. *Discovering the STM32 Microcontroller*, 2012 (CC BY-NC-SA 3.0).

Lietuviški vadovėliai ir mokymo(si) medžiaga

8. Masiokas S. *Elektrotechnika*.
9. Kirvaitis R. *Loginės schemos*. Vilnius: Technika.
10. Kirvaitis R., Martavičius R. *Analoginė elektronika*. Vilnius: Technika.
11. *Pramoninė elektronika 1: puslaidininkiniai prietaisai ir stiprintuvai*.
12. *Elektrotechnika ir pramoninės elektronikos pagrindai*.
13. Undžėnas V. *Kompiuterinė technika*. Mokymo medžiaga. Vilniaus universitetas, 2009.
14. Jonkus V. *Mikrovaldikliai elektroninėse grandinėse*. Mokymo priemonė. Vilnius, 2008.

Internetiniai šaltiniai ir įrankiai

15. Komponentų gamintojų dokumentacija (datasheet).
16. Falstad, EveryCircuit, TINA-TI.
17. Viešai prieinami elektronikos šaltiniai.