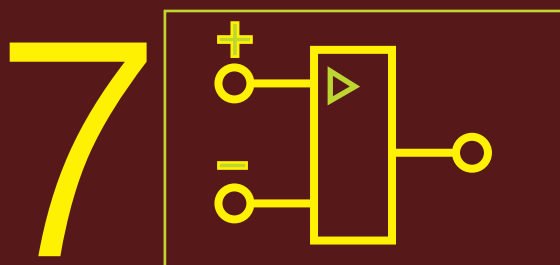
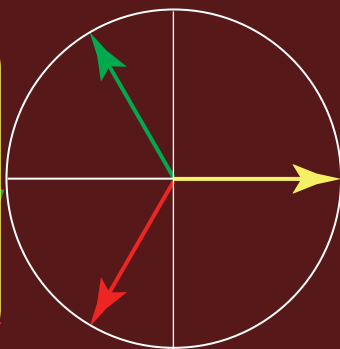
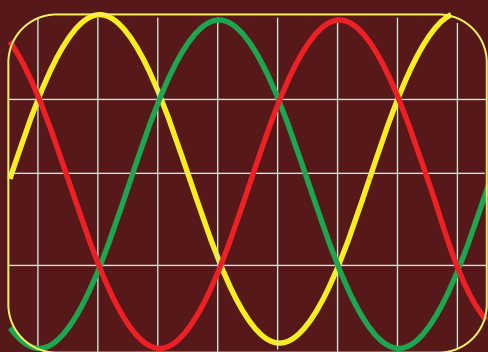


S.Masiokas

Elektro technika



Elektronikos
įtaisai

VADOVĖLIS
AUKŠTOSIOMS
MOKYKLOMS

7.1. Vienfaziai lygintuvai 174

- 7.1.1. Lygintuvo struktūrinė schema / 174
 - 7.1.2. Svarbiausi lygintuvų parametrai / 175
 - 7.1.3. Dvipusio lyginimo lygintuvai / 177
 - 7.1.4. Išlygintos įtampos pulsacija / 179
 - 7.1.5. Įtampos stabilizavimas / 180
-

7.2. Trifaziai ir valdomieji lygintuvai 181

- 7.2.1. Trifazis lygintuvas su neutraliuoju laidu / 182
 - 7.2.2. Trifazis tiltelinis lygintuvas / 182
 - 7.2.3. Valdomojo lygintuvo veikimo principas / 183
-

7.3. Stiprintuvų savybės ir charakteristikos 184

- 7.3.1. Struktūrinė schema / 184
 - 7.3.2. Stiprintuvų parametrai ir charakteristikos / 184
-

7.4. Elektroninio stiprintuvo veikimo principas ir vidiniai ryšiai 187

- 7.4.1. Atstojamoji schema / 187
 - 7.4.2. Darbo režimai / 189
 - 7.4.3. Daugiapakopiai stiprintuvai / 189
 - 7.4.4. Grįžtamieji ryšiai / 190
-

7.5. Vienos pakopos tranzistoriniai stiprintuvai 192

- 7.5.1. Stiprintuvas su lauko tranzistoriumi / 192
 - 7.5.2. Stiprintuvas su dvipoliu tranzistoriumi / 194
 - 7.5.3. Galios stiprintuvų ypatumai / 196
 - 7.5.4. Vientaktis galios stiprintuvas / 196
 - 7.5.5. Dvitaktis galios stiprintuvas / 197
-

7.6. Specialiosios paskirties stiprintuvai 198

- 7.6.1. Selektyvusis stiprintuvas / 198
 - 7.6.2. Kartotuvai / 198
 - 7.6.3. Nuolatinės srovės stiprintuvas; nulinis dreifas / 199
 - 7.6.4. Diferencinis nuolatinės srovės stiprintuvas / 199
 - 7.6.5. Operaciniai stiprintuvai / 200
-

7.7. Elektroniniai generatoriai 202

- 7.7.1. Generatoriaus susižadinimo sąlygos / 202
 - 7.7.2. Harmoninių virpesių autogeneratorius / 203
 - 7.7.3. Generuojamųjų virpesių stabilizavimas / 203
-

7.8. Samprata apie impulsinę elektroniką 204

- 7.8.1. Elektrinio impulso charakteristikos / 204
 - 7.8.2. Elektroninių elementų veikimas jungiklio režimu / 205
 - 7.8.3. Tiesinės impulsų formavimo grandinės / 206
 - 7.8.4. Netiesinės impulsų formavimo grandinės / 207
-

7.9. Samprata apie loginius elementus 208

- 7.9.1. Pagrindiniai loginiai veiksmai / 208
 - 7.9.2. Inversiniai loginiai veiksmai / 210
 - 7.9.3. Elektroniniai loginiai elementai / 210
 - 7.9.4. Trigeris / 212
-

Kontroliniai klausimai ir užduotys 212

Daugelis šiuolaikinių elektroninių įrenginių yra sudaryti iš įvairių įtaisų: lygintuvų, inverterių, stabilizatorių, stiprintuvų, generatorių, multivibratorių, loginių elementų bei kitų. Kiekviename įrenginyje jie atlieka konkrečias funkcijas, ir jų parametrai turi būti tarpusavyje suderinti. Tas pačias funkcijas atliekantys elektronikos įtaisai gali būti naudojami kaip savarankiški vienetai arba tik kaip sudėtinė elektroninės ar kitokios aparatūros dalis – mazgai. Pavyzdžiui, radijo aparate įmontuotas lygintuvas yra jo mazgas, o galvaniniame ceche įrengtą lygintuvą galime laikyti atskiru elektroniniu įtaisu ir netgi įrenginiu.

Elektroniniai įrenginiai vis daugiau naudojami pramonėje. Tai ne tik staklių ir robotų elektroninė valdymo aparatūra, bet ir elektros pavarų jėgos įrenginiai, kurių galia siekia dešimtis ir net tūkstančius kilovatų. Supergalingi lygintuvai ar inverteriai, keičiantys kintamąją srovę nuolatine ar atvirkščiai, įrengiami energetinėse sistemose. Tokių įrenginių galia matuojama šimtais ir tūkstančiais megavatų, o jų vardinės įtampos esti šimtai kilovoltų.

Taigi šiuolaikinės **elektronikos įrenginiai naudojami plačiame galios, įtampos bei dažnio diapazone** (nuo mikrovatų iki megavatų, nuo milivoltų iki kilovoltų, nuo nuolatinės srovės iki gigahercų dažnio kintamosios). **Bet nors ir labai plati elektroninių įrenginių taikymo sritis ir jų parametrų diapazonas, analogiškų įtaisų (lygintuvų, stiprintuvų ir kitų) struktūra bei veikimo principai yra panašūs.**

7.1

Vienfaziai lygintuvai

7.1.1. Lygintuvo struktūrinė schema. Lygintuvų paskirtis – išlyginti kintamąją srovę, t. y. paversti ją nuolatine. Nuolatinė srovė reikalinga elektroninei aparatūrai, nuolatinės srovės elektros varikliams, įvairiems elektrochemijos, elektrotechnologijos bei kitiems specialios paskirties įrenginiams.

Bendruoju atveju visą lyginimo įtaiso struktūrą galima atvaizduoti 7.1 pav. parodyta schema. Praktiškai kai kuriuose lygintuvuose gali nebūti vieno ar kito mazgo. Pavyzdžiui, įmonės cecho lygintuvui nereikalingas filtras pulsacijai mažinti ir išlygintos įtampos stabilizatorius.

Transformatorius (I) skirtas lyginamos įtampos vertei suderinti su reikalinga išlygintos įtampos verte. Pavyzdžiui, tinklo įtampa yra 220 V kintamoji, o radijo aparatui reikia 9 V nuolatinės įtampos.

Svarbiausias lygintuvo mazgas (2) sudaromas iš lyginimo elementų – diodų. Jų varža tiesiogine kryptimi yra gana maža, o atgaline – pakankamai didelė. Nors tiesiogine kryptimi diodo varža maža, bet ji nelygi nuliui, todėl diode yra gaunamas nedidelis įtampos kritimas tiesiogine kryptimi. Mažos galios lygintuvuose tai neturi praktinės reikšmės, tačiau naudojant galingus pramoninius lygintuvus, į šį reiškinį tenka atsižvelgti.

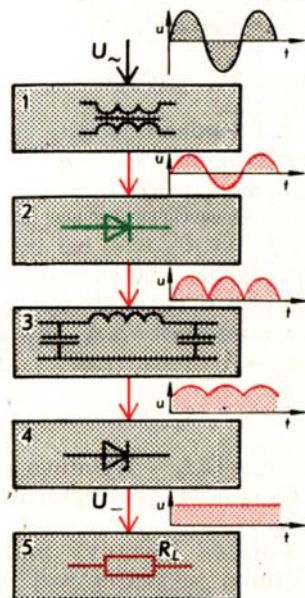
Pavyzdžiui, jei diodu tiesiogine kryptimi teka srovė $I_F = 400$ A ir jame yra įtampos kritimas $U_F = 1,0$ V, tai diodo nuostolių galia $P_F = I_F U_F = 400 \cdot 1,0 = 400$ W. Jeigu pramoniniame lygintuve yra sumontuoti šeši tokie diodai, tai jų nuostolių galia lygi 2,4 kW. Dėl to gali padidėti ne tik paties lygintuvo, bet ir patalpos temperatūra.

Filtrai (3) skirtas sumažinti išlygintos įtampos (arba srovės) pulsacijai. Pavyzdžiui, radio aparatuose išlygintos įtampos pulsacija sudaro pastovų girdimą foną, menkinantį atkuriamojo garso kokybę. Kai kada filtro gali ir nebūti, jei tam tikra išlygintos srovės pulsacija yra leistina, pavyzdžiui, kai lygintuvas tiekia srovę elektros varikliui ar galvaninei voniai.

Įtampos stabilizatorius (4) skirtas palaikyti pastovaus didumo išlygintai įtampai, kai svyruoja apkrovos srovė ar lyginamoji įtampa. Pavyzdžiui, reikia, kad televizoriaus vaizdo skaitis nekistų, kai tinklo įtampa svyruoja.

Lygintuvo apkrova (5) yra imtuvas, kurį turi maitinti lygintuvas ir kurio savybės diktuoja reikalavimus visam lygintuvo kompleksui. Viena iš svarbiausių imtuvo charakteristikų yra jo varža. Kad būtų paprasčiau nagrinėti toliau, laikysime, jog imtuvo varža yra tik aktyvioji – R_L .

Lygintuvų schemas ir veikimo principus išnagrinėsime laikydami, kad transformatorius ir diodai yra idealūs. Tai reiškia, kad: a) transformatoriaus apvijų vidinės varžos lygios nuliui ir b) diodų varža tiesiogine kryptimi lygi nuliui, o varža atgaline kryptimi yra be galo didelė (žr. 6.12 pav., a). Šios prielaidos galimos, nes apkrovos varža paprastai esti gerokai didesnė už transformatoriaus varžas bei diodų varžas tiesiogine kryptimi. Diodų varžos atgaline kryptimi visada žymiai didesnės už apkrovos varžą.



7.1 pav. Bendroji lygintuvo struktūrinė schema: 1 – transformatorius, 2 – lyginimo mazgas, 3 – filtras, 4 – įtampos stabilizatorius, 5 – apkrova

7.1.2. Svarbiausieji lygintuvų parametrai. Jais yra laikomi šie dydžiai.

1. Vidutinė išlyginta įtampa $\bar{U}$ ir srovė $\bar{I}$. Išlyginta įtampa u ir srovė i , praktiškai yra nesinusinės laiko funkcijos. Bendru atveju jų vidutinės vertės yra lygios nuolatiniams dedamosioms (žr. 2.9.2): $\bar{U} = U_0$; $\bar{I} = I_0$.

2. Pulsacijos koeficientas (dažniausiai skaičiuojamas įtampos):

$$k_p = U_{(1)m} / U_0; \quad (7.1)$$

čia $U_{(1)m}$ – išlygintos įtampos pirmosios harmonikos amplitudė.

3. Vidutinė tiesioginė diodu tekanti srovė $\bar{I}_F$ ir didžiausia atgalinė diodui tenkanti įtampa U_{Rm} yra svarbūs parametrai diodams parinkti.

4. Transformatoriaus antrinės įtampos ir srovės efektyvės vertės U_2 ir I_2 bei transformatoriaus antrinės apvijos išnaudojimo koeficientas k_{tr} yra svarbūs, kai reikia apskaičiuoti ir parinkti lygintuvui transformatorių.

Transformatoriaus antrinės apvijos išnaudojimo koeficientas

$$k_{tr} = P_0 / S_2; \quad (7.2)$$

čia $P_0 = U_0 I_0$ – lygintuvo išėjimo aktyvioji galia, $S_2 = U_2 I_2$ – transformatoriaus antrinės apvijos pilnutinė galia.

Minėtus lygintuvų parametrus plačiau paaiškinsime, pasirinkę pavyzdžiu patį paprasčiausią **vienfazį vienpusio lyginimo lygintuvą**. Jį sudaro transformatorius ir vienas diodas VD , kuris su apkrova R_L yra sujungtas nuosekliai (7.2 pav.)

Transformatoriaus antrinė įtampa kinta sinuso dėsnio: $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$. Tą pusperiodį, kai įtampos u_2 poliarumas yra toks, kad diodas laidus, antrine transformatoriaus grandine teka srovė. Tai yra transformatoriaus antrinės apvijos, diodo tiesioginė bei apkrovos srovė: $i_2 = i_F = i$. Kitą įtampos u_2 pusperiodį antrine grandine srovė neteka: $i_2 = i_R = i = 0$. Apkrovos įtampa $u = R_L i$ yra tos pačios fazės ir kinta tuo pačiu dėsnio, kaip srovė. Priminsime, kad idealaus diodo $u_F = 0$, atgaline kryptimi idealiu diodu srovė neteka. Atgalinė diodo įtampa $u_R = 0$, kai $0 \leq t \leq T/2$ ir $u_R = u_2$, kai $T/2 \leq t \leq T$.

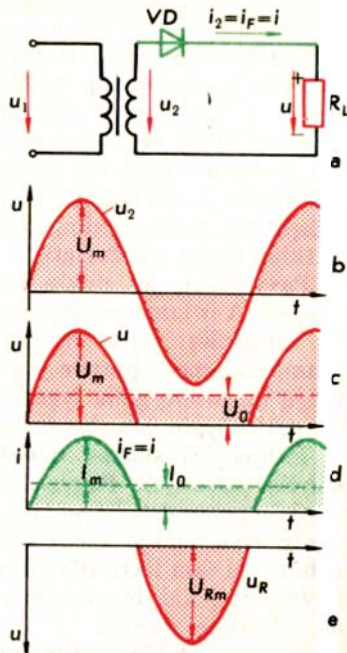
Vienfazio vienpusio lyginimo lygintuvo **išlyginta įtampa ir srovė vieną pusperiodį kinta sinuso dėsnio, o kita yra lygios nuliui**. Dėl to jų vidutinės vertės per visą periodą galima apskaičiuoti šitaip:

$$U_0 = \frac{1}{T} \left[\int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt + \int_{T/2}^T 0 dt \right];$$

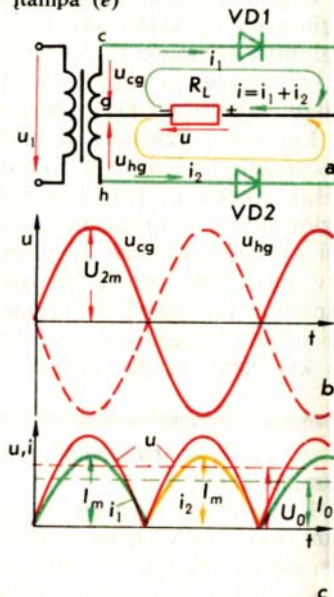
$$I_0 = \frac{1}{T} \left[\int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt + \int_{T/2}^T 0 dt \right].$$

Suintegravę ir prisiminę, kad $U_m = U_{2m}$, turime:

$$U_0 = U_{2m} / \pi; \quad I_0 = I_m / \pi. \quad (7.3)$$



7.2 pav. Vienfazio vienpusio lyginimo lygintuvo schema (a), įėjimo (b) ir išėjimo (c) įtampos, apkrovos srovė (d), diodo atgalinė įtampa (e)



7.3 pav. Vienfazio dvipusio lyginimo lygintuvo su vidurine atšaka schema (a), transformatoriaus antrinės įtampos (b), išlyginta įtampa ir srovė (c)

Apskaičiavę išlygintos įtampos pirmosios harmonikos amplitudę, gauname $U_{(1)m} = U_{2m}/2$. Įrašę ją ir U_0 vertę į (7.1), turime $k_p = \pi/2 = 1,57$. Vidutinė tiesioginė diodo srovė $I_T = I_0$, didžiausia diodui tenkanti atgalinė įtampa $U_{RM} = U_{2m}$.

Antrinės apvijos įtampos $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$ efektinė vertė $U_2 = U_{2m}/\sqrt{2}$. Kadangi transformatoriaus antrine apvija srovė i_2 teka tik kas antrą pusperiodį, jos efektinė vertė (žr. (2.4)):

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_2^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\int_0^{T/2} I_m^2 \sin^2 \omega t dt + \int_{T/2}^T 0 dt \right]} = \frac{1}{2} I_m.$$

Įrašę U_{2m} bei I_{2m} vertes iš (7.3), turime:

$$U_2 = (\pi/\sqrt{2}) U_0; \quad I_2 = (\pi/2) I_0. \quad (7.4)$$

Įrašę visų dydžių vertes į (7.2), gauname, kad $k_{tr} = 0,29$.

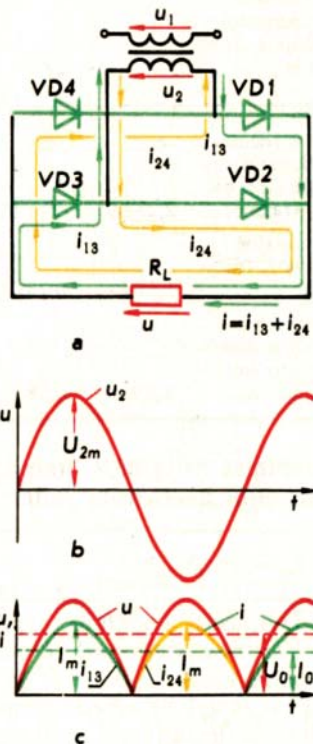
Dėl didelės pulsacijos ir mažo transformatoriaus antrinės apvijos išnaudojimo koeficiento vienfaziai vienpusio lyginimo lygintuvai praktikoje naudojami labai retai. Šių ir kitokių lygintuvų parametrų palyginimui sudaryta 7.1 lentelė.

7.1.3. Dvipusio lyginimo lygintuvai. Praktiškai yra naudojamos dvi grandinės: su transformatoriaus antrinės apvijos vidurine atšaka (Mitkevičiaus schema) (7.3 pav.) ir tiltelio (Herco schema) (7.4 pav.). Abiems lygintuvams būdinga tai, kad vieną pusperiodį srovė (paveiksluose pažymėta žalia linija) teka viena lyginimo grandinės dalimi, o kitą pusperiodį (pažymėta geltona linija) – kita dalimi. Abu pusperiodžius apkrovos srovė i yra tos pačios krypties.

Grandinėje su vidurine atšaka antrinė transformatoriaus apvija sudaroma iš dviejų vienodų dalių, kurių įtampos $u_{cg} = -u_{hg} = u_2 = U_{2m} \sin \omega t$. Vieną pusperiodį veikia viena antrinės apvijos dalis ir vienas diodas, antrą pusperiodį – antra dalis ir kitas diodas.

Tiltelinio lygintuvo grandinė yra sudaryta iš keturių diodų. Vieną pusperiodį srovė teka diodu VD1, apkrova R_L ir diodu VD3, kitą pusperiodį – diodu VD2, apkrova R_L ir diodu VD4.

Dvipusio lyginimo lygintuvų parametrai (žr. 7.1 lentelę) yra šitokie. Vidutinė išlyginta įtampa ir srovė yra dvigubai didesnės nei vienpusio lyginimo lygintuvo: $U_0 = 2U_{2m}/\pi$; $I_0 = 2I_{2m}/\pi$. Kai per vieną kintamosios srovės periodą



7.4 pav. Tiltelinio lygintuvo schema (a), transformatoriaus antrinė įtampa (b), išlyginta įtampa ir srovė (c)

7.1 lentelė. Pagrindiniai lygintuvų parametrai

Parametras	Lygintuvas				
	vienfazis		trifazis		
	vienpusio lyginimo	dvipusio lyginimo		su neutraliuoju laidu	tiltelinis
		su vidurine atšaka	tiltelinis		
Kiekvieno diodo vidutinė išlyginta srovė I_F	I_0	$0,50 I_0$	$0,50 I_0$	$0,333 I_0$	$0,333 I_0$
Didžiausia atgalinė diodo įtampa U_{Rm}	$3,14 U_0$	$3,14 U_0$	$1,57 U_0$	$2,09 U_0$	$1,05 U_0$
Pulsacijos koeficientas k_p	1,57	0,667	0,667	0,25	0,057
Pulsacijos dažnis f_p , kai lyginamos kintamosios įtampos dažnis – f	f	$2f$	$2f$	$3f$	$6f$
Transformatoriaus: a) antrinė įtampa U_2 (fazinė)	$2,23 U_0$	$1,11 U_0$	$1,11 U_0$	$0,855 U_0$	$0,427 U_0$
b) antrinė srovė I_2 (fazinė)	$1,57 I_0$	$0,785 I_0$	$1,11 I_0$	$0,578 I_0$	$0,818 I_0$
c) antrinės apvijos išnaudojimo koeficientas k_{tr}	0,29	0,58	0,83	0,68	0,95

gaunamas išlygintos įtampos pusbangių skaičius $m \geq 2$, pulsacijos koeficientą galima apskaičiuoti paprasčiau:

$$k_p = 2/(m^2 - 1). \quad (7.5)$$

Dvipusio lyginimo lygintuvų $k_p = 0,667$.

Vidutinė tiesioginė diodo srovė $I_F = I_0/2$. Didžiausia atgalinė diodo įtampa: a) grandinėje su vidurine atšaka – $U_{Rm} = 2U_{2m}$; b) tiltelio grandinėje srovė teka dviem diodais, kurie sujungti nuosekliai, todėl $U_{Rm} = U_{2m}$.

Lygintuvo su vidurine atšaka transformatoriaus išnaudojimo koeficientas $k_{tr} = 0,58$, lyginimo tiltelio – $k_{tr} = 0,83$.

Pagal schemą su vidurine atšaka yra jungiami didelės atgalinės įtampos vakuuminiai diodai, kai reikalinga aukšta išlyginta įtampa. Pavyzdžiui, lygintuvas televizoriaus kineskopo anodinei įtampai (keliolikos kV) arba Rentgeno vamzdžio anodinei įtampai (kelių dešimčių kV) gauti.

Puslaidininkiniai diodai dažniausiai jungiami pagal tiltelio schemą, nes galima parinkti mažesnės atgalinės įtampos diodus, transformatorius yra mažesnės masės ir pigesnis. Svarbiausias lyginimo tiltelio trūkumas yra tas, kad jam reikia dvigubai daugiau diodų. **Lyginimo tilteliai vis dažniau yra gaminami viename korpuse, išvedant tik kintamosios įtampos (įėjimo) ir nuolatinės įtampos (išėjimo) prijungimo gnybtus.** Jie yra kompaktiški, patikimi, pigūs ir patogūs.

7.1.4. Išlygintos įtampos pulsacija. Jai sumažinti naudojami įvairūs filtrai. Plačiai taikomi, ypač pramonės elektronikoje, įvairūs **pasivūs filtrai**, kurie **sudaromi iš talpinių ir induktyviųjų elementų – kondensatorių ir ričių.**

Talpinis filtras prijungiamas prie lygintuvo išėjimo gnybtų lygiagrečiai apkrovai (7.5 pav., a). Išlygintai įtampai didėjant, kondensatorius įsikrauna iki jos amplitudinės vertės (7.5 pav., b). Įtampai pradėjus mažėti, kondensatorius išsikrauna per apkrovą. Kuo didesnė apkrovos varža, tuo ilgiau trunka pereinamasis procesas (žr. 4.2). Kuo kondensatorius išsikrauna lėčiau, tuo esti mažesnė išlygintos įtampos pulsacija. Dėl to **talpinis filtras yra tuo efektyvesnis, kuo apkrovos varža didesnė, t. y., kuo lygintuvo apkrova (srovė) yra mažesnė.**

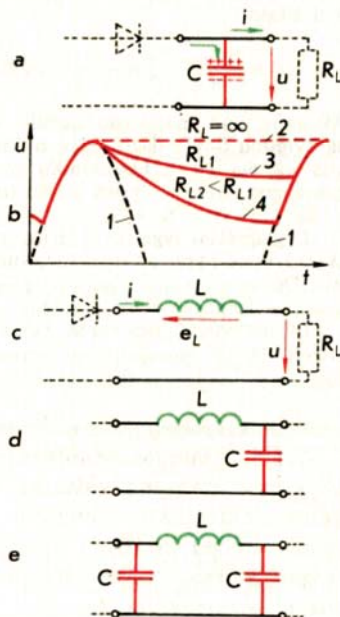
Induktyvų filtras sudaro induktyvumo ritė (gali būti su uždaru magnetolaidžiu ar droselis), įjungta nuosekliai su apkrova (7.5 pav., c). Kintant rite ir apkrova tekančiai srovei i , ritėje indukuojama savii indukcijos EVJ: $e_L = L di/dt$. Ši EVJ priešinas srovės kitimui. Kuo didesnė išlyginta srovė ir kuo ji sparčiau kinta, tuo induktyvusis filtras yra efektyvesnis. Todėl jis naudojamas, kai apkrovos srovės yra didelės.

Filtro kokybė proporcinga filtracijos koeficientui:

$$k_f = k_{p1}/k_{p2}; \quad (7.6)$$

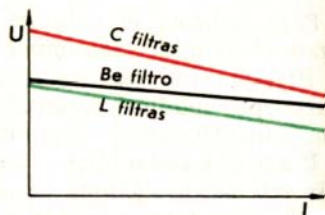
čia k_{p1} ir k_{p2} – lygintuvo be filtro ir lygintuvo su filtru pulsacijos koeficientai.

Praktikoje plačiai naudojami efektyvesni filtrai, kurie sudaromi iš keleto talpinių ir induktyviųjų elementų. Dažniausiai sudaromos „Γ“ (gama) bei „Π“ (pi) tipo schemas (7.5 pav., d ir e).



7.5 pav. Elektriniai filtrai: a – C tipo; b – vienosio lyginimo lygintuvo išlygintos įtampos kreivės, kai filtro nėra (1) ir kai yra C filtras, esant įvairiam apkrovos varžos didumui (2, 3, 4); c – L; d – „Γ“; e – „Π“ tipo

Prijungus filtrą pasikeičia lygintuvo išorinė charakteristika – išlygintos išėjimo įtampos priklausomybė nuo apkrovos srovės (7.6 pav.). Didinant apkrovą, lygintuvo be filtro išėjimo įtampos vidutinė vertė U_0 šiek tiek mažėja, nes gaunamas įtampos kritimas transformatoriaus apvijose bei dioduose. Prijungus talpinį filtrą, vidutinė išėjimo įtampos vertė U_0 yra didesnė, kai lygintuvas mažai apkrautas, nes yra mažesnė pulsacija. Didinant apkrovą, pulsacija didėja, todėl U_0 mažėja labiau. Kai prijungiamas induktyvusis filtras, išorinė lygintuvo charakteristika gali būti įvairi, priklausomai nuo filtro parametru. Didinant apkrovos srovę įtampa dažniausiai mažėja. Kai filtro elementai induktyvieji ir talpiniai, jų parametrai parenkami taip, kad didesnę įtaką turėtų talpiniai elementai. Realų lygintuvų išėjimo įtampa šiek tiek mažėja, didinant jų apkrovą.



7.6 pav. Lygintuvo be filtro ir su C bei L filtrais išorinės charakteristikos

Elektrinių filtrų veikimą galima paaiškinti, taikant nesinusinių srovių bei įtampų grandinių tyrimo metodus (žr. 2.9). Pavyzdžiui, dvipusio lyginimo lygintuvo išlygintą pulsuojančią įtampą galime užrašyti šitaip:

$$u(t) = \frac{4U_{zm}}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \dots \right).$$

Matome, kad mažiausio dažnio išlygintos įtampos harmonika kinta dvigubu tinklo dažniu 2ω , o kitų harmonikų dažnis didėja ir lygus 4ω , 6ω ir t. t. Harmonikų amplitudės palaipsniui mažėja ir proporcingos tokioms prieš skliaustus iškelto daugiklio dalims: $1/3$, $1/15$, $1/35$ ir t. t.

Lygiagrečiai lygintuvui prijungus kondensatorių, pastarojo varža $X_C = 1/(k\omega C)$ yra tuo mažesnė, kuo didesnis įtampos harmonikos dažnis. Dėl to kondensatoriumi teka aukštesniųjų harmonikų srovės, o apkrova – žemesniųjų ir nuolatinę srovę dedamoji.

Induktyvumo ritės varža $X_L = k\omega L$, ir ji tuo didesnė, kuo didesnis srovės dažnis. Nuosekliai su apkrova įjungta ritė netrukdomai praleidžia nuolatinę srovę dedamąją, bet silpnina aukštesniasias harmonikas.

7.1.5. Įtampos stabilizatorius. Kuo mažiau svyruoja išlygintos įtampos vidutinė vertė, tuo geresnės yra daugelio elektronikos įrenginių darbo sąlygos. Lygintuvo išėjimo įtampa priklauso nuo jo apkrovos, lyginamos kintamosios įtampos svyravimų, nuo lygintuvo bei filtro parametru.

Vienas iš paprasčiausių įtampos stabilizatorių yra parametrinis (7.7 pav.). Jį sudaro stabilitronas VD (žr. 6.2.4) ir tiesinis balastinis rezistorius R. Stabilizatoriaus darbo taškas yra stabilitrono (1) ir likusios tiesinės grandinės (2) voltamperinių charakteristikų sankirta A (žr. 1.7.3). Tiesinei voltamperinei charakteristikai (2) nubraižyti apskaičiuosime: 1) tuščiosios eigos įtampą, kai stabilitronas

atjungtas ($I_Z=0$): $U_{Z0}=R_L I=R_L U_0/(R_L+R)$; 2) trumpojo jungimo srovė, kai stabilizatoras sujungtas trumpai ($U_Z=0$): $I_k=U_0/R$.

Tarkime, kad pakito lygintuvo (ir stabilizatoriaus) apkrovos varža R_L . Jeigu $U_0=\text{const}$, tai trumpojo jungimo srovė nepakito: $I_k=U_0/R$. Tuščiosios eigos įtampa U_{Z0} priklauso nuo varžos R_L , todėl tiesinės voltamperinės charakteristikos padėtis keičiasi (7.7 pav., c). Sankirtos A'' ir A' rodo, kokios yra apkrovos varžos R_L leistinos vertės, kad, kintant srovei nuo $I_{Z\min}$ iki $I_{Z\max}$ stabilizatorius stabilizuotų įtampą $U_Z \pm \Delta U_Z$.

Kai $R_L=\text{const}$, bet kinta įėjimo įtampa U_0 , kinta ir trumpojo jungimo, ir tuščiosios eigos taško padėtis. Voltamperinės charakteristikos 2, 2' ir 2'' yra lygiagrečios tiesės (7.7 pav., d). Jų ir stabilizatorinio charakteristikos (1) sankirtos A'' ir A' rodo, kokios yra leistinos $U_0 \pm \Delta U_0$ kitiimo ribos, kad stabilizuota įtampa kistų ribose $U_Z \pm \Delta U_Z$, kintant srovei nuo $I_{Z\min}$ iki $I_{Z\max}$.

Stabilizatoriaus darbo kokybė nusakoma stabilizacijos koeficientu:

$$k_Z = \frac{\Delta U_0 / U_0}{\Delta U_Z / U_Z} \quad (7.7)$$

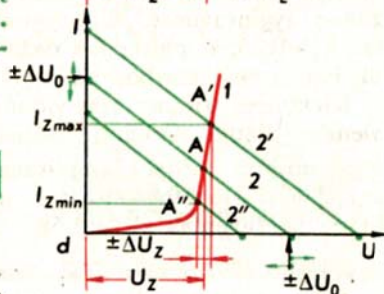
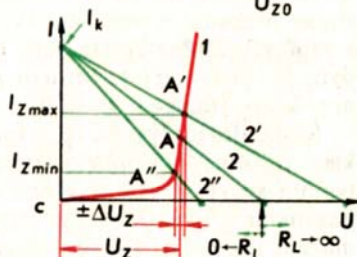
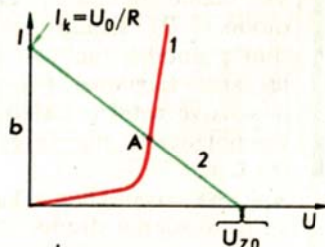
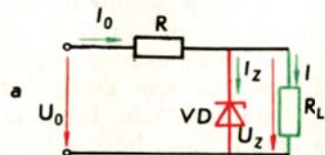
Kuo didesnis k_Z , tuo įtampa stabilizuojama geriau. Puslaidininkinių stabilizatorių $k_Z \approx 100$, dujinio išlydžio stabilizatorių $k_Z \approx 10$. Dėl didelių nuostolių balastiniame rezistoriuje bei stabilizatore parametrinių stabilizatorių naudingumo koeficientas dažniausiai esti apie 0,2–0,3. Dėl to šio tipo stabilizatoriai naudojami mažos galios lygintuvų įtampai stabilizuoti.

7.2

Trifaziai ir valdomieji lygintuvai

Trifaziai lygintuvai plačiai taikomi pramonėje maitinti nuolatinės srovės imtuvams: suvirinimo agregatams, elektrolizės vonioms, nuolatinės srovės varikliams. Jie pakeičia trifazę kintamąją srovę nuolatine elektrinio transporto pastotėse, laivuose, lėktuvuose. Netgi šiuolaikiniuose automobiliuose yra įrengiami trifaziai generatoriai, kuriuose gaminama trifazė srovė trifaziame lygintuve paverčiama nuolatine.

Trifazių lygintuvų grandinių yra daug, tačiau labiausiai paplitusios yra dvi: lygintuvas su neutraliuoju laidu ir tiltelinis lygintuvas (Larionovo schema).



7.7 pav. Parametrinio įtamos stabilizatoriaus schema (a), darbo taškas A (b), darbo taško poslinkiai, keičiant apkrovos varžą R_L (c) ir įėjimo įtampą $U_0 \pm \Delta U_0$ (d)

7.2.1. Trifazis lygintuvas su neutraliuoju laidu. Tai vienpusio lyginimo lygintuvas. Jis sudarytas iš trijų diodų, įjungtų į kiekvieną transformatoriaus antrinės apvijos fazę (7.8 pav.). Tarp sujungtos žvaigždės transformatoriaus apvijos neutraliojo mazgo ir visų diodų katodų, sujungtų į vieną mazgą, įjungiama apkrova, kurios varža R_L .

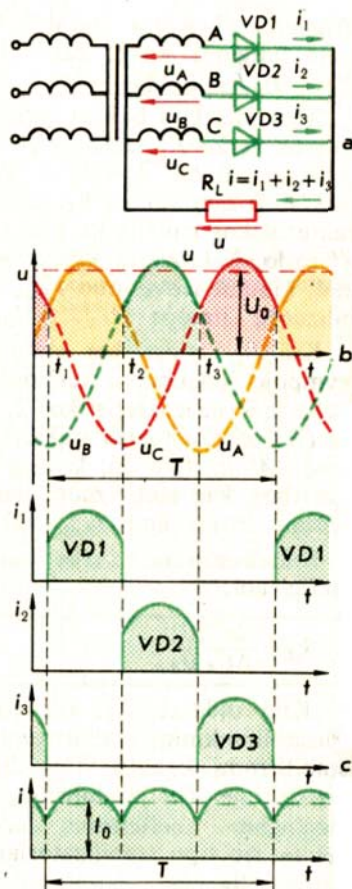
Kadangi visų diodų katodų potencialai vienodi, srovė teka tuo diodu, kurio anodo potencialas yra didžiausias. Pavyzdžiui, laiko intervale $t_1 - t_2$ didžiausia ir teigiama yra fazinė įtampa u_A . Dėl to didžiausias teigiamas yra diodo VD1 anodo potencialas; teka srovė i_1 . Kitų diodų anodai tuo metu turi arba neigiamą potencialą, arba teigiamą, bet mažesnį už diodo VD1, todėl jais srovė neteka. Laiko intervale $t_2 - t_3$ didžiausią anodo potencialą turi fazės B diodas VD2, teka srovė i_2 ir t. t.

Apkrova visą laiką teka vienos krypties srovė $i = i_1 + i_2 + i_3$. Kadangi diodo, kuriuo teka srovė, anodo potencialas niekada nesumažėja iki nulio, tai ir imtuvo įtampa u taip pat nebūna lygi nuliui, o pulsuoja (7.8 pav., b parodėta ištisine kreive). Imtuvo srovė i kinta tuo pačiu dėsniu kaip įtampa: $i = u/R_L$.

Šio trifazio lygintuvo pagrindiniai parametrai yra tokie: vidutinė išlyginta įtampa $U_0 = 1,17 U_{2f}$; vidutinė išlyginta srovė $I_0 = 1,73 I_{2f}$; čia U_{2f} ir I_{2f} – antrinė fazinė įtampa ir srovė. Kadangi išlyginta įtampa ir srovė nesumažėja iki nulio, tai jų pulsacija yra mažesnė nei vienfaziuose lygintuvuose. Šio lygintuvo pulsacijos koeficientas $k_p = 0,25$, o pulsacijos dažnis yra tris kartus didesnis už lyginamos įtampos dažnį (žr. 7.1 lentelę).

Kiekvienu diodu teka vidutinė srovė $\bar{I}_F = I_0/3$. Kiekvienam diodui tenkanti didžiausia atgalinė įtampa yra lygi linijinės įtampos amplitudei: $U_{Rm} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} U_{2f} = 2,09 U_0$. Transformatoriaus antrinės apvijos išnaudojimo koeficientas $k_{tr} = 0,68$.

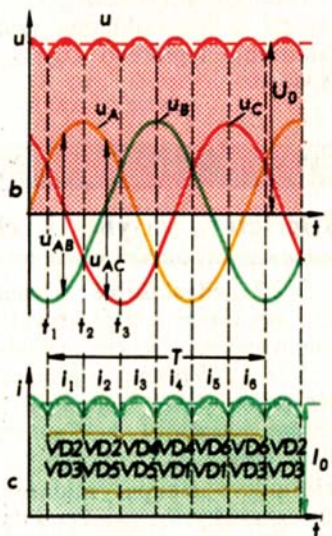
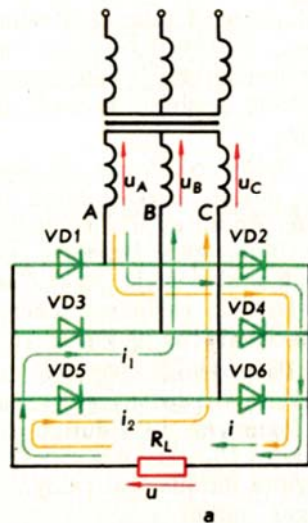
7.2.2. Trifazis tiltelinis lygintuvas. Šio tipo lygintuvai naudojami pramonėje, kur reikalingi galingi nuolatinės įtampos šaltiniai. Be to, jie naudojami šiuolaikiniuose automobiliuose, suvirinimo įtaisuose ir kt. Tai dvipusio lyginimo lygintuvas. Jame yra šeši diodai (7.9 pav.), kurie gali būti prijungti prie žvaigždės (γ) ar trikampio (Δ) sujungtos trifazio transformatoriaus antrinės apvijos. Tarkime, kad transformatoriaus antrinė apvija sujungta γ ir jos neutraliojo mazgo potencialas yra lygus nuliui. Tokiu atveju mazgų A, B ir C potencialai kinta taip kaip sinusinės fazinės įtampos u_A , u_B ir u_C .



7.8 pav. Trifazio lygintuvo su neutraliuoju laidu schema (a), fazinės įtampos ir išlyginta įtampa (b), diodų srovės ir išlyginta srovė (c)

Srovė gali tekėti ta nuosekliai sujungta apkrova ir dviejų diodų grandine, kurios potencialų skirtumas (linijinė įtampa) yra didžiausias. Pavyzdžiui, iš fazinių įtampų kitimo kreivių matome, kad nuo laiko momento t_1 iki t_2 didžiausia įtampa $u = u_{AB}$ yra tarp mazgų A ir B. Dėl to laikotarpiu $t_{12} = t_2 - t_1 = T/6$ teka srovė i_1 (schemoje – žalia linija) grandine $VD2 - R_L - VD3$. Laikotarpiu $t_{23} = t_3 - t_2 = T/6$ didžiausia įtampa $u = u_{AC}$ yra tarp mazgo A ir C, todėl teka srovė i_2 (schemoje – geltona linija) grandine $VD2 - R_L - VD5$. Taip srovės $i_1 - i_6$ teka pakaitomis įvairiais nuosekliai sujungtais diodais kiekvieną šeštadalį periodo. Apkrova R_L teka vienos krypties pulsuojanti srovė i , kuri per vieną periodą esti didžiausia ir mažiausia po šešis kartus.

Tiltelinio lygintuvo vidutinė išlyginta įtampa ir srovė: $U_0 = 2,33 U_{2f}$; $I_0 = 1,22 I_{2f}$. Išlygintos srovės pulsacijos koeficientas yra visai mažas $k_p = 0,057$, t. y. mažiau kaip 6%, o pulsacijos dažnis yra 6 kartus didesnis už lyginamos įtampos dažnį (žr. 7.1 lentelę). Dėl to šiems lygintuvams dažnai nereikia papildomų priemonių pulsacijai mažinti. Kiekvienu diodu teka trečdalis išlygintos srovės: $I_F = I_0/3$. Didžiausia atgalinė įtampa, tenkanti kiekvienam diodui: $U_{Rm} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} U_{2f} = 1,045 U_0$. Transformatoriaus visos fazės beveik visą laiką yra tolygiai apkrautos, ir jo antrinės apvijos išnaudojimo koeficientas $k_{tr} = 0,95$.



7.2.3. Valdomojo lygintuvo veikimo principas. Pramonėje neretai reikalingi nuolatinės reguliuojamos įtampos šaltiniai, pavyzdžiui, įvairių elektros pavarų greičiui keisti. Vienas iš paprastesnių ir ekonomiškесnių išlygintos įtampos reguliavimo būdų yra panaudoti valdomuosius lygintuvus su tiristoriais. Keičiant tiristorių atidarymo momentą, galima keisti išlygintos įtampos ir srovės vidutines vertes.

Išnagrinėsime vienpusio lyginimo valdomąjį lygintuvą, kuriame yra įjungtas tiristorius VS (7.10 pav.). Tiristoriaus valdymo elektrodai suteikiamas srovės impulsas, gaunamas iš valdymo bloko VB. Jei impulsas suteikiamas kiekvieno teigiamo pusperiodžio pradžioje, tiristorius atidaromas iš karto, srovė juo teka visą pusperiodį, ir toks lygintuvas niekuo nesiskiria nuo nevaldomo. Jei valdymo impulsas uždeliamas faze α , tiristorius atidaromas vėliau, srovė juo teka tik likusią pusperiodžio dalį. Kampas α yra vadinamas valdymo kampu.

Didinant valdymo kampą, tiristorius atidaromas vis

7.9 pav. Trifazio tiltelinio lygintuvo schema (a), fazinių antrinių įtampų ir apkrovos įtampos (didžiausios linijinės įtampos) kreivės (b), apkrovos srovės kreivė (po ją nurodyta, kuriais diodais srovė teka įvairiais laikotarpiais) (c)

vėliau, todėl vidutinė išlyginta įtampa yra mažesnė (žr. 7.10 pav., c – e). Parenkant valdomojo lygintuvo schemą ir jo darbo režimą, reikia atsižvelgti į tai, kad, didinant tiristorių valdymo kampą, didėja išlygintos įtampos pulsacija.

Valdymo blokas dažniausiai yra specialus elektroninis įtaisas, kuris gamina sinchroninius tinklo dažniui ir fazei impulsus ir jais valdo tiristorių atidarymo momentą. Valdomųjų lygintuvų schemas sudaromos tokios pat kaip nevaldomųjų, pakeičiant dalį ar visus diodus tiristoriais. Nuo parinktos schemos ir tiristorių skaičiaus priklauso valdomųjų lygintuvų savybės ir charakteristikos.

Pavyzdžiui, vienfazio tiltelinio lygintuvo du diodus pakeitę tiristoriais (7.11 pav.), turime vienfazį valdomąjį lygintuvą. Jo vidutinė išlyginta įtampa apskaičiuojama šitaip: $U_{0\alpha} = (1 + \cos \alpha) U_0 / 2$; čia $U_{0\alpha}$ ir U_0 – vidutinė išlyginta įtampa, kai valdymo kampas yra lygus α ir kai jis lygus nuliui.

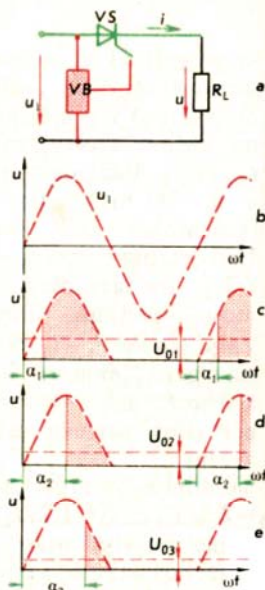
Įtampų santykio $U_{0\alpha} / U_0$ priklausomybė nuo valdymo kampo α yra vadinama valdymo charakteristika. Minėto valdomojo lygintuvo $U_{0\alpha} / U_0 = (1 + \cos \alpha) / 2$ (žr. 7.11 pav., c).

7.3

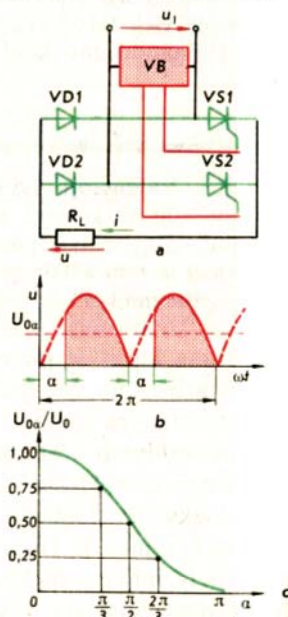
Stiprintuvų savybės ir charakteristikos

7.3.1. Struktūrinė schema. Technikoje yra naudojami įvairiausi stiprintuvai – mechaniniai, hidrauliniai, pneumatiniai, elektromašininiai, magnetiniai, elektroniniai ir kt. Visiems stiprintuvams būdinga tai, kad mažesnės galios įėjimo signalu A yra valdomas didesnės galios išėjimo signalas A , keičiant maitinimo šaltinio tiekiamą energijos kiekį W (7.12 pav.). Taip, pavyzdžiui, hidraulinio stiprintuvo čiaupas atidaromas mažos galios signalu, o suslėgtas skystis, patekęs į darbo cilindrą, suteikia stūmokliui didelę galią. Įvairūs varikliai iš esmės taip pat yra stiprintuvai; pavyzdžiui, vidaus degimo variklio kuro pedalui nuspausti reikalingas tam tikras nedidelės galios valdymo signalas, o variklio išvystoma galia jau yra išėjimo signalas. Šio „stiprintuvo“ energijos šaltinis yra kuras, tiekiamas varikliui.

7.3.2. Stiprintuvų parametrai ir charakteristikos. Visų elektrinių stiprintuvų (elektromašininų, magnetinių, elektroninių) bendroje atstojamojoje schemoje (7.13 pav.)



7.10 pav. Valdomojo vienpusio lyginimo tiristorinio lygintuvo schema (a), įėjimo (b) ir išėjimo (c, d, e) įtampa u bei išlyginta įtampa U_0 priklausomai nuo valdymo kampo



7.11 pav. Valdomojo dvipusio lyginimo tiristorinio lygintuvo schema (a), įtampos kreivės (b) ir valdymo charakteristika (c)

galima pavaizduoti dvi elektrines grandines: įėjimo ir išėjimo. Įėjimo grandinė sudaryta iš įėjimo signalo šaltinio, kurio EVJ yra $\underline{E}_s$ ir vidinė varža – $\underline{Z}_s$, bei stiprintuvo įėjimo ekvivalentinės varžos $\underline{Z}_{in}$. Išėjimo grandinė yra sudaryta iš stiprintuvo išėjimo ekvivalentinės EVJ $\underline{E}_{ex}$ ir varžos $\underline{Z}_{ex}$ bei apkrovos varžos $\underline{Z}_L$.

Elektriniai stiprintuvai sąlygiškai skirstomi į įtampas, srovės ir galios stiprintuvus. Be to, dar gali būti nuolatinės ir kintamosios srovės stiprintuvai. Elektriniai stiprintuvai dažniausiai apibūdinami šiais pagrindiniais rodikliais.

1. Stiprinimo koeficientas $K = A/a$ (žr. 7.12 pav.) yra išėjimo signalo santykis su įėjimo signalu. Dažniausiai nurodomi įtampas, srovės ir galios stiprinimo koeficientai:

$$K_U = U_{ex}/U_{in}; \quad K_I = I_{ex}/I_{in}; \quad K_P = P_{ex}/P_{in}. \quad (7.8)$$

2. Įėjimo ir išėjimo varžos. Dažniausiai reaktyviųjų dedamųjų galima nepaisyti, todėl nurodomos tik R_{in} ir R_{ex} . Paprastai įėjimo signalai esti labai silpni, todėl įėjimo grandinei parenkamas suderintasis darbo režimas (žr. 1.2.4), t. y. toks, kad stiprintuvo įėjimo varža būtų lygi įėjimo signalo šaltinio vidinei varžai ($R_{in} = R_s$). Tuo atveju įėjimo signalo galia yra didžiausia. Pavyzdžiui, iš antenos į televizorių turi patekti didžiausios galios signalas, todėl kabelio varža turi būti suderinta su televizoriaus antenos įvado varža. Kad išėjimo signalo galia būtų didžiausia, stiprintuvo išėjimo varža suderinama su apkrovos varža ($R_{ex} = R_L$). Dauguma stiprintuvų yra pritaikyti apkrovai, kurios varža yra normuota standartų. Pavyzdžiui, garso atkūrimo stiprintuvų išėjimo parametrai yra pritaikyti apkrovai (garsiaikalbiams), kurios varža yra lygi 4Ω (arba 8Ω). Kai išėjimo signalo galia yra didelė, dėl išėjimo varžos gali būti nemaži energijos nuostoliai.

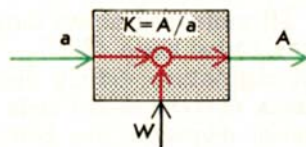
3. Naudingumo koeficientas. Tai išėjimo galios santykis su maitinimo grandinės galia

$$\eta = P_{ex}/P_0. \quad (7.9)$$

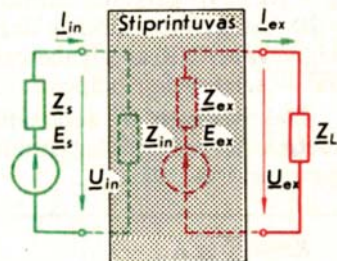
Elektronikoje energijos nuostoliai svarbūs ne tiek tuo, kad dėl jų prarandama dalis energijos. Papildomos išlaidos reikalingos elektronikos elementų ar įtaisų aušinimui, kad jų temperatūra nebūtų per aukšta.

4. Dažninė amplitudės charakteristika – tai stiprinimo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo signalo dažnio (ar kampinio dažnio) (7.14 pav.):

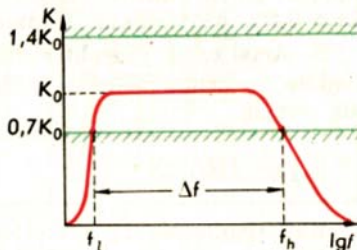
$$K = F(f) \quad \text{arba} \quad K = F(\omega). \quad (7.10)$$



7.12 pav. Stiprintuvo struktūrinė schema



7.13 pav. Elektrinio stiprintuvo atstojamoji schema



7.14 pav. Stiprintuvo dažninė amplitudės charakteristika ir stiprinimo koeficiento kitimo ribos

Stiprintuvus įvairaus dažnio signalus gali stiprinti nevienodai, o kai kurio dažnio – visai nestiprinti. Tai priklauso nuo stiprintuvo vidinių elektrinių savybių. **Dažninė amplitudės charakteristika** rodo, kaip yra stiprinami sinusiniai dydžiai diapazone nuo žemiausio f_l iki aukščiausio f_h dažnio. Šis dažnių skirtumas yra vadinamas stiprintuvo dažnių pralaidumo juosta Δf . Priklausomai nuo jos pločio stiprintuvai gali būti vadinami siaurajuosčiais ar plačiąjuosčiais. Dažniau yra nurodomas visos dažnių pralaidumo juostos plotis: pavyzdžiui, nuolatinės srovės stiprintuvus ($f_l=0$ Hz, f_h – įvairus), garsinio dažnio stiprintuvus ($f_l=20$ Hz, $f_h=20$ kHz), labai aukštų dažnių stiprintuvai (f_h matuojami megahercais ar gigahercais). Gali būti itin siaurajuosčiai – selektyvieji stiprintuvai.

Elektronikoje ir automatikoje yra įprasta stiprinimo koeficientą pakeisti logaritminiu, padauginus jo dešimtainį logaritmą iš 20:

$$K^* = 20 \lg K. \quad (7.11)$$

Jis yra matuojamas decibelais (dB) (7.2 lentelė).

Logaritminio stiprinimo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo signalo dažnio yra stiprintuvo logaritmė dažninė amplitudės charakteristika (7.15 pav.). Dažnai nurodomos leistinos logaritmio stiprinimo koeficiento kitimo ribos. Pavyzdžiui, garso atkūrimo aparatūros logaritmio stiprinimo koeficiento kitimo diapazonas paprastai yra ± 3 dB. Tai reiškia, kad dažnių pralaidumo juostoje stiprintuvo išėjimo ir įėjimo signalų santykis gali kisti nuo 0,707 iki 1,41 karto. Arba tarkime, magnetofono instrukcijoje parašyta, kad triukšmų lygis yra ne didesnis kaip minus 46 dB. Triukšmų signalo ir pagrindinio signalo santykis K gali būti apskaičiuojamas iš lygybės: $-46 = 20 \lg K$; iš čia $K=0,005$. Tai reiškia, kad triukšmai, atkuriant garsą minėtu magnetofonu, sudaro ne daugiau kaip 0,5% pagrindinio signalo.

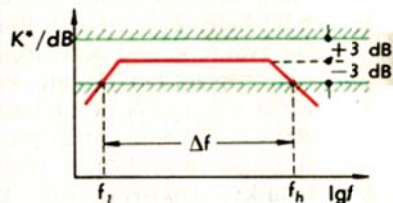
5. Amplitudės charakteristika – tai priklausomybė tarp išėjimo ir įėjimo signalo (dažniausiai įtampos) amplitudinių verčių:

$$U_{exm} = f(U_{inm}). \quad (7.12)$$

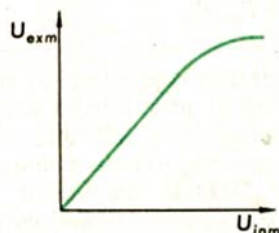
Kai amplitudės charakteristika (7.16 pav.) yra tiesė, išėjimo signalo forma tiksliai atkartoja įėjimo signalo formą. Kai ši charakteristika nuo tam tikros U_{inm} vertės „užlinksta“, didesnių nei U_{inm} amplitudžių įėjimo signalai išėjime yra iškraipomi. Tokie iškraipymai yra vadinami

7.2 lentelė. Ryšys tarp stiprinimo koeficiento K ir K^*

K	K^* dB	K	K^* dB
0,5	-6	2	6
$1/\sqrt{2}$	-3	10	20
1	0	100	40
$\sqrt{2}$	3	1000	60



7.15 pav. Stiprintuvo logaritmė dažninė amplitudės charakteristika ir logaritmio stiprinimo koeficiento kitimo ribos



7.16 pav. Stiprintuvo amplitudės charakteristika

mi **netiesiniais**. Garso atkūrimo aparatuose, kai iš jos norima išgauti pernelyg didelį stiprinimą, netiesiniai iškreipymai pasireiškia nemaloniais gergždžiančiais garsais. Matavimo prietaisuose šie iškreipymai sudaro papildomas paklaidas, o automatikos grandinėse dėl jų sumažėja reguliavimo tikslumas.

7.4

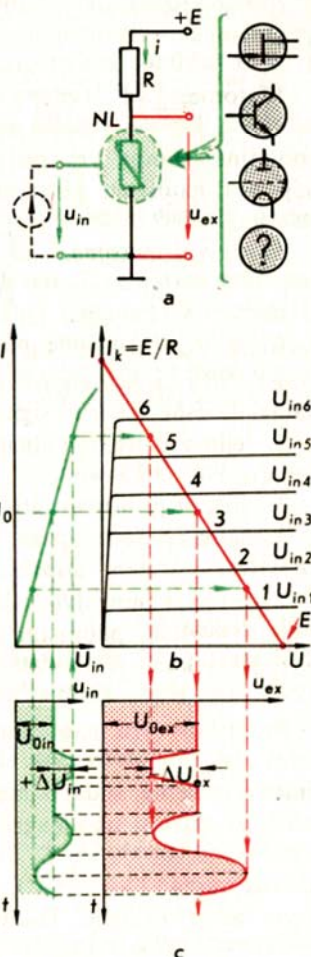
Elektroninio stiprintuvo veikimo principas ir vidiniai ryšiai

7.4.1. Atstojamoji schema. Paprasčiausias elektroninis stiprintuvas gali būti pavaizduotas atstojamąja schema (7.17 pav., a). Ją sudaro nuosekliai prie EVJ šaltinio prijungti rezistorius, kurio varža R , ir netiesinis elementas NL , kurio varža $R_{NL} = f(I, U_{in})$ ir kuris yra stiprinimo elementas; pavyzdžiui, lauko ar dvipolis tranzistorius, elektroninė lempa (triodas, pentodas) ar koks kitas. Svarbiausia jo savybė yra ta, kad jo **voltamperinę** (išėjimo) charakteristiką galima labai smarkiai pakeisti, į jėjimą padavus kokį nors silpną išorinį signalą.

Tarkime, kad stiprintuvo įėjimo signalas u_{in} yra valdymo signalas, keičiantis netiesinio stiprinimo elemento išėjimo charakteristiką. Išėjimo signalas u_{ex} yra stiprinimo elemento gnybtų įtampa.

Daugumos stiprinimo elementų išėjimo charakteristikos yra kreivių, išeinančių iš koordinačių pradžios, šeima (žr. 6). Paprastumo dėlei šiek tiek idealizavę jų pobūdį, galime laikyti, kad tai yra pradžioje staiga, o vėliau tik truputį didėjančios tiesinės funkcijos. Stiprinimo elemento normalaus darbo srityje $I = f(U_{ex})$ vaizduosime šiek tiek kylančiomis tiesėmis, kurių padėtis priklauso nuo valdymo signalo U_{in} vertės (7.17 pav., b).

Nuosekliai sujungtų rezistoriaus R ir stiprinimo elemento NL darbo taškus galime nustatyti, pritaikę charakteristikų sukirtimo metodą (žr. 1.7.3). Laikydami, kad EVJ šaltinis yra idealus (jo vidinė varža lygi nuliui), atidedame koordinačių ašyse stiprinimo elemento tuščiosios eigos ($I=0$; $U_{ex}=E$) ir trumpojo jungimo ($U_{ex}=0$; $I_k=E/R$) taškus. Per juos išvedame tiesę, vadinamą apkrovos charakteristika, kurios sankirtos su stiprinimo elemento išėjimo charakteristikomis yra stiprintuvo darbo taškai 1–6. Sklandžiai keičiant valdymo signalą U_{in} , tolygiai kinta stiprinimo elemento išėjimo charakteristika, ir darbo taškai slenka apkrovos charakteristika.



7.17 pav. Stiprintuvo atstojamoji schema (a) ir išėjimo įtamos kreivės sudarymas (b)

Atskaitę gautų sankirtųordinates ir žinodami jas atitinkančias U_{in} vertes, sudarome stiprintuvo perdavimo charakteristiką $I=f(U_{in})$, kurios statumas $S=\Delta I/\Delta U_{in}$.

Stiprintuvo veikimą paaiškinsime, pasinaudodami perdavimo ir išėjimo charakteristikomis. Tarkime, kad įėjimo signalas kinta 7.17 pav., b pavaizduota $u_{in}(t)$ funkcija. Kai įėjimo signalas yra nuolatinis ir lygus U_{0in} , iš perdavimo charakteristikos galime atskaityti srovės vertę I_0 . Tai yra stiprintuvo darbo taško ordinatė. Abscisė, t. y. išėjimo įtampa U_{0ex} , atskaitoma iš stiprinimo elemento apkrovos charakteristikos. Panašiais grafiniais veiksmais galime sudaryti visą išėjimo signalo kitimo kreivę $u_{ex}(t)$.

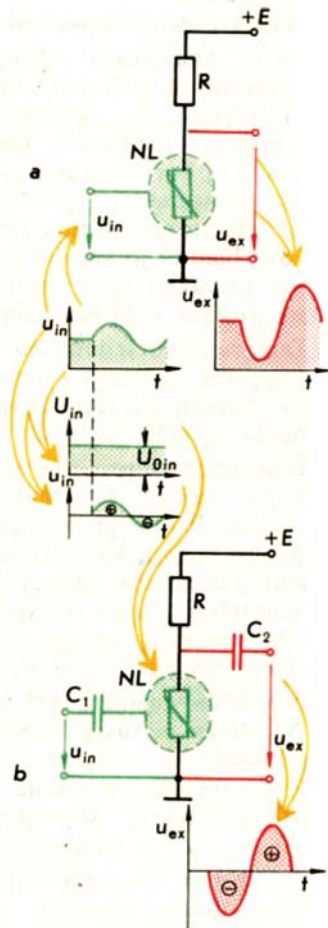
Matome, kad **teigiamas įėjimo signalo pokytis sudaro neigiamą išėjimo signalo pokytį**. Jei prie įėjimo kartu su nuolatinė įtampa yra prijungiamas kintamoji, tai išėjime taip pat gaunama kintamoji išėjimo įtampos dedamoji, tačiau **išėjimo signalas yra priešingos fazės**.

Iš kreivių matome, kad **kuo didesnis perdavimo charakteristikos statumas S , tuo didesnis gaunamas stiprinimo koeficientas K** . Palyginę įėjimo ir išėjimo signalų kreives $u_{in}(t)$ ir $u_{ex}(t)$, galime padaryti šias išvadas.

1. Maža įėjimo signalo pokyčio vidutinė vertė paverčiama didesne išėjimo signalo pokyčio vidutine verte.
2. Įėjimo ir išėjimo signalų kitimo fazės yra priešingos: kai u_{in} yra didžiausia, u_{ex} yra mažiausia.
3. Šis stiprintuvas stiprina įėjimo signalo nuolatinę ir kintamąją dedamąsias. Toks stiprintuvas vadinamas nuolatinės srovės stiprintuvu.

Kai reikia nurodyti, kaip **stiprintuvas stiprina kintamąją dedamąją**, paprastai apskaičiuojamas **stiprinimo koeficientas**, kuris **išreiškiamas išėjimo ir įėjimo signalo pokyčių santykio absoliutiniu didumu**: $K=|\Delta U_{ex}/\Delta U_{in}|$.

Praktikoje yra naudojami kintamosios srovės stiprintuvai **tik kintamiesiems signalams stiprinti**. Tokio stiprintuvo schemą sudarysime nagrinėtosios pagrindu (7.18 pav.). Ji skiriasi nuo nagrinėtosios schemos tuo, kad **joje yra du kondensatoriai C_1 ir C_2** . Kaip žinome, kondensatoriaus varža $X_C=1/(\omega C)$, todėl nuolatinėi srovei ($\omega=0$) ji yra be galo didelė. Tokiu būdu **kondensatoriai neleidžia nuolatinėi srovei, tekančiai iš maitinimo šaltinio į stiprinimo elementą, atsišakoti į įėjimo ir išėjimo grandines**. Antra vertus, įjungus kondensatorių C_1 , į stiprintuvą iš įėjimo signalo šaltinio gali patekti tik kintamasis signalas.



7.18 pav. Nuolatinės (a) ir kintamosios (b) įtampos stiprintuvo atstojamoji schema bei įėjimo ir išėjimo įtampos kreivės

7.4.2. Darbo režimai. Realus stiprinimo elemento perdavimo charakteristika $I=f(U_{in})$ yra tiesė tik tam tikrame diapazone (7.19 pav.). Panagrinėkime kintamosios srovės stiprintuvo darbą, sudarydami jo išėjimo įtampos kreives dviem atvejais.

Tarkime, kad nuolatinė įtampa, kuri patenka į stiprinimo elemento įėjimą, yra lygi U_A , o kintamoji įėjimo įtampa yra $u'_{in}(t)$ (1 kreivė). Atlikę anksčiau paaiškintus grafinius veiksmus, galime sudaryti išėjimo įtampos kreivę $u'_{ex}(t)$ (2 kreivė). Matome, kad išėjimo ir įėjimo įtampų momentinės vertės yra proporcingos: kuo didesnė u'_{in} , tuo didesnė u'_{ex} . Kai nuolatinė įtampa U_A yra tokia, kad taškas A yra įėjimo charakteristikos tiesinės dalies viduryje, teigiamos ir neigiamos pasirinktosios įėjimo įtampos $u'_{in}(t)$ vertės yra stiprinamos vienodai. Toks stiprintuvo darbo režimas yra vadinamas **A režimu**.

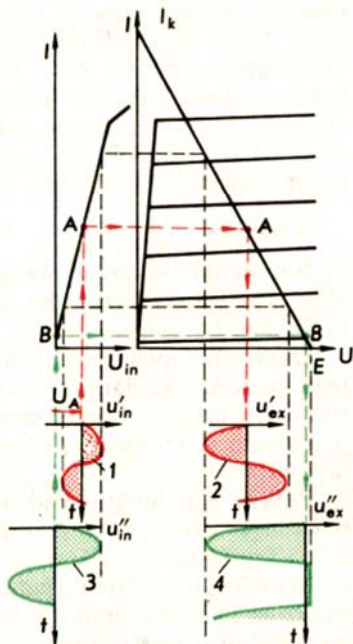
B režimu yra vadinamas toks stiprintuvo darbo režimas, kai darbo taškas (B) yra apatiniaame įėjimo charakteristikos taške. Prijungę stiprintuvui kintamąją įtampą $u''_{in}(t)$ (3 kreivė), išėjimo gnybtuose gausime kintamąją įtampą $u''_{ex}(t)$ (4 kreivė). B režimu dirbantis stiprintuvas stiprina tik teigiamas įėjimo signalo vertes.

A režimu dirbantis stiprintuvas praktiškai signalo neiškraipo, kol įėjimo įtampos amplitudė neišeina už perdavimo charakteristikos tiesinės dalies ribų. Perdaug padidinus įėjimo signalą, išėjimo signalo forma tampa nebepanaši į įėjimo signalo formą. Pasireiškia netiesiniai iškraipymai.

A režimu dažniausiai dirba įtampos stiprintuvai. Jų naudingumo koeficientas nedidelis: $\eta \leq 0,5$ (praktiškai jis retai esti didesnis už 0,35).

B režimu dirbančio stiprintuvo išėjimo signalo forma labai skiriasi nuo įėjimo, netiesiniai iškraipymai yra labai dideli. Antra vertus, **neiškraipomos dvigubai didesnės teigiamos įėjimo signalo vertės**. Sujungus du stiprintuvus taip, kad teigiamus signalus stiprintų vienas B režimu dirbantis stiprintuvas, o neigiamus – kitas B režimu dirbantis stiprintuvas, gaunamas dvitaktis stiprintuvas. Prijungus dvitaktį stiprintuvui kintamąjį įėjimo signalą, vieną pusperiodį dirba viena stiprintuvo dalis, o kitą – kita. Išėjimo gnybtuose gaunamas kintamasis išėjimo signalas.

B režimu dirbančio stiprintuvo naudingumo koeficientas gali būti iki 0,8. Tokiu režimu dažnai dirba dvitaktiniai galios stiprintuvai.



7.19 pav. Stiprintuvo, veikiančio A ir B režimu, darbo taškai bei įėjimo ir išėjimo signalų kreivės

7.4.3. Daugiapakopiai stiprintuvai. Jie naudojami, kai vienos pakopos stiprintuvo stiprinimo koeficientas yra per mažas. **Pakopos yra jungiamos nuosekliai: pirmosios**

pakopos išėjimo signalas yra antrosios pakopos įėjimo signalas (7.20 pav.). Daugiapakopio stiprintuvo stiprinimo koeficientas yra $K = A/a_1$. Prisiminė, kad kiekvienos pakopos išėjimo signalas gali būti išreikštas stiprinimo koeficiento ir įėjimo signalo sandauga, gauname: $A = K_n a_n$; ... $a_3 = K_2 a_2$; $a_2 = K_1 a_1$. Įrašę paskutiniąsias išraiškas į išėjimo signalo A išraišką, o pastarąją į K lygybę, turime:

$$K = K_1 K_2 \dots K_n. \quad (7.13)$$

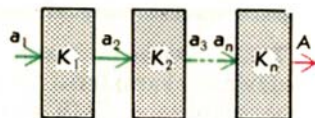
Nuosekliai sujungto daugiapakopio stiprintuvo stiprinimo koeficientas yra visų pakopų stiprinimo koeficientų sandauga.

Daugiapakopiai stiprintuvai dažniausiai esti dviejų trijų pakopų. Kadangi vienos pakopos elektroninių stiprintuvų stiprinimo koeficientai yra nuo 10 iki 200, tai dviejų pakopų stiprintuvo stiprinimo koeficientas yra nuo 100 iki 40 000.

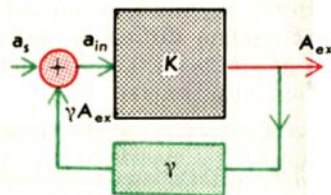
Reikia nepamiršti, kad **stiprintuvus sustiprina ne tik reikalingą signalą, bet ir įvairius pašalinius signalus – triukšmus**. Triukšmai yra išoriniai (patenkantys į įėjimą kartu su signalu) ir vidiniai (paties stiprintuvo triukšmai, pavyzdžiui, dėl krūvininkų šiluminio judėjimo). **Kuo didesnis stiprinimo koeficientas, tuo labiau stiprinami ir triukšmai**. Radijo ir garso atkūrimo aparatuose šie vidiniai triukšmai girdimi kaip šnypštimas (kai nėra jokio įėjimo signalo), kuris yra tuo stipresnis, kuo didesnis stiprinimo koeficientas.

Ryšys tarp pakopų gali būti labai įvairus. Nuolatinės srovės stiprintuvuose yra naudojamas paprasčiausias – tiesioginis ryšys, kai aukštesnės pakopos stiprintuvo įėjimas yra tiesiogiai sujungtas su žemesnės pakopos išėjimu. **Kintamosios srovės stiprintuvuose ryšiui tarp pakopų dažnai naudojamas kondensatorius**, kuris kartu yra žemesnės pakopos išėjimo grandinės ir aukštesnės pakopos įėjimo kondensatorius. Toks ryšys yra vadinamas kondensatoriniu ryšiu. Kintamosios srovės stiprintuvuose **dar gali būti transformatorinis pakopų ryšys**, nors jis jau paprastai tenaudojamas tik paskutinės stiprintuvų pakopos įėjime.

7.4.4. Grįžtamieji ryšiai. Grįžtamuju ryšiu vadinamas toks, **kai dalis išėjimo signalo yra prijungiama prie stiprintuvo įėjimo** (7.21 pav.). Jis gali būti įtampos ar srovės (7.22 pav.). Stiprintuvo įėjimo grandinei grįžtamojo ryšio signalas taip pat gali būti prijungiamas dvejopai. Įėjimo ir grįžtamojo ryšio grandinę sujungus nuosekliai, sumuojamos įtampos, o lygiagrečiai, – sumuojamos srovės (7.23 pav.).



7.20 pav. Daugiapakopio stiprintuvo struktūrinė schema



7.21 pav. Grįžtamojo ryšio schema

Teigiamas grįžtamasis ryšys yra toks, kurio signalas didina įėjimo signalą. Neigiamas, – kai grįžtamąjį ryšio signalą įėjimo signalą mažina. Elektroniniuose stiprintuvuose dažniausiai naudojami neigiami grįžtamieji ryšiai.

Išnagrinėsime nuoseklaus įtampos grįžtamojo ryšio (7.23 pav., a) įtaką stiprintuvo darbui. Kai įėjimo signalas sinusinis, II Kirchhofo dėsnį įėjimo grandinei galime užrašyti kompleksiniais dydžiais: $\underline{U}_{in} - \underline{U}_Y - \underline{U}_s = 0$. Iš čia:

$$\underline{U}_{in} = \underline{U}_s + \underline{U}_Y. \quad (7.14)$$

Kai grįžtamojo ryšio įtampa $\underline{U}_Y$ yra tos pačios fazės kaip signalo šaltinio $\underline{U}_s$, įėjimo įtampa $\underline{U}_{in}$ padidėja: grįžtamasis ryšys yra teigiamas. Kai $\underline{U}_Y$ yra priešingos fazės negu $\underline{U}_s$, įėjimo įtampa $\underline{U}_{in}$ sumažėja: grįžtamasis ryšys yra neigiamas.

Kai grįžtamasis ryšys yra neigiamas, galime įtampos u_Y kryptį pažymėti priešinga (7.24 pav.) ir (7.14) įtampų lygtį užrašyti šitaip: $u_{in} = u_i - u_Y$. Grįžtamojo ryšio įtampa $u_Y = \gamma u_{ex}$; čia

$$\gamma = u_Y / u_{ex} \quad (7.15)$$

yra grįžtamojo ryšio perdavimo koeficientas. Stiprintuvo stiprinimo koeficientai,

kai grįžtamojo ryšio nėra – $K = u_{ex} / u_{in}$;

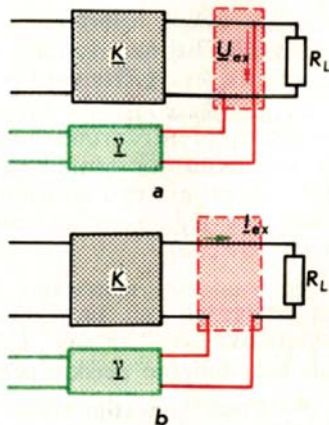
kai grįžtamasis ryšys yra – $K_{Y-} = u_{ex} / u_s$.

Irašę $u_s = u_{in} + u_Y$ ir u_Y vertes į stiprinimo koeficiento K_{Y-} išraišką, gauname: $K_{Y-} = u_{ex} / (u_{in} - \gamma u_{ex})$ arba

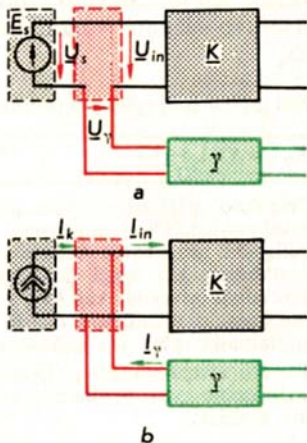
$$K_{Y-} = K / (1 + \gamma K). \quad (7.16)$$

Matome, kad kuo stipresnis neigiamas grįžtamasis ryšys (kuo didesnė sandauga γK), tuo mažesnis stiprinimo koeficientas K_{Y-} . Atrodytų, kad tai menkina pagrindinę stiprintuvo savybę – stiprinti įėjimo signalą, tačiau neigiamas grįžtamasis ryšys suteikia stiprintuvui kitų gerų savybių.

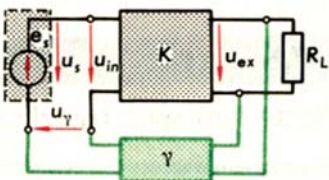
1. Sumažėja nepageidautina įvairių trikdžių ir triukšmų įtaka stiprinimo koeficiento stabilumui. Tarkime, kad dėl tinklo įtampos svyravimų ar dėl šilumos įtakos stiprintuvo elementams δ kartų pasikeitė stiprinimo koeficientas K . Kai yra neigiamas grįžtamasis ryšys, stiprintuvo stiprinimo koeficientas pasikeičia taip: $K'_{Y-} = \delta K / (1 + \delta \gamma K)$. Iš čia matome, kad kuo grįžtamasis ryšys stipresnis, tuo bendras stiprinimo koeficientas K_{Y-} kinta mažiau. Kai $\gamma K \gg 1$, $K'_{Y-} \approx 1/\gamma$, t. y. esant stipriam neigiamam grįž-



7.22 pav. Schema įtampos (a) ir srovės (b) grįžtamojo ryšio signalui gauti iš stiprintuvo išėjimo



7.23 pav. Nuosekliai (a) ir lygia-grečiai (b) prijungto prie įėjimo grįžtamojo ryšio schema



7.24 pav. Stiprintuvas su neigiamu nuosekliai įtampos grįžtamojo ryšiu

tamajam ryšiui, stiprintuvo stiprinimo koeficientas beveik nepriklauso nei nuo išorinių, nei nuo vidinių trikdžių, o priklauso tik nuo grįžtamojo ryšio perdavimo koeficiento γ .

2. Gaunama platesnė dažnių pralaidumo juosta (kai grįžtamojo ryšio perdavimo koeficientas γ nepriklauso nuo dažnio). Kuo stipresnis neigiamas grįžtamasis ryšys, tuo mažesnis stiprintuvo stiprinimo koeficientas, bet tuo platesnis yra įėjimo signalo stiprinamų dažnių diapazonas (7.25 pav., a).

3. Sumažėja netiesiniai iškraipymai. Sudarius neigiamą grįžtamąjį ryšį, pasikeičia stiprintuvo amplitudės charakteristika (žr. 7.25 pav., b). Kuo tas ryšys stipresnis, tuo gali būti didesnė neiškraipomo įėjimo signalo amplitudė.

4. Pasikeičia stiprintuvo išėjimo ir įėjimo varžos. Pavyzdžiui, kai yra sudaryta įtampos neigiamas grįžtamojo ryšio grandinė (parodyta 7.24 pav.), įėjimo varža padidėja, o išėjimo varža sumažėja. Dažniausiai tai yra gera stiprintuvo savybė: 1) kuo įėjimo varža didesnė, tuo reikalinga mažesnė įėjimo signalo šaltinio galia; 2) kuo mažesnė stiprintuvo išėjimo varža, tuo galios nuostoliai jame mažesni.

Kai grįžtamasis ryšys yra teigiamas, stiprinimo koeficientas padidėja:

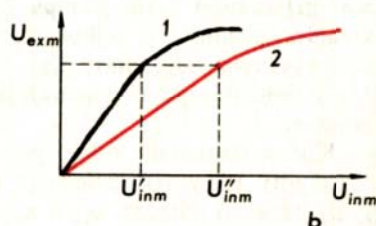
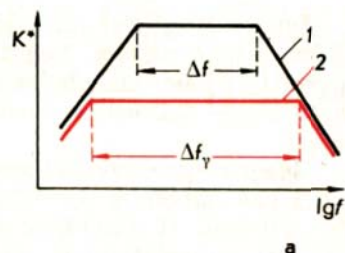
$$K_{\gamma+} = K / (1 - \gamma K). \quad (7.17)$$

Teigiamo grįžtamojo ryšio atveju stiprintuvas įgauna savybių, priešingų anksčiau minėtoms. Tokiam stiprintuvui būdingas didelis, bet nepastovus stiprinimo koeficientas. Stiprintuvas dirba nestabiliai, gali netgi tapti virpesių generatoriumi. Kai kuriais specialiais atvejais, kai šios neigiamos savybės neturi lemiamos reikšmės, o reikalingas didelis stiprinimo koeficientas, teigiamas grįžtamasis ryšys yra taikomas.

Bendru atveju sinusinių signalų stiprintuvo stiprinimo koeficientą bei grįžtamojo ryšio perdavimo koeficientą galima užrašyti kompleksiniais dydžiais:

$$\underline{K}_{\gamma} = \underline{K} / (1 \pm \gamma \underline{K}). \quad (7.18)$$

Kai grįžtamasis ryšys yra neigiamas, vardiklyje rašomas ženklas „plus“, kai teigiamas, – „minus“.



7.25 pav. Stiprintuvo be grįžtamojo ryšio (1) ir su neigiamu grįžtamoju ryšiu (2) logaritminė dažninė amplitudės (a) ir amplitudės (b) charakteristika

7.5

Vienos pakopos tranzistoriniai stiprintuvai

7.5.1. Stiprintuvas su lauko tranzistoriumi. Stiprintuvo atstojamojoje schemoje (žr. 7.17 pav., a) stiprinimo elementą pakeičiame lauko tranzistoriumi, pavyzdžiui,

su n tipo kanalu (7.26 pav.). Jo charakteristikos (žr. 6.3.1) šiek tiek skiriasi nuo nagrinėto apibendrintojo stiprinimo elemento charakteristikų. Šio lauko tranzistoriaus perdavimo charakteristika yra $I_D = f(U_{GS})$, kai U_{DS} yra pastovus. Kita lauko tranzistoriaus ypatybė, į kurią reikia atsižvelgti, sudarant stiprintuvo schemą, yra ta, kad tarp užtūros ir kanalo esančios $p-n$ sandūros aktyvioji varža atgaline kryptimi yra labai didelė. Atgaline kryptimi šią sandūrą galima laikyti kondensatoriumi, kuris yra laidus kintamajai srovei ir nelaidus nuolatinei. Dėl to į įėjimo signalo šaltinį nepatenka maitinimo šaltinio įtampos nuolatinė dedamoji.

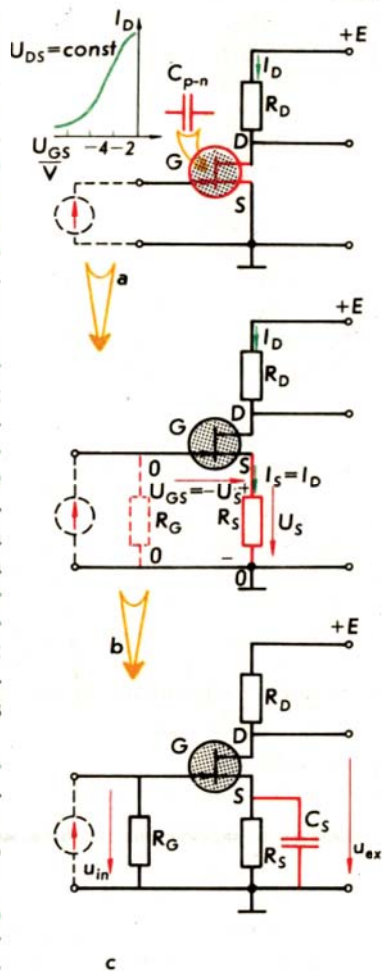
Šio stiprintuvo darbo režimui sudaryti reikia, kad užtūros potencialas, kai įėjimo signalo nėra, būtų neigiamas: $U_{GS} < 0$. Tam gali būti panaudoti įvairūs būdai. Paprastai padidinamas taško S potencialas, o taško G potencialas palaikomas lygus nuliui. Tuo tikslu ištakos grandinėje įjungiamas rezistorius, kurio varža R_S . Kad užtūros potencialas išliktų lygus nuliui, jos grandinė sujungiama su korpusu per nuotėkio rezistorių, kurio varža R_G yra labai didelė. Kai teka srovė $I_D = I_S$, gaunamas įtampos kritimas varžoje R_S : $U_S = R_S I_S$. Taško S potencialas padidėja, o taško G potencialas lieka tas pats (lygus nuliui): $U_{GS} = U_G = -U_S$. Parinkus rezistoriaus varžą R_S , sudaromas reikalingas neigiamas užtūros potencialas, kuris nulemia stiprintuvo darbo režimą.

Rezistorius R_S tuo pačiu yra ir neigiamo grįžtamojo ryšio grandis. Padidėjus srovei $I_D = I_S$, padidėja įtampos kritimas U_S , gaunama didesnė neigiama užtūros įtampa $U_G = -U_S$. Tranzistoriaus laidusis kanalas susiaurėja, ir juo tekanti srovė susilpnėja.

Rezistorius R_S taip pat stabilizuoja stiprintuvo darbą, keičiantis tranzistoriaus temperatūrai. Padidėjus temperatūrai, padidėja srovė I_S . Dėka to S potencialas padidėja, o G tampa neigiamesnis. Tranzistorius labiau uždaroamas, todėl tranzistoriaus srovė, padidėjus temperatūrai, beveik nepadidėja.

Prijungus prie įėjimo kintamąją įtampą, dėl neigiamo grįžtamojo ryšio jos stiprinimas taip pat būtų mažesnis, negu be jo. Kad to nebūtų, reikia panaikinti grįžtamojo ryšio (įtampos U_S) įtaką kintamajam signalui. Tai galima padaryti, lygiagrečiai rezistoriui R_S prijungus kondensatorių. Jo talpa C_S turi būti pakankamai didelė, kad žemiausiam kintamojo signalo dažniui ω kondensatoriaus talpinė varža $X_C = 1/(\omega C)$ būtų daug kartų mažesnė už varžą R_S .

Kaip matome, įjungus ištakos grandinėje R_S ir C_S , gaunamas neigiamas užtūros potencialas, kuriuo sudaromas reikiamas lauko tranzistoriaus darbo reži-



7.26 pav. Stiprintuvo su lauko tranzistoriumi schemos sudarymas

mas. Tuo pačiu gaunamas neigiamas grįžtamasis ryšys, kompensuojantis temperatūros įtaką, tačiau neturintis įtakos kintamosios įtampos stiprinimui.

Prie stiprintuvo (7.27 pav.) įėjimo prijungus kintamosios įtampos signalą $u_{in}(t)$, tranzistoriaus santakos—ištakos grandine teka įėjimo signalo faze pulsuojanti srovė $i_D(t)$. Taško D potencialas pulsuoja priešinga faze, bet per kondensatorių C_2 perduodama tik kintamoji sustiprintos įtampos dedamoji.

Pritaikę charakteristikų sukirtimo metodą tranzistoriaus grandinei tirti, nubraižome apkrovos charakteristiką. Pasinaudoję tranzistoriaus perdavimo ir išėjimo charakteristikomis, galime sudaryti išėjimo signalo kreivę, kaip buvo parodyta 7.19 pav.

Norėdami, kad stiprintuvas dirbtų A režimu, turime sudaryti užtūros elektrodai neigiamą nuolatinę įtampą $U_{GA} = -R_S I_D$. Išėjimo įtampa yra U_{DA} , kurią surandame grafiškai iš apkrovos charakteristikos. Laikydami, kad įėjimo signalas yra kintamoji įtampa $u_{in}(t)$, grafiškai sudarome išėjimo įtampos kirtimo kreivę $u_{ex}(t)$.

Stiprintuvo stiprinimo koeficientas priklauso nuo perdavimo charakteristikos statumo $S = \Delta I_D / \Delta U_{GS}$, taip pat nuo tranzistoriaus grandinės parametrų. **Praktiškai tokio stiprintuvo stiprinimo koeficientas**

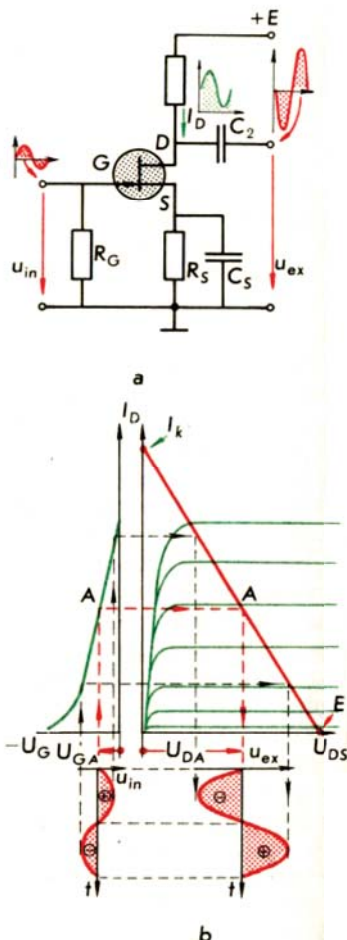
$$K_U \approx SR_D.$$

$$(7.19)$$

7.5.2. Stiprintuvas su dvipoliu tranzistoriumi. Dvipo-
lis tranzistorius valdomas bazės srove I_B , nuo kurios priklauso kolektoriaus srovė I_C bei išėjimo charakteristikos.

Stiprintuvo schemą pradėsime sudarinėti, pakeisdami stiprinimo elementą (žr. 7.17 pav.), pavyzdžiui, $n-p-n$ tipo dvipoliu tranzistoriumi (7.28 pav.). **Darbo režimu** sudaryti reikalinga tam tikra nuolatinė bazės srovė I_B . Tam tarp bazės ir šaltinio išvado įjungiamas rezistorius R_{B1} . Srovė I_B teka nuosekliai sujungtais R_{B1} ir $B-E$ sandūra.

Tokį stiprintuvą galima naudoti, tačiau jame nėra priemonių darbiui stabilizuoti, pakitus temperatūrai. Tarkime, kad į **emiterio grandinę** įjungiamas rezistorius, kurio varža R_E . Bazės grandinėje sudaromas dviejų rezistorių R_{B1} ir R_{B2} įtampos dalytuvas, kuriuo bazės potencialas (įtampa U_B) palaikomas pastovus. Padidėjus temperatūrai, tuo pačiu ir srovei I_E , padidėja ir įtampa $U_E = R_E I_E$. Dėl to sumažėja įtampų skirtumas $U_{BE} = U_B - U_E$ ir sumažėja I_B , todėl I_E beveik nepakinta. **Gaunamas neigiamas grįžtamasis ryšys**, kuris šiuo atveju panaudojamas temperatū-



7.27 pav. Kintamosios įtampos stiprintuvo su lauko tranzistoriumi principinė schema (a) ir išėjimo įtampos kreivės sudarymas (b)

ros įtakai kompensuoti. Kad šis neigiamas grįžtamasis ryšys nesumažintų kintamosios srovės signalo stiprinimo, lygiagrečiai R_E prijungiamas kondensatorius, kurio talpa C_E parenkama tokio didumo, kad jo varža būtų $X_E \ll R_E$.

Kintamosios srovės stiprintuvo įėjimo ir išėjimo grandinėje įjungiami kondensatoriai C_1 ir C_2 (7.29 pav.). Kondensatorius C_1 nepraleidžia nuolatinės įtampos į įėjimo signalo šaltinį, bet praleidžia kintamąjį įėjimo signalą į bazę.

Kintamoji įėjimo įtampa $u_{in}(t)$ sukuria bazės – emiterio grandinėje kintamąją srovės dedamąją, kuri kartu su nuolatinė bazės srove I_B sudaro pulsuojančią bazės – emiterio srovę $i_B(t)$. Ji valdo tranzistoriaus kolektoriaus srovę $i_C(t)$, kuri pulsuoja ta pačia faze. Kolektoriaus potencialas pulsuoja priešinga faze. Kad stiprintuvo išėjime būtų tik kintamoji įtampa $u_{ex}(t)$, įjungiamas kondensatorius, kurio talpa C_2 .

Šio stiprintuvo išėjimo signalo kreivė (7.29 pav., b) gaunama taip, kaip ir iki šiol nagrinėtų stiprintuvų, pasinaudojant tranzistoriaus charakteristikomis: įėjimo – $I_B = f(U_{BE})$, perdavimo – $I_C = f(I_B)$ ir išėjimo $I_C = f(U_{CE})$. Tarkime, kad tranzistorius turi veikti režimu A. Tam parenkama tokia rezistoriaus R_{B1} varža, kad būtų sudaroma tam tikra nuolatinė bazės įtampa $U_{BA} = U_B - U_E$ ir bazės srovės nuolatinė dedamoji I_{BA} .

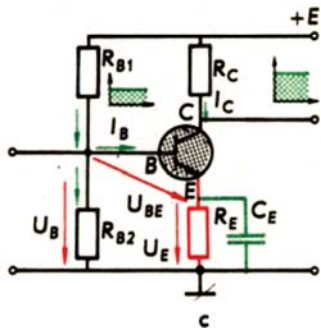
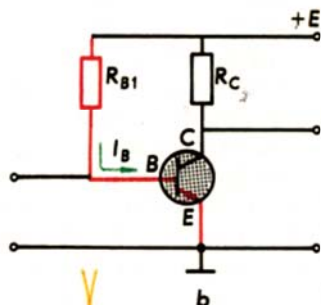
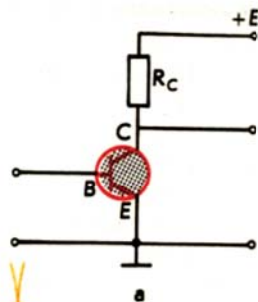
Stiprintuvo su dvipoliu tranzistoriumi stiprinimo koeficientas yra tuo didesnis, kuo didesnis tranzistoriaus srovės perdavimo koeficientas β (žr. (6.3)). **Praktiškai įtampos stiprinimo koeficientas**

$$K_U \approx \beta R_C / R_{in}; \quad (7.20)$$

čia R_C ir R_{in} – kolektoriaus grandinės rezistoriaus ir apkopos įėjimo varžos.

Kai yra žinomas tranzistoriaus charakteristikos $I_C = f(U_{BE})$ (ji taip pat vadinama perdavimo charakteristika) statusas $S = \Delta I_C / \Delta U_{BE}$, įtampos stiprinimo koeficientą galime išreikšti šitaip:

$$K_U \approx S R_C. \quad (7.21)$$



7.28 pav. Stiprintuvo su dvipoliu tranzistoriumi schemos sudarymas

7.5.3. Galios stiprintuvų ypatumai. Dažniausiai stiprintuvo išėjimo signalas turi būti pakankamos galios, todėl paskutiniąją stiprintuvo pakopą paprastai esti galios stiprintuvus. Imtuvai gali būti įvairūs garsiakalbiai, relės ar kontaktoriai, elektros mašinų apvijos ar kiti, kuriuose stiprintuvo išėjimo signalo energija dažnai paverčiama kitos rūšies energija. Kad išėjimo signalas būtų didesnės galios, imtuvas jungiamas į kolektoriaus grandinę ir galios stiprintuvo išėjimo grandinė veikia suderintuoju režimu.

Galios stiprintuvams naudojami specialūs didelės galios dvipoliai tranzistoriai. Suderintajam darbo režimui (žr. 1.2.4) gauti reikia, kad kolektoriaus grandinėje įjungtos apkrovos varža R_L būtų lygi tranzistoriaus išėjimo varžai. Kadangi šiuolaikinių tranzistorių išėjimo varža yra šimtai ar tūkstančiai omų, o imtuvų varža dažniausiai vienetai ar dešimtys omų, tai imtuvą jungti tiesiogiai į tranzistoriaus kolektoriaus grandinę netikslinga. Suderintajam režimui sudaryti į kolektoriaus grandinę įjungtama įtampa žeminančio transformatoriaus pirminė apvija (7.30 pav.), o imtuvas jungiamas prie jo antrinės apvijos.

Galime laikyti, kad kolektoriaus grandinėje yra apkrova, kurios ekvivalentinė (redukuotoji) varža apskaičiuojama šitaip:

$$R'_L = (N_1/N_2)^2 R_L; \quad (7.22)$$

čia N_1 ir N_2 – transformatoriaus pirminės ir antrinės apvijų vijų skaičius,

R_L – tikroji apkrovos varža.

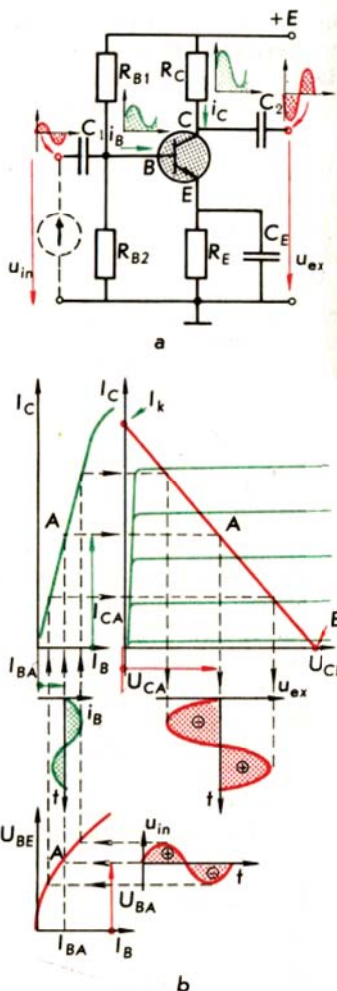
Galios stiprintuvo stiprinimo koeficientas $K_P = P_{ex}/P_{in}$. Jis lygus įtampos ir srovės stiprinimo koeficientų sandaugai:

$$K_P = K_U K_I. \quad (7.23)$$

7.5.4. Vientaktis galios stiprintuvas. Šio stiprintuvo schema (7.31 pav., a) mažai skiriasi nuo įtampos stiprintuvo, išskyrus tai, kad imtuvas kolektoriaus grandinėje yra įjungtas per transformatorių.

Tranzistoriaus darbo režimas parenkamas taip, kad jo srovė visada būtų mažesnė už didžiausią leistiną srovę I_{max} , o įtampa tarp kolektoriaus ir emiterio nebūtų didesnė už didžiausią leistiną įtampą U_{max} . Be to, nuostolių galia tranzistoriuje taip pat turi būti ne didesnė už leistinąją didžiausią P_{max} , kurios hiperbolė $P_{max}(U)$ įvairių tipų tranzistoriams pateikiama kataloguose.

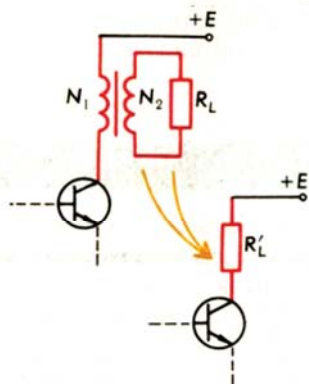
Pažymėję I_C , U_{CE} koordinačių sistemoje šiuos didžiau-



7.29 pav. Bendro emiterio tranzistorinio stiprintuvo principinė schema (a) ir išėjimo įtampos kreivės sudarymas (b)

sus leistinus dydžius, taip pat nubraižę tranzistoriaus volt-ampėrinių charakteristikų žėimà (7.31 pav., *b*) matome, kad yra sritis, kurioje stiprintuvo darbas yra neleistinas. Paprastai darbo taškas (*A*) parenkamas apkrovos charakteristikoje, jungiančioje tuščiosios eigos $E \leq U_{\max}$ ir trumpojo jungimo taškus $I_k \leq U_{\max}/R'_L$, arti leistinos galios $P_{\max}(U)$ kreivės. Vientakčiam stiprintuvui dažniausiai parenkamas *A* režimas.

Vientaktis galios stiprintuvas turi trūkumų: 1) kai įėjimo signalo nėra, tranzistoriumi ir transformatoriaus pirmine apvija teka nuolatinė srovė; dėl jos turi būti parenkamas didesnės galios transformatorius ir jam sunaudojama daugiau vario ir plieno, negu reikia naudingai išėjimo galiai; 2) dėl nuolatinės srovės dedamosios tranzistoriuje gaunama didelė nuostolių galia, todėl šio stiprintuvo naudingumo koeficientas negali būti didesnis už 0,5 ($\eta = 0,15 - 0,40$). Dėl šių priežasčių vientaktis galios stiprintuvas yra naudojamas, kai išėjimo signalo galia yra iki 1–2 W.



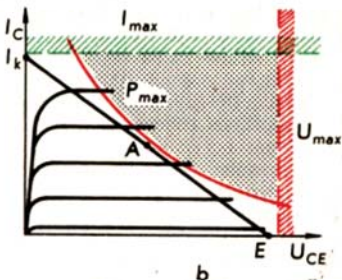
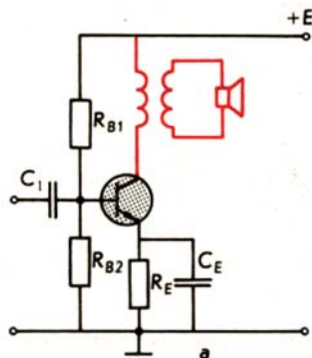
7.30 pav. Apkrovos prijungimo prie galios stiprintuvo ir ekvivalentinio imtuvo schema

7.5.5. Dvitaktis galios stiprintuvas. Tai du galios stiprintuvai, sujungti taip, kad vieną pusperiodį dirba vienas, o kitą pusperiodį – kitas stiprintuvas. Tokiems pakaitomis dirbantiems stiprintuvams parenkamas *B* darbo režimas, todėl jų naudingumo koeficientai yra didesni, negu būtų jiems dirbant *A* režimu.

Viena dvitakčio stiprintuvo schema parodyta 7.32 pav. Įėjimo signalas yra prijungiamas per stiprintuvo pakopų ryšio transformatorių *T1*. Jo dvigubos antrinės apvijos įtampa pakaitomis atidaro tai vieną, tai kitą tranzistorių. Rezistorių R_{B1} ir R_{B2} varžos parenkamas tokios, kad abu tranzistoriai dirba *B* režimu ir jų kolektorių grandinėmis srovės teka pakaitomis kas antrą pusperiodį. Išėjimo transformatoriaus *T2* pirmine apvija teka kintamoji srovė. Jo antrinėje apvijoje indukuojamas kintamasis sustiprintas signalas.

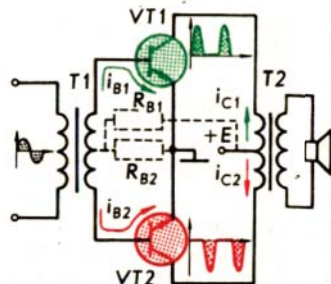
Tokios dvitakčių stiprintuvų schemos yra labai dažnai naudojamos šiuolaikinėje garso atkūrimo bei kitoje aparatūroje, kai išėjimo galia yra daugiau nei 2 W.

Dvitakčio stiprintuvo privalumai: 1) didelis naudingumo koeficientas ($\eta = 0,6 - 0,8$); 2) maži netiesiniai iškraipymai; 3) mažesnė išėjimo transformatoriaus galia, nes nėra nuolatinės srovės dedamosios pirminėje apvijoje; 4) mažesnė maitinimo šaltinio pulsacijos įtaka. Šios schemos trūkumas yra tas, kad įėjimo ir išėjimo grandinėse yra transformatoriai. Juose gaunami nuostoliai, jų netiesinė magnetinė grandinė iškraipo signalą, siauresnė dažnių pralaidumo juosta.



7.31 pav. Vientakčio galios stiprintuvo schema (*a*) ir darbo taško koordinatinių parinkimas (*b*)

Galios stiprintuvai gali būti be transformatorių, kai yra naudojami specialūs dvigubi mažos išėjimo varžos tranzistoriai.



7.32 pav. Dvitakčio galios stiprintuvo schema

Specialiosios paskirties stiprintuvai

7.6.1. Selektivusis stiprintuvas. Iki šiol nagrinėti stiprintuvai pasižymėjo plačia dažnių pralaidumo juosta: stiprintuvuose su RC ryšiu tarp pakopų santykis f_h/f_l gali siekti 10^6 ir daugiau. Yra atvejų, kai reikia stiprinti labai siauro dažnių diapazono signalus, kai $f_h/f_l \leq 1,001 - 1,100$. Taip yra daugiakanalio radijo ryšio, automatinio valdymo dispečerinės, energetikos sistemose.

Selektyviuosiuose stiprintuvuose siaurai dažnių pralaidumo juostai sudaryti dažniausiai yra naudojami rezonansiniai kontūrai. Srovių rezonanso kontūras įjungiamas kolektoriaus grandinėje (7.33 pav.) vietoj rezistoriaus R_c . Kai prie įėjimo grandinės prijungiamas kintamasis signalas, kurio dažnis yra lygus kontūro rezonansiniam dažniui $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$, kontūro laidumas yra aktyvusis ir mažiausias (žr. 2.7.2). Tokiu būdu ekvivalentinė kontūro varža yra didžiausia, ir rezonansinio dažnio signalo stiprinimo koeficientas yra didžiausias (žr. (7.21) išraišką).

Kontūro ekvivalentinė rezonansinė varža yra proporcinga kvadratu kontūro kokybės Q , kuri apskaičiuojama šitaip:

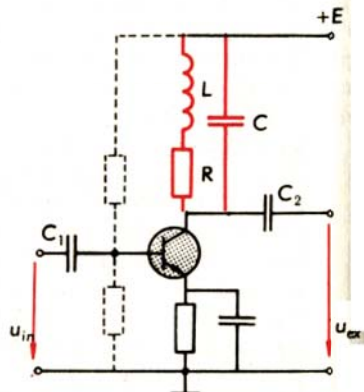
$$Q = \sqrt{L/C} / R; \quad (7.24)$$

čia R – kontūro realios ritės aktyvioji varža.

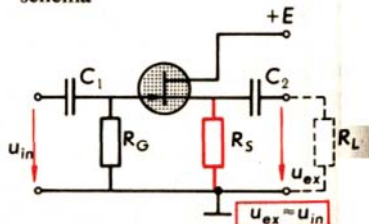
Kontūro kokybei pagerinti mažinama kontūro aktyvioji varža: ritė gaminama iš didelio skerspjūvio varinio laido, atstumas tarp kondensatorių ir ritės daromas mažas, parenkamas kondensatorius su aukštos kokybės (mažų nuostolių) dielektriku, sujungimai tarp ritės ir kondensatoriaus gerai sulituojami. Tuo būdu pasiekama kontūro kokybė iki 50–500.

7.6.2. Kartotuvas. Tai toks galios stiprintuvas, kuris įtampos nestiprina, o tik ją atkartoja, nepakeisdamas jos fazės. Paprastai jis jungiamas prie signalo šaltinių, kurių didelė vidinė varža. Kartotuvo įėjimo varža taip pat yra didelė, todėl jis kartu su šaltiniu dirba suderintuoju režimu (žr. 1.2.4). Kartotuvo išėjimo varža yra maža, todėl prie jo galima prijungti nedidelės varžos imtuvą: elektromagnetinės relės apviją, optinio oscilografo vibratorių, kabelį ir pan.

Pavyzdžiui, iš garso stiprinimo aparatūros mikrofono gaunamą silpną signalą dažniausiai gana ilgų kabelių reikia perduoti stiprintuvui. Kadangi mikrofono varža yra didelė, kabeliu turėtų tekėti silpna srovė. Dėl įvairių pašalinių kabelyje indukuojamų ir patekusių į stiprintuvą trukdžių, kurių lygis būtų artimas signalo lygiui, garsiakalbyje atsirastų sustiprinto triukšmo fonas. Sustiprinus kabeliu tekančią srovę, triukšmai sudarytų mažą naudingo signalo dalį ir jų nebūtų girdėti. Tam reikėtų, kad mikrofono išėjimo varža būtų maža. Sumontavus kartu su mikrofonu kartotuvą, gaunamas mažos išėjimo varžos mikrofonas.



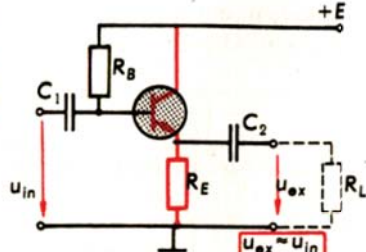
7.33 pav. Selektinio stiprintuvo schema



7.34 pav. Kartotuvo su lauko tranzistoriumi schema

Paprastiausio kartotuvo (7.34 pav.) išėjimo signalas yra įtampos kritimas ištakos rezistoriuje R_S . Įtampos stiprinimo koeficientas $K_U = u_{ex}/u_{in} \leq 1$, kadangi $|U_G| \approx |U_S|$. Kartotuvo įėjimo varža yra didelė (iki vieno megaomo), o išėjimo – maža (kelios dešimtys omų). Įėjimo grandinė (teztistoriumi R_G) teka silpna srovė. Išėjimo grandinė, kurioje įtampa beveik tokia pat, bet kurios varža (parinkus mažos varžos imtuvą) yra maža, teka stipri srovė. Pastebėsime, kad u_{in} ir u_{ex} fazės sutampa. Toks kartotuvai yra vadinamas išstakinu.

Įtampos kartotuvai gali būti sudaromi panaudojant ir kitus stiprinimo elementus. 7.35 pav. parodyta emiterinio įtampos kartotuvo su dvipoliu tranzistoriumi schema. Šiuo atveju $U_E \approx U_B$ ir $K_U = u_{ex}/u_{in} \leq 1$.



7.35 pav. Kartotuvo su dvipoliu tranzistoriumi schema

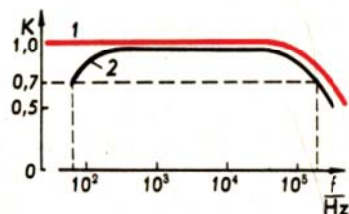
7.6.3. Nuolatinės srovės stiprintuvai; nulinis dreifas. Nuolatinės srovės stiprintuvai yra tokie, kurie stiprina ne tik greitai, bet ir lėtai kintančius įėjimo signalus (7.36 pav.), t. y. ne tik kintamąją, bet ir nuolatinę įėjimo signalo dedamąją.

Paprastiausio nuolatinės srovės stiprintuvo (7.37 pav.) stiprinimo elementas yra dvipolis tranzistorius. Bazės srovė atidaro tranzistorių, ir tarp išėjimo gnybtų gaunamas įtampos kritimas u_{ex} . Šiam stiprintuvui reikia atlikti vadinamąją nulio korekciją. Tam jo įėjimo gnybtai sujungiami trumpai ($u_{in}=0$), o potenciometro R_0 slankiklis nustatomas tokioje padėtyje, kad būtų $u_{ex}=0$.

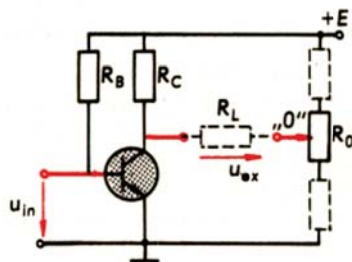
Matome, kad nuolatinės srovės stiprintuvai yra paprastesnis (nėra nė vieno kondensatoriaus ar transformatoriaus), daug platesnė jo dažninė amplitudės charakteristika. Tačiau jis turi esminį trūkumą – „nulinis dreifas“.

Nulinis dreifas pasireiškia tuo, kad, nesant jokio įėjimo signalo, tarp išėjimo gnybtų gali atsirasti įtampa, kuri laikui bėgant kinta atsitiktiniu dėsniu (7.38 pav.). Pagrindinė nulinio dreifo priežastis yra temperatūros įtaka stiprinimo elementui. Gali būti ir kitos priežastys: tai maitinimo įtampos nestabilumas, grandinės elementų parametrų kitimas laikui bėgant ir kiti faktoriai.

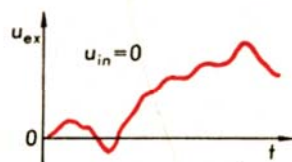
Nulinio dreifui sumažinti yra naudojamos įvairios priemonės. Pirmiausia parenkami stabilių charakteristikų stiprinimo elementai, mažinama temperatūros įtaka jiems, stabilizuojama maitinimo įtampa. Dažnai tos priemonės būna nepakankamos. Galima nuolatinės srovės signalą specialiais keitikliais pakeisti kintamosios srovės signalu, kurį po to stiprinti kintamosios srovės stiprintuvais. Efektyviausiai nulinis dreifas sumažinamas, sudarius diferencinį nuolatinės srovės stiprintuvą.



7.36 pav. Nuolatinės (1) ir kintamosios (2) srovės stiprintuvų dažninių amplitudės charakteristikų pavyzdžiai



7.37 pav. Paprastiausio nuolatinės srovės stiprintuvo schema



7.38 pav. Nuolatinės srovės stiprintuvo nulinis dreifas

7.6.4. Diferencinis nuolatinės srovės stiprintuvai. Jis sudaromas iš dviejų nuolatinės srovės stiprintuvų. Tarkime, kad stiprinimo elementai yra netiesiniai valdomi rezistoriai $NL1$ ir $NL2$ (7.39 pav.). Jei abiejų stiprintuvų elementų

parametrai yra vienodi, tai $u_{ex1} = Ku_{in1}$, $u_{ex2} = Ku_{in2}$. Diferencinio stiprintuvo išėjimo įtampa:

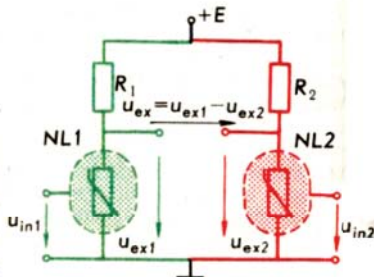
$$u_{ex} = u_{ex1} - u_{ex2} = K(u_{in1} - u_{in2}), \quad (7.25)$$

t. y., K kartų yra sustiprinamas įėjimo signalų skirtumas.

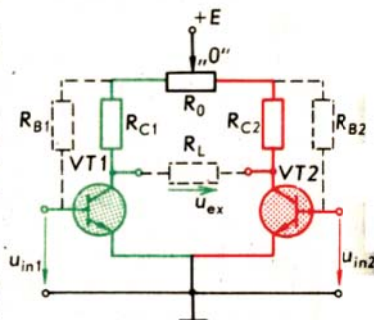
Tokio diferencinio stiprintuvo grandinė yra nuolatinės srovės tiltelis, kurio vienoje įstrižainėje yra įtampos šaltinis, o kitoje – apkrova. Diferencinio stiprintuvo darbo stabilumas priklauso nuo to, kaip identiški yra parinktų elementų parametrai. Maitinimo įtampos ar aplinkos temperatūros pokyčiai turės vienodą įtaką išėjimo įtampoms u_{ex1} ir u_{ex2} , ir jų skirtumas u_{ex} nuo to nepasikeis. Kaip tik dėl to galime laikyti, kad tokio stiprintuvo nulinio dreifo nėra. Ypač stabiliai dirba diferencinis nuolatinės srovės stiprintuvas – mikroschema, nes jos abiejų dalių tranzistorių ir rezistorių parametrai yra identiški, jiems vienodą įtaką turi temperatūra.

Kai diferenciniam stiprintuvui parenkami dvipoliai tranzistoriai (7.40 pav.), jo darbo režimui sudaryti bazės grandinėse yra įjungiami rezistoriai R_{B1} ir R_{B2} . Kai elementų parametrai nėra idealiai vienodi, nulio korekcijai naudojamas rezistorius, kurio varža lygi R_0 .

Visų nagrinėtų nuolatinės srovės stiprintuvų trūkumas yra tas, kad jų apkrova nesujungta su tašku, kurio potencialas yra lygus nuliui. Tai būtina, sudarant daugiapakopį stiprintuvą, kai vienos pakopos išėjimas yra kitos pakopos įėjimas. Šio trūkumo neturi **nuolatinės srovės stiprintuvai**, kurie yra maitinami iš dviejų nuolatinės EVJ šaltinių.



7.39 pav. Diferencinio nuolatinės srovės stiprintuvo atstojamoji schema



7.40 pav. Diferencinio nuolatinės srovės stiprintuvo su dvipoliais tranzistoriais schema

7.6.5. Operaciniai stiprintuvai. Tai universalios paskirties stiprintuvai, kurie skirti ne tik įtampai ar srovei stiprinti, bet ir kitoms operacijoms atlikti: palyginti, sudauginti, padalyti, susumuoti, apriboti, nufiltruoti įvairius signalus. Dėl to, kad jie pradžioje buvo skirti labai įvairioms operacijoms (dažniausiai analoginėse skaičiavimo mašinose) atlikti, jie buvo pavadinti operaciniais stiprintuvais.

Šiuolaikiniai operaciniai stiprintuvai yra nuolatinės srovės diferenciniai stiprintuvai. Juose yra dvi ar daugiau stiprinimo pakopos bei kiti papildomi elementai. Stiprintuvų parametrai parenkami tokie, kad jie būtų kuo universalūs. Taikant operacinius stiprintuvus dažniausiai **pakanka žinoti tik įėjimo ir išėjimo parametrus bei savybes**, nesidomint jų vidaus struktūra.

Schemose operacinis stiprintuvas žymimas stačiakampiu su trikampio (stiprintuvas) ir begalybės (stiprinimo koeficientas labai didelis) ženklais (7.41 pav.). Vienas jo įėjimas vadinamas neinvertiniu, o kitas (pažymėtas skrituliuku) – invertiniu. Prijungus prie **neinvertinio** įėjimo sig-

nalą u_p , gaunamas tos pačios fazės išėjimo signalas u_{ex} . Kai tas pats signalas (pavadinkime jį u_n) prijungiamas prie **inversinio** įėjimo, išėjimo signalo fazė yra priešinga įėjimo signalo u_n fazei. Tam, kad operacinis stiprintuvas stiprintų ir teigiamo, ir neigiamo poliarumo signalus, naudojami du (dažniausiai 15 V) maitinimo šaltiniai. Schemose paprastai nerodoma, kaip jie prijungti.

Tarp inversinio ir neinversinio įėjimų gali būti prijungtas diferencinis įėjimo signalas: $u_d = u_{in} = u_p - u_n$. Tuo atveju išėjimo signalo fazė yra tokia pat kaip u_d . Diferencinio stiprinimo koeficientas yra $K_d = \Delta u_{ex} / \Delta u_{in}$. Idealaus operacinio stiprintuvo amplitudės charakteristika $U_{exm} = f(U_{inm})$ plačiame diapazone yra tiesė (7.42 pav.). Didžiausia išėjimo įtampa yra apie 3 V mažesnė už maitinimo šaltinio įtampą, todėl ji gali būti lygi ± 12 V.

Kadangi operacinis stiprintuvas iš esmės yra nuolatinės srovės stiprintuvas, **jame galimas nulinis dreifas. Nors dreifas palyginti mažas, tačiau yra numatytos priemonės nulinio dreifui kompensuoti**, panaudojant išorinės grandinės elementus.

Šiuolaikiniai **operaciniai stiprintuvai** – tai **monolitinės integrinės mikroschemos**. Jie yra pigūs, patikimi, mažų matmenų: daugumos šiuolaikinių operacinių stiprintuvų matmenys ir kaina tokia pat kaip pavienių tranzistorių.

Operacinių stiprintuvų parametrai yra gana įvairūs; jie priklauso nuo stiprintuvo paskirties. Daugiausia naudojami bendros paskirties operaciniai stiprintuvai, kurių parametrai yra tokie: **diferencinis stiprinimo koeficientas K_d yra nuo 10^5 iki 10^6 , dažnių pralaidumo juosta – nuo 0 iki 1–10 MHz, įėjimo varžos R_{in} – nuo 10^6 iki $10^9 \Omega$, didžiausia išėjimo įtampa ± 12 V, didžiausia išėjimo srovė – ± 20 mA.**

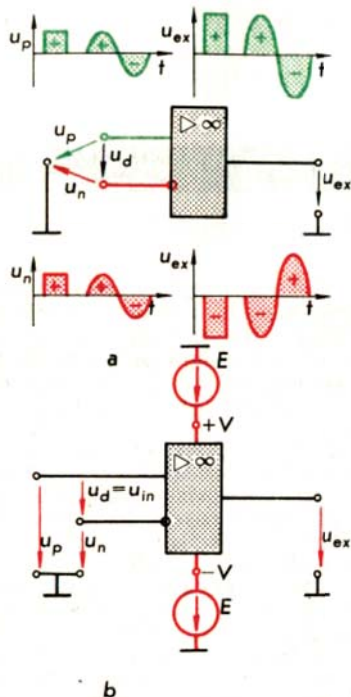
Dažniausiai naudojami operaciniai stiprintuvai su įvairiais grįžtamaisiais ryšiais. Prijungę neigiamą grįžtamąjį ryšį, gauname stiprinimo koeficientą $K_v = K_d / (1 + \gamma K_d)$ (žr. (7.16) lygybę). Kadangi operacinių stiprintuvų stiprinimo koeficientai yra dideli, tai **galima naudoti stiprius neigiamus grįžtamuosius ryšius**.

Kaip pavyzdį išnagrinėsime operacinio stiprintuvo su neigiamu grįžtamoju ryšiu veikimą (7.43 pav.). Iš įtamos dalytuvo (R ir R_v) išėjimo įtamos dalis $u_v = R_v u_{ex} / (R + R_v)$ (žr. (1.52) lygybę) grąžinama į stiprintuvo inversinį įėjimą. Grįžtamojo ryšio perdavimo koeficientas $\gamma = u_v / u_{ex}$.

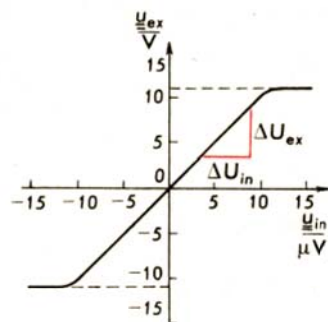
Įvedę stiprų neigiamą grįžtamąjį ryšį ($\gamma K_d \gg 1$), gauname stiprinimo koeficientą $K_v \approx 1/\gamma = 1/(u_v/u_{ex}) = u_{ex}/u_v$, todėl

$$K_v \approx 1 + (R/R_v). \quad (7.26)$$

Kaip matome, stiprinimo koeficientas priklauso tik nuo R ir R_v varžų santykio. Kai $R \approx 0$, $K_v \approx 1$, išėjimo sig-



7.41 pav. Operacinio stiprintuvo neinversinio ir inversinio įėjimo ir išėjimo signalai (a) ir jungimo schema (b)



7.42 pav. Operacinio stiprintuvo amplitudės charakteristika

nalas yra toks pat kaip įėjimo. Tai reiškia, kad, prijungus išėjimo signalą tiesiog prie inversinio įėjimo, operacinis stiprintuvas veikia kaip kartotuvas (7.44 pav.).

7.7

Elektroniniai generatoriai

Elektroniniu generatoriumi vadinamas toks įtaisas, kuris **nuolatinės srovės energiją paverčia kintamosios tam tikro dažnio ir formos srovės energija**. Kai gaunami virpesiai yra **sinusiniai**, generatoriai vadinami **harmoninių virpesių generatoriais**. Kai virpesiai **stačiakampio, trapecijos, trikampio, pjūklų ar kitokios formos**, – generatoriai yra vadinami **relaksacinių virpesių generatoriais**. Priklausomai nuo generuojamų virpesių dažnio elektroniniai generatoriai yra skirstomi į šitokių: žemo dažnio ($f=0,001 \text{ Hz} - 100 \text{ kHz}$), aukšto dažnio ($f=100 \text{ kHz} - 100 \text{ MHz}$) ir labai aukšto dažnio ($f=100 \text{ MHz}$ ir daugiau).

Prie elektroninių generatorių yra jungiami labai įvairūs imtuvai. Ypač plačiai taikomi harmoninių virpesių generatoriai. Ryšių technikoje tai – radijo ir televizijos stočių siųstuvai; pramonėje – aukšto dažnio metalų grūdinimo ir lydymo, metalų ir plastmasių suvirinimo, medžio ir kitų medžiagų džiovinimo įrenginiai; medicinoje – aukšto dažnio giluminio šildymo aparatai; maisto pramonėje – sterilizavimo įrenginiai, aukšto dažnio voryklės ir t. t.

Relaksacinių virpesių generatoriai taip pat taikomi gana plačiai: 70% elektroninės aparatūros turi juos kaip mazgus. Jie naudojami įvairiuose matavimo ir elektroniniuose prietaisuose, skaičiavimo technikos įrenginiuose. Pavyzdžiui, televizoriaus ar oscilografo eilučių skleistinei (žr. 8.5.3) naudojami pjūklinės įtampos generatoriai (žr. 4.2.4), įvairiuose elektroniniuose laikrodžiuose, kalkuliatoriuose, taip pat galinguose pramoniniuose įrenginiuose tiristorių valdymui (žr. 7.2.3) naudojami stačiakampių virpesių generatoriai.

7.7.1. Generatoriaus susižadinimo sąlygos. Elektroninį generatorių sudaro **stiprintuvas ir grįžtamojo ryšio blokas** (7.45 pav.). Į stiprintuvo įėjimą patenka tiksliai grįžtamojo ryšio signalas, todėl toks generatorius dar yra vadinamas **autogeneratoriumi** arba savaiminių virpesių generatoriumi. Pagrindiniai jo kompleksiniai parametrai yra tokie: išėjimo ir įėjimo įtampos $\underline{U}_{ex}$ ir $\underline{U}_{in}$, stiprinimo koeficientas $\underline{K}$, grįžtamojo ryšio perdavimo koeficientas $\underline{\gamma}$.

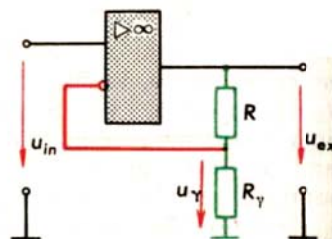
Generatoriaus stiprintuvo įėjimo signalas yra išėjimo signalo dalis: $\underline{U}_{in} = \underline{\gamma} \underline{U}_{ex}$. Generatoriaus išėjimo signalas: $\underline{U}_{ex} = \underline{K} \underline{U}_{in} = \underline{\gamma} \underline{K} \underline{U}_{ex}$. Iš čia gauname: $\underline{\gamma} \underline{K} = 1$. Tai kompleksinė lygtis, kurią galima užrašyti šitaip:

$$\underline{\gamma} \underline{K} = \gamma e^{j\varphi} K e^{j\psi} = \gamma K e^{j(\varphi + \psi)} = 1. \quad (7.27)$$

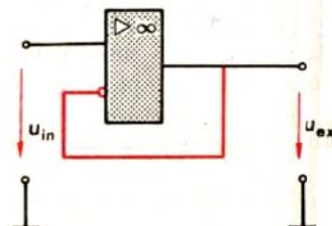
Matome, kad generatoriaus susižadinimo sąlygos yra dvi:

$$1) \gamma K = 1; \quad 2) \varphi + \psi = 0, 2\pi, \dots \quad (7.28)$$

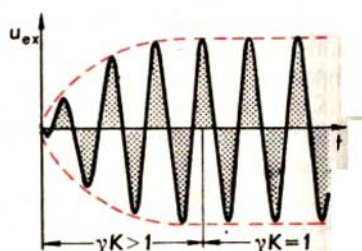
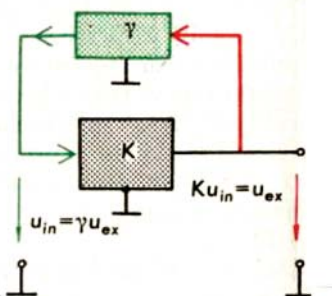
Pirmoji sąlyga vadinama amplitudžių balanso, antroji – **fazių balanso sąlyga**. Pirmoji sąlyga ($\gamma K = 1$) rodo, kad stiprintuvo įėjimo signalas sustiprinamas stiprintuve K kartų ir grįžtamojo ryšio γ



7.43 pav. Operacinis stiprintuvas su neigiamu grįžtamojo ryšiu



7.44 pav. Operacinio stiprintuvo, veikiančio kartotuvo režimu, jungimo schema

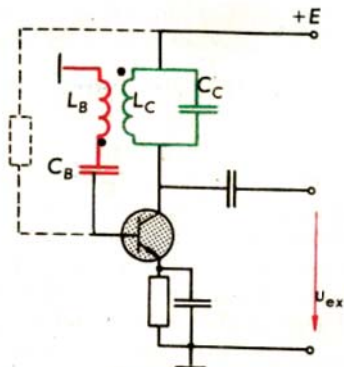


b

7.45 pav. Elektroninio generatoriaus struktūrinė schema (a) ir išėjimo signalas (b)

kartų susilpnintas vėl patenka į stiprintuvo įėjimą. Jeigu sandauga γK bent šiek tiek didesnė už vienetą, įėjimo signalas stiprėja tol, kol stiprintuvas pradeda įsisotinti. Esant tokiems dideliems signalams, stiprintuvo amplitudės charakteristika yra netiesinė. Tuomet stiprinimo koeficientas sumažėja ir išėjimo signalas nustoja didėti (7.45 pav., b). Kaip matome, paties stiprintuvo savybės sulauko išėjimo signalo didėjimą, ir sandauga γK tampa lygi vienetui. Taip gaunami nusistovėjusio režimo savaiminiai virpesiai.

Antroji sąlyga ($\varphi + \psi = 0, 2\pi \dots$) rodo, kad generatoriuje grįžtamasis ryšys turi būti teigiamas: grįžtamojo ryšio bloko išėjimo ir stiprintuvo įėjimo signalai turi būti vienodos fazės.



7.46 pav. LC autogeneratoriaus principinė schema

7.7.2. Harmoninių virpesių autogeneratorius. Vienas iš paprasčiausių yra LC autogeneratorius (7.46 pav.), kurio stiprinimo elementas yra dvipolis tranzistorius. Jo kolektoriaus grandinėje įjungtas virpamasis kontūras, sudarytas iš ritės, kurios induktyvumas L_C , lygiagrečiai sujungtos su kondensatoriumi, kurio talpa C_C . Kontūro aktyvioji varža yra R_C (paprastai schemoje ji nerodoma kaip rezistorius).

Įjungus nuolatinės EVJ šaltinį $+E$, kontūre $L_C C_C$ atsiranda harmoniniai virpesiai. Jų dažnis $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_C C_C})$. Jie gęsta, nes gauta iš šaltinio energija yra suvartojama realiame, turinčiame varžą R_C , kontūre. Kad virpesiai negęstų, reikia kontūro energiją papildyti iš nuolatinės EVJ šaltinio.

Bazės grandinėje yra ritė L_B ir kondensatorius C_B . Abi ritės turi abipusės indukcijos ryšį (žr. 2.8.2). Kintant ritės L_C srovei, ritėje L_B indukuojama abipusės indukcijos EVJ. Kadangi ritė L_B per kondensatorių C_B yra sujungta su tranzistoriaus baze, tranzistorius yra periodiškai atidaromas. Virpamuoju kontūru teka kolektoriaus srovė, todėl jam periodiškai suteikiama papildoma energija. Gaunami negęstantys harmoniniai virpesiai.

Paprastai ritės L_B ir kondensatoriaus C_B parametrai parenkami taip, kad jų savųjų virpesių dažnis būtų lygus f_0 . Išėjimo ir įėjimo signalo fazės turi būti tos pačios, nes tik tuo atveju grįžtamasis ryšys yra teigiamas ir gaunami savaiminiai virpesiai.

7.7.3. Generuojamųjų virpesių stabilizavimas. Vienas iš svarbių rodiklių, apibūdinančių generatoriaus kokybę, yra generuojamojo dažnio nestabilumas, kuris turi būti kiek galint mažesnis ir yra išreiškiamas santykiu $\Delta f/f_0$; čia Δf yra dažnio svyravimai. Nestabilus dažnis gali būti dėl labai įvairių priežasčių, pakeičiančių virpamojo kontūro parametrus – induktyvumą ir talpą. Jie gali pakisti dėl aplinkos temperatūros pokyčio, parazitinių induktyvumų ir talpų, išorinių magnetinių laukų įtakos, mechaninio poveikio ir kt. Jeigu reikalingas stabilus dažnis, taikomos įvairios dažnio stabilizavimo priemonės.

Viena iš tokių priemonių yra LC parametų stabilizavimas, kuris vadinamas parametrinio stabilizavimu. Juo galima sumažinti dažnio nestabilumą iki 10^{-5} (Δf sudaro 0,001% dažnio f_0). Geriausia dažnį stabilizuoti panaudojant ploną kvarco (arba turmalino) plokštelę ar strypelį. Kvarcas yra piezoelektrinė medžiaga; suspaudžiant kvarco plokštelę, priešingose jos sienelėse atsiranda teigiami ir neigiami elektros krūviai. Ištempiant plokštelę, elektros krūviai yra priešingo poliarumo, negu suspaudžiant. Kai kvarco plokštelę veikia kintamasis elektrinis laukas, joje susidaro tamprūs mechaniniai virpesiai, kurie savo ruožtu sukuria plokštelės paviršiuje elektros krūvius. Taigi kvarco kristalas yra rezonansinė elektromechaninė sistema.

Priklausomai nuo kristalo matmenų ir jo pjūvių krypties kiekvienos plokštelės rezonansinis dažnis yra skirtingas ir labai stabilus. Jis gali būti nuo 10^4 iki 10^8 Hz. Kvarcinio rezonatoriaus galima gauti dažnio nestabilumą $10^{-6} - 10^{-10}$.

Samprata apie impulsinę elektroniką

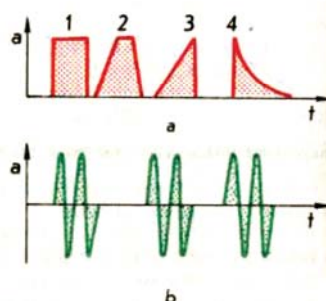
Įvairiose elektrinėse grandinėse taikoma impulsinė elektros srovė ar įtampa, ypač dažnai elektrotechnologijoje (impulsinis elektrinis suvirinimas, elektrohidraulinio efekto panaudojimas, elektroerozinis medžiagų apdirbimas), elektrinei žūklei, impulsinėse elektros pavarose ir kitur. Impulsinė technika plačiai taikoma medicinoje, šviesos technikoje, signalizacijoje, ryšio technikoje. Radiolokacijos, kai kurie matavimo technikos įrenginiai ir prietaisai negali apsieiti be impulsinės technikos įtaisų. Numatoma transliuoti televizijos laidas, taikant skaitmeninę (impulsinę) signalo perdavimo ir priėmimo techniką. Visos taip plačiai taikomos skaitmeninės ESM iš tiesų yra impulsinės technikos įrenginiai.

Tai, kad impulsinė technika taip plačiai taikoma, galima paaiškinti kai kuriomis impulsinių grandinių ypatybėmis. Gali būti tik dvi tokios grandinės būsenos: **signalas yra arba jo nėra. Kadangi tarpinių būsenų nėra, o signalų imtuvai reaguoja tik į vieną ar kitą diskrečią grandinės būseną, pašaliniai trukdžiai – fonas – neturi įtakos impulsinės grandinės darbui.** Tai ypač svarbu įvairioms ryšio informacinėms sistemoms.

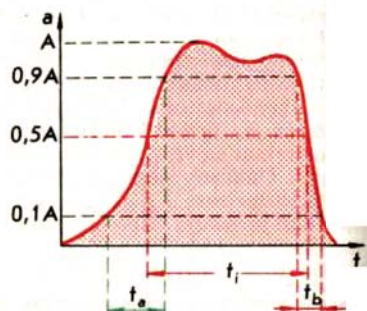
Antra vertus, **nedidelės energijos impulsas yra tuo didesnės galios, kuo mažesnė jo trukmė.** Pavyzdžiui, impulsinės fotolempos, naudojamos šviesinei signalizacijai, blyksnio galia yra apie 40 kW. Tuo tarpu blyksnio energija tesudaro tik apie 40 J, o vidutinė lempos galia yra vos keli vatai.

7.8.1. Elektrinio impulso charakteristikos. Įvairiose impulsinėse sistemose yra naudojami trumpi (iki $10^{-2} - 10^{-9}$ s trukmės) elektros srovės ar įtampos impulsai. **Impulso forma** gali būti labai įvairi (7.47 pav.). Stačiakampio (1), trapecijos (2), pjūklo (3), eksponentės (4) ir kitų formų impulsai yra vadinami videoimpulsais (arba tiesiog impulsais). Radiotechnikoje yra naudojami radijo impulsai. Tai trumpi aukšto dažnio harmoninių virpesių impulsai.

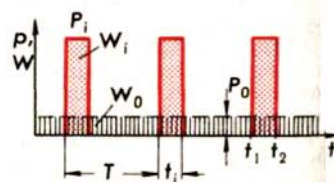
Realiose elektrinėse grandinėse kiekvieno impulso pradžioje bei pabaigoje vyksta pereinamieji procesai. Šių procesų metu net ir labai maži induktyvumas bei talpa daro žalingą įtaką. Impulso forma yra iškreipoma (7.48 pav.) ir kuo impulsai trumpesni ir dažnesni, tuo labiau.



7.47 pav. Videoimpulsų (a) ir radioimpulsų (b) forma



7.48 pav. Realus stačiakampio impulso forma



7.49 pav. Impulso galia ir energija

Impulso (srovės ar įtampos) **amplitudė** paprastai yra didžiausia jo vertė ir žymima A (žr. 7.48 pav.). Impulso **priekinio fronto trukmė** t_a yra laiko tarpas nuo momento, kai impulso vertė tampa lygi 10% amplitudės vertės, iki momento, kai ji tampa lygi 90% amplitudės A . Analogiškai apskaičiuojama impulso **užpakalinio fronto trukmė** t_b , kai impulso vertė mažėja. Impulso trukmė t_i yra laikas, kurio metu impulso vertė yra ne mažesnė negu 50% jo amplitudės A . (Kai kuriais specialiais atvejais minėtos impulso charakteristikos skaičiuojamos kiek kitaip).

Impulso sekos retumas Q , impulso energija W_i , impulso galia P_i ir impulso vidutinė galia P_0 (7.49 pav.) apskaičiuojamos šitaip:

$$Q = T/t_i; \quad W_i = \int_{t_i} p_i(t) dt; \\ P_i = W_i/t_i; \quad P_0 = W_i/T; \quad (7.29)$$

čia T – impulsų kartojimosi periodas, t_i – impulso trukmė, p_i – momentinė galia.

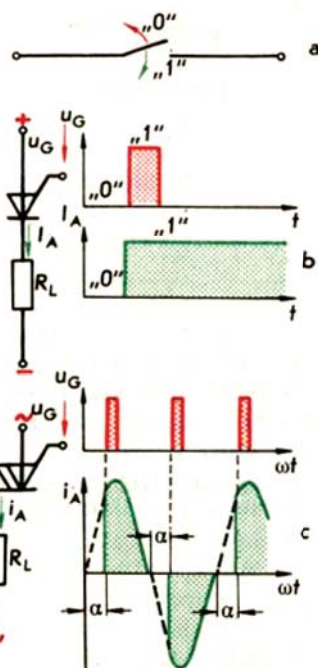
Matome, kad $P_i/P_0 = T/t_i = Q$. Tai reiškia, kad **impulso galia yra tuo didesne**, lyginant su vidutine impulsų galia, **kuo didesnis sekos retumas**. Pavyzdžiui, kai radiolokatoriaus $Q=1000$, o vidutinė siųstuvo galia $P_0=1$ kW, iš antenos sklinda galingi – $P_i=1000$ kW – impulsai. Panašus impulsų sekos retumas ir galių santykiai yra šviesinės impulsinės signalizacijos, metalų apdirbimo elektroziniu būdu, elektrinės žuklės įrenginiuose ir kt.

7.8.2. Elektroninių elementų veikimas jungiklio režimu.

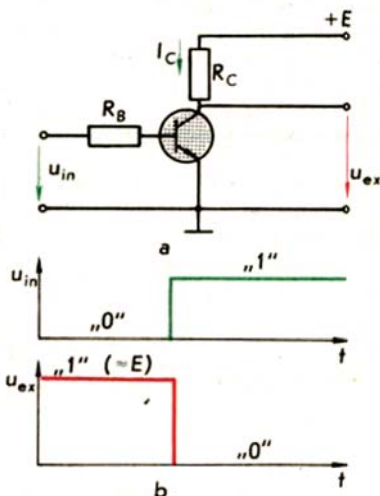
Daugelyje elektronikos ir elektrotechnikos grandinių yra naudojamas paprasčiausias jungiklis, kuris sujungia arba atjungia elektrinę grandinę. Elektrinės grandinės junginėti mechaniniais jungikliais netinka, kai reikia, kad jungikliai veiktų labai greitai ir patikimai, jų matmenys būtų gana maži, juos būtų galima valdyti silpnais elektriniais signalais.

Elektroniniai jungikliai yra naudojami ESM, ryšių technikoje, telemechanikoje, matavimo technikoje, automatinėje. Jie reikalingi ir pramoniniams didelės galios elektrotechnikiniams ir elektrotechnologiniams įrenginiams.

Elektroninį jungiklį sąlygiškai galima vaizduoti kontaktu ar jungikliu (7.50 pav.). Kai grandinė teka srovė, jungiklio padėtis pažymėta „1“ (signalas yra). Kai grandinėje srovės nėra, jungiklio padėtis „0“ (signalas nėra).



7.50 pav. Elektrinio jungiklio schema (a), tiristorinių jungiklių schema, valdymo signalų bei valdomosios grandinės srovės priklausomybė nuo laiko (b, c)



7.51 pav. Tranzistorinio jungiklio schema (a) ir valdymo signalų u_{in} bei valdomosios įtampos u_{ex} priklausomybė nuo laiko (b)

Kaip greitaveikiai elektroniniai jungikliai, valdomi silpnais signalais, nuolatinės srovės jėgos grandinėse yra naudojami tristoriai (žr. 7.50 pav., b), o kintamosios srovės jėgos grandinėse – triakai (žr. 6.4.2). Vėlinant valdymo impulsus tam tikru kampu α , triaką galima panaudoti kaip srovės reguliatorių (žr. 7.2.3, 7.50 pav., c). Tristoriai yra naudojami junginėti elektros pavarų, elektrotechnologinių, elektroenergetikos ir kitokių įrenginių jėgos grandinės.

Silpnų srovių grandinėse jungiklio režimu veikia puslaidininkiniai vienpoliai ir dvipoliai tranzistoriai. Kai prie tranzistoriaus įėjimo prijungiamas signalas, tranzistoriaus varža labai sumažėja, ir juo gali tekėti srovė. Kai nėra jokio įėjimo signalo, tranzistoriaus varža yra labai didelė, ir juo srovė neteka.

Tranzistoriniam jungikliui (7.51 pav.) naudojamas tranzistorius, veikiantis įsotintu režimu. Kai valdymo signalo nėra ar jis neigiamas ($U_{in} \leq 0$), tranzistoriumi srovė neteka, įtampa $U_{ex} \approx E$. Kai įėjimo signalas teigiamas ir pakankamai didelis (bazės srovė I_B artima didžiausiai leistinajai jos vertei), teka srovė $I_C = E/R_C$, o $U_{ex} \approx 0$.

Ijungimo ir atjungimo metu tranzistoriuje ir junginėjamojoje grandinėje vyksta pereinamieji procesai. Dėl to U_{ex} pakinta ne šuoliu, o šiek tiek uždelstai (7.52 pav.). Nuo signalo prijungimo arba jo išjungimo iki tranzistoriaus darbo režimo pasikeitimo praeina ne tiek daug laiko (nuo 1 ns iki 1 μ s), tačiau tai riboja šiuolaikinių elektroninių įrenginių (ypač ESM) veikimo spartą. Šiam laikui trumpinti yra naudojamos įvairios priemonės; dauguma jų skirtos pereinamajam procesui paspartinti.

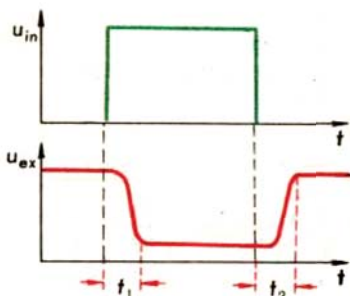
7.8.3. Tiesinės impulsų formavimo grandinės. Jei elektrinė grandinė yra tiesinė (sudaryta iš tiesinių rezistorių, kondensatorių ir ričių), tai joje sinusinių periodinių signalų forma neiškraipoma, o gali pasikeisti tik jų fazė (žr. 2.9). Kai tokia elektrinė grandinė sklinda elektriniai impulsai, jų forma gali būti pakeičiama. Impulsinėje technikoje naujai impulsų formai sudaryti naudojamos specialios tiesinės elektrinės grandinės. Iš jų dažniausiai – diferencijavimo ir integravimo.

Kai prie diferencijavimo grandinės (7.53 pav.) įėjimo prijungiama įtampa $u_{in}(t)$, išėjimo signalas proporcingas jos pirmajai išvestinei

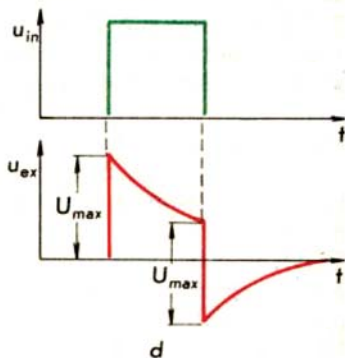
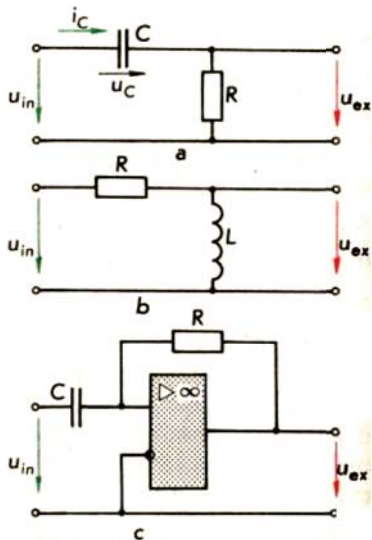
$$u_{ex} = \tau du_{in}/dt; \quad (7.30)$$

čia τ yra laiko konstanta: $\tau = RC$ arba $\tau = L/R$.

Tarkime, kad įėjimo įtampa yra u_{in} . Kondensatoriaus (žr. 7.53 pav., a) srovė yra $i_C = C du_C/dt$. Kadangi $u_C = u_{in} - u_{ex}$, tai $i_C = C (du_{in}/dt -$



7.52 pav. Tranzistoriaus perjungimo diagrama, t_1 ir t_2 – įjungimo ir išjungimo delsos trukmės



7.53 pav. Diferencijavimo grandinės: a – RC ; b – RL ; c – RC su operacinio stiprintuvo ir d – stačiakampio impulso formos pakeitimas

$-du_{ex}/dt$). Išėjimo įtampa $u_{ex} = R i_c$. Įrašę i_c reikšmę, gauname: $u_{ex} = RC(du_{in}/dt - du_{ex}/dt)$. Kai $du_{in}/dt \gg du_{ex}/dt$, $u_{ex} \approx RC du_{in}/dt = \tau du_{in}/dt$.

Praktiškai išėjimo impulso forma 7.53 pav., a ir b pavaizduotoms grandinėms šiek tiek skirsis nuo parodytos 7.53 pav., d. Diferencijavimo grandinė, kuriai panaudotas operacinis stiprintuvas su neigiamu grįžtamuoju ryšiu, yra geresnių parametrų. Jos įėjimo varža yra didelė, galima gauti didelį stiprinimo koeficientą. Be to, elektroninis diferenciatorius yra tikslesnis: jo išėjimo impulso forma yra artimesnė įėjimo impulso pirmajai išvestinei, užpakalinis u_{ex} impulso frontas yra daug statenesnis, negu RC ar RL diferenciatorių išėjimo impulsų.

Integravimo grandinės (7.54 pav.) sudaromos taip pat iš RC arba iš RL elementų. Jų išėjimo įtampa yra proporcinga įėjimo impulso integralui:

$$u_{ex} = \frac{1}{\tau} \int_0^t u_{in}(t) dt. \quad (7.31)$$

Tarkime, kad grandinės (7.54 pav., a) įėjimo įtampa yra $u_{in}(t)$. Per kondensatoriaus teka srovė $i_c(t) = (u_{in} - u_{ex})/R$. Išėjimo įtampa

$$u_{ex} = u_c = \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt.$$

Įrašę i_c reikšmę gauname:

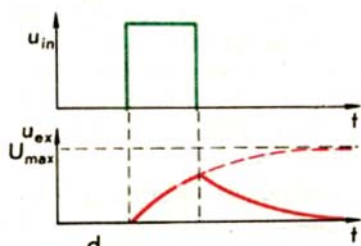
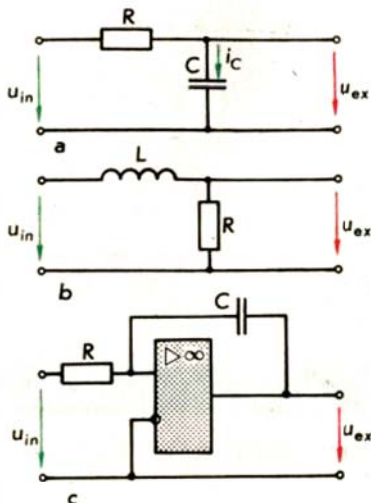
$$u_{ex} = \frac{1}{RC} \int_0^t (u_{in} - u_{ex}) dt.$$

Pradiniu kondensatoriaus įkrovimo momentu $|u_{in}| \gg |u_{ex}|$, todėl

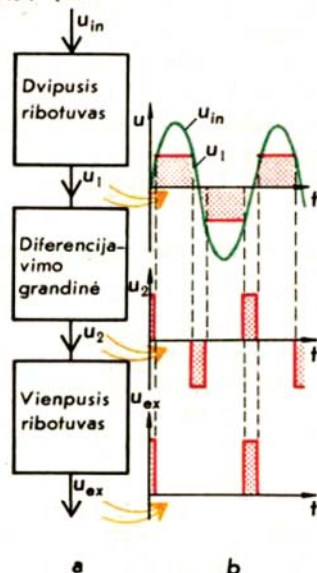
$$u_{ex} \approx \frac{1}{\tau} \int_0^t u_{in} dt.$$

Stačiakampis įėjimo impulsas, jį suintegravus, turėtų tapti išėjimo impulsu, kurio abu frontai kinta tiesiniu dėsnio. Iš tiesų nagrinėtoje grandinėje (7.54 pav., a ir b) gaunami išėjimo impulsai, kurių abu frontai yra eksponentinių funkcijų pradinės dalys. Integravimas yra tuo tikslesnis, kuo didesnė laiko konstanta τ , lyginant ją su impulso trukme. Kad integravimo paklaida būtų mažesnė už 10%, reikia, kad būtų $\tau > 5t_i$.

Integratorius tikslesnis, kai naudojamas operacinis stiprintuvas su neigiamu grįžtamuoju ryšiu.



7.54 pav.



7.55 pav. Impulsų formuotuvo struktūrinė schema (a) ir impulsų diagrama (b)

7.8.4. Netiesinės impulsų formavimo grandinės. Iš sinusiniu dėsniu kintančios įtampos formuoti impulsus galima įvairiose netiesinėse grandinėse. Dažniausiai tam yra naudojami įtaisai – ribotuvas, kurie apriboja generatoriaus signalo kėtimą ribas. Pavyzdžiui, trapecijos formos įtampą galima gauti iš sinusinės įtampos, neleidžiant pastarajai kisti daugiau kaip iki vertės $\pm U_1$ (7.55 pav.). Tam galime panaudoti dvipusį ribotuvą. Prijungę trapecijos formos įtampą prie diferencijavimo grandinės, išėjime gauname stačiakampių impulsus. Jei reikalingi tik vieno poliarumo impulsai, galima panaudoti vienpusį ribotuvą.

Kaip **dvipusį ribotuvą** galima panaudoti grandinė, sudaryta iš dviejų diodų ir stabilitronų (7.56 pav.). Pirmąjį pusperiodį išėjimo įtampa yra lygi įėjimo įtampai ir didėja tol, kol jos momentinė vertė susilygina su pirmojo stabilitrono $VD1$ stabilizuojamos įtampos verte U_{Z1} . Pirmąja šaka teka srovė, išėjimo įtampa yra lygi stabilitrono $VD1$ įtampai U_{Z1} . Kai įėjimo įtampos momentinė vertė sumažėja ir tampa mažesnę už U_{Z1} , srovė nutrūksta. Įtampos u_{in} bei u_{ex} mažėja sinuso dėsnio. Pirmąjį pusperiodį diodas $VD4$ srovės antrąja šaka nepraleidžia, todėl ji neturi įtakos impulso formai.

Antrąjį pusperiodį analogiškai yra suformuojamas trapezinis priešingos fazės išėjimo įtampos impulsas, veikiant stabilitronui $VD2$ ir diodui $VD4$.

7.9

Samprata apie loginius elementus

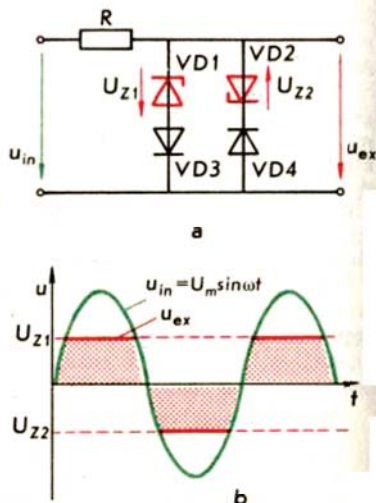
Visos skaitmeninės elektronikos pagrindą sudaro loginiai ir atminties įtaisai, kurie iš pirmo žvilgsnio atrodo sudėtingi. Iš tiesų juos sudaro daug paprastų vieno tipo elementų, kurie gali atlikti tam tikrus formalius loginius veiksmus. Impulsinis įtaisas, atliekantis loginį veiksmą, vadinamas **loginiu elementu**.

Galimos dvi priešingos loginės situacijos: „taip“ ir „ne“. Jos gali nurodyti bet kokias dvi priešybes: balta – juoda, šalta – karšta, šiaurė – pietūs, pirmyn – atgal ir t. t. Elektrinėje grandinėje tokios priešybės yra: **įjungta grandinė – išjungta grandinė**. Tuo būdu elektrinės grandinės jungiklis gali būti loginio veiksmo (loginės operacijos) veiksnys (7.57 pav.). Kai jungiklis atjungtas, jo padėtis atitinka loginę situaciją „0“, kai sujungtas, – „1“. Šie nulis – „0“ ar vienetasis – „1“ yra loginių situacijų ženklai. Kad būtų paprasčiau, toliau juos rašysime be kabučių: 0, 1.

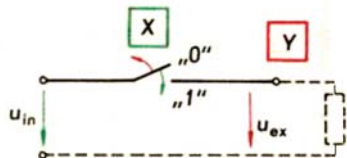
7.9.1. Pagrindiniai loginiai veiksmai. Jie yra tokie: **loginė sudėtis** (disjunkcija), **loginė daugyba** (konjunkcija) ir **loginis neigimas** (inversija). Šie veiksmai elektronikoje yra atitinkamai vadinami: **ARBA**, **IR** bei **NE**. Išnagrinėsime, kaip šie veiksmai realizuojami grandinėse, sudarytose tik iš elektrinių jungiklių.

ARBA veiksmą galima atlikti, įjungus, pavyzdžiui, du jungiklius lygiagrečiai (7.58 pav.). Šiuo atveju **elektrinė grandinė yra sujungta, jeigu sujungtas arba X_1 jungiklis, arba X_2 , arba abu: X_1 ir X_2** . Toks loginės sudėties veiksmas yra užrašomas šitaip:

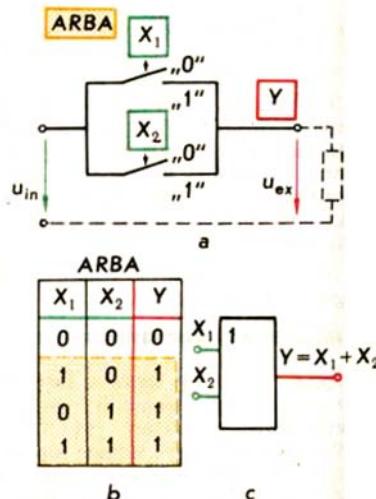
$$Y = X_1 \vee X_2 = X_1 + X_2; \quad (7.32)$$



7.56 pav. Dvipusio įtampos ribotuvo schema (a) ir įėjimo bei išėjimo įtampų kitimo kreivės (b)



7.57 pav. Elektrinis jungiklis kaip loginės operacijos elementas



7.58 pav. Loginio veiksmo ARBA jungiklių sujungimo schema (a), teisingumo lentelė (b) ir loginio elemento sutartinis ženklas (c)

čia X_1 ir X_2 yra loginiai kintamieji, kurių vertė gali būti arba 0, arba 1. **Loginė suma taip pat gali būti tik arba 0, arba 1.** Visi galimi šios loginės sudėties variantai pateikti operacijos ARBA teisingumo lentelėje. Matome, kad $Y=1$ (grandinė sujungta), kai nors vienas $X=1$ (nors vienas jungiklis sujungtas); $Y=0$ (grandinė atjungta), kai visi $X=0$ (visi jungikliai atjungti).

Loginės sudėties nereikia painioti su aritmetine sudėtimi. Štai keli loginės sudėties pavyzdžiai:

$$Y = 0 + 1 + 0 + 1 = 1; \quad Y = 1 + 1 + 1 + 1 = 1;$$

$$Y = 0 + 0 + 0 + 0 = 0.$$

Loginio elemento ARBA sutartinis ženklas yra stačiakampis, kuriame užrašytas 1, ir kuris turi tiek įėjimo išvadų, kiek gali būti prijungta loginių kintamųjų.

IR veiksmą taip pat galima atlikti jungikliais. Įjungus jungiklius nuosekliai (7.59 pav.), **elektrinė grandinė yra sujungta tik tuo atveju, kai yra sujungtas ir jungiklis X_1 , ir jungiklis X_2 .** Toks loginės daugybos veiksmas užrašomas šitaip:

$$Y = X_1 \wedge X_2 = X_1 \cdot X_2. \quad (7.33)$$

Šios loginės daugybos teisingumo lentelės rezultatus lygindami su galimais jungiklių sujungimo variantais, matome, kad $Y=1$, kai $X_1=1$ ir $X_2=1$. **Jeigu bent vienas jungiklis atjungtas ($X=0$), grandinė lieka atvira, t. y. $Y=0$.** Štai keletas loginės daugybos pavyzdžių:

$$Y = 1 \cdot 0 \cdot 1 \cdot 1 = 0; \quad Y = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1;$$

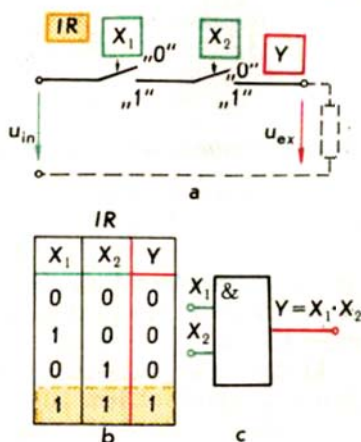
$$Y = 0 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 1 = 0; \quad Y = 0 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 0 = 0.$$

Nesunku įsitikinti, kad, kaip ir ARBA, loginiai veiksmai IR gali būti atliekami, kai yra ne tik du ar keturi loginiai kintamieji, o jų gali būti kiek norima daug. Pavyzdžiui, lifto elektrinės pavaros grandinėje yra sujungti visų šachtos durų kontaktai: jeigu bent vienos durys yra praviros, liftas neturi pradėti judėti.

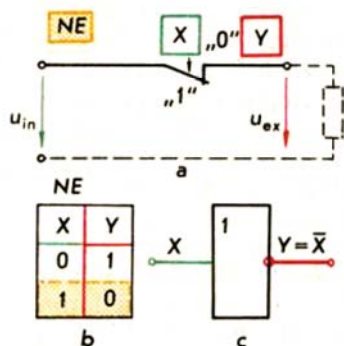
Loginio elemento IR sutartinis ženklas yra stačiakampis, kurio viduje užrašomas angliško žodžio „ir“ ženklas „&“.

Loginis neigimas yra loginis veiksmas NE. Jam paaiškinti **įjungsime į grandinę atjungiamąjį jungiklį** (7.60 pav. a). **Jo kontaktai sujungti, kol jo neličiame, – grandinė sujungta. Jungiklį paspaudus, grandinė atjungiamą, atliekamas veiksmas NE:** kai $X=0$, $Y=1$; kai $X=1$, $Y=0$. Loginio neigimo veiksmas užrašomas šitaip:

$$Y = \bar{X}. \quad (7.34)$$



7.59 pav. Loginio veiksmo IR jungiklių sujungimo schema (a), teisingumo lentelė (b), loginio elemento sutartinis ženklas (c)



7.60 pav. Loginio veiksmo NE jungiklių sujungimo schema (a), teisingumo lentelė (b) ir loginio elemento sutartinis ženklas (c)

Loginio elemento, atliekančio veiksmą NE, sutartinis ženklas yra stačiakampis su skaitmeniu 1, bet prie šio elemento gali būti prijungtas tik vienas įėjimo signalas, o jo išėjimas yra žymimas skrituliuku.

7.9.2. Inversiniai loginiai veiksmai. Kaip matėme, trims svarbiausiems loginiams veiksams atlikti reikalingi loginiai elementai ARBA, IR bei NE. **Praktiškai realizuojant integres mikroschemas, yra daug paprasčiau pagaminti loginius elementus, atliekančius inversinius veiksmus ARBA-NE bei IR-NE.**

ARBA-NE veiksmą paaiškinsime grandine su nuosekliai įjungtais dviem atjungiamaisiais jungikliais (7.61 pav.). Kai $X_1=0$ ir $X_2=0$ grandinė sujungta, t. v. $Y=1$. **Grandinę galima atjungti, paspaudus arba pirmą, arba antrą jungiklį, arba abu iš karto.** ARBA-NE loginis veiksmas užrašomas šitaip:

$$Y = \overline{X_1 + X_2}. \quad (7.35)$$

ARBA-NE veiksmą atliekantis elementas žymimas panašiai kaip ARBA, tik jo išėjime yra rodantis inversiją skrituliukas.

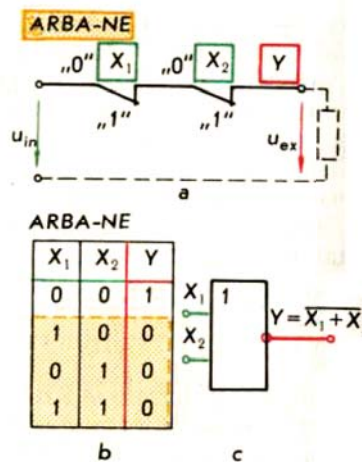
IR-NE veiksmui atlikti sujungiamo du atjungiamuosius jungiklius lygiagrečiai (7.62 pav.). **Elektrinė grandinė gali būti atjungta ($Y=0$) tik tada, kai ir vienas, ir antras jungikliai paspausti** (kai $X_1=1$ ir $X_2=1$).

Loginį elementą NE galima sudaryti iš elementų IR-NE bei ARBA-NE, sujungus lygiagrečiai kiekvieno jų įėjimo gnybtus (7.63 pav.), nes loginis elementas NE gali priimti tik vieną įėjimo signalą.

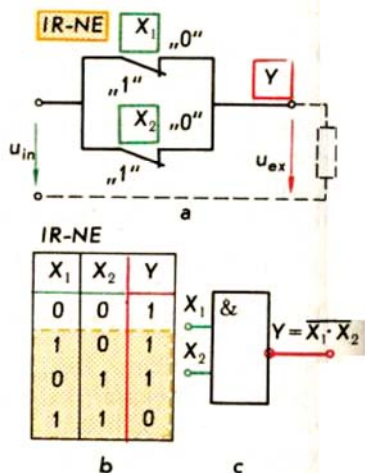
Loginį veiksmą IR atliekantis elementas sudaromas iš dviejų IR-NE, sujungus juos nuosekliai (7.64 pav.). Elementas ARBA sudaromas iš dviejų nuosekliai sujungtų ARBA-NE (7.65 pav.).

7.9.3. Elektroniniai loginiai elementai. Nors loginius veiksmus gali atlikti ir elektromagnetinės relės, tačiau dėl jų stambių matmenų, didelio suvartojamos energijos kiekio bei lėto veikimo šie kontaktiniai įtaisai nenaudojami. **ESM ir kituose skaitmeninės elektronikos įrenginiuose yra naudojami elektroniniai loginiai elementai.**

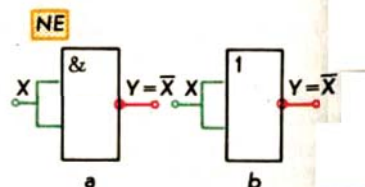
Elektronikos elementai loginiams veiksams atlikti gali būti panaudoti, kai jie dirba jungiklių režimu (žr. 7.8.2). Pavyzdžiui, kai dvipolis tranzistorius (7.66 pav.) yra nelaidus ($U_{BE}=0$), jo kolektoriaus-emiterio įtampa yra beveik lygi maitinimo įtampai ($U_{CE}=E$). Kai U_{BE} yra pakankamai didelė, tranzistorius atidaromas. Jis dirba



7.61 pav. Inversinio veiksmo ARBA-NE jungiklių sujungimo schema (a), teisingumo lentelė (b) ir loginio elemento sutartinis ženklas (c)



7.62 pav. Inversinio veiksmo IR-NE jungiklių schema (a), teisingumo lentelė (b) ir loginio elemento sutartinis ženklas (c)



7.63 pav. Loginis elementas NE iš elementų IR-NE (a), ARBA-NE (b)

įsotintu režimu ir jo $U_{CE} \approx 0$. **Taigi tranzistorius, sujungtas pagal tokią schemą, yra loginis elementas, atliekantis veiksmą NE.** Kadangi išėjimo signalas gaunamas pasikeitus tranzistoriaus kolektoriaus potencialui, šis loginis veiksmas yra vadinamas potencialiniu.

Nuodugniau išnagrinėję matytume, kad tranzistoriaus, veikiančio net ir įsotintu režimu, kolektoriaus potencialas nėra lygus nuliui, o sudaro apie 0,2 V. Dėl įvairių priežasčių jis gali kisti nuo 0 iki 0,4 V (7.66 pav., c). Kai tranzistorius uždarytas, U_{CE} taip pat nėra tiksliai lygi maitinimo įtampai, o gali kisti tam tikrose ribose, pavyzdžiui, nuo 3 iki 5 V. Jeigu toks tranzistorius yra įjungtas į grandinę taip, kad galimi tik du jo kolektoriaus potencialai – mažas ir didelis – laikoma, kad pirmuoju atveju yra loginė situacija 0, o antruoju – 1. Šias logines situacijas supaprastinti nėra pavojaus, nes tarp mažo ir didelio potencialo skirtumas visada yra pakankamas – net ir esant patiems didžiausiems jų nuokrypims.

Sujungus kelis tranzistorius lygiagrečiai ir panaudojus vieną bendrą kolektoriaus grandinės rezistorių R (7.67 pav.), gaunamas loginis elementas **ARBA–NE**. Prijungus prie bet kurio tranzistoriaus bazės teigiamą potencialą, tranzistoriaus grandinė atsidaro; jo kolektoriaus potencialas sumažėja beveik iki nulio. Tuo būdu $Y=0$, jei bet kuris $X_i=1$.

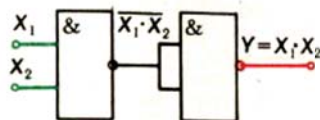
Loginis elementas **IR–NE** gali būti sudarytas iš dviejų tranzistorių: vienas iš jų ($VT1$) turi kelis emiterius (7.68 pav.) bei atlieka **IR** veiksmą. $VT1$ bazės potencialas yra didelis tik tuo atveju, kai visų emiterių potencialai yra dideli. Srovė teka $VT1$ bazės–kolektoriaus atvira sandūra ir $VT2$ baze. Atidaromas $VT2$ ir jo išėjimo potencialas sumažėja beveik iki nulio ($Y=0$). Jeigu bent vienas $X_i=0$ (veiksmas **IR**), to emiterio grandine teka srovė, $VT1$ bazės potencialas yra beveik lygus nuliui ir $VT2$ baze srovė neteka. $VT2$ uždarytas ir jo kolektoriaus potencialas yra didelis ($Y=1$).

Įjungus arba išjungus loginį elementą, dėl pereinamųjų procesų elektrinėse grandinėse ir pačiuose elektronikos elementuose išėjimo signalas vėluoja (7.69 pav.). Nuo impulso delsos trukmės $t=(t_a+t_b)/2$ priklauso skaitmeninės technikos veikimo sparta. Šiuolaikiniuose loginiuose elementuose jis esti nuo 1 ns iki 1 μ s.

Loginiai elementai gali būti gaminami iš įvairių elektronikos elementų: rezistorių, diodų, lauko ir dvipolių tranzistorių. Priklausomai nuo loginio elemento struktūros gali būti įvairūs jų tipai: rezistorinės-tranzistorinės logikos (RTL), diodinės-tranzistorinės logikos (DTL), tranzistorinės-tranzistorinės logikos (TTL), tranzistorinės logikos (TL), tik integrinėmis schemomis realizuojamos integrinės injekcinės logikos (I^2L) ir kiti. Pavyzdžiui, 7.66 ir 7.67 pav. pavaizduotos RTL, o 7.68 pav. – TTL logikos elementų schemas. Šiuo metu plačiausiai naudojami loginiai elementai integrinėse mikroschemose.

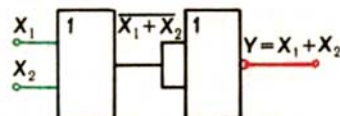
Loginiai elementai dar apibūdinami jų galia ar vartojama energija.

$$IR = [IR-NE] + [IR-NE]$$

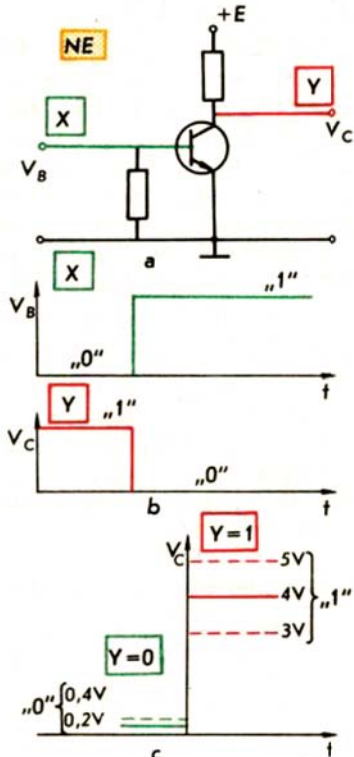


7.64 pav. Loginis elementas **IR** iš elementų **IR–NE**

$$ARBA = [ARBA-NE] + [ARBA-NE]$$



7.65 pav. Loginis elementas **ARBA** iš elementų **ARBA–NE**



7.66 pav. Tranzistorius kaip loginis elementas **NE**: a – schema; b – teoriniai kolektoriaus ir bazės potencialai; c – realiojo kolektoriaus potencialo kitimo ribos

Integrinių mikroschemų loginių elementų galia esti nuo $1\mu\text{W}$ iki keleto dešimčių mW. Jų maitinimo įtampa dažniausiai yra 5V ir tik kai kuriais specialiais atvejais yra didesnė (12–15 V).

Naudojant loginius elementus, svarbią reikšmę turi šakotumo koeficientas, kuris rodo, kiek yra įėjimų (arba išėjimų). Šakotumo koeficientas dažniausiai yra lygus 10; kai kuriais atvejais jis gali būti lygus 3–4 arba 20–50.

7.9.4. Trigeris. Tai elektroninis atminties įtaisas viena loginei situacijai įsiminti. Jį galima sudaryti iš dviejų ARBA – NE loginių elementų $L1$ ir $L2$ (7.70 pav.), tarp kurių yra teigiamas grįžtamasis ryšys. Tarkime, trigeriui yra prijungti tokie signalai: $S=1$, $R=0$. Elemento $L1$ įėjimo $S=1$, o kitas įėjimo signalas, gaunamas grįžtamuju ryšiu iš $L2$, yra inversinis $\bar{R}=Q=1$. Dėl to $L1$ išėjime gauname inversinį signalą $\bar{Q}=0$. (Žr. 7.61 pav., b lentelę). Pastarasis taip pat grįžtamuju ryšiu prijungiamas prie $L2$ įėjimo ir papildomai užfiksuoja gautą loginę situaciją: $L1$ išėjime $\bar{Q}=0$, $L2$ išėjime $Q=1$.

Atjungus trigeriui suteiktą signalą S , $L1$ išėjime vis tiek lieka $\bar{Q}=0$, nes įėjime yra $S=0$, $Q=1$, o $L2$ išėjime lieka $Q=1$. Matome, kad, trigeriui prijungus signalą $S=1$ arba $R=1$, jis pereina į tam tikrą stabilią loginę būseną, kurioje ir lieka, nors įėjimo signalas atjungiamas. Galima sakyti, kad jis „įsimena“ vieną signalą, kurio informacijos kiekis yra lygus vienam vienetui – bitui.

Informaciją pakeisti į priešingą galima, prijungus signalą, kai $S=0$ (žr. 7.70 pav., b). Tuomet $L2$ išėjime gaunamas $\bar{R}=Q=0$. $L1$ įėjimo $Q=0$, $S=0$ paverčiami inversiniu $\bar{Q}=1$. Jis grįžtamuju ryšiu patenka į $L2$ ir patvirtina naują loginę situaciją: $L1$ išėjime $\bar{Q}=1$, $L2$ išėjime $Q=0$.

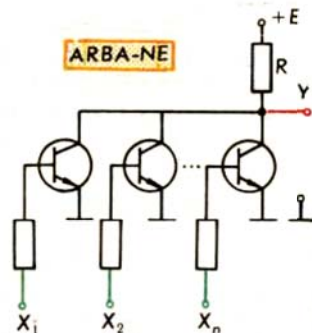
Situacija $R=1$, $S=1$ yra neleistina.

Trigeriai integruose mikroschemose yra gaminami viename kristale ir dažniausiai naudojami kaip ESM atminties elementai.

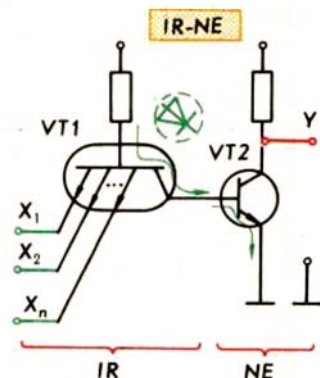
Kontroliniai klausimai ir užduotys

7.1. Paaiškinkite, kas tai yra:

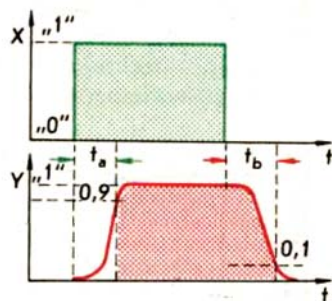
- vienfazis, trifazis lygintuvas;
- vienpusio, dvipusio lyginimo lygintuvas;
- valdomasis lygintuvas;
- elektrinis filtras;
- įtampos stabilizatorius;
- elektroninis stiprintuvas;
- galios stiprintuvas;
- diferencinis stiprintuvas;
- operacinis stiprintuvas;
- elektroninis generatorius;
- loginis elementas.



7.67 pav. Loginis elementas ARBA – NE



7.68 pav. Loginis elementas IR – NE



7.69 pav. Loginio elemento įėjimo $X(t)$ ir išėjimo $Y(t)$ signalai

7.2. Kokia yra bendra struktūrinė lygintuvo schema? Kokia kiekvieno jo mazgo paskirtis ir ypatybės?

7.3. Kokie svarbiausieji lygintuvo parametrai? Kaip juos apskaičiuoti ir kokias lygintuvo savybes jie nurodo?

7.4. Kokios yra elektrinės schemos ir kaip veikia šie dvipusio lyginimo lygintuvai: *a* – su vidurine atšaka; *b* – tiltelis? Ar kurio nors parametrai geresni? Kokie?

7.5. Kaip mažinama išlygintos įtampos pulsacija? Kuo apibūdinama filtro kokybė? Kaip priklauso lygintuvo išorinė charakteristika nuo filtro?

7.6. Kaip stabilizuojama išlyginta įtampa? Kuo nusakoma stabilizatoriaus darbo kokybė?

7.7. Kokios yra elektrinės schemos ir kaip veikia šie trifaziai lygintuvai: *a* – su neutraliuoju laidu; *b* – tiltelis? Ar kurio nors parametrai geresni? Kokie?

7.8. Kokios yra elektrinės schemos ir kaip veikia valdomieji lygintuvai? Kas yra valdymo charakteristika? Kodėl mažinant išlygintą įtampą didėja jos pulsacija?

7.9. Kokia atstojamąja schema galima vaizduoti elektrinį stiprintuvą? Kokie svarbiausi jo rodikliai ir charakteristikos?

7.10. Ką vadinsime dažnių pralaidumo juosta? Kaip aiškinsite šių stiprintuvų pavadinimus: nuolatinės srovės, kintamosios srovės, plačiajuostis, siaurajuostis, selektyvusis?

7.11. Kokia gali būti paprasčiausia elektroninio stiprintuvo elektrinė schema? Kaip grafiškai sudaroma išėjimo signalo kitimo kreivė? Palyginkite ją su įėjimo signalo kreive.

7.12. Nuo kokio elektrinio dydžio priklauso, kokių režimu (A ar B) veikia stiprintuvai? Kuo ypatingi šie režimai?

7.13. Koks gali būti grįžtamasis ryšys? Kaip jis pakeičia stiprintuvo savybes?

7.14. Nubraižykite stiprintuvo su lauko tranzistoriumi schemą ir paaiškinkite elementų paskirtį.

7.15. Nubraižykite stiprintuvo su dvipoliu tranzistoriumi schemą ir paaiškinkite elementų paskirtį.

7.16. Kuo ypatingas galios stiprintuvai ir kodėl prie jo apkrova jungiama per transformatorių? Kokių režimu ir kaip veikia vientakiai ir dvitaktis galios stiprintuvai?

7.17. Kodėl ir kuo pasireiškia stiprintuvo nulinis dreifas? Ar galima jį išvengti ar jį sumažinti? Kaip?

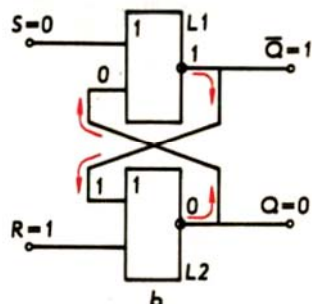
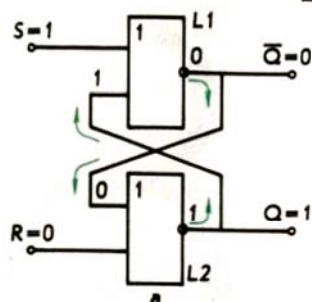
7.18. Kuo ypatingas operacinis stiprintuvai? Kodėl jam energiją tiekia du šaltiniai? Kokie svarbiausi jo parametrai?

7.19. Kaip veikia elektroninis generatorius? Kokios jo susižadinimo sąlygos? Kaip stabilizuojamas dažnis?

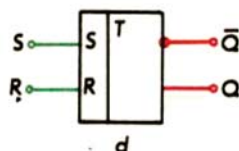
7.20. Kokie elektroniniai elementai naudojami kaip jungikliai? Kaip veikia tokie jungikliai?

7.21. Kokie yra pagrindiniai loginiai veiksmi ir elementai?

7.22. Kas yra trigeris ir kaip jis veikia?



S	R	Q	Signalas
1	0	1	Įrašomas "1"
0	0	1	Išlaikomas
0	1	0	Išimamas "0"
1	1		Neleistinas



7.70 pav. Trigerio loginė būsenų, kai įrašomas „1“ (a), įrašomas „0“ (b), trigerio būsenų lentelė (c) ir sutartinis ženklas (d)