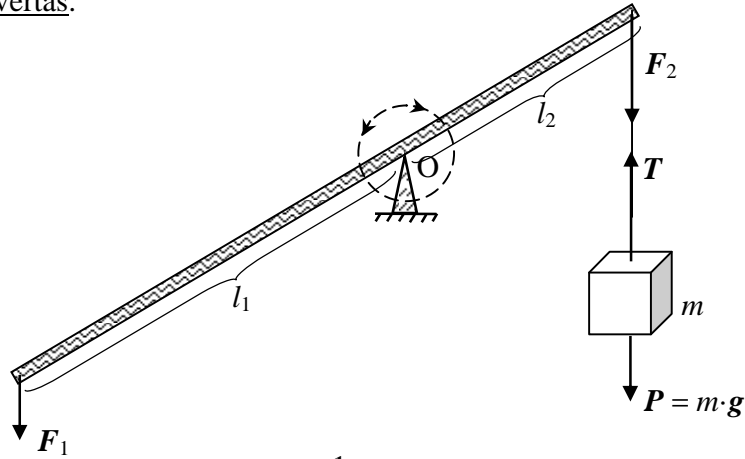


Stiprinimas

1. Mechaninės jėgos F stiprinimas

1.1. Archimedo svertas.

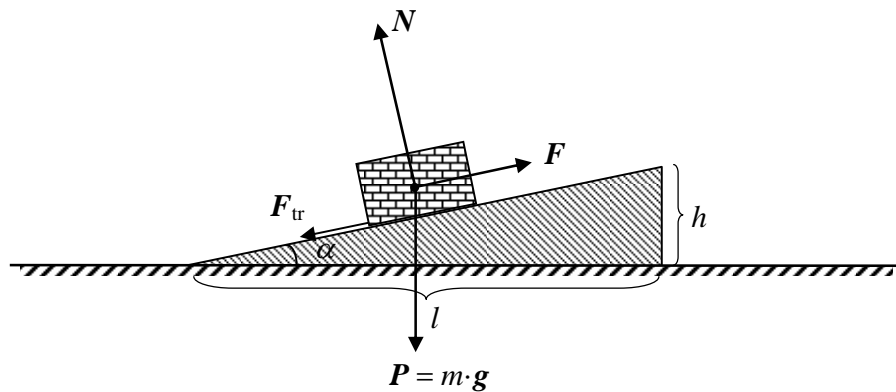


1 pav.

$$K_F = F_2 / F_1 = l_1 / l_2. \quad (1)$$

čia: P – sunkio jėga; T – įtempimo (tamprumo) jėga; $F_{1,2}$ – atitinkamai poveikio ir reakcijos jėgos.

1.2. Nuožulnioji plokštuma – pleištas arba sraigtas.



2 pav.

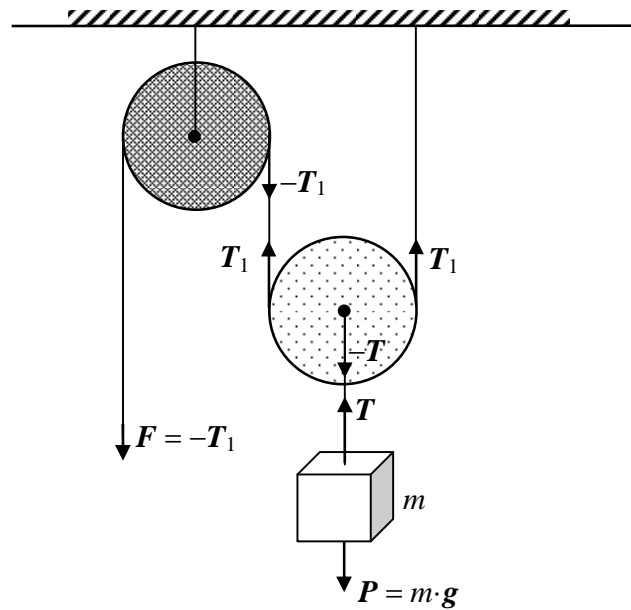
$$K_{F(P)} = P / F = 1 / \sin \alpha, \quad \left. \vphantom{K_{F(P)}} \right\} \text{– nuožulnioji plokštuma} \quad (2)$$

$$K_{F(N)} = N / F = 1 / \operatorname{tg} \alpha, \quad \left. \vphantom{K_{F(N)}} \right\} \quad (3)$$

$$K_{F(N)} = N / F = \{ 2 \cdot [1 - \cos (2 \cdot \alpha)] \}^{-1/2} \text{ – pleištas} \quad (4)$$

čia: N – atramos reakcijos jėga; F_{tr} – slydimo trinties jėga; F – poveikio jėga.

1.3. Judantys skridiniai.

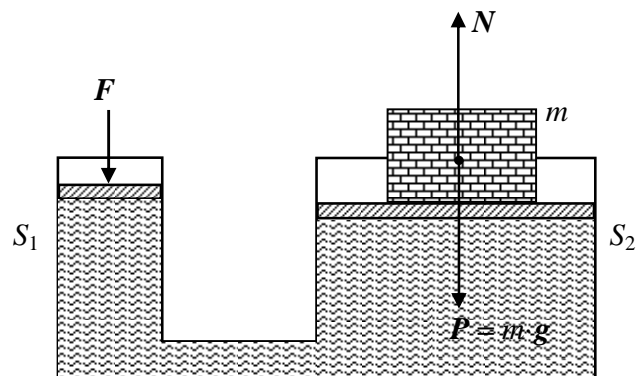


3 pav.

$$K_F = F/P = 2 \cdot n, \quad (5)$$

čia: $n = 1, 2, \dots$ – judančių skridinių skaičius; F – poveikio jėga.

1.4. Hidraulika – pneumatika.

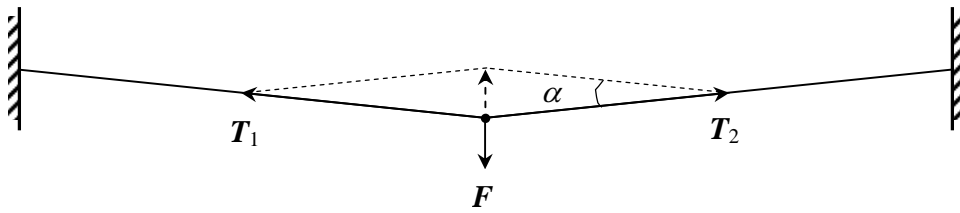


4 pav.

$$K_F = P/F = S_2/S_1, \quad (6)$$

čia: $S_{1,2}$ – cilindrų plotai; m – keliamo kūno masė; F – poveikio jėga.

1.5. Įtempta styga.

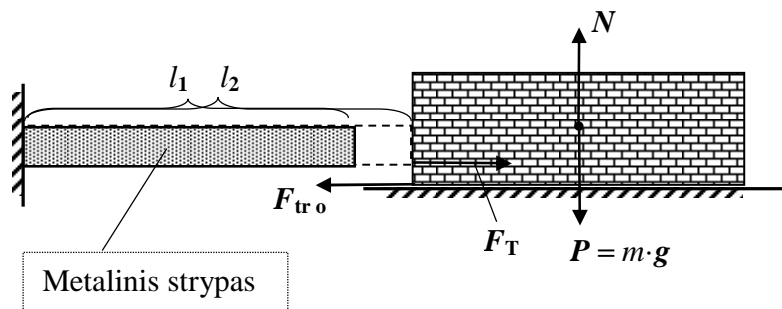


5 pav.

$$K_F = T_{1,2}/F = 1/[2 \cdot \sin(\alpha/2)]. \quad (7)$$

čia F – poveikio jėga.

1.6. Šiluminis plėtimasis – termodinamika.



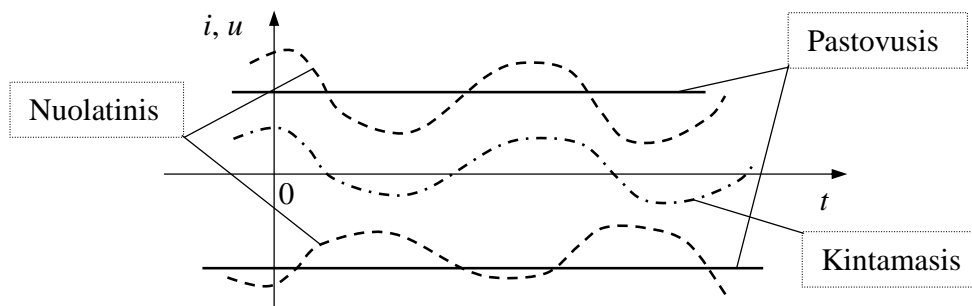
6 pav.

$$\begin{aligned} K_F = F_T/F_{tr o} &= [k_t \cdot (l_2 - l_1)] / (k_{tr o} \cdot N) = \\ &= [k_t \cdot \alpha_T \cdot l_1 \cdot (t_2^0 - t_1^0)] / (k_{tr o} \cdot N). \end{aligned} \quad (8)$$

čia F_T – poveikio jėga – tamprumo jėga; k_t – tamprumo koeficientas; $l_{1,2}$ – strypo ilgiai atitinkamai prie t_1^0 ir $t_2^0 > t_1^0$ temperatūrų; $k_{tr o}$ – rambės trinties koeficientas; α_T – šiluminio plėtimosi linijinis koeficientas;

2. Elektrinių signalų – $u(t)$, $i(t)$ ir $p(t)$ stiprinimas

2.1. Elektriniai signalai – įtampa $u(t)$ ir srovė $i(t)$ pagal savo kitimo pobūdį laike t yra skirstomi taip:

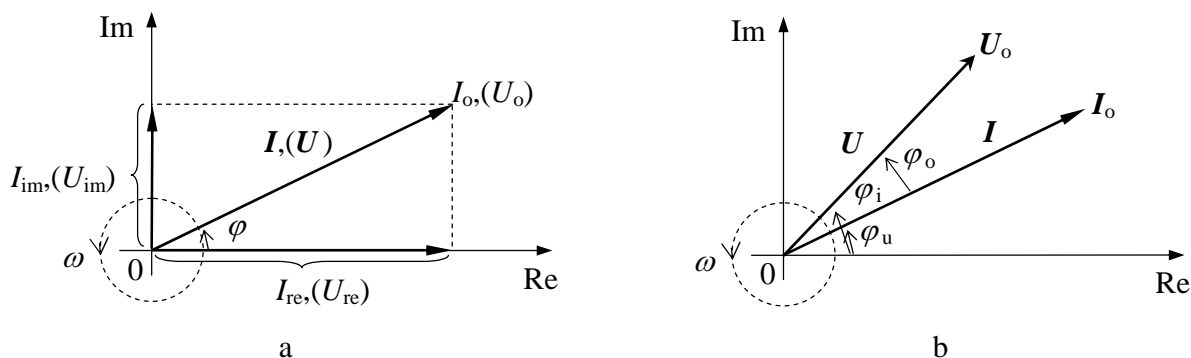


7 pav.

2.2. Harmoninio signalo atveju:

2.2.1. Įtampa U arba srovė I yra išreikiama taip:

$$I, (U) = \underbrace{I, (U)_{\text{re}} + j \cdot I, (U)_{\text{im}}}_{\text{algebrinė}} = \underbrace{I, (U)_o \cdot (\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi)}_{\text{trigonometrinė}} = \underbrace{I, (U)_o \cdot e^{j \cdot \varphi}}_{\text{laipsninė}}, \quad (9)$$



8 pav.

čia:

$$\left. \begin{aligned} (I_{\text{re}}, U_{\text{re}}) &= (I_o, U_o) \cdot \cos \varphi; & (I_{\text{im}}, U_{\text{im}}) &= (I_o, U_o) \cdot \sin \varphi; \\ (I_o, U_o) &= [(I_{\text{re}}, U_{\text{re}})^2 + (I_{\text{im}}, U_{\text{im}})^2]^{1/2}; & \text{tg } \varphi &= (I_{\text{im}}, U_{\text{im}}) / (I_{\text{re}}, U_{\text{re}}), \\ \varphi_o &= \varphi_i - \varphi_u, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

čia: $\varphi = \omega \cdot t \pm \varphi_o^*$, $\omega = 2 \cdot \pi / T$, $f = 1 / T = \omega / (2 \cdot \pi)$, čia φ_o^* – pradinis kampas (fazė) (a), kai laikas $t = 0$; ω ir f – ciklinis ir paprastasis svyravimų dažnis, atitinkamai; T – svyravimų periodas; φ_o – pradinis kampas (fazė) (b) tarp srovės I ir įtampos U vektorių elektrinėje grandinėje.

2.2.2. Elektrinio signalo momentinė galia $p(t)$, harmoninio signalo atveju \mathbf{P} (8 pav., b), yra išreiškiama taip:

$$\begin{aligned} \mathbf{P} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{I} &= (U_{re} + j \cdot U_{im}) \cdot (I_{re} + j \cdot I_{im}) = (U_{re} \cdot I_{re} - U_{im} \cdot I_{im}) + j \cdot (U_{re} \cdot I_{im} + U_{im} \cdot I_{re}) = \\ &= [U_o \cdot (\cos \varphi_u + j \cdot \sin \varphi_u)] \cdot [I_o \cdot (\cos \varphi_i + j \cdot \sin \varphi_i)] = \\ &= U_o \cdot I_o \cdot [(\cos(\varphi_u + \varphi_i) + j \cdot \sin(\varphi_u + \varphi_i))] = \\ &= \mathbf{P} = U_o \cdot e^{j \cdot \varphi_u} \cdot I_o \cdot e^{j \cdot \varphi_i} = U_o \cdot I_o \cdot e^{j \cdot (\varphi_u + \varphi_i)} = P_o \cdot e^{j \cdot (\varphi_u + \varphi_i)}, \quad (11) \end{aligned}$$

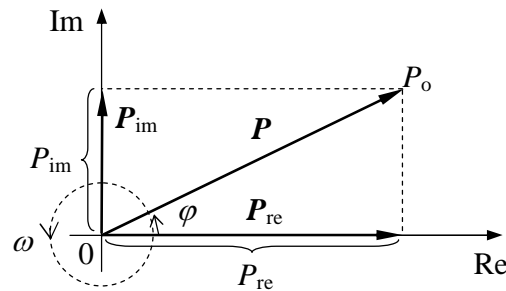
čia $P_o = U_o \cdot I_o$.

Kitaip galima parašyti:

$$p(t) = i(t) \cdot u(t) = I_o \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot U_o \cdot \sin(\omega \cdot t \pm \varphi_o) = (P_o/2) \cdot [\cos(\mp \varphi_o) - \cos(2 \cdot \omega \cdot t \pm \varphi_o)], \quad (12)$$

ir iš čia išplaukia, kad momentinė vertė $p(t)$, kartu ir vidutinė $P_{vid} = T^{-1} \cdot \int p(t) \cdot dt$, bei efektyvioji $P_{ef} = P_o / \sqrt{2}$ vertės priklauso nuo koeficiento $\cos(\mp \varphi_o)$, čia φ_o – kampas tarp srovės \mathbf{I} ir įtampos \mathbf{U} vektorių (8 pav., b).

Harmoninio signalo atveju vektorius \mathbf{P} atvaizduojamas kompleksinėje plokštumoje {Im, Re}, parodytoje 9 pav.

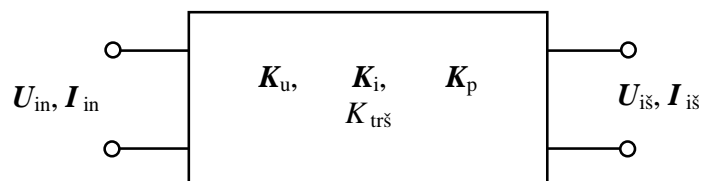


9 pav.

Iš 9 pav. galima parašyti:

$$P_o = (P_{re}^2 + P_{im}^2)^{1/2} = P_{im} / \sin \varphi = P_{re} / \cos \varphi. \quad (13)$$

3. Elektrinių signalų stiprintuvas – keturpolio vaizdinio atveju:



10 pav.

čia $K_{i, u, p}$ – įtampos, srovės ir galios stiprinimo-perdavimo koeficientai, išreiškiami taip:

$$K_u = U_{iss} / U_{in}, \quad K_i = I_{iss} / I_{in}, \quad K_p = P_{iss} / P_{in} \equiv K_u \cdot K_i, \quad (14)$$

čia harmoniniu atveju:

$$U_{in} = U_{o \text{ in}} \cdot e^{j \cdot \varphi_u}, \quad I_{in} = I_{o \text{ in}} \cdot e^{j \cdot \varphi_i}, \quad U_{iss} = U_{o \text{ iss}} \cdot e^{j \cdot (\varphi_u - \varphi_{o u})}, \quad I_{iss} = I_{o \text{ iss}} \cdot e^{j \cdot (\varphi_i - \varphi_{o i})}. \quad (15)$$

3.1. Įėjimo varža pastoviajai srovei R_{in} :

$$R_{in} = U_{oin} / I_{oin}; \quad (16)$$

3.2. Išėjimo varža pastoviajai srovei $R_{iš}$:

$$R_{iš} = U_{oiš} / I_{oiš}; \quad (17)$$

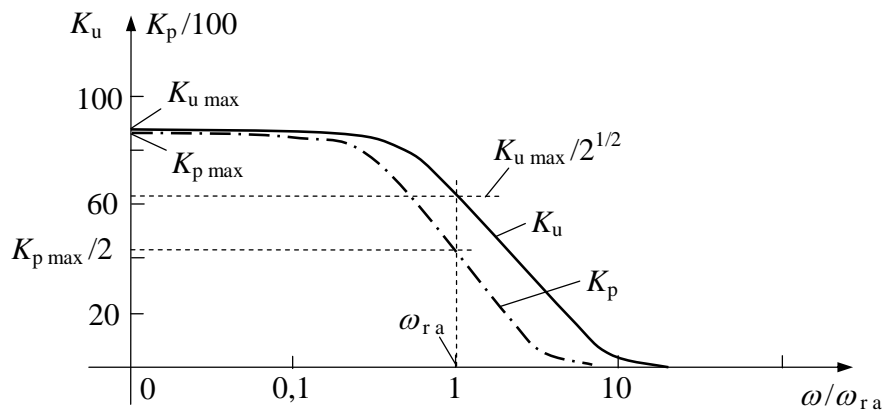
3.3. Įėjimo varža kintamajai srovei r_{in} (diferencialinė varža):

$$r_{in} = U_{in} / I_{in}, \quad r_{in} = \partial U_{in} / \partial I_{in}; \quad (18)$$

3.4. Išėjimo varža kintamajai srovei $r_{iš}$ (diferencialinė varža):

$$r_{iš} = U_{iš} / I_{iš}, \quad r_{iš} = \partial U_{iš} / \partial I_{iš}. \quad (19)$$

3.5. Įtampos U ir galios P atitinkamų stiprinimo koeficientų $K_{u,p}$ atitinkamos dažninės charakteristikos $K_{u,p}(\omega)$:



11 pav. Čia ω_{ra} – aukštasis ribinis dažnis, o žemasis ribinis dažnis $\omega_{r\check{z}} = 0$, nes įėjime U_{in} nėra skiriamąjo kondensatoriaus $C_{in} = 0$,

3.5.1. Koeficientai $K_{u,i,p}$ gali turėti vertes labai plačiame diapazone – nuo 10^{-9} iki 10^9 ir plačiau. Todėl patogumo dėlei yra įprasta galios stiprinimo-perdavimo koeficiento K_p vertes išreikšti *belais* (B) – dešimtainio logaritmo masteliu:

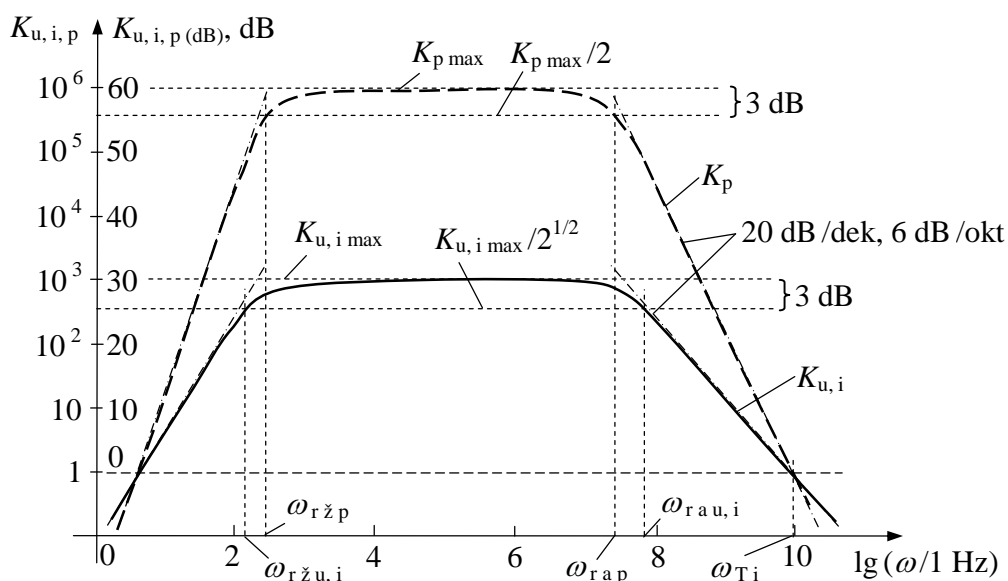
$$K_{p(B)} = \lg K_p, [B]. \quad (20)$$

Tačiau ir šiuo atveju yra gaunamas gana didelis matavimo vienetas, todėl paprastai naudojamas dešimt kartų mažesnis santykinis matavimo vienetas – *decibelas* (dB):

$$K_{p(dB)} = 10 \cdot \lg K_p, [dB] \equiv 10 \cdot \lg K_{u,i}^2 = 20 \cdot \lg K_{u,i}, [dB]. \quad (21)$$

Slopinimo atveju turime neigiamas vertes: –dB.

Tipinės $K_{u,i,p}$ modulių dažninės priklausomybės – dažninės charakteristikos $K_{u,i,p}(\omega)$ santykiniais kartais ir dB parodytos 12 pav.



12 pav. Čia įėjime U_{in} yra skiriamasis kondensatorius $C_{in} > 0$, todėl žemasis ribinis dažnis $\omega_{r\check{z}} > 0$

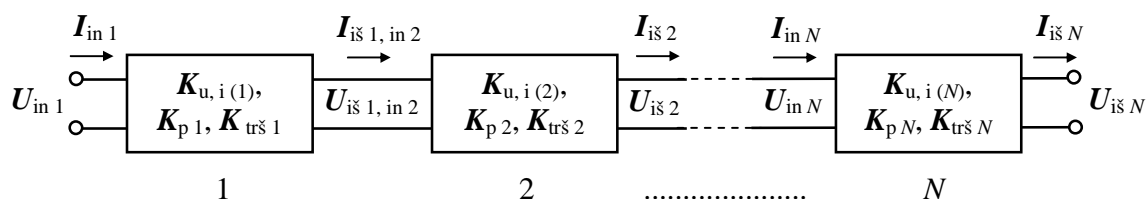
Vienas pagrindinių tranzistorių, kartu ir stiprintuvų, dažnines savybes nusakančių parametų yra srovės stiprinimo ribinis dažnis ω_{Ti} , kurio vertė nusakoma taip:

$$K_i(\omega_{Ti}) = 1 \quad (22)$$

3.6. Triukšmo koeficientas $K_{tr\check{s}}$ – santykinis dydis, parodantis kiek kartų sumažėja naudingo signalo (U_s, I_s) ir triukšmo ($S_{tr\check{s}}$) atitinkamų vidutinių galių P_s ir $P_{tr\check{s}}$ santykis $P_s/P_{tr\check{s}}$ elektroninio įrenginio išėjime $U_{i\check{s}} - (P_s/P_{tr\check{s}})_{i\check{s}}$, palyginus su šiuo santykiu elektroninio įrenginio įėjime $U_{in} - (P_s/P_{tr\check{s}})_{in}$:

$$K_{tr\check{s}} = (P_s/P_{tr\check{s}})_{in} / (P_s/P_{tr\check{s}})_{i\check{s}} \geq 1. \quad (23)$$

3.7. Kaskadinis stiprintuvas – sudarytas iš N stiprinimo pakopų.



13 pav. Kaskadinis stiprintuvas

Kaskadinio stiprintuvo įtampos, srovės bei galios stiprinimo koeficientai $K_{u,i,p(N)}$ yra:

$$\begin{aligned} K_{u,i(N)} &= \partial(U; I)_{i\check{s}N} / \partial(U; I)_{in1} = (K_{u,i(N)} \cdot \partial(U; I)_{i\check{s}(N-1), inN}) / \partial(U; I)_{in1} = \\ &= (K_{u,i(N)} \cdot K_{u,i(N-1)} \cdot \partial(U; I)_{i\check{s}(N-2), in(N-1)}) / \partial(U; I)_{in1} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (K_{u,i(N)} \cdot K_{u,i(N-1)} \cdots K_{u,i2} \cdot \partial(U;I)_{i\tilde{1}\sim}) / \partial(U;I)_{in\tilde{1}\sim} = \\
&= K_{u,i(N)} \cdot K_{u,i(N-1)} \cdots K_{u,i2} \cdot K_{u,i1} = \prod_{j=1}^N K_{u,ij}, \\
K_{p(N)} &= K_{u(N)} \cdot K_{i(N)} = \prod_{j=1}^N K_{uj} \prod_{j=1}^N K_{ij} = \prod_{j=1}^N K_{pj}. \tag{24}
\end{aligned}$$

Decibelais:

$$\begin{aligned}
K_{u,i(N)} \text{ (dB)} &= 20 \cdot \lg \left[\prod_{j=1}^N K_{u,ij} \right] = \sum_{j=1}^N K_{u,ij} \text{ (dB)}, \text{ [dB]}, \\
K_{p(N)} \text{ (dB)} &= 10 \cdot \lg \left[\prod_{j=1}^N K_{pj} \right] = \sum_{j=1}^N K_{pj} \text{ (dB)}, \text{ [dB]}. \tag{25}
\end{aligned}$$

Kaskadinio stiprintuvo triukšmo koeficientas $K_{trš(N)}$ yra:

$$\begin{aligned}
K_{trš(N)}^* &= K_{trš1} + (K_{trš2} - 1)/K_{p1} + (K_{trš3} - 1)/(K_{p1} \cdot K_{p2}) + \dots + (K_{tršN} - 1)/ \\
&\quad / (K_{p1} \cdot K_{p2} \cdots K_{p(N-1)}), \tag{26}
\end{aligned}$$

ir iš (23) išplaukia fundamentalios išvados:

1. **Daugiapakopės kaskadinės elektroninės sistemos triukšmo koeficientas $K_{trš}^*$ iš esmės yra apspręstas tik pirmosios, bei šiek tiek mažiau antrosios pakopų triukšmų koeficientais.**
2. **Todėl blogą galių santykį $(P_s/P_{trš})_{in}$ įrenginio įėjime U_{in} nebeįmanoma pagerinti toliau didinant kaskadinio jungimo elektroninės sistemos pakopų skaičių N . Ši išvada tinka ir tada, kai pirmąją stiprinimo „pakopą“ yra atvira erdvė („eteris“).**

4. Stiprinimo pakopos įtampos U arba srovės I stiprinimo-perdavimo atitinkamo koeficiento $K_{u,i}$ dažninė charakteristiką $K_{u,i}(\omega)$ (11 pav.) pakankamai tiksliai yra aproksimuojama taip:

$$K_{u,i}(\omega) = K_{u,i \max} / [1 + (\omega/\omega_{ra})^2]^{1/2}, \tag{27}$$

čia:

$$K_{u,i \max} = K_{u,i}(\omega)|_{\omega \rightarrow 0} - \text{žemadažnė vertė,}$$

čia: ω_{ra} – aukštasis ribinis dažnis, kai $K_{u,i}(\omega_{ra}) = K_{u,i \max} / 2^{1/2}$.

4.1. Kaskadinio stiprintuvo (13 pav.) sudaryto iš vienuių N stiprinimo pakopų:

$$K_{u,i(N)} = \prod_{j=1}^N K_{u,ij} = [K_{u,i}(\omega) \cdot e^{j \cdot \varphi_{u,i}(\omega)}]^N = [K_{u,i}(\omega)]^N \cdot e^{j \cdot N \cdot \varphi_{u,i}(\omega)}, \tag{28}$$

$$\varphi_N(\omega) = N \cdot [\pm \varphi_{u,i}(\omega)] \equiv \pm \varphi_{u,i1}(\omega) \pm \varphi_{u,i2}(\omega) \pm \dots \pm \varphi_{u,iN}(\omega), \tag{29}$$

Iš apibrėžties (11 pav.):

$$\begin{aligned}
K_{u,i(N)}(\omega_{raN}) &= K_{Nu,i \max} / 2^{1/2} \Rightarrow [K_{u,i}(\omega_{raN})]^N = (K_{u,i \max})^N / 2^{1/2} \Rightarrow \\
\Rightarrow \{K_{u,i \max} / [1 + (\omega_{ra(N)}/\omega_{ra})^2]^{1/2}\}^N &= (K_{u,i \max})^N / 2^{1/2} \Rightarrow \{[1 + (\omega_{ra(N)}/\omega_{ra})^2]^{1/2}\}^N = 2^{1/2}, \tag{30}
\end{aligned}$$

Iš (30) randame:

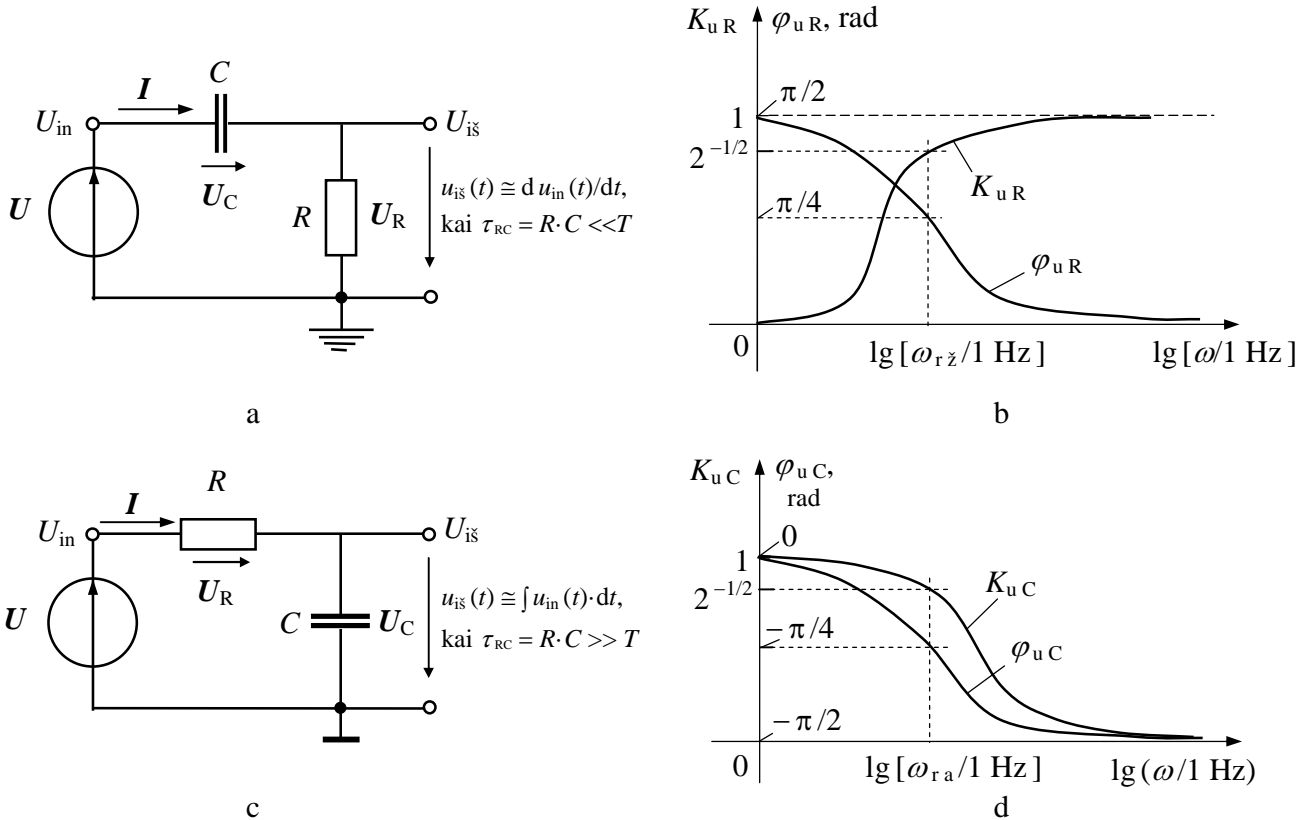
$$\omega_{ra(N)} = \omega_{ra} \cdot (2^{1/N} - 1)^{1/2} \leq \omega_{ra}. \quad (31)$$

Kaskadinio stiprintuvo su skiriamaisiais kondensatoriais $C > 0$ tarp pakopų dažninėje charakteristikoje $K_{u,i}(\omega)$ be aukštojo ribinio dažnio ω_{ra} yra ir žemasis ribinis dažnis $\omega_{r\check{z}} < \omega_{ra}$ (12 pav.), kurio vertę surandame taikydami tokio pavidalo aproksimaciją:

$$K_{u,i}(\omega) = K_{u,i \max} / [1 + (\omega/\omega_{r\check{z}})^{-2}]^{1/2}, \quad (32)$$

čia: $\omega_{r\check{z}}$ – žemasis ribinis dažnis, kai $K_{u,i}(\omega_{r\check{z}}) = K_{u,i \max} / 2^{1/2}$.

Čia pastebėsime, jog išraiška (31) atitinka diferencijuojančios RC– grandinės, parodytos 14 pav., a, įtampos perdavimo koeficiento $K_{u,R}$ dažninę charakteristiką $K_{u,R}(\omega)$ ir fazinę charakteristiką $\varphi_{u,R}(\omega)$, kurios parodytos 14 pav., b, o išraiška (27) atitinka integruojančios RC– grandinės (14 pav., c) įtampos perdavimo koeficiento $K_{u,C}$ dažninę charakteristiką $K_{u,C}(\omega)$ ir fazinę charakteristiką $\varphi_{u,C}(\omega)$, kurios parodytos 14 pav., d.



14 pav. Diferencijuojančioji (a) ir integruojančioji (c) RC– grandinės (a) bei jų atitinkamos dažninės $K_{u,R,C}(\omega)$ ir fazinės $\varphi_{u,R,C}(\omega)$ charakteristikos (b) ir (d), čia: τ_{RC} – RC– grandinės laiko konstanta; T – įėjimo – poveikio signalo U pasikartojimo periodas

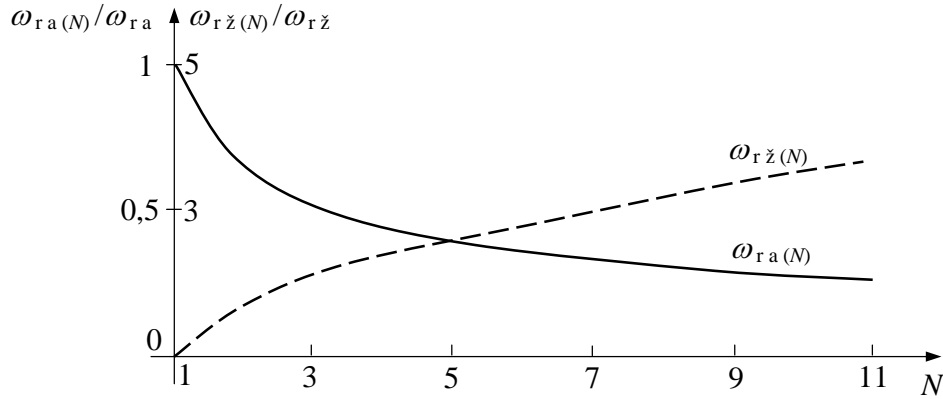
Iš apibrėžties (11 pav.) ir (32) parašome:

$$\begin{aligned} K_{u,iN}(\omega_{r\check{z}N}) &= K_{u,i \max} N / 2^{1/2} \Rightarrow [K_{u,i}(\omega_{r\check{z}N})]^N = (K_{u,i \max})^N / 2^{1/2} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \{K_{u,i \max} / [1 + (\omega_{r\check{z}N} / \omega_{r\check{z}})^{-2}]^{1/2}\}^N = (K_{u,i \max})^N / 2^{1/2} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \{[1 + (\omega_{r\check{z}N} / \omega_{r\check{z}})^{-2}]^{1/2}\}^N = 2^{1/2}, \end{aligned} \quad (33)$$

ir iš (33) randame:

$$\omega_{r\check{z}N} = \omega_{r\check{z}} \cdot (2^{1/N} - 1)^{-1/2} \geq \omega_{r\check{z}}. \quad (34)$$

Vaizdumo dėlei gautas priklausomybės (31) ir (34) pateikiame 15 pav. atitinkamais grafikais:



15 pav. Kaskadinio stiprintuvo (13 pav.) ribinių dažnių $\omega_{r\check{z}, a(N)}$ priklausomybės nuo pakopų skaičiaus N

4.2. Kaskadinio stiprintuvo praleidžiamų dažnių juostos plotis $\Delta\omega_N$ yra:

$$\Delta\omega_N = \omega_{ra(N)} - \omega_{r\check{z}(N)}, \quad (35)$$

ir iš (31) bei (34), ir (35) randame:

$$\Delta\omega_N = \omega_{ra} \cdot (2^{1/N} - 1)^{1/2} - \omega_{r\check{z}} \cdot (2^{1/N} - 1)^{-1/2}. \quad (36)$$

Iš (36) nustatome kaskadinio stiprintuvo didžiausių pakopų skaičių N_{\max} , kuriam esant $\Delta\omega_N = 0$:

$$\omega_{ra} \cdot (2^{1/N_{\max}} - 1)^{1/2} - \omega_{r\check{z}} \cdot (2^{1/N_{\max}} - 1)^{-1/2} = 0,$$

ir iš čia randame:

$$\left. \begin{aligned} N_{\max} &= (\lg 2) / [\lg(1 + \omega_{r\check{z}}/\omega_{ra})] < \omega_{ra}/\omega_{r\check{z}}. \\ N_{\max} &\approx 0,7 \cdot (\omega_{ra}/\omega_{r\check{z}}). \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

Iš (37) matome – kai $\omega_{r\check{z}} \Rightarrow 0$, $N_{\max} \Rightarrow \infty$ ir iš čia išplaukia, jog kaskadinio stiprintuvo, sudaryto iš N pastovaus signalo stiprinimo pakopų, prie bet kokio šių pakopų skaičiaus $N > 1$, visada $\Delta\omega_N > 0$ ir todėl:

pastovaus signalo kaskadinio stiprintuvo pakopų skaičius N gali būti neribotas.

4.2. *Ryšiu technikoje* signalų perdavimo linijų silpninimui (slopinimui) α įvertinti yra naudojamas kitas santykinis matavimo vienetas- **Neperis** (Np), kuris apibrėžiamas taip:

$$\alpha_{(Np)} = \ln(U_1/U_2) \equiv 0,5 \cdot \ln(P_1/P_2). [Np] \quad (38)$$

Iš (38) išplaukia – 1 Np atitinka signalo slopinimą, kuriam esant įtampos U_2 modulis U_2 perdavimo linijos išėjime $U_{i\text{š}}$ yra $e = 2,718...$ kartų mažesnė už įtampos U_1 modulį U_1 tos linijos įėjime $U_{i\text{in}}$. Iš čia randame sąryšį tarp Np ir dB:

$$1 \text{ Np} = 20 \cdot \lg e \cong 8,686 \text{ dB}, \text{ ir atvirkščiai: } 1 \text{ dB} = (20 \cdot \lg e)^{-1} \cong 0,115 \text{ Np}. \quad (39)$$

Čia pastebėsime, jog matavimo vienetas Neperis yra taikomas ir signalų stiprinimo atveju. Todėl išraiška (38) yra parašoma taip:

$$\alpha_{(Np)} = \ln(U_2/U_1) [Np], \quad (40)$$

ir iš čia matome, jog signalų slopinimo atveju gauname neigiamas α vertes ($\alpha < 0$), o signalų stiprinimo atveju – teigiamas α vertes ($\alpha > 0$).

Kita vertus, ryšių technikoje signalų galią įvairių įrenginių įėjimuose $U_{i\text{in}}$ ir išėjimuose $U_{i\text{š}}$ dažnai įvertina santykiniu galios matavimo vienetu – **dBm**, kuris apibrėžiamas taip:

$$K_{p(dBm)} = 10 \cdot \lg(P_{i\text{š, in}}/1 \text{ mW}), [dBm] \quad (41)$$

iš čia:

$$1 \text{ dBm atitinka matuojamąją galią } P_{i\text{š, in}} \cong 1,259 \text{ mW}.$$

Taip pat naudojami santykiniai galios matavimo vienetai: **dBμ**, **dBW** ir t. t., kurių apibrėžtis analogiška (41) ir todėl akivaizdi – μW , W ir t. t.

5. Elektrinius signalus $u(t)$, $i(t)$ ir $p(t)$, stiprinantis įtaisas – elektroninis stiprintuvas.

Istoriškai pirmaisiai buvo išrasti elektrovakuuminiai – lempiniai stiprintuvai...

Istorija:

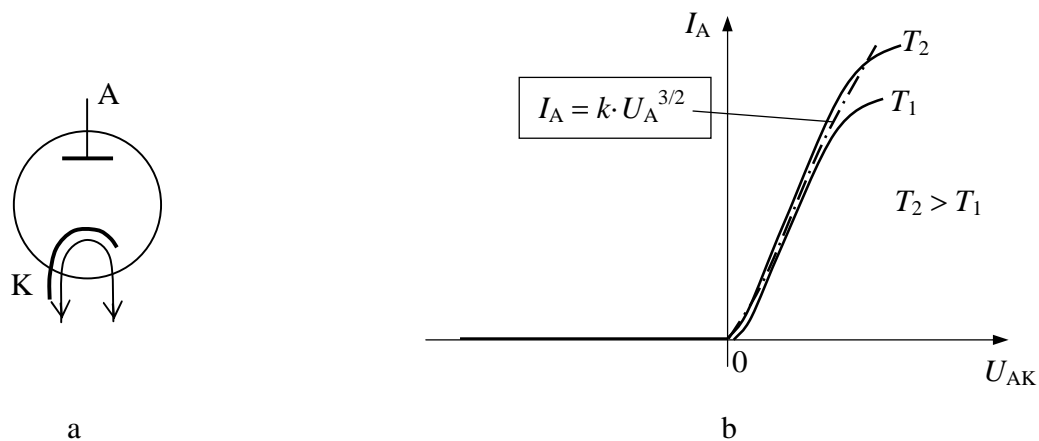
1872 m. – kaitrinė apšvietimo elektros lempa (**Lodiginas**);

1884 m. – termoelektroninės emisijos reiškinys (**Edisonas**);

1904 m. – vakuuminis diodas (**Flemingas**);

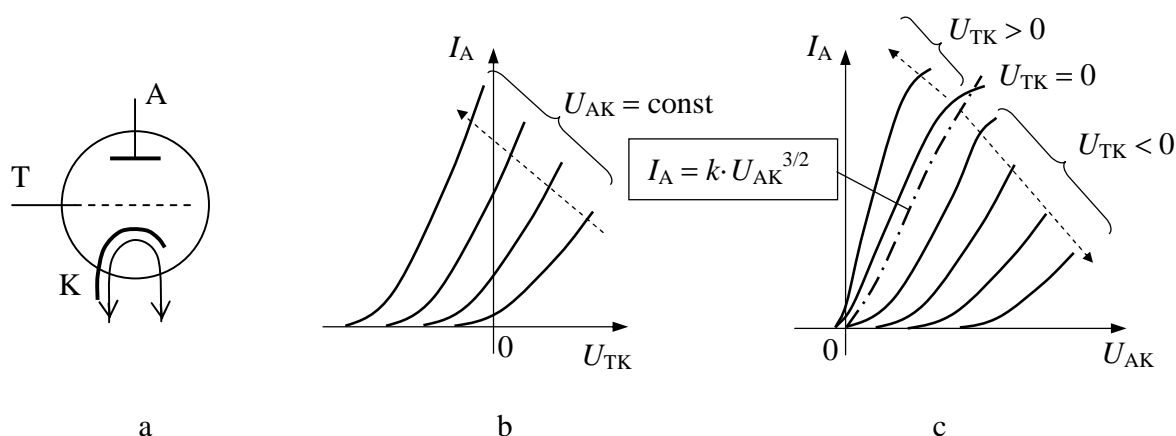
1907 m. – vakuuminis triodas (**Li-de-Forestas**).

5.1. Vakuuminė lempa – diodas



16 pav. Vakuuminio diodo žymuo (a) ir jo VACH (b), čia: A – anodas; K – katodas

5.1. Vakuuminė lempa – triodas



17 pav. Vakuuminio triodo žymuo (a) ir jo VACH: perdavimo (b) ir išėjimo (c), čia T – tinklelis

5.2. Vakuuminio triodo pamatiniai parametrai:

5.2.1. Statumas S:

$$S = \partial i_A / \partial u_T |_{U_A = \text{const}} \equiv \Delta I_A / \Delta U_T |_{U_A = \text{const}} ; \quad (42)$$

5.2.2. Vidinė diferencialinė varža r_i :

$$r_i = \partial u_A / \partial i_A |_{U_T = \text{const}} ; \quad (43)$$

5.2.3. Vidinė varža R_i pastoviajai srovei:

$$R_i = u_A / i_A |_{U_T = \text{const}} ; \quad (44)$$

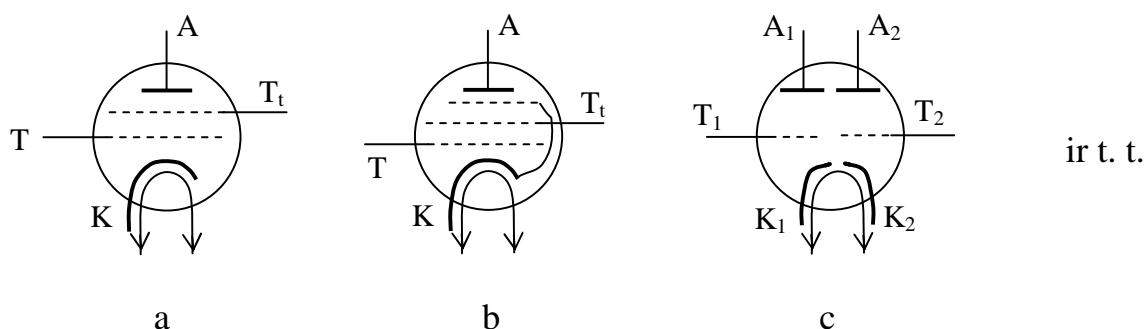
5.2.4. Diferencialinis įtampos stiprinimo koeficientas μ :

$$\mu = -\partial u_A / \partial u_T |_{I_A = \text{const}} ; \quad (45)$$

Visi šie parametrai yra surišti tarpusavyje:

$$S \cdot r_i / \mu = 1 \Rightarrow \mu = S \cdot r_i. \quad (46)$$

5.3. Vakuuminių lempų įvairovė:



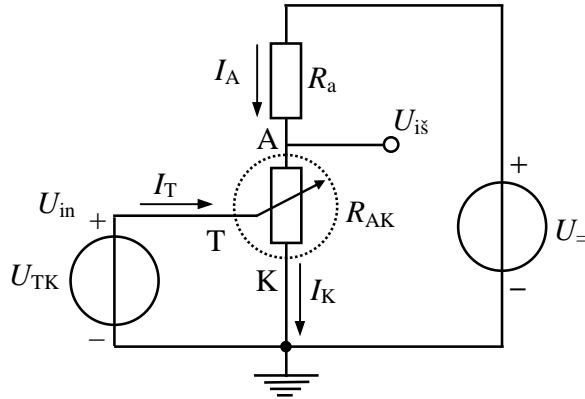
18 pav. Vakuuminio tetrodo (a), pentodo (b), dvigubo triodo (arba dvigubo diodo, kai nėra parodytų tinklelių $T_{1,2}$) žymenys

Taip pat labai ir ypač aukštų dažnių diapazone yra šie vakuuminiai įtaisai:

- 1- klistronai – vieno ir dviejų rezonatorių;
 - 2- bėgančios ir atspindžio bangų lempos;
 - 3- įvairių konstrukcijų magnetronai;
- ir t. t.

5.4. Stiprinimas

Elektrinių signalų $u(t)$, $i(t)$ ir $p(t)$ stiprintuvai sudaromi taikant pastoviosios įtampos $U_{=}$ rezistorinio daliklio principą, kai daliklis yra sudaromas iš nuosekliai sujungtų apkrovos rezistoriaus R_a ir, pavyzdžiui, vakuuminio triodo. Tokios schemas ekvivalentinė (lygiavertė) grandinė parodyta 19 pav.

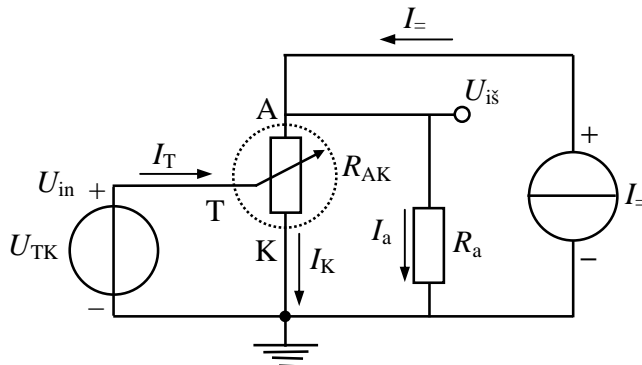


$$U_{i\dot{s}} = U_{=} \cdot R_{AK} / (R_a + R_{AK}), \quad (47)$$

$$K_u = U_{i\dot{s}} / U_{in} = \mu \cdot R_a / (R_a + R_i). \quad (48)$$

19 pav. Įtampos $U_{=}$ rezistorinis daliklis – stiprintuvai, čia vakuuminis triodas pakeistas ekvivalentiniu kečiamos varžos rezistoriumi – elektroniniu potenciometru R_{AK}

Kitas elektrinių signalų $u(t)$, $i(t)$ ir $p(t)$ stiprintuvų sudarymo principas paremtas taikant pastoviosios srovės $I_{=}$ rezistorinio daliklio principą, kai daliklis yra sudaromas iš lygiagrečiai sujungtų apkrovos rezistoriaus R_a ir, pavyzdžiui, vakuuminio triodo. Tokios schemas ekvivalentinė (lygiavertė) grandinė parodyta 20 pav.



$$U_{i\dot{s}} = I_{=} \cdot R_a \cdot R_{AK} / (R_a + R_{AK}). \quad (49)$$

$$K_u = U_{i\dot{s}} / U_{in} = S \cdot R_a. \quad (50)$$

20 pav. Srovės $I_{=}$ rezistorinis daliklis – stiprintuvai čia vakuuminis triodas pakeistas ekvivalentiniu kečiamos varžos rezistoriumi – elektroniniu potenciometru R_{AK}

Iš (47) ir (49) matome, kad išėjimo įtampa $U_{i\dot{s}}$ yra vakuuminio triodo varžos R_{AK} funkcija, o varža R_{AK} , savo ruožtu, yra įėjimo įtampos U_{in} funkcija. Didėjant U_{in} , varža R_{AK} mažėja ir idealiu atveju $R_{AK} \Rightarrow 0$. Todėl abeiose schemose 19 pav. ir 20 pav. išėjimo įtampa $U_{i\dot{s}} \Rightarrow 0$. Kai įėjimo įtampa U_{in} mažėja, varža R_{AK} didėja ir idealiu atveju $R_{AK} \Rightarrow \infty$. Todėl schemoje 19 pav. išėjimo įtampa $U_{i\dot{s}} \Rightarrow U_{=}$, o schemoje 20 pav. išėjimo įtampa $U_{i\dot{s}} \Rightarrow I_{=} \cdot R_a$. Įtampos U_{in} stiprinimas išreiškiamas įtampos stiprinimo koeficientu K_U pastoviajai įtampai ir diferencialiniu koeficientu K_u kintamajai įtampai taip:

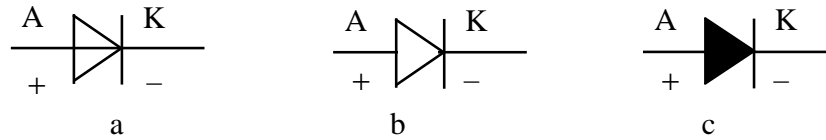
$$K_U = U_{i\dot{s}} / U_{in}, \quad K_u = \partial U_{i\dot{s}} / \partial U_{in}, \quad (51)$$

čia koeficientu K_u išraiškos pateiktos (48) ir (50).

6. Puslaidininkinė elektronika

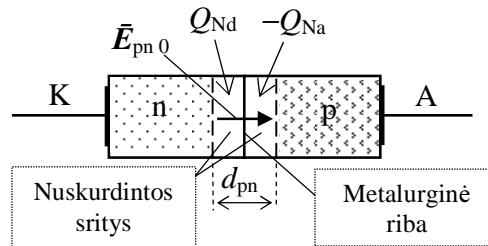
6.1. Puslaidininkinis diodas – pradėtas naudoti apie 1906 m., tačiau esminės revoliucijos elektronikoje nepadarė... 1922 m. – *Losevas* atrado stiprinimo efektą – generaciją p–n sandūroje.

Puslaidininkinio diodo žymuo parodytas 21 pav.



21. pav. Puslaidininkinio diodo grafiniai simboliai, čia: A – anodas; K – katodas, pridėtos įtampos U_{AK} poliškumas atitinka tiesioginę kryptį, kai per diodą teka tiesioginė difuzinė srovė

Dauguma puslaidininkinių diodų – lyginantieji, varikapai, stabilitronai, tuneliniai ir t. t., padaryti su plokščiąja p–n sandūra, kurios darinys parodytas 22 pav.



22 pav. Puslaidininkinio diodo plokščiosios p–n sandūros, sudarytos iš dviejų neutralių skirtingo laidumo n– ir p– puslaidininkinių kūnų, vientisas darinys su anodo (A) ir katodo (K) ominiais metalo kontaktais, čia: $Q_{Nd, Na}$ – donorinių (N_d) ir akceptorinių (N_a) legiruojančių priemaišų krūviai nuskurdintose srityse; d_{pn} – laisvaisiais n ir p krūvininkais nuskurdintų sričių bendrasis storis; \bar{E}_{pn0} – elektrinio lauko stiprio nuskurdintose srityse vidutinė vertė

Puslaidininkinės p–n sandūros nuskurdintų laisvaisiais krūvininkais: n – elektronais ir p – skylėmis sričių bendrasis storis d_{pn} išreiškiamas taip:

$$d_{pn} = [2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (\varphi_k \pm U_{np}) \cdot (1/N_d + 1/N_a) / q]^{1/2}, \quad (52)$$

čia: ε – puslaidininkinio santykinė dielektrinė skvarba; ε_0 – vakuumo dielektrinė skvarba;

Puslaidininkinis p–n darinys (22 pav.) atitinka plokščiąjį kondensatorių ir turi barjerinę talpą C_{pn} :

$$C_{pn} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S_{pn} / [2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (\varphi_k \pm U_{np}) \cdot (1/N_d + 1/N_a) / q]^{1/2}. \quad (53)$$

Puslaidininkinio diodo dažnines savybes lemia barjerinė talpa C_{pn} ir p–n sandūros pasyviųjų n– ir p– sričių atitinkamos ominės varžos R_p ir R_n , o kartu ir kontaktų ominės varžos, kurių dažnai nepaiso dėl santykinai mažų verčių. Impulsinėje elektronikoje diodo perjungimo spartą apsprendžia p–n sandūros difuzinė talpa C_{pnd} , kurios vertė yra:

$$C_{pnd} \approx \tau_{ef(p,n)} / R_{pn}(U_{AK}), \quad (54)$$

čia: $\tau_{ef(p,n)}$ – per p–n sandūrą injektuotų šalutinių krūvininkų p_n ir n_p efektyvioji gyvavimo trukmė; $R_{pn} = U_{AK} / I$ – p–n sandūros varža nuolatinei srovei veikos taške $\{I, U_{AK}\}$.

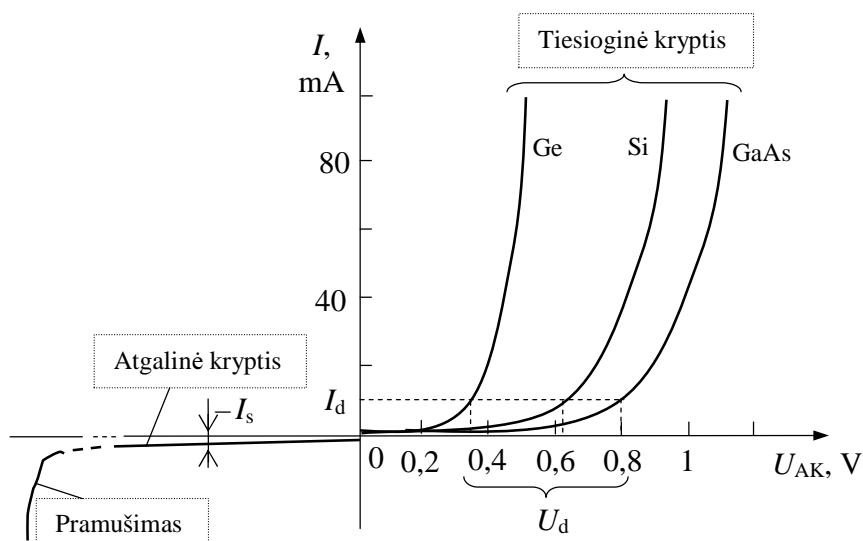
Iš (54) išplaukia, kad difuzinė talpa C_{pn} turi įtakos tik diodo veikos tiesioginei kryptimi, kai $U_{AK} > 0$.

Puslaidininkinės p–n sandūros, kartu ir diodų jos pagrindu, voltamperinė charakteristika – VACH yra aproksimuojama taip:

$$I = I_s \cdot \{ \exp [U_{AK} / (m \cdot \varphi_T)] - 1 \} \equiv I_s \cdot [e^{[U_{AK} / (m \cdot \varphi_T)]} - 1], \quad (55)$$

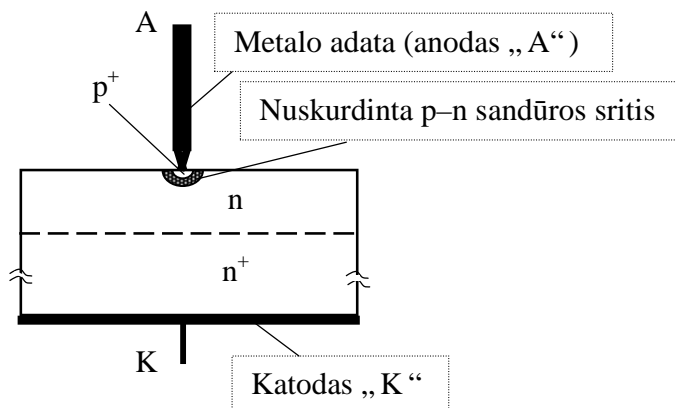
čia: I_s – diodo atgalinės srovės teorinė vertė (atgalinė soties arba šiluminė srovė), kai diodo įtampa $U_{AK} < 0$; $\varphi_T = k \cdot T / q$ – temperatūrinis potencialas, kuris kambario temperatūroje $T = 296$ K yra lygus 25,5 mV (k – Bolcmono konstanta); m – VACH patikslinimo koeficientas, įskaitantis nuokrypį nuo puslaidininkinio diodo teorinio Šoklio modelio (dažniausiai $m = 1-2$); $\exp \Rightarrow e = 2,7182... \equiv \lim_{n \rightarrow \infty} (1 + n^{-1})^n$.

Iš (55) apskaičiuotos VACH parodytos 23 pav.



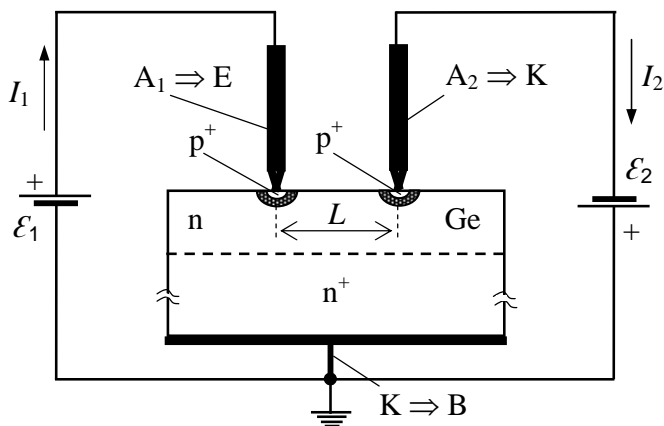
23 pav. Puslaidininkinių diodų VACH, čia: Ge, Si ir GaAs – atitinkamai germanis, silicis ir galio arsenidas; $I_d = 0,1 \cdot I_{max}$ – charakteringoji srovė, kurios atitinkama įtampa U_d nusako puslaidininkinės medžiagos tipą; I_{max} – didžiausioji tiesioginės srovės I vertė, kai diodas „sudega“

Aukštuose dažniuose ($f > 10$ MHz) moduluotų signalų detekcijai naudojami taškiniai diodai, kurių barjerinė talpa C_{pn} yra minimali ($C_{pn} < 1$ pF). Taškinio diodo – detektoriaus konstrukcija parodyta 24 pav.



24. pav. Puslaidininkinis diodas – taškinis detektorius

Elektroninių įtaisų, tame tarpe ir detektorinių įtaisų, triukšmai turi būti minimalūs. Labai aukštuose dažniuose, kai $f > 1$ GHz, naudojami balansiniai detektoriai su dviem puslaidininkiniais diodais, kai vienodų detektorių atveju galima sumažinti triukšmus. Akivaizdu, kad puslaidininkinės plokštelės paviršiuje šalia esantis du puslaidininkiniai diodiniai dariniai turi beveik vienodus parametrus ir todėl tinka mažatriukšmio balansinio detektoriaus konstravimui. 1945–1947 m. JAV Belo kompanijoje buvo atliekami germanio plokštelės paviršiuje šalia patalpintų taškinių diodų tyrimai, kurių eksperimentinė schema parodyta 25 pav.



Atrastas 1947 m.:

Brateinas }
Bardinas } *Nobelio premija*
Šokli }

$$\alpha_o = I_2/I_1 \approx 2,5 ?$$

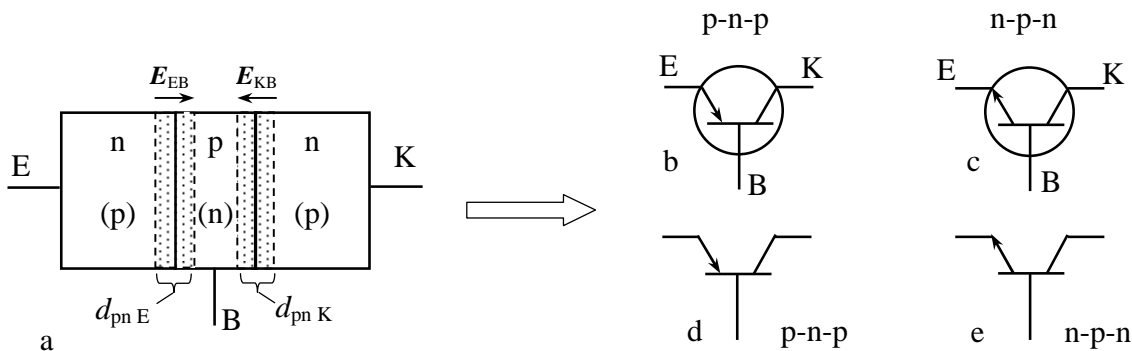
$$L < L_{dp(n)}.$$

25 pav. Puslaidininkinis balansinis detektorius (dvigubas diodas) ir jo tyrimo schema, čia: $A_{1,2}$ – atitinkamai pirmojo ir antrojo diodų anodai; K – bendras katodas; B – bazė; E – emiteris; K – kolektorius; L – atstumas tarp diodinių darinių; $L_{dp(n)}$ – šaltinių krūvininkų p – skylių n – puslaidininkyje difuzijos ilgis

Germanio (Ge) plokštelės paviršiuje šalia patalpintų taškinių diodų eksperimentiniai tyrimai netikėtai parodė sąsają tarp srovių I_1 ir I_2 (25 pav.), tekančių pirmojo diodo A_1 -K ir antrojo diodo A_2 -K grandinėse. Buvo stebėta srovės I_2 tiesioginė priklausomybė nuo srovės I_1 ir gautas santykis $\alpha_o = I_2/I_1 \approx 2,5 ?$, o tai atitiko stiprinimo efektą ! Taip buvo atrastas *dvipolis taškinis tranzistorius*.

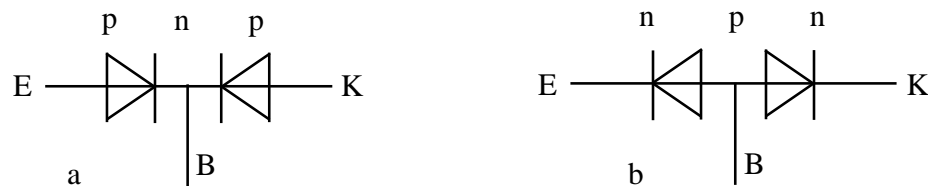
6.2. Tranzistoriai

6.2.1. Dvipolis tranzistorius – puslaidininkinis n-p-n arba p-n-p darinys, parodytas 26 pav., a, kartu su jo žymenimis 26 pav., b–e.



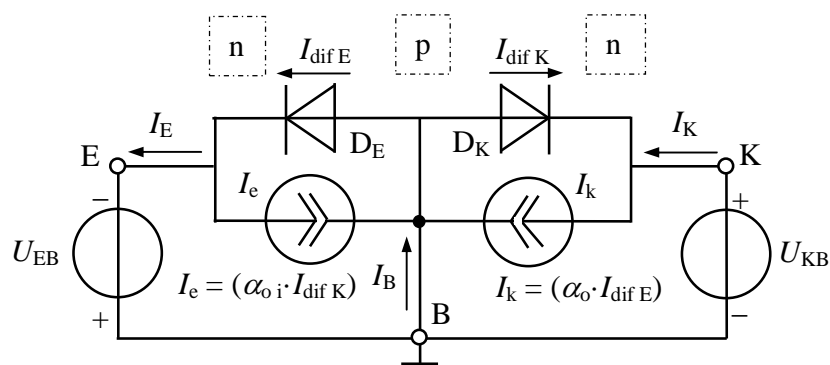
26 pav. Dvipolio tranzistoriaus n-p-n arba p-n-p darinys (a) ir jų žymenys (b)–(e), čia: E, B ir K – atitinkamai emiteris, bazė ir kolektorius; E_{EB} ir E_{KB} – elektrinių laukų kryptys atitinkamai emiterio-bazės ir kolektoriaus-bazės p-n sandūrų nuskurdintuose srityse (pažymėtos taškuotomis sritimis), kurių storiai $d_{pn E, K}$

Dvipolio tranzistoriaus ekvivalentinė schema su puslaidininkiais diodais parodyta 27 pav.



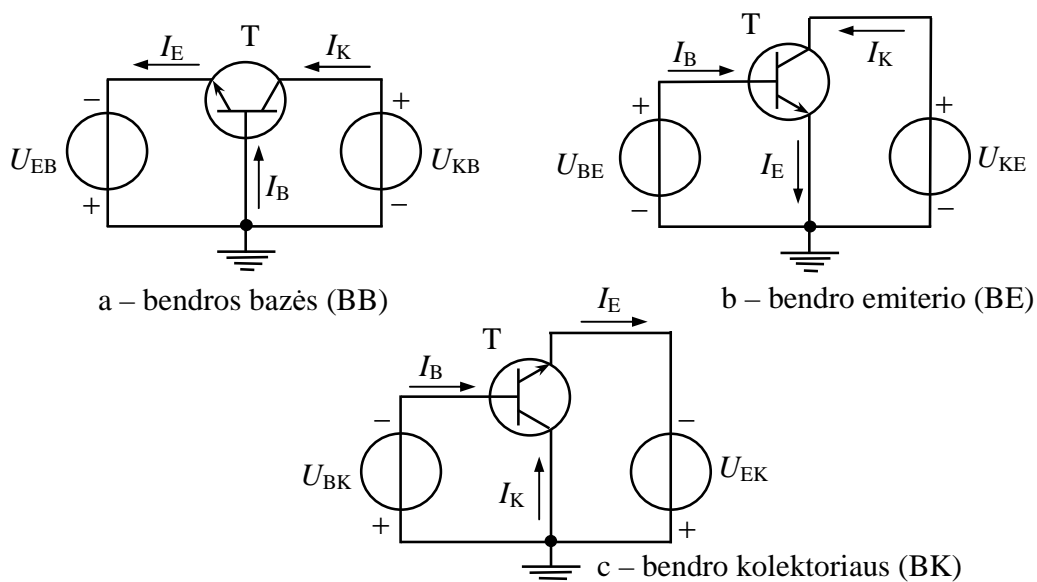
27 pav. Dvipolio p-n-p (a) arba n-p-n (b) tranzistoriaus diodinis ekvivalentas, naudojamas Eberso-Molo modelyje

Dvipolio tranzistoriaus diodinio ekvivalento (27 pav., b) taikymas Eberso-Molo modelyje n-p-n darinio atveju parodytas 28 pav.



28 pav. Dvipolio n-p-n tranzistoriaus Eberso ir Molo ekvivalentinė schema bendros bazės (BB) jungimo grandinėje su ekvivalentiniais diodais $D_{E, K}$, čia: $\alpha_o = I_K / I_E$ – normalioje veikoje; $\alpha_{oi} = I_E / I_K$ – inversinėje veikoje

Dvipolio n-p-n tranzistoriaus jungimo schemas VACH matavimo metu parodytos 29 pav.



29 pav. Dvipolio n-p-n tranzistoriaus jungimo schemas, čia p-n-p atveju srovių $I_{E, B, K}$ kryptis ir įtampų $U_{EB, BE, KB, EK}$ poliškumai yra priešingi

6.2.2. Dvipolio tranzistoriaus pamatiniai parametrai išreiškiami taip:

$$\left. \begin{array}{l} \text{statiniai} - \quad \beta_o = I_K/I_B, \quad \alpha_o = I_K/I_E, \\ \text{diferencialiniai} - \quad \beta = \partial I_K / \partial I_B, \quad \alpha = \partial I_K / \partial I_E, \end{array} \right\} \quad (56)$$

čia: β_o – diferencialinis ir statinis bazės srovių $I_{B\sim}$ stiprinimo koeficientai BE schemeje; α_o – diferencialinis ir statinis emiterio srovių $I_{E\sim}$ perdavimo koeficientai BB schemeje.

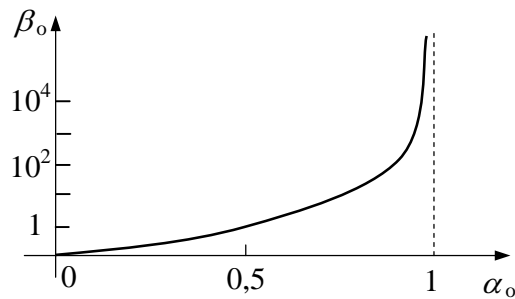
Dvipolio tranzistoriaus srovių balanso lygtis:

$$I_{E=} = I_{K=} + I_{B=}, \quad I_{E\sim} = I_{K\sim} + I_{B\sim}, \quad i_E = i_K + i_B, \quad I_E = I_K + I_B. \quad (57)$$

Iš (56) ir (57), kai $\alpha_o > 0$ ir $\beta_o > 0$, gauname:

$$\beta_o = \alpha_o / (1 - \alpha_o), \quad \alpha_o = \beta_o / (\beta_o + 1), \quad (58)$$

ir šios priklausomybės parodytos 30 pav.



30 pav. Koeficientų α_o ir β_o tarpusavio sąryšio priklausomybė

Iš Eberso-Molo modelio (28 pav.) išplaukia dvipolio tranzistoriaus VACH:

$$\left. \begin{array}{l} I_E = a_{11} \cdot [\exp(U_{BE}/\varphi_T) - 1] + a_{12} \cdot [\exp(U_{BK}/\varphi_T) - 1], \\ I_K = a_{21} \cdot [\exp(U_{BE}/\varphi_T) - 1] + a_{22} \cdot [\exp(U_{BK}/\varphi_T) - 1], \\ I_B = a_{31} \cdot [\exp(U_{BE}/\varphi_T) - 1] + a_{32} \cdot [\exp(U_{BK}/\varphi_T) - 1], \end{array} \right\} \quad (59)$$

čia parametrai a_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) išreikšti per atitinkamų ekvivalentinių diodų $D_{E,K}$ ir D_K atitinkamas sotes sroves I_{DEs} ir I_{DKs} atgalinėmis kryptimis (23 pav.):

$$\left. \begin{array}{l} a_{11} = I_{DEs}, \quad a_{12} = -\alpha_{oi} \cdot I_{DKs}, \quad a_{21} = \alpha_o \cdot I_{DEs}, \\ a_{22} = -I_{DKs}, \quad a_{31} = (1 - \alpha_o) \cdot I_{DEs}, \quad a_{32} = (1 - \alpha_{oi}) \cdot I_{DKs}, \end{array} \right\} \quad (60)$$

Išraiškose (59) pastoviosios įtampos U_{BE} ir U_{BK} yra įrašomos su ženklų: „+“ tiesiogine kryptimi ir „-“ užtvarine (atgaline) kryptimi; I_{DEs} ir I_{DKs} – emiterio-bazės ir kolektoriaus-bazės p–n sandūrų atgalinės srovės, kai kita p–n sandūra yra atjungta – per ją tekanti srovė lygi nuliui; α_{oi} – inversinio jungimo atveju, kai kolektorius K yra sukeistas vietomis su emiteriu E ir šiuo atveju $\beta_{oi} = \alpha_{oi} / (1 - \alpha_{oi})$.

Visose dvipolio tranzistoriaus jungimo scheme (29 pav.) jo veikai nusakyti yra naudojamos:

įėjimo VACH – $I_{E,B}(U_{EB, BE})$, esant užduotai įtampai $U_{KB, KE} = \text{const}$;

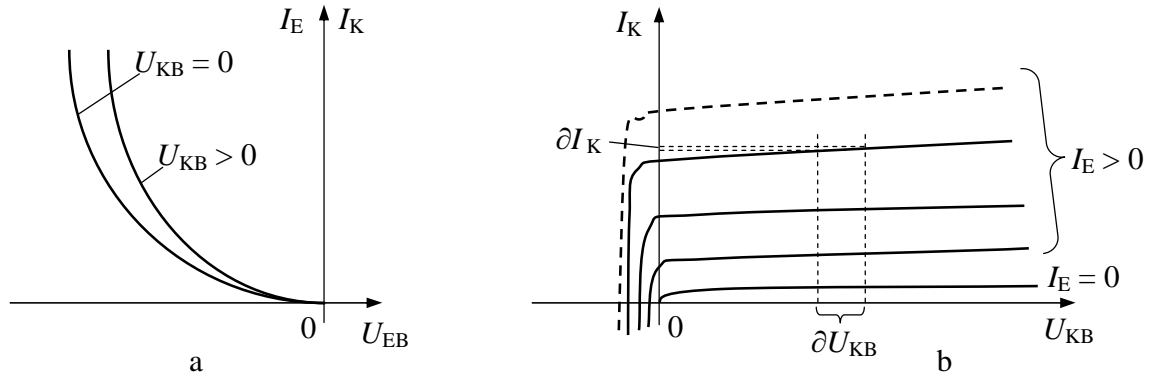
išėjimo VACH – $I_K(U_{KB, KE})$, esant užduotai srovei $I_{E,B} = \text{const}$;

perdavimo charakteristika – $I_K(U_{EB, BE})$, esant užduotai įtampai $U_{KB, KE} = \text{const}$.

Iš perdavimo charakteristikos $I_K(U_{EB, BE})$ kintamojo signalo atveju kolektoriaus srovių I_K priklausomybės nuo emiterio-bazės (BB schemoje) arba bazės-emiterio (BE schemoje) atitinkamų įtampų $U_{EB, BE}$ yra nusakomos atitinkamais diferencialiniais statumais $S_{b, e}$:

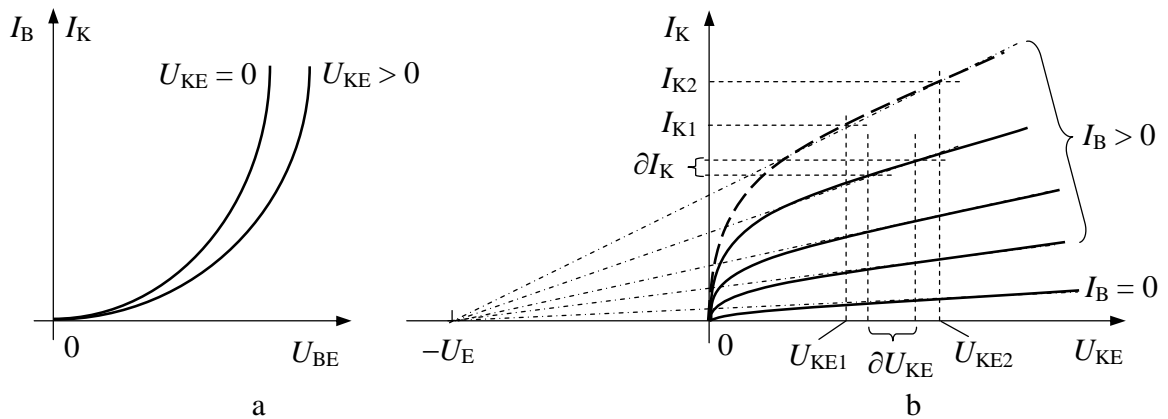
$$S_{b, e} = [I_K(U_{EB, BE})]'|_{U_{EB, BE}} = \partial I_K / \partial U_{EB, BE} = |I_K / \varphi_T|, \quad \text{kai } U_{KB, KE} = \text{const.} \quad (61)$$

Dvipolio n-p-n tranzistoriaus VACH BB jungimo atveju parodytos 31 pav.



31 pav. Dvipolio n-p-n tranzistoriaus įėjimo ir perdavimo VACH (a), bei išėjimo VACH (b)

Dvipolio n-p-n tranzistoriaus VACH BE jungimo atveju parodytos 32 pav.



32 pav. Dvipolio n-p-n tranzistoriaus įėjimo ir perdavimo VACH (a), bei išėjimo VACH (b), čia U_E – Erlio įtampa

Dvipolio tranzistoriaus įėjimo varža $R_{EB b, BE e}$ pastoviajai srovei:

$$\left. \begin{aligned} R_{EB b} &= |U_{EB} / I_E|_{U_{KB} = \text{const}} = |U_{EB} \cdot \exp(U_{EB} / \varphi_T) / I_{DE s}, \quad (\text{BB}) \\ R_{BE e} &= U_{BE} / I_B |_{U_{KE} = \text{const}} = U_{BE} / [I_B s \cdot \exp(U_{BE} / \varphi_T)]. \quad (\text{BE}) \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

Dvipolio tranzistoriaus diferencialinė įėjimo varža $r_{EB b, BE e}$:

$$\left. \begin{aligned} r_{EB b} &= (U_{EB} \sim / I_K \sim) / (I_E \sim / I_K \sim) |_{U_{KB} = \text{const}} = \alpha / S_b = \alpha \cdot \varphi_T / I_K, \quad (\text{BB}) \\ r_{BE e} &= (U_{BE} \sim / I_K \sim) \cdot (I_K \sim / I_B \sim) |_{U_{KE} = \text{const}} = \beta / S_e = \beta \cdot \varphi_T / I_K. \quad (\text{BE}) \end{aligned} \right\} \quad (63)$$

Dvipolio tranzistoriaus išėjimo varža $R_{KBb, KEe}$ pastoviai srovei:

$$\left. \begin{aligned} R_{KBb} &= U_{KB}/I_K |_{I_E = \text{const}} = U_{KB} \cdot \exp(U_{EB}/\varphi_T) / I_{DKs}, & \text{(BB)} \\ R_{KEe} &= U_{KE}/I_K |_{I_B = \text{const}} = U_{KE} / [I_{Kes} \exp(U_{BE}/\varphi_T)]. & \text{(BE)} \end{aligned} \right\} \quad (64)$$

Dvipolio tranzistoriaus diferencialinė išėjimo varža $r_{KBb, KEe}$:

$$\left. \begin{aligned} r_{KBb} &= \partial U_{KB} / \partial I_K |_{I_E = \text{const}} = \varphi_T \cdot \exp(U_{KB}/\varphi_T) / [(1 - \alpha_o \cdot \alpha_{oi}) \cdot I_{DKs}], & \text{(BB)} \\ r_{KEe} &= \partial U_{KE} / \partial I_K |_{I_B = \text{const}} = \varphi_T \cdot (1 - \alpha_o) \cdot \exp(U_{KB}/\varphi_T) / [(1 - \alpha_o \cdot \alpha_{oi}) \cdot I_{DKs}]. & \text{(BE)} \end{aligned} \right\} \quad (65)$$

6.2.3. Dvipolio tranzistoriaus dažninės charakteristikos aprašomos šiomis aproksimacijomis:

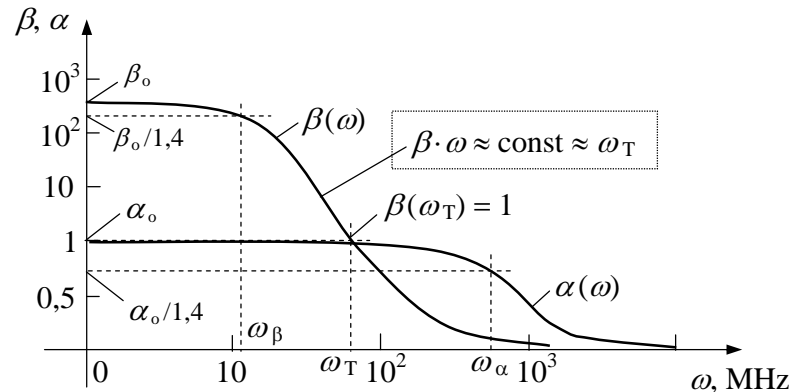
$$\left. \begin{aligned} \alpha(j\omega) &\cong \alpha_o \cdot \exp\{-j\omega[(v_\varphi/\omega) + (2\pi\tau_{dK})]\} / [1 + j(\omega/\omega_\alpha)], & \text{(BB)} \\ \beta(j\omega) &\cong \beta_o \cdot \exp\{-j\omega[(v/\omega) + (2\pi\omega\tau_{dK})]\} / [1 + j(\omega/\omega_\beta)], & \text{(BE)} \end{aligned} \right\} \quad (66)$$

čia: $\omega_{\alpha, \beta}$ – ribiniai dažniai atitinkamai BB ir BE jungimo schemose, kai dažnis ω tenkina sąlygas:

$$[\alpha, \beta](\omega)|_{\omega = \omega_{\alpha, \beta}} = [\alpha_o, \beta_o] / \sqrt{2} \cong 0,71 \cdot [\alpha_o, \beta_o]; \quad (67)$$

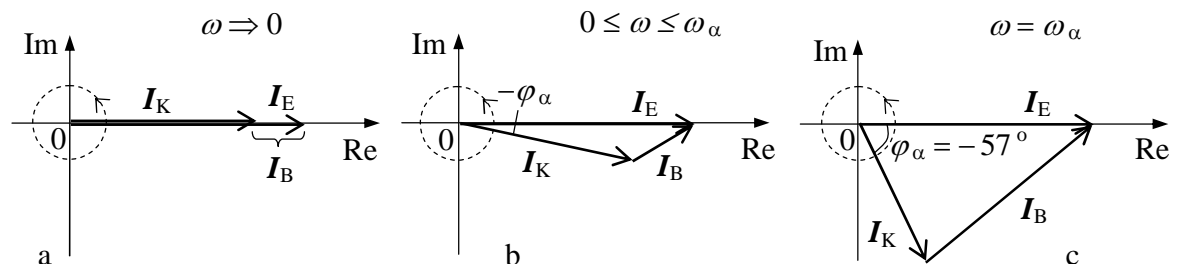
τ_{dK} – kintamojo signalo vėlinimo trukmės konstanta nuskurdintoje kolektorinės p–n sandūros srityje d_{pnK} (26 pav., a); v_φ – kolektoriaus K kintamosios srovės I_K fazės φ_α atžvilgiu emiterio E srovės I_E patikslinimo koeficientas.

Ribinių dažnių $\omega_{\alpha, \beta}$ apibrėžtis išplaukia iš dažnių charakteristikų $[\alpha, \beta](\omega)$, parodytų 33 pav.



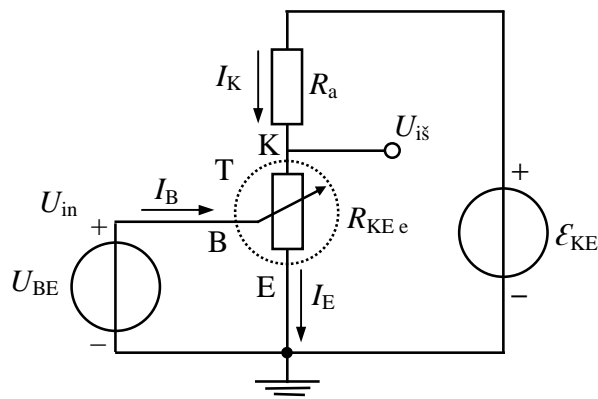
33 pav. Dvipolio tranzistoriaus dažninės charakteristikos $\alpha(\omega)$ ir $\beta(\omega)$ atitinkamai BB ir BE jungimo schemose

Iš srovių balanso lygties (49): $I_E = I_K + I_B$, išplaukia dvipolio tranzistoriaus srovių vektorinės diagramos, parodytos 34 pav.



34 pav. Dvipolio tranzistoriaus srovių $I_E = I_K + I_B$ vektorinės diagramos

6.3. Elektrinių signalų stiprinimas – dvipolio tranzistoriaus BE pakopos stiprintuvo ekvivalentinė schema su elektriškai valdomu rezistoriniu pastoviosios maitinimo įtampos \mathcal{E}_{KE} dalikliu parodyta 35 pav.

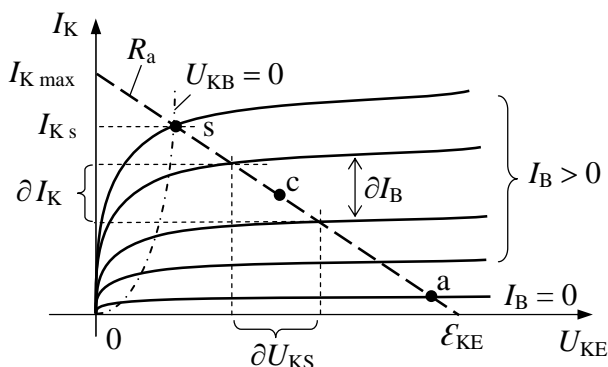


$$U_{i\text{š}} = U_{i\text{in}} \cdot R_{KEe} / (R_{KEe} + R_a), \quad (68)$$

$$K_{u(e)} = U_{i\text{š}} / U_{i\text{in}} \cong S \cdot R_a. \quad (69)$$

35 pav. Pastoviosios maitinimo įtampos \mathcal{E}_{KE} rezistorinis daliklis – tranzistorinės BE stiprinimo pakopos ekvivalentas

Tranzistorinės BE stiprinimo pakopos veiką paaiškinanti diagrama – išėjimo VACH ir joje atidėta apkrovos R_a tiesė parodytos 36 pav.



36 pav. Apkrovos R_a tiesė tranzistorinės BE pakopos išėjimo VACH koordinačių $\{I_K, U_{KE}\}$ plokštumoje

Iš Omo dėsnio visai išėjimo $U_{i\text{š}}$ grandinei (35 pav.) apkrovos R_a tiesė yra aprašoma šia lygtimi:

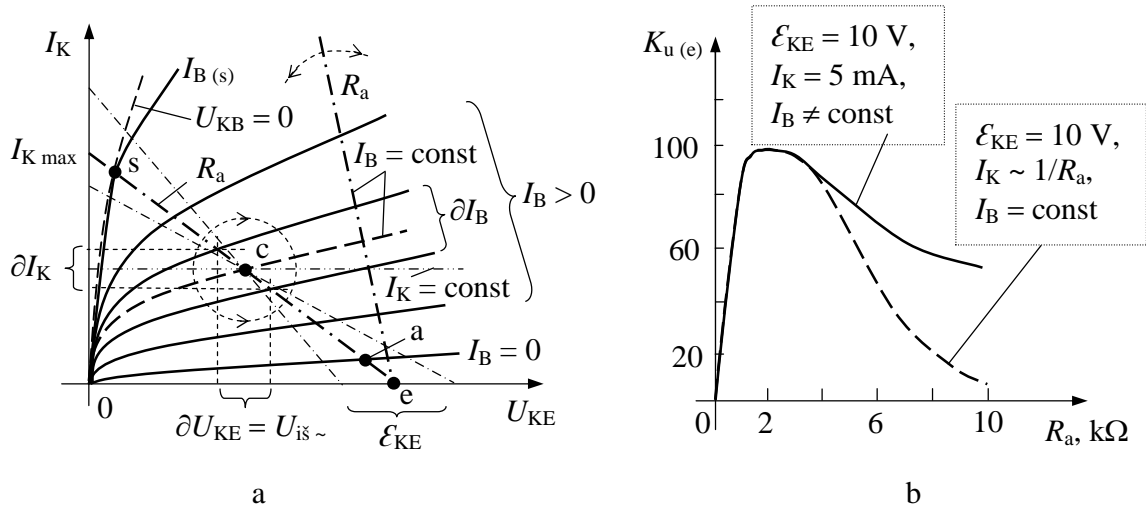
$$I_K = I_{K \text{ max}} - U_{KE} / R_a \quad \text{arba} \quad I_K = (\mathcal{E}_{KE} - U_{KE}) / R_a, \quad (70)$$

čia: $I_{K \text{ max}} = \mathcal{E}_{KE} / R_a$, ir iš čia, bei 35 pav. randame:

$$\begin{aligned} U_{i\text{š}} &= \mathcal{E}_{KE} - U_{RK} = \mathcal{E}_{KE} - (I_K \cdot R_a) = \mathcal{E}_{KE} - [\mathcal{E}_{KE} \cdot R_a / (R_a + R_{KEe})] = \\ &= \mathcal{E}_{KE} \cdot R_{KEe} / (R_a + R_{KEe}) = \mathcal{E}_{KE}^2 / \{ [I_{Ks} \cdot R_a \cdot \exp(U_{BE} / \varphi_T)] + |\mathcal{E}_{KE}| \}, \quad (71) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{u(e)} &= \partial U_{i\text{š}} / \partial U_{BE} |_{I_B = \text{const}} = \mathcal{E}_{KE}^2 \cdot I_K \cdot R_a / [\varphi_T \cdot (I_K \cdot R_a + \mathcal{E}_{KE})^2] = \\ &= K_{u(e)} = S_e \cdot R_a \cdot \mathcal{E}_{KE}^2 / (I_K \cdot R_a + \mathcal{E}_{KE})^2. \quad (72) \end{aligned}$$

Tranzistorinės BE stiprinimo pakopos (35 pav.) įtampos diferencialinio stiprinimo koeficiento $K_{u(e)}$ priklausomybės nuo apkrovos varžos R_a , apskaičiuotos iš (72), parodytos 37 pav., b, kartu su paaškinančiomis diagramomis (a).



37 pav. Tranzistorinės BE stiprinimo pakopos (35 pav.) įtampos diferencialinio stiprinimo koeficiento $K_{u(e)}$ priklausomybės nuo apkrovos varžos R_a (b) ir paaškinančios diagramos (a)

Dvypolio tranzistoriaus elektrinių savybių pagrindinės palyginamosios vertės įvairiose jungimų schemose yra pateiktos 1-ioje lentelėje.

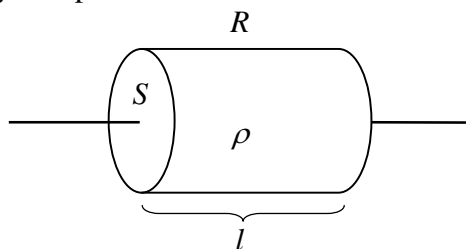
1 lentelė

Tranzistoriaus jungimo grandinė	Tranzistoriaus įėjimo diferencialinė Varža r_{in}	Tranzistoriaus išėjimo diferencialinė Varža $r_{iš}$	Stiprinimas: srovės//įtampos galios $K_{i, u, p}$	Srovė, įtampa: įėjime//išėjime
Bendros bazės (BB)	labai maža: $10 \div 300 \Omega$	labai didelė: $100 \text{ k}\Omega \div 10 \text{ M}\Omega$	$\leq 1 // \gg 1$ didelis	$I_E, U_{EB} // I_K, U_{KB}$
Bendro emiterio (BE)	didelė: $10 \div 100 \text{ k}\Omega$	vidutinė: $100 \div 10^3 \text{ k}\Omega$	$\gg 1 // \gg 1$ labai didelis	$I_B, U_{BE} // I_K, U_{KE}$
Bendro kolektoriaus (BK), emiterinio kartotuvo (EK)	labai didelė: $100 \text{ k}\Omega \div 10 \text{ M}\Omega$	vidutinė: $100 \div 10^3 \text{ k}\Omega$, kai $I_B = \text{const}$; maža: $0,01 \div 1 \text{ k}\Omega$, kai $I_B \neq \text{const}$	$\gg 1 // \leq 1$ didelis	$I_B, U_{BK} // I_E, U_{EK}$

6.4. Vienpolis (unipoliarinis, lauko) tranzistorius

Elektroninių vakuuminių lempų eroje radiofizikai ir elektronikos inžinieriai bandė sukurti kietakūnį – puslaidinikinį įtaisą – vakuuminio triodo analogą, valdomą elektriniu lauku. 1928 m. – *Lilienfeldas* ir 1930 m. – *Heilas* pasiūlė *lauko tranzistorių konstrukcijų variantus*, kurie, deja, tuo metu negalėjo būti įgyvendinti dėl nepakankamų tuometinių teorinių žinių apie puslaidininkines medžiagas ir atitinkamų technologijų nebuvimo. 1947 m. – *Šokli* pagamino lauko tranzistorių, kuris, deja, neveikė !

Nuo 1960 m. prasidėjo lauko tranzistorių era, kuri, lygiagrečiai su dvipoliais tranzistoriais, tęsiasi ir šiuo metu... Lauko tranzistorių galimos konstrukcijos ir veikimo principai išplaukia iš elektra laidaus kūno varžos R keitimo būdų, kurie parodyti 38 pav.

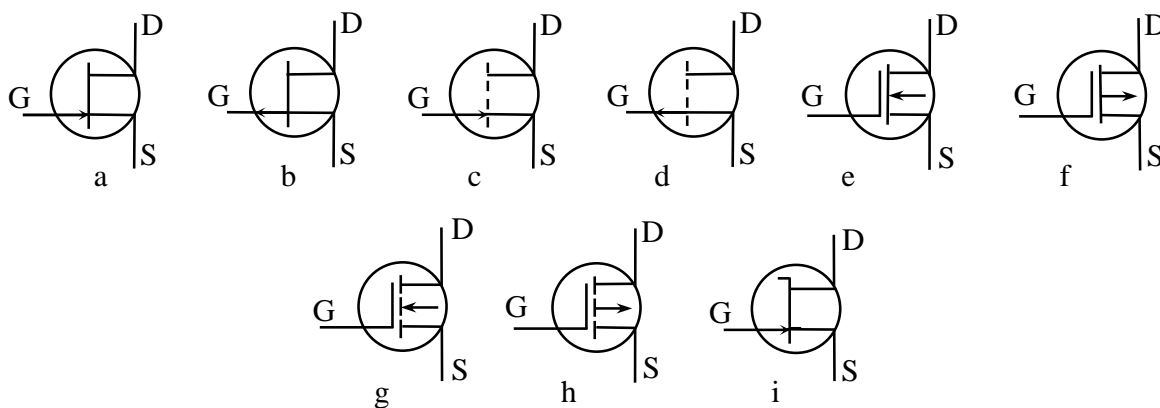


38 pav. Laidaus kūno, pavyzdžiui, cilindrinio, varžos R keitimo būdai, čia: S ir l – cilindro skerspjūvio, statmeno simetrijos ašiai, plotas ir ilgi; ρ – cilindro medžiagos savitoji elektrinė varža

Cilindrinio kūno (38 pav.) elektrinė varža R išreiškiama taip:

$$R = (\rho \cdot l) / S. \quad (73)$$

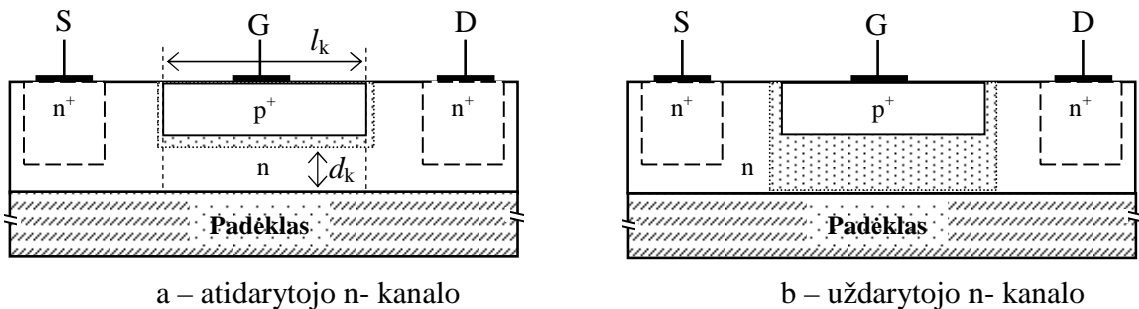
Iš (73) išplaukia trys būdai keisti kūno elektrinę varžą – keičiant skerspjūvio plotą S , keičiant išilginį ilgį l ir keičiant kūną sudarančios medžiagos savitąją elektrinę varžą ρ . Tai lemia santykinai didelę lauko tranzistorių įvairovę. Lauko tranzistorių žymenys parodyti 39 pav.



39 pav. Lauko tranzistorių žymenys – Europos standartas (Amerikos standarte nėra braižomas apskritimas)

Lauko tranzistorių žymenyse (39 pav.) parodyta: G – užtūra (sklendė); S – ištaka; D – santaka; a–d – n– ir p– kanalo sandūriniai; e–h – n– ir p– kanalo MOP – metalas-oksidas-puslaidininkis (arba MDP – metalas-dielektrikas-puslaidininkis); i – n– kanalo Šotkio.

6.4.1. Tipinis atidarytojo bei uždarytojo sandūrinio n- kanalo lauko tranzistoriaus planariosios (paviršinės) konstrukcijos darinio pjūvis parodytas 40 pav.



40 pav. Atidarytojo bei uždarytojo sandūrinio n- kanalo lauko tranzistoriaus planariosios (paviršinės) konstrukcijos darinio pjūvis, čia taškuotos sritys žymi užtūros G p⁺-n sandūros nuskurdintas sritys

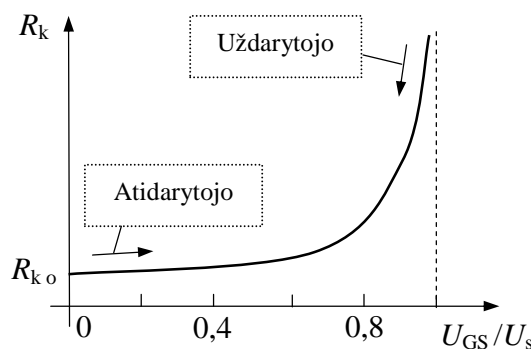
40 pav. pažymėta: n – santykinai silpnai donorinėmis priemaišomis $N_d = 10^{17} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ legiruota puslaidininkinė elektroninio laidumo sritis; n⁺ – santykinai stipriai donorinėmis priemaišomis $N_d = 10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ legiruota puslaidininkinė elektroninio laidumo sritis; p⁺ – santykinai stipriai akceptorinėmis priemaišomis $N_a = 10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ legiruota puslaidininkinė skylinio laidumo sritis; d_k ir l_k – atitinkamai kanalo storis ir ilgis; Padėklas – elektrai nelaidi ir šilumai laidū sritis.

Iš 40 pav. matome, kad sandūrinį lauko tranzistorių veikia pagrįsta kanalo, esančio po užtūros G p⁺-sritimi, varžos priklausomybė nuo kanalo skerspjūvio ploto S_k , kuris, savo ruožtu, priklauso nuo užtūros G p⁺-n sandūros nuskurdintą srities storio d_{pn} sando d_{pnk} kanale – n- srityje. Atidarytojo sandūrinio lauko tranzistoriaus (40 pav., a) kanalo – n srities, esančios po p⁺ sritimi – užtūra G, varžą R_k yra išreiškama taip:

$$R_k = \rho_k l_k / (h_k l_G) = R_{k0} / [1 - (|U_{GS}| / |U_s|)^{1/2}], \quad \text{kai } 0 \leq |U_{GS}| \leq |U_s|, \quad (74)$$

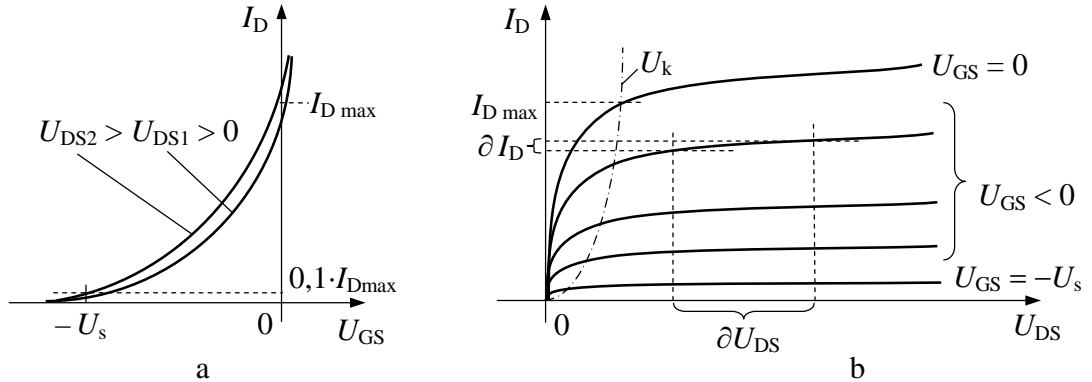
čia: $R_{k0} = \rho_k l_k / (W_k l_G)$ – minimali atidaryto kanalo varža, kai $U_{GS} = 0$ ir $U_{DS} = 0$; ρ_k , l_G – atitinkamai kanalo savitoji varža ir plotis statmenai piešinio plokštumai; U_s – slenkstinė užtūros G įtampa, kuriai esant atidarytojo kanalo sandūrinio lauko tranzistoriaus kanalas yra visiškai uždaromas – užtūros G p⁺-n sandūros nuskurdinta sritis $d_{pn(n)}$ visiškai užpildo kanalo sritį, o uždarytojo kanalo atveju atvirkščiai – kanalas yra truputi atidaromas – pradaromas, ir juo teka santakos D srovė $I_D \cong 0,1 \cdot I_{D \text{ s max}}$; $I_{D \text{ s max}}$ – santakos D srovė, kai įtampa $U_{SG} = 0$ ir $U_{DG} \geq U_s$, ir iš čia įtampą U_s galima apibrėžti kaip įtampos vertę, kuriai esant santakos D srovė $I_D = 0,1 \cdot I_{D \text{ s max}}$, kai $U_{DG} \geq U_s$.

Atidarytojo (40 pav., a) ir uždarytojo (40 pav., b) sandūrinį lauko tranzistorių kanalo varžos R_k priklausomybė nuo santykio U_{GS} / U_s parodyta 41 pav.

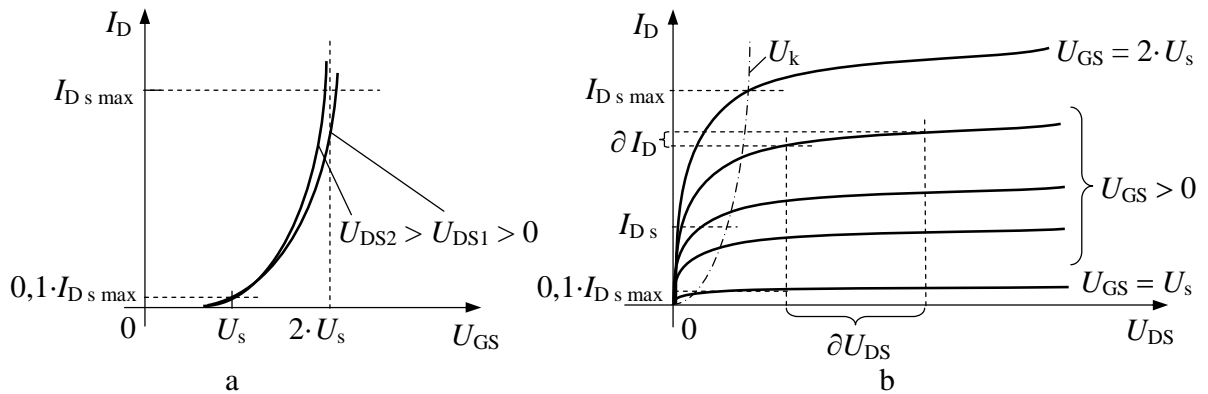


41 pav. Sandūrinį lauko tranzistorių kanalo varžos R_k kitimo kryptis

Bendros ištakos (BS) – bendraištakėje schemoje atidarytojo n- kanalo sandūrinio lauko tranzistoriaus perdavimo charakteristika $I_D(U_{GS})$ ir išėjimo VACH $I_D(U_{DS})$ parodytos 42 pav., o uždarytojo n- kanalo sandūrinio lauko tranzistoriaus perdavimo charakteristika $I_D(U_{GS})$ ir išėjimo VACH $I_D(U_{DS})$ parodytos 43 pav.



42 pav. Bendraištakėje schemoje (BS) atidarytojo n- kanalo sandūrinio lauko tranzistoriaus perdavimo charakteristika $I_D(U_{GS})$ (a) ir išėjimo VACH $I_D(U_{DS})$ (b)



43 pav. Bendraištakėje schemoje (BS) uždarytojo n- kanalo sandūrinio lauko tranzistoriaus perdavimo charakteristika $I_D(U_{GS})$ (a) ir išėjimo VACH $I_D(U_{DS})$ (b)

Iš 42 ir 43 pav. matome, kad atidarytojo kanalo sandūrinio lauko tranzistoriaus $I_{D \max}$ atitinka santakos D srovės I_D vertę, kai $U_{GS} = 0$ ir $U_{DS} > 0$, o uždarytojo kanalo sandūrinio lauko tranzistoriaus $I_{D s \max}$ atitinka santakos D srovės I_D vertę, kai $U_{GS} = 2 \cdot U_s$ ir $U_{DS} \geq U_k$, čia $U_k \approx U_s$ ir atitinka U_{DS} vertę, nurodančią ribą tarp išėjimo VACH pradinės, kai $I_D \approx U_{DS}$, ir sąsmukos, kai $I_D \approx \text{const}$, sričių. Atidarytojo ir uždarytojo p- kanalo sandūrinių lauko tranzistorių VACH analogiškos parodytos 42 ir 43 pav., kuriose įtampos U_{DS} ir U_{GS} yra priešingų ženklų.

Į BI schemą įjungto atidarytojo kanalo sandūrinio lauko tranzistoriaus perdavimo charakteristika $I_D(U_{GS})$ (42 pav., a), kai $0 \leq |U_{GS}| \leq |U_s|$, yra aprašoma šia aproksimacija:

$$I_D \cong I_{D \max} \cdot [1 - (|U_{GS}|/|U_s|)]^2, \quad (75)$$

o uždarytojo kanalo sandūrinio lauko tranzistoriaus perdavimo charakteristika $I_D(U_{GS})$ (43 pav., a), kai $|U_s| \leq |U_{GS}| \leq |2 \cdot U_s|$, yra aprašoma šia aproksimacija:

$$I_D \cong I_{D s \max} \cdot [1 - (|U_{GS}|/|U_s|)]^2, \quad (76)$$

Į BI schemą įjungto sandūrinio lauko tranzistoriaus išėjimo VACH pradinė sritis (42 ir 43 pav, b), kai įtampa $U_{DS} \leq U_k$, yra aprašoma šia aproksimacine išraiška:

$$I_D = I_{D_{s \max}} [2 \cdot (|U_s| - |U_{GS}|) \cdot |U_{DS}| - U_{DS}^2] / U_s^2 = I_{D_{s \max}} (2 \cdot |U_k| \cdot |U_{DS}| - U_{DS}^2) / U_s^2, \quad (77)$$

čia $|U_{DS}| \leq |U_k|$.

Iš 42 ir 43 pav. parodytų VACH apskaičiuojame:

diferencialinę išėjimo varžą r_{DS_s} :

$$r_{DS_s} = \partial U_{DS} / \partial I_D = U_{DS} / I_D, \quad \text{kai } U_{GS} = \text{const}, \quad (78)$$

iš čia r_{DS_s} vertę išėjimo VACH pradinėje srityje:

$$r_{DS_s} = U_s^2 / [2 \cdot I_{D_{\max}} \cdot (|U_s| - |U_{GS}| - |U_{DS}|)] = U_s^2 / \{2 \cdot |U_k| \cdot I_{D_{\max}} \cdot [1 - (|U_{DS}| / |U_k|)]\}; \quad (79)$$

čia $0 \leq |U_{DS}| \leq |U_k|$.

diferencialinį statumą S_s kintamajai srovei, kai $U_{DS} = \text{const}$:

$$\begin{aligned} S_s &= \partial I_D / \partial U_{GS} = [I_D(U_{GS})]'_{U_{GS} = \text{const}} = I_D / U_{GS} \cong \\ &\cong 2 \cdot I_{D_{\max}} \cdot (|U_s| - |U_{GS}|) / U_s^2 = 2 \cdot (I_{D_{\max}} \cdot I_D)^{1/2} / |U_s|, \end{aligned} \quad (80)$$

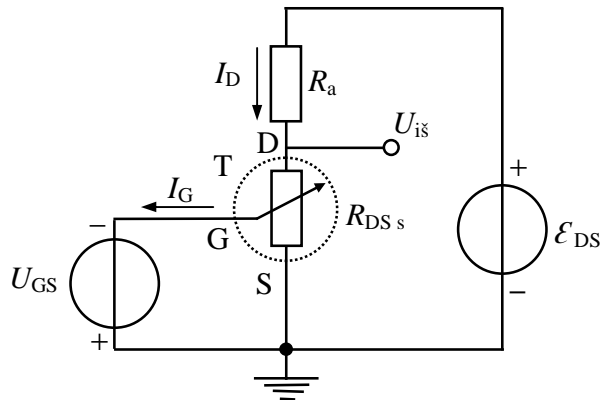
čia $0 \leq |U_{GS}| \leq |U_s|$ ir $U_{DS} = \text{const}$.

Iš (80) matome, jog S_s didėja, didėjant santakos D pastoviajai srovei I_D , ir todėl yra didžiausioji vertė $S_{s \max}$, kai $I_D = I_{D_{\max}}$, ir iš (80) randame:

$$S_{s \max} \cong 2 \cdot I_{D_{\max}} / |U_s|. \quad (81)$$

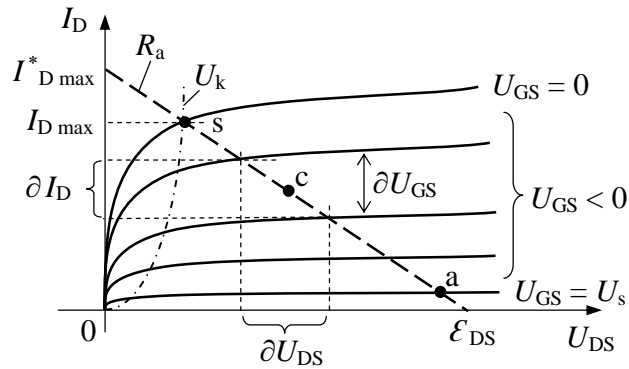
Uždarytojo kanalo sandūrinio lauko tranzistoriaus atveju išraiškose (77)–(81) vertę $I_{D_{\max}} \rightarrow I_{D_{s \max}}$.

6.4.1. Elektrinių signalų stiprinimas – BS stiprintuvo su lauko tranzistoriumi ekvivalentinis analogas – elektriškai valdomo rezistorinio įtampos daliklio veika parodyta 44 pav.



44 pav. BS stiprintuvo su lauko tranzistoriumi ekvivalentinis analogas, čia $R_{DS_s} \cong R_k$ – įtampa U_{GS} valdoma varža tarp išvadų D ir S

BS stiprintuvo, parodyto 44 pav., veika paaiškinama atidėjus apkrovos R_a tiesę išėjimo VACH koordinatų $\{I_D, U_{DS}\}$ plokštumoje, parodytoje 45 pav.



45 pav. Apkrovos tiesė R_a lauko tranzistoriaus išėjimo VACH koordinatinių $\{I_D, U_{DS}\}$ plokštumoje

Iš Omo dėsnio visai išėjimo $U_{i\check{s}}$ grandinei (43 pav.) apkrovos R_a tiesė yra aprašoma šia lygtimi:

$$I_D = I_{D \max}^* - |U_{DS}|/R_a \quad \text{arba} \quad I_D = (|\mathcal{E}_{DS}| - |U_{DS}|)/R_a, \quad (82)$$

čia: $I_{D \max}^* = |\mathcal{E}_{DS}|/R_a$.

BS schemos (44 pav.) išėjimo įtampa $U_{i\check{s}}$ kinta ribose:

$$0 \leq U_{i\check{s}} \cong |\mathcal{E}_{DS}| / \{1 + \{R_a \cdot I_{D \max} [1 - (|U_{GS}|/|U_s|)]\} / |U_s|\} \leq |\mathcal{E}_{DS}|, \quad (83)$$

ir todėl pastoviosios įtampos stiprinimo koeficientas K_{U_s} tenkina nelygybę:

$$K_{U_s} = U_{i\check{s}}/U_{in} \cong |\mathcal{E}_{DS}|/|U_s| > 1, \quad \text{kai } \mathcal{E}_{DS} > U_s, \quad (84)$$

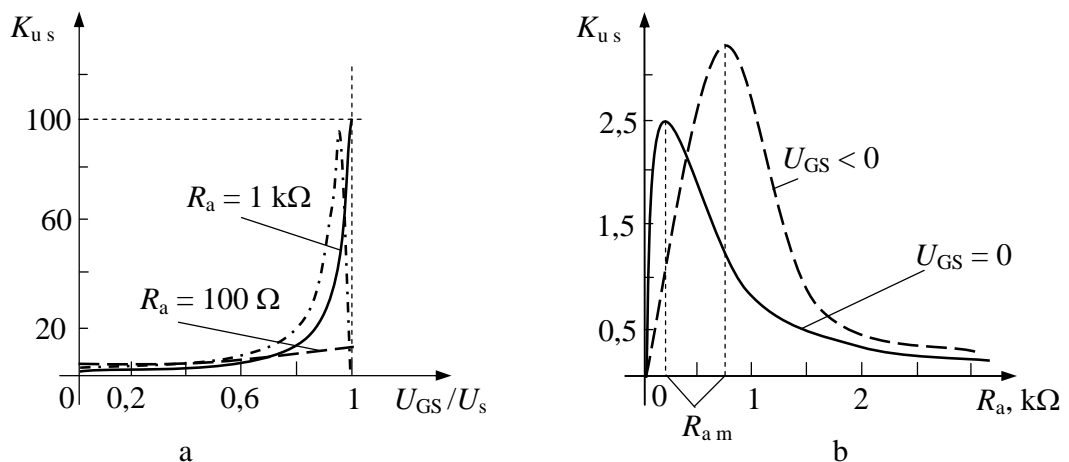
o kintamosios įtampos diferencialinis stiprinimo koeficientas K_{u_s} išreiškiamas taip:

$$K_{u_s} = \partial U_{i\check{s}} / \partial U_{in} = U_{i\check{s}} / U_{in}, \quad \text{kai } U_{GS} = \text{const}, \quad (85)$$

ir yra:

$$K_{u_s} \cong R_a I_{D \max} |\mathcal{E}_{DS}| / \{|U_s| + R_a I_{D \max} [1 - (|U_{GS}|/|U_s|)]\}^2 \cong S_s \cdot R_a. \quad (86)$$

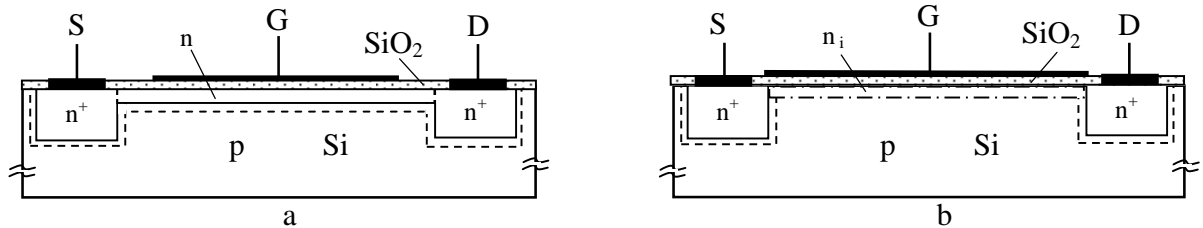
Iš (86) apskaičiuotos K_{u_s} priklausomybės nuo santykio U_{GS}/U_s ir R_a parodytos 46 pav.



46 pav. BS schemos kintamosios įtampos stiprinimo diferencialinio koeficiento K_{u_s} priklausomybės nuo U_{GS}/U_s (a) ir R_a (b) paaiškinimo diagramos, čia $R_{a,m}$ – optimaliausia R_a vertė, kai K_{u_s} yra didžiausios vertės $K_{u_s \max}$

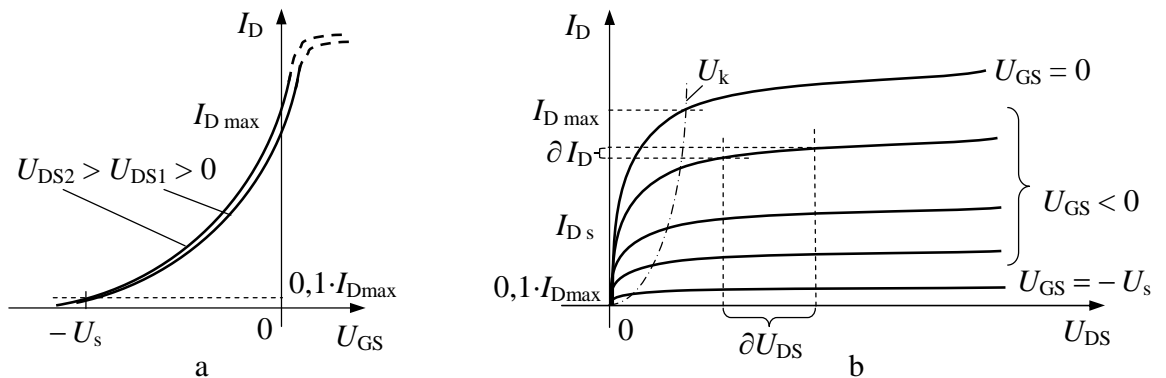
6.4.2. MOP (MDP) lauko tranzistorių veikia pagrįsta kanalo srities savitosios elektrinės varžos ρ_k keitimu elektriniu lauku, indukuojamu užtūros G įtampa U_{GS} .

Įterpto bei indukuoto n- arba p- kanalo MOP (MDP) tranzistorių planariosios konstrukcijos pjūviai, n- kanalo atveju, yra parodyti 47 pav., atitinkamai a ir b.

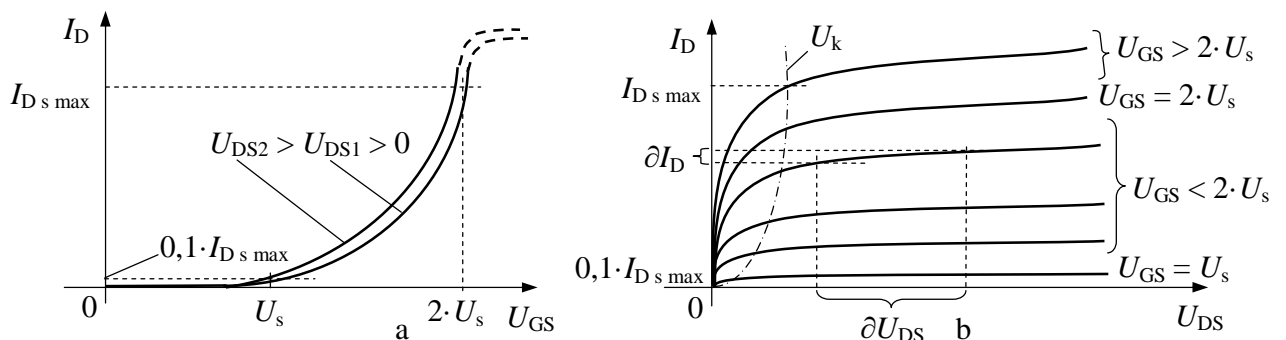


47 pav. Įterpto (a) ir indukuoto (b) n- kanalo MOP (MDP) tranzistorių planariosios konstrukcijos pjūviai

Iš 47 pav., a, matome, kad įterpto kanalo MOP tranzistoriaus varža $R_{DS} \cong R_k$, kai $U_{GS} = 0$, yra minimali $R_{DS \min}$ ir, esant įtampai $|U_{DS}| > 0$, teka santakos D maksimali srovė $I_{D \max} \cong |U_{DS}|/R_{DS \min}$. Kita vertus, iš 47 pav., b, matome, kad indukuoto kanalo MOP tranzistoriaus varža $R_{DS} \cong \infty$, kai $U_{GS} = 0$, yra maksimali $R_{DS \max}$ ir, esant įtampai $|U_{DS}| > 0$, teka santakos D minimali srovė $I_{D \min} \cong I_s$ – atgalinė p-n⁺ sandūros srovė (55). Įterpto n- kanalo MOP tranzistoriaus VACH parodytos 48 pav., o indukuoto n_i- kanalo MOP tranzistoriaus VACH parodytos 49 pav.



48 pav. Bendraištakėje (BS) įterpto n- kanalo MOP tranzistoriaus perdavimo charakteristika $I_D(U_{GS})$ (a) ir išėjimo VACH $I_D(U_{DS})$ (b)



49 pav. Į bendraištakę (BI) schemą įjungto indukuoto n- kanalo MOP tranzistoriaus perdavimo charakteristika $I_D(U_{GS})$ (a) ir išėjimo VACH (b)

6.4.3. Lauko tranzistoriaus dažninė charakteristika $K_u(j \cdot \omega)$ aprašoma šia aproksimacija:

$$K_u(j \cdot \omega) \cong [K_{u0} \cdot \exp(-j \cdot \nu_\varphi)] / [1 + j \cdot (\omega / \omega_u)], \quad (87)$$

čia: ν_φ – išėjimo signalo U_{is} fazės φ_{is} įėjimo įtampos U_{in} atžvilgiu patikslinimo koeficientas, priklausantis nuo lauko tranzistoriaus jungimo schemas ir nustatomas eksperimentiniais matavimais; ω_u – ribinis įtampos stiprinimo dažnis, kuriam esant $K_u(\omega)|_{\omega=\omega_u} = K_{u0} / \sqrt{2} \cong 0,71 \cdot K_{u0}$; K_{u0} – vienpolio tranzistoriaus žemadažnis diferencialinis įtampos stiprinimo koeficientas atitinkamoje jungimo schemeje, kai $\omega \Rightarrow 0$.

Iš (87) randame K_u modulio dažninę priklausomybę $K_u(\omega)$:

$$K_u(\omega) = U_{is} / U_{in} = [(\operatorname{Re} K_u)^2 + (\operatorname{Im} K_u)^2]^{1/2} = K_u(\omega) = K_{u0} / [1 + (\omega / \omega_u)^2]^{1/2}, \quad (88)$$

ir fazinę priklausomybę $\varphi_u(\omega)$:

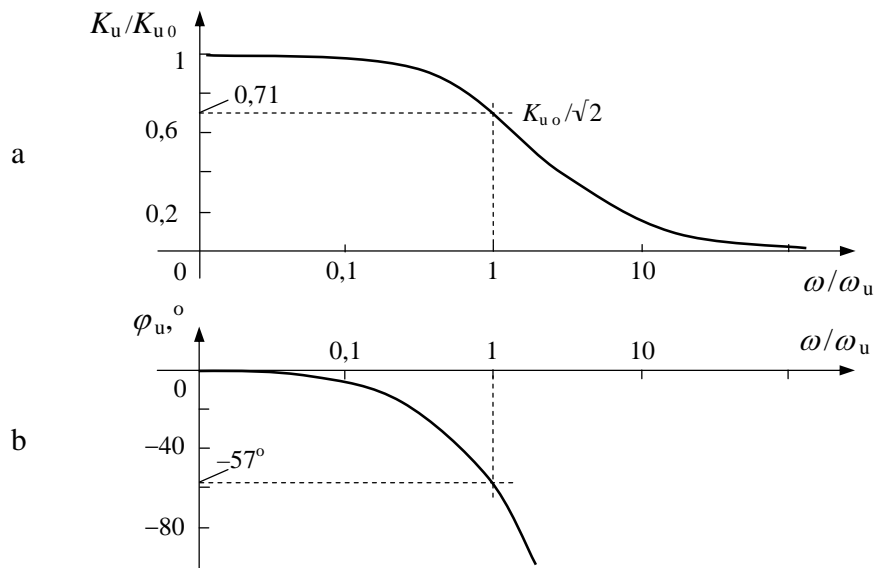
$$\begin{aligned} \varphi_u(\omega) &= \operatorname{arctg} [(\operatorname{Im} K_u) / (\operatorname{Re} K_u)] = \\ &= -\operatorname{arctg} \{ [\sin \nu_\varphi + (\omega / \omega_u) \cdot \cos \nu_\varphi] / [\cos \nu_\varphi - (\omega / \omega_u) \cdot \sin \nu_\varphi] \}, \quad (89) \end{aligned}$$

čia įtampos U_{in} stiprinimo ribinį dažnį ω_u randame taip:

$$1 / \omega_u = 1 / \omega_G + 1 / \omega_{\Delta R} + 1 / \omega_{dk}. \quad (90)$$

čia: $\omega_G = 1 / \tau_G$ – užtūros G valdymo efektyvumo ribinis dažnis, išreiškiamas per vienpolio tranzistoriaus užtūros G trukmės konstantą $\tau_G \cong (R_G + R_S) \cdot C_{GS}$, čia $R_{G, S}$ ir C_{GS} – atitinkamai užtūros ir ištakos ominės varžos, bei parazitinė talpa; $\omega_{\Delta R} = 1 / \tau_{\Delta R}$ – kanalo varžos R_k pokyčio ΔR_k efektyvumo ribinis dažnis, išreiškiamas per kanalo varžos R_k kitimo efektyvumo trukmės konstanta $\tau_{\Delta R} \cong R_k \cdot C_{GS}$; $\omega_{d(k)} = 1 / \tau_{d(k)} = 2 \cdot \nu_s / L_k$ – kanalo ribinis dažnis, išreiškiamas per kanalo inertiškumą nusakančią trukmės konstantą $\tau_{d(k)}$, įskaitančią pagrindinių krūvininkų lėkio trukmę $t_{d(k)}$ per lauko tranzistoriaus kanalą L_k .

Iš (88) apskaičiuota dažninė priklausomybė $K_u(\omega)$, o iš (89) – fazinė priklausomybė $\varphi_u(\omega)$ yra parodytos 1.77 pav. atitinkamai a ir b.



50 pav. Iš (88) ir (89) apskaičiuotos vienpolio tranzistoriaus įtampos stiprinimo koeficiento $K_u(j \cdot \omega)$ modulio dažninė priklausomybė (a) ir fazinė priklausomybė (b)

Lauko tranzistoriaus ribinių dažnių ω_G , $\omega_{\Delta R}$ ir $\omega_{d(k)}$ vertės tenkina nelybę:

$$\omega_G \ll \omega_{\Delta R} < \omega_{d(k)}. \quad (91)$$

ir todėl $\omega_u \cong \omega_G$.

Pagrindinės vienpolio (lauko) tranzistoriaus elektrinių savybių palyginamosios vertės įvairiose jungimų schemose yra pateiktos 2-ioje lentelėje.

2 lentelė

Tranzistoriaus jungimo būdas	Tranzistoriaus įėjimo ominė varža R_{in} ir diferencialinė varža r_{in} , kai $\omega \Rightarrow 0$	Tranzistoriaus išėjimo ominė varža R_{is} ir diferencialinė varža r_{is} , kai $\omega \Rightarrow 0$	Stiprinimas: Srovės/įtampos, galios $K_{i, u, p}$, kai $\omega \Rightarrow 0$	Srovė, įtampa: Įėjime/išėjime
Bendros užtūros (BU)	priklauso nuo įtampų U_{SG}/U_s ir U_{DS} ir kinta intervale nuo 10–300 Ω iki ∞	priklauso nuo įtampų U_{SG}/U_s ir U_{DS} ir kinta intervale nuo 10–300 Ω iki ∞	$1 / \approx 20$ ≈ 20	$I_S, U_{SG}/I_D, U_{DG}$
Bendros ištakos (bendraištakė) (BI)	labai didelė 10–100 M Ω $R_{in} \geq r_{in}$	didelė 100 k Ω –10 M Ω $r_{is} > R_{is}$, kai $U_{DS} > U_k$ $r_{is} \cong R_{is}$, kai $U_{DS} < U_k$	$\approx 10^6 / \approx 20$ $\approx 2 \cdot 10^7$	$I_G, U_{GS}/I_D, U_{DS}$
Bendros santakos (BS)	labai didelė 10–100 M Ω	didelė 100 k Ω –10 M Ω $r_{is} > R_{is}$, kai $U_{SD} > U_k$ $r_{is} \cong R_{is}$, kai $U_{SD} < U_k$	$\approx 10^6 / \approx 20$ $\approx 2 \cdot 10^7$	$I_G, U_{GD}/I_S, U_{SD}$
Ištakinis kartotuvas (IK)	labai didelė 10–100 M Ω	R_a	$\approx 10^6 / \leq 1$ $\approx 10^6$	$I_G, U_G/I_S, U_D$