ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
Физика-техникалық факультеті

Физикалық электроника негіздері

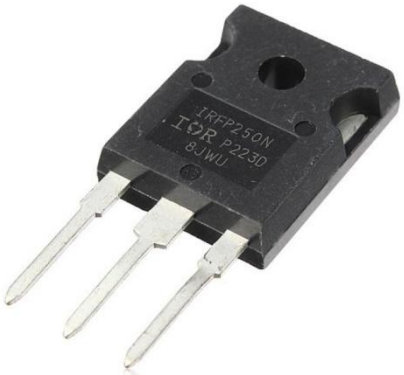
Профессор Досболаев М.Қ.
merlan@physics.kz

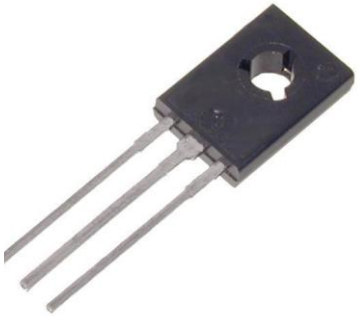




ТРАНЗИСТОР

электр тогын басқару және күшейту үшін қолданылатын активті элемент



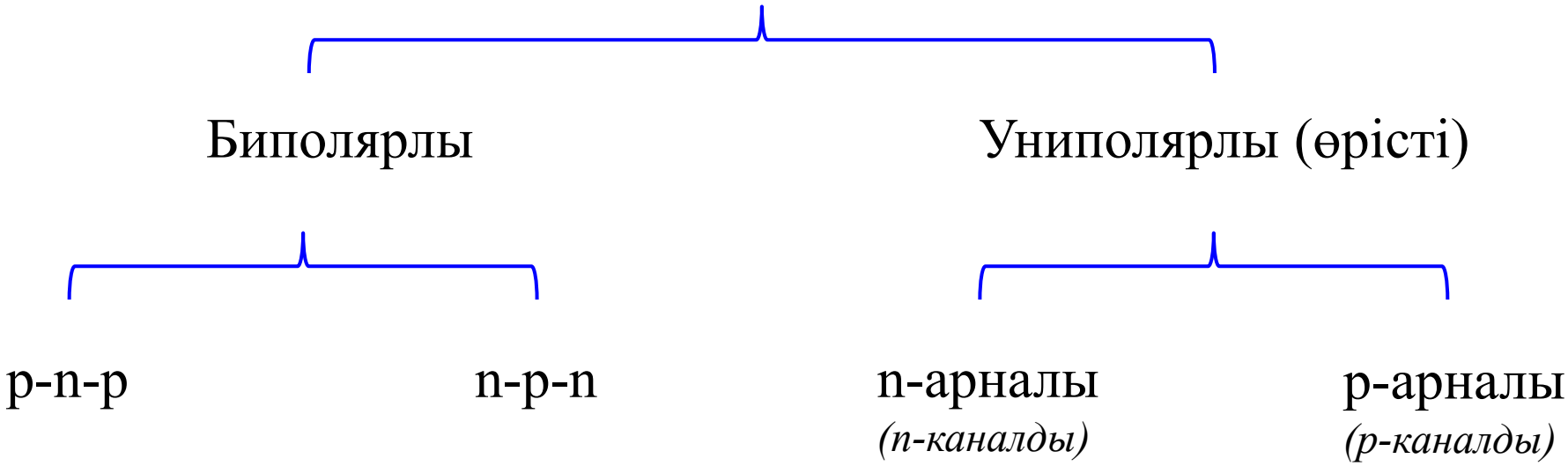








ТРАНЗИСТОР



Транзисторлар аз сингалмен үлкен токтарды басқару кездесетін көптеген жерлерде қолданылады. Мысалы, коммутация құрылғылары, күшейткіштер, тербелістер генераторы, ток көзі, кернеу тұрақтандырғыштар және сандық логика микросхемаларын дайындауда қолданыс тапқан

Алғашқы транзистор

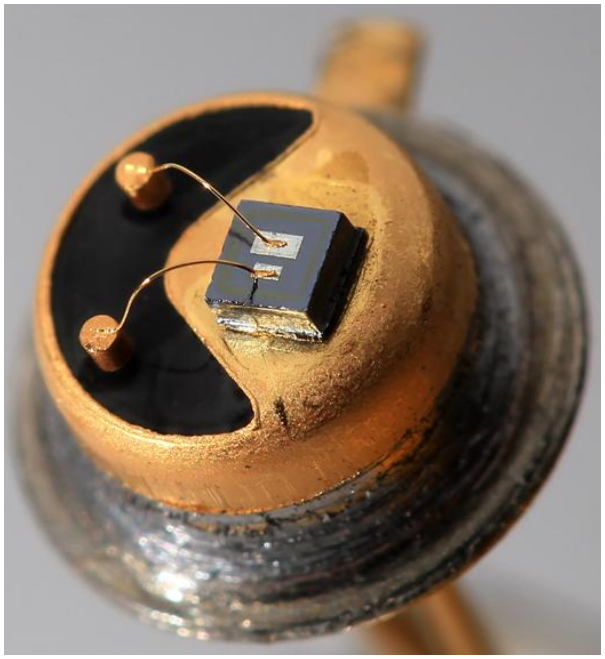


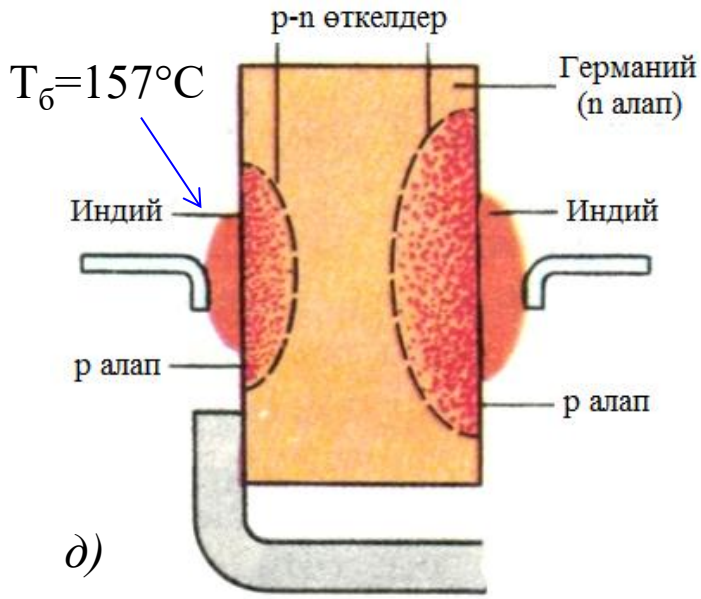
120 мм

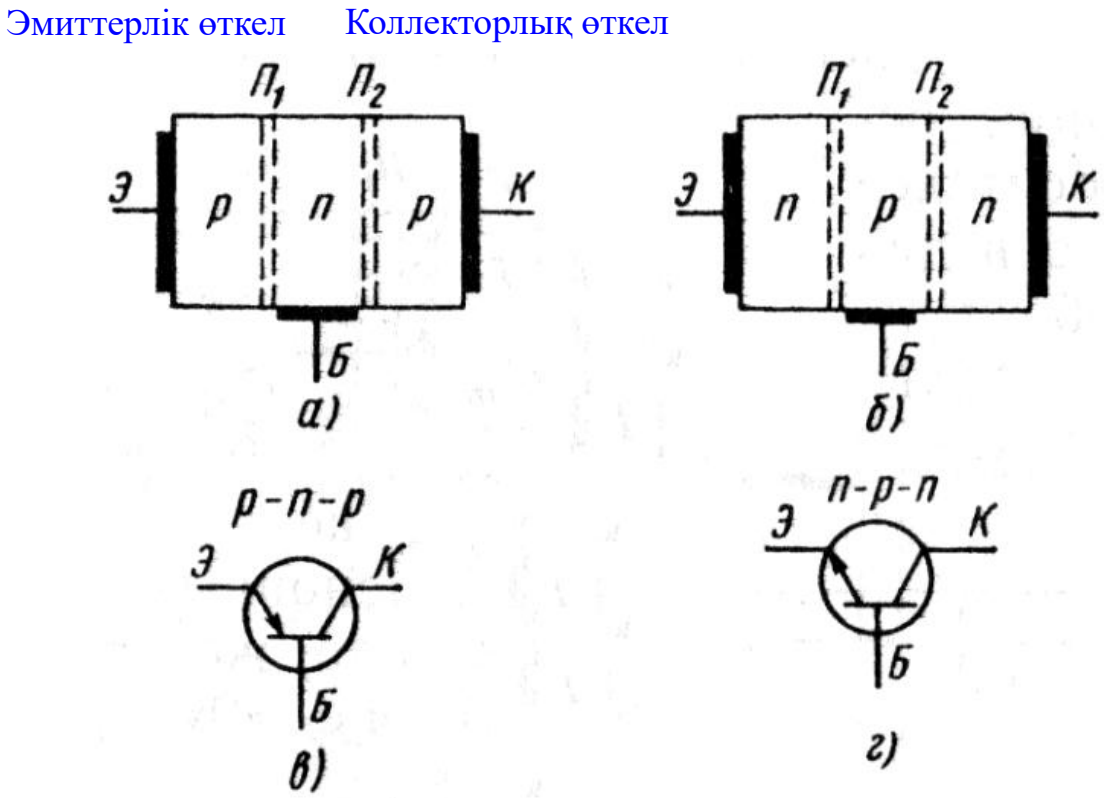


Джон Бардин, Уильям Шокли, Уолтер Браттейн
Нобель сыйлығы (1956 ж.)

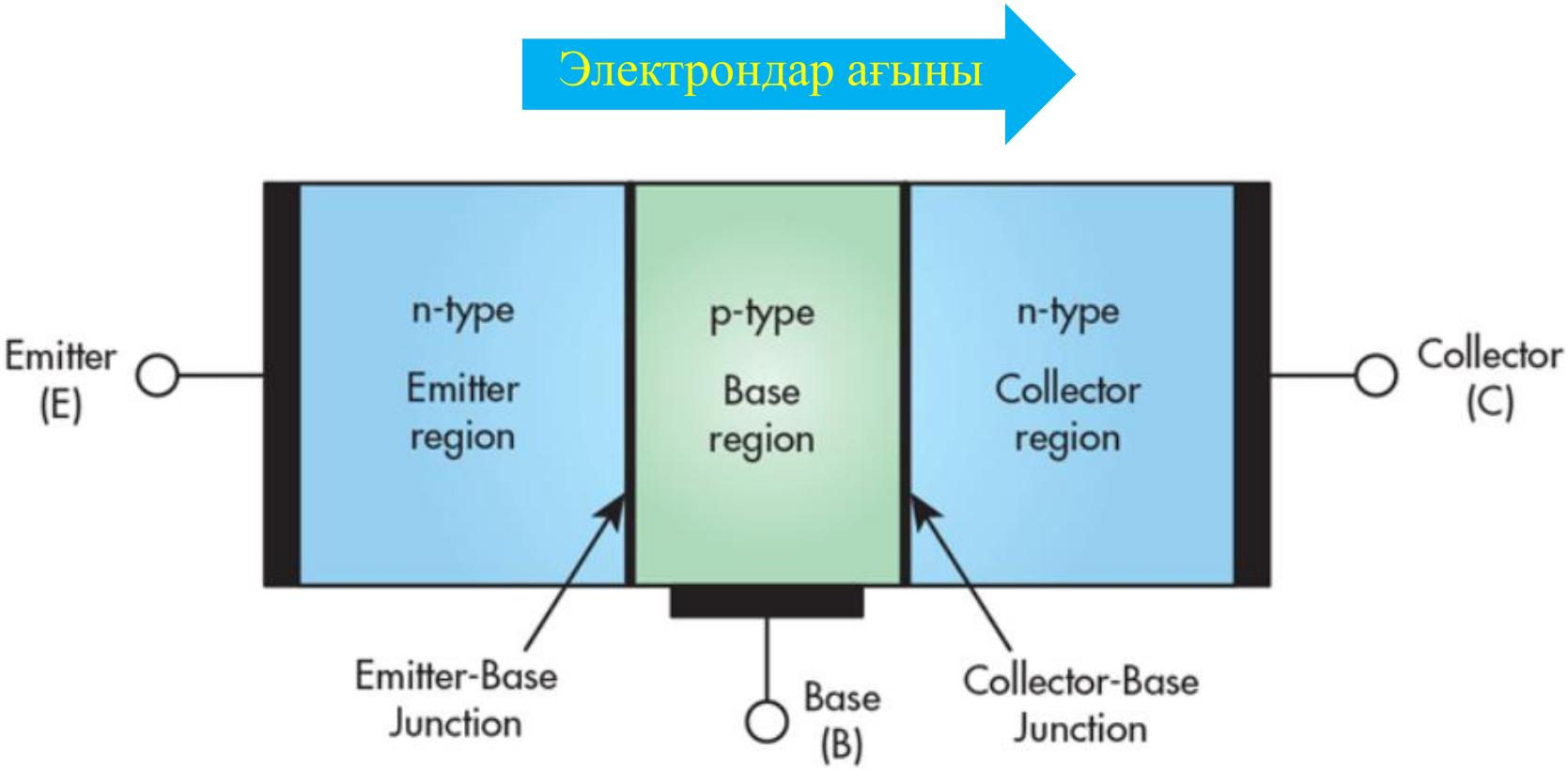
Биполярлы транзистордың құрылымы





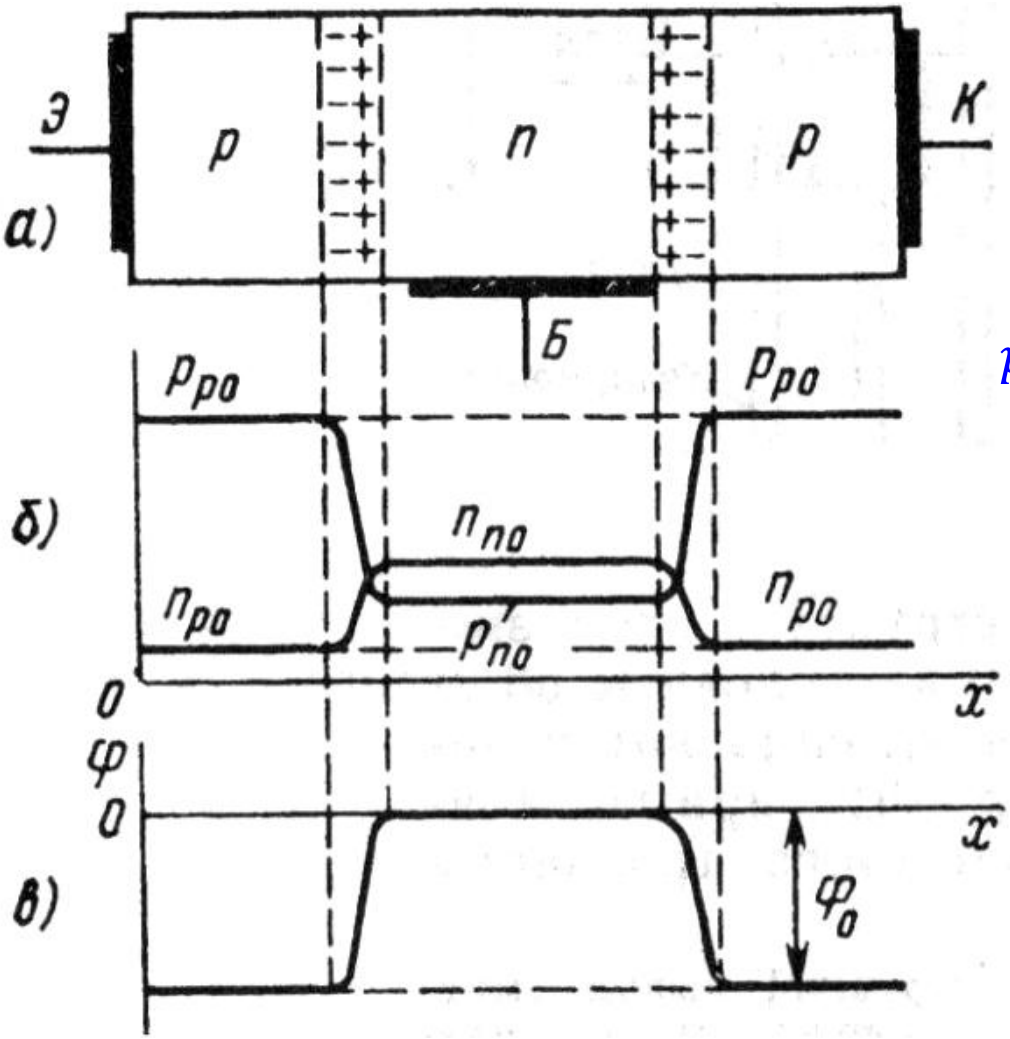


1 сурет. Биполярлы транзистордың жартылай өткізгішті құрылымы және конструкциясы. Германий кристалына орнатылған индий таблеткалары екі p-n өткел құрайды.



Эмиттерлік өткелдің қызметі заряд тасымалдаушыларды базаға инжекциялау, ал коллекторлық өткелдің қызметі базалық қабат арқылы өткен зарядтарды тиімді жинау. Ол үшін коллектордың ауданы үлкен болу керек

Сырттан кернеу түсірілмеген жағдай



2 сурет

$p_{p0} \gg n_{n0}$, зарядтардың база арқылы тасымалдануына әсер ететін негізгі шарт

$$p_{p0} n_{p0} = p_{n0} n_{n0}$$

$$\mathbf{E} = -\mathbf{grad}\varphi$$

$$I_{\text{диф}} \approx I_{\text{др}}$$

p_{p0} – сыртқы өріс жоқ кездегі *p* алабтың негізгі заряд тасымалдаушылар концентрациясы

Сырттан кернеу түсірілген жағдай

Эмиттерлік өткел тура, ал коллекторлық өткел кері ығысу керек

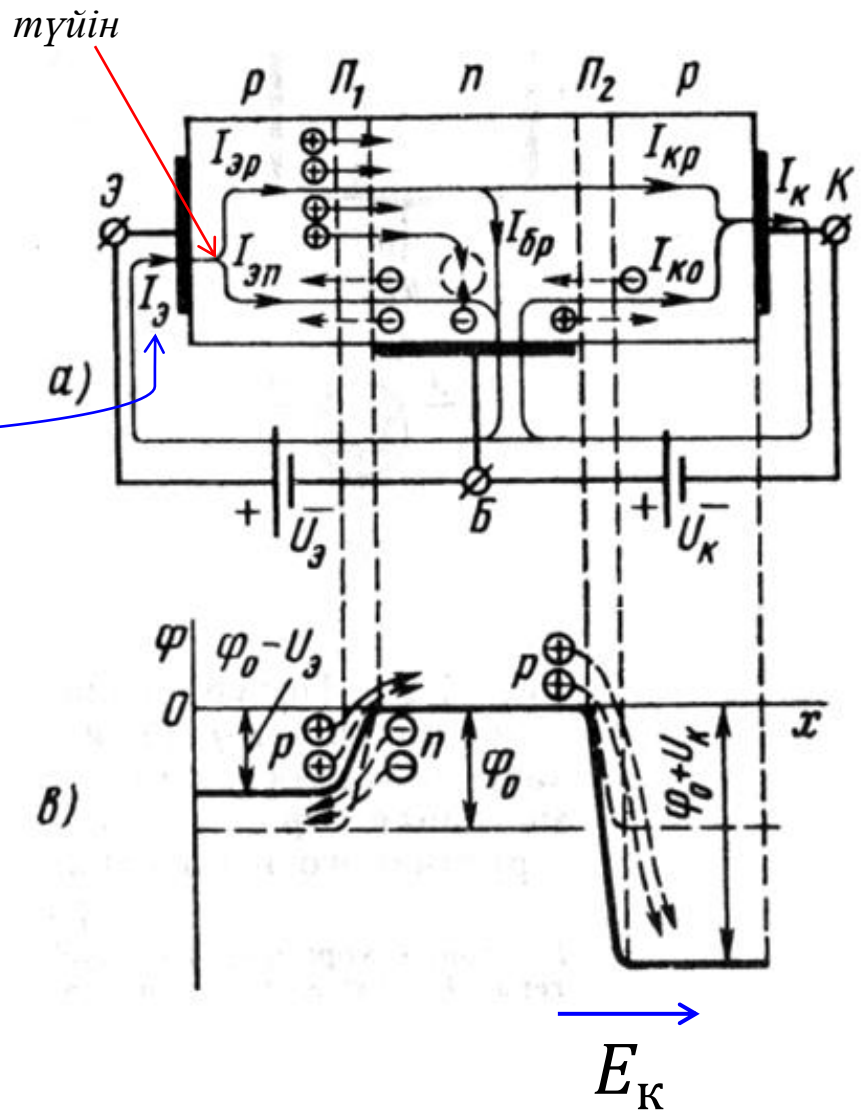
Эмиттерлік өткелдің толық тогы:

$$I_э = I_{э\,p} + I_{э\,n}$$

$p_{p0} \gg n_{n0}$ шартына сәйкес $I_{эп}$ тогының құраушысы аз болады, ол эмиттерлік тізбекке кетеді

Инжекция коэффициенті:

$$\gamma = I_{э\,p}/I_э = 0{,}97 \div 0{,}995$$



3 сурет

База қабатындағы процестер эмиттерден көшіп келген кемтіктерден тәуелді

Эмиттерлік өткелге жақын орналасқан базадағы кемтіктер концентрациясы:

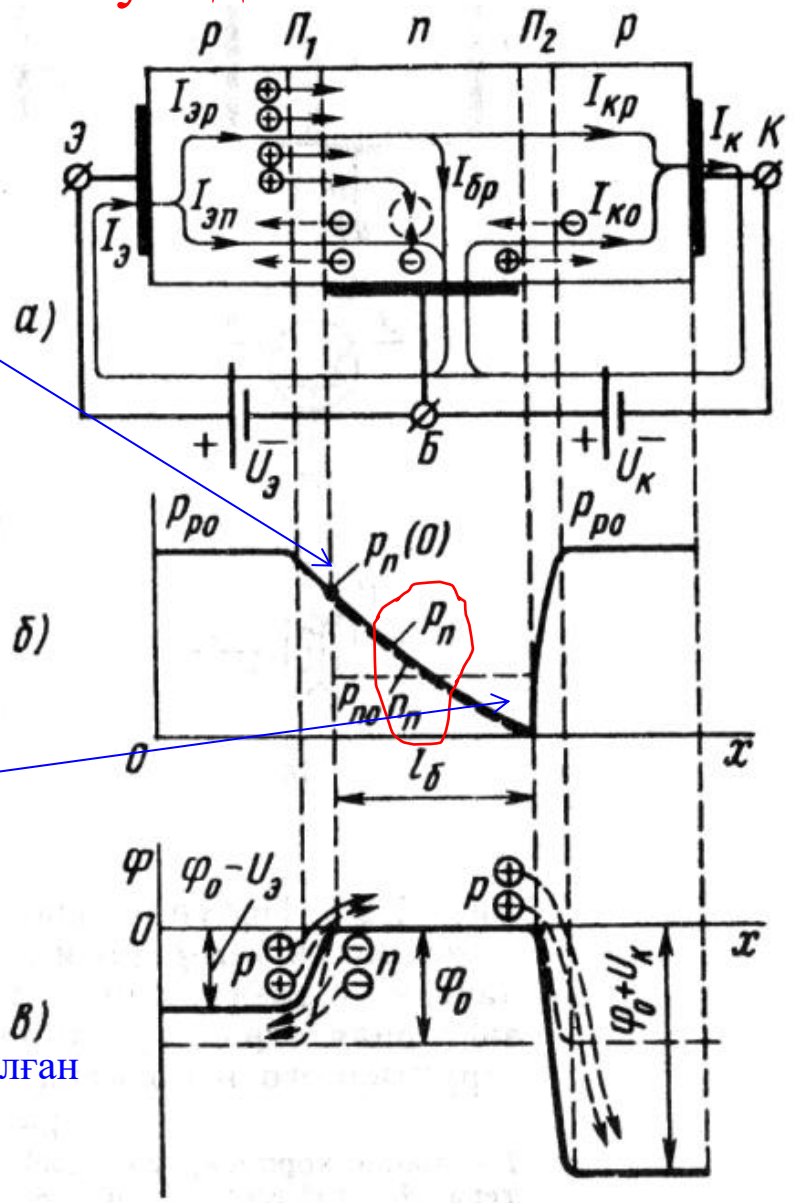
(1) $p_n(0) = p_{n0} e^{U_э/\varphi_т}$

Коллекторлық өткелге диффузияланып, жақын келген базадағы кемтіктер концентрациясы төмен, себебі күшті өткел өрісі әсерінен олар коллекторға өтіп кетеді.

Шарт $l_б \approx L_p$ және $p_n \approx n_n$

Эмиттерлік өткелден коллекторлық өткелге бағытталған базадағы кемтіктердің диффузиялық тогы:

$$J_{\text{диф } p} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$



3 сурет

Кемтіктердің база қабатындағы электрондармен рекомбинациясы

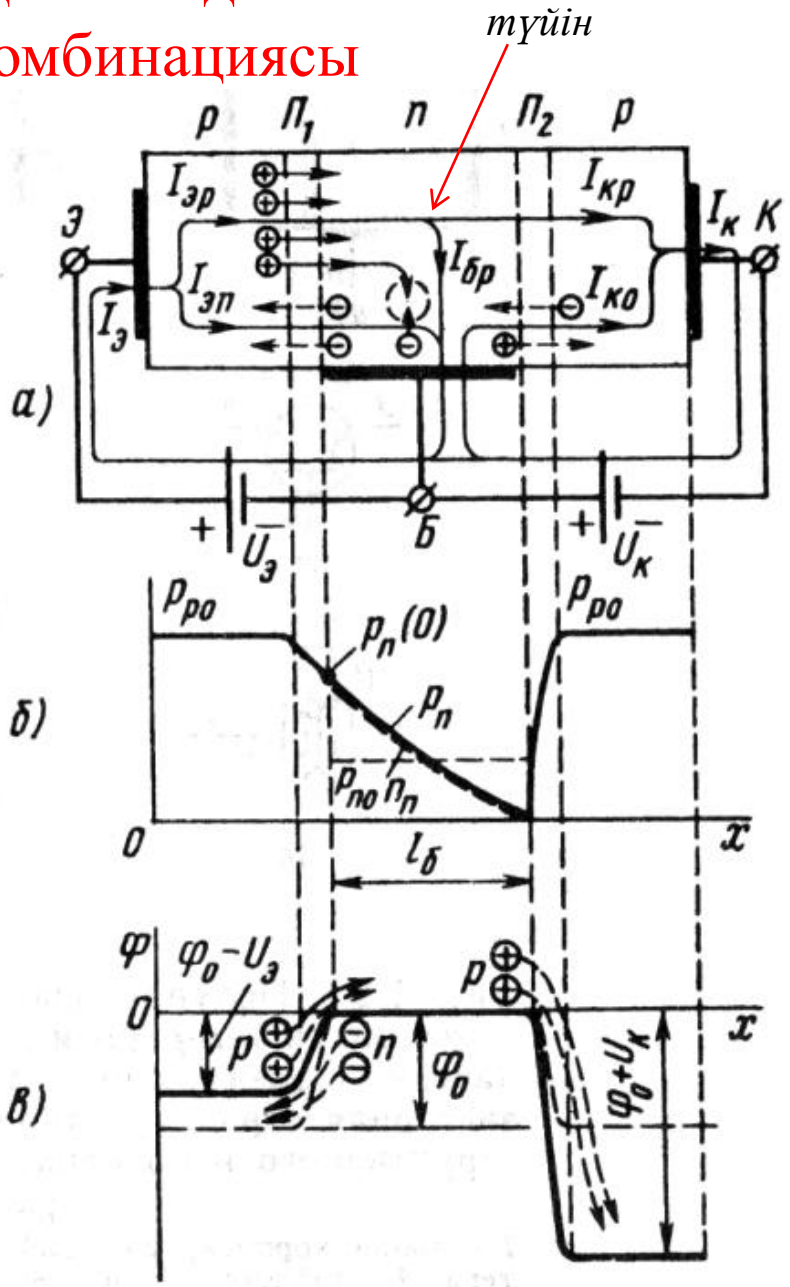
Базадағы кемтіктер мен электрондардың рекомбинациясы әсерінен базадағы электрондар саны төмендейді, оның орнын толтыру үшін база тізбегінен электрондар келе бастайды, осылайша базалық ток ($I_{бр}$) туады. Сонымен, түйіндегі эмиттерлік кемтіктік ток келесі құраушылардан тұрады:

$$I_{э\,p} = I_{к\,p} + I_{б\,p}$$

Тасымалдау коэффициенті:

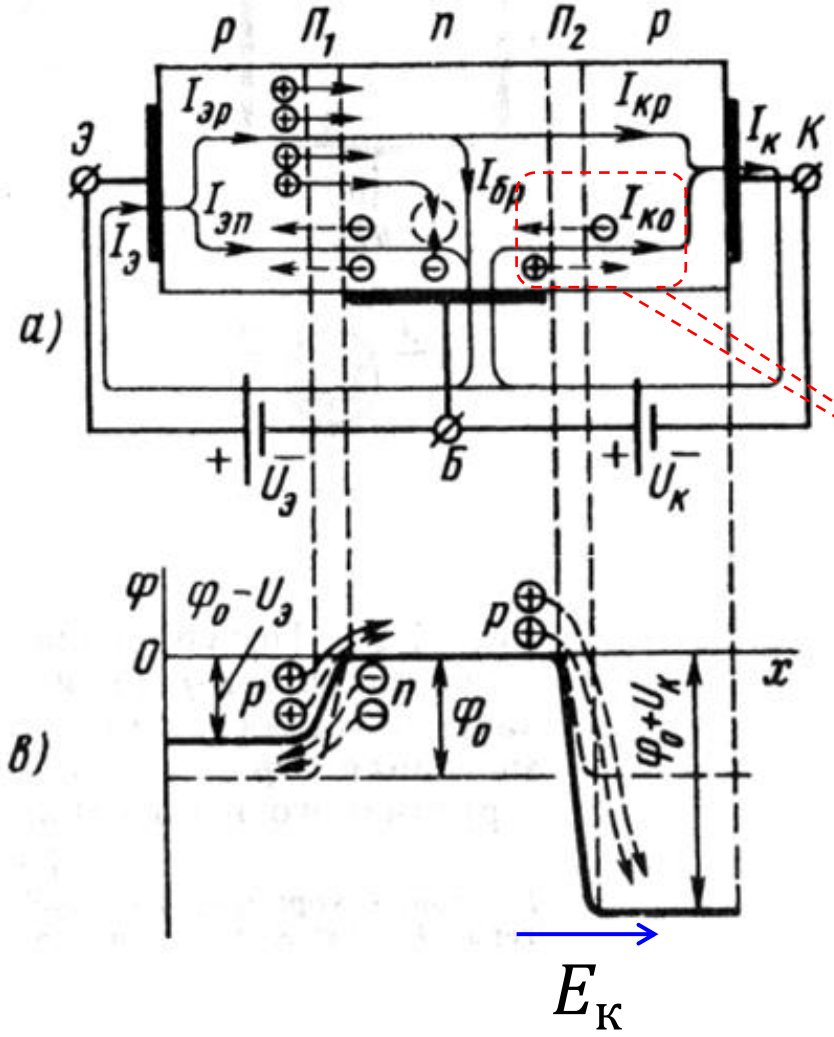
$$\delta = I_{к\,p}/I_{э\,p} = 0{,}96 \div 0{,}996$$

Осы мәнге қол жеткізу үшін базадағы зарядтар рекомбинациясын азайту қажет, ол үшін база қалыңдығы ($l_б$) жұқа болу керек



3 сурет

Коллекторлық және эмиттерлік токтардың байланысы



3 сурет

Беріліс коэффициенті:

$$\alpha = I_{к\,p} / I_э$$

$$\alpha = \frac{I_{э\,p}}{I_э}\frac{I_{к\,p}}{I_{э\,p}} = \gamma\delta$$

$I_{к0}$ – коллекторлық өткел маңайындағы негізгі емес заряд тасымалдаушылар туғызатын басқарылмайтын кері немесе жылулық ток

$$I_{к0\,(Ge)} = 10 \div 100 \text{ мкА};$$
$$I_{к0\,(Si)} = 0.1 \div 10 \text{ мкА}.$$

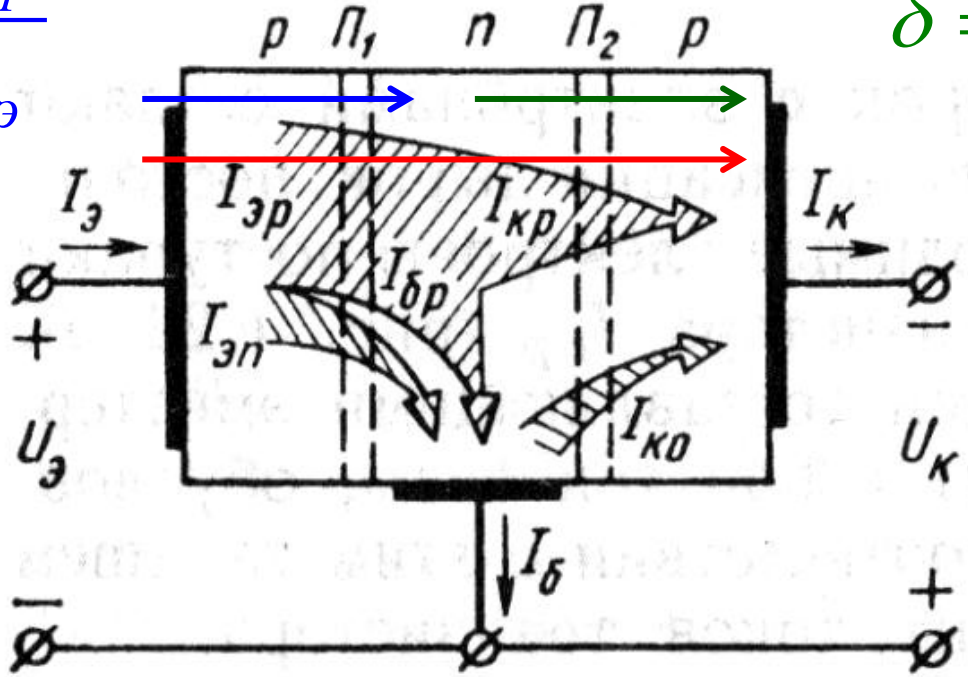
Биполярлы транзистор коэффициенттері

Инжекция коэф.

$$\gamma = \frac{I_{эр}}{I_{э}}$$

Тасымалдау коэф.

$$\delta = \frac{I_{кр}}{I_{эр}}$$

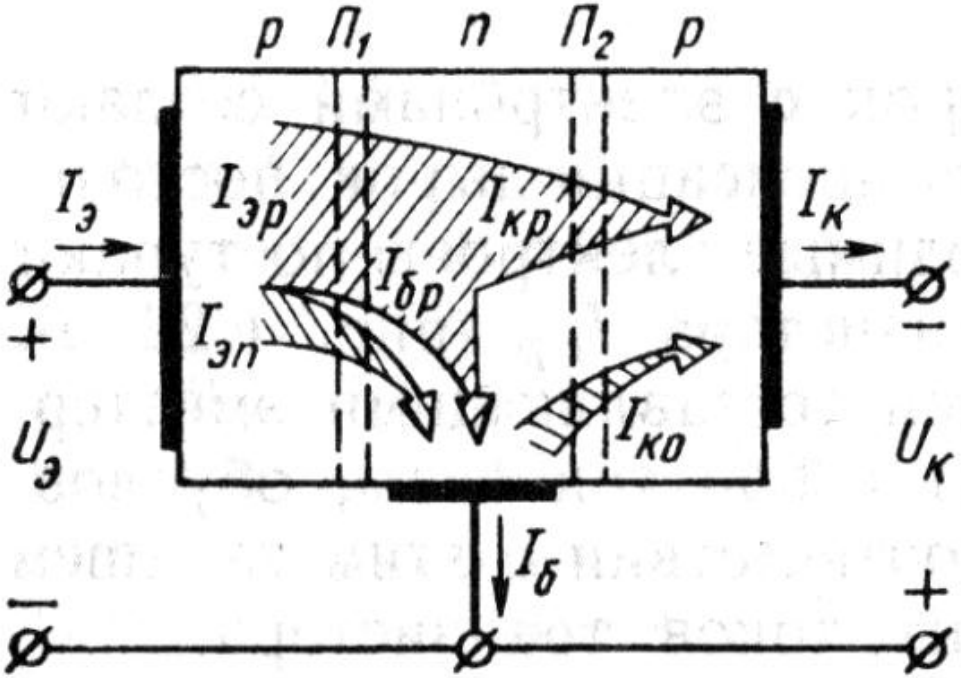


Беріліс коэф.

$$\alpha = \frac{I_{кр}}{I_{э}} = \gamma\delta$$

4 сурет

Кирхгов ережесіне сай жазылған биполярлы транзистор токтары



Эмиттер тогы: $I_э = I_{э\,p} + I_{э\,n}$.

Коллектор тогы: $I_к = I_{к\,p} + I_{к0}$.

База тогы: $I_б = I_{э\,n} + I_{б\,p} - I_{к0}$.

Сонымен, биполярлы транзистордың жұмыс істеу принципі, эмиттерден коллекторға база арқылы «транзитті» өтетін заряд тасымалдаушылар ағынын тудырып, осы кездегі коллекторлық токты эмиттерлік токпен басқаруға негізделген

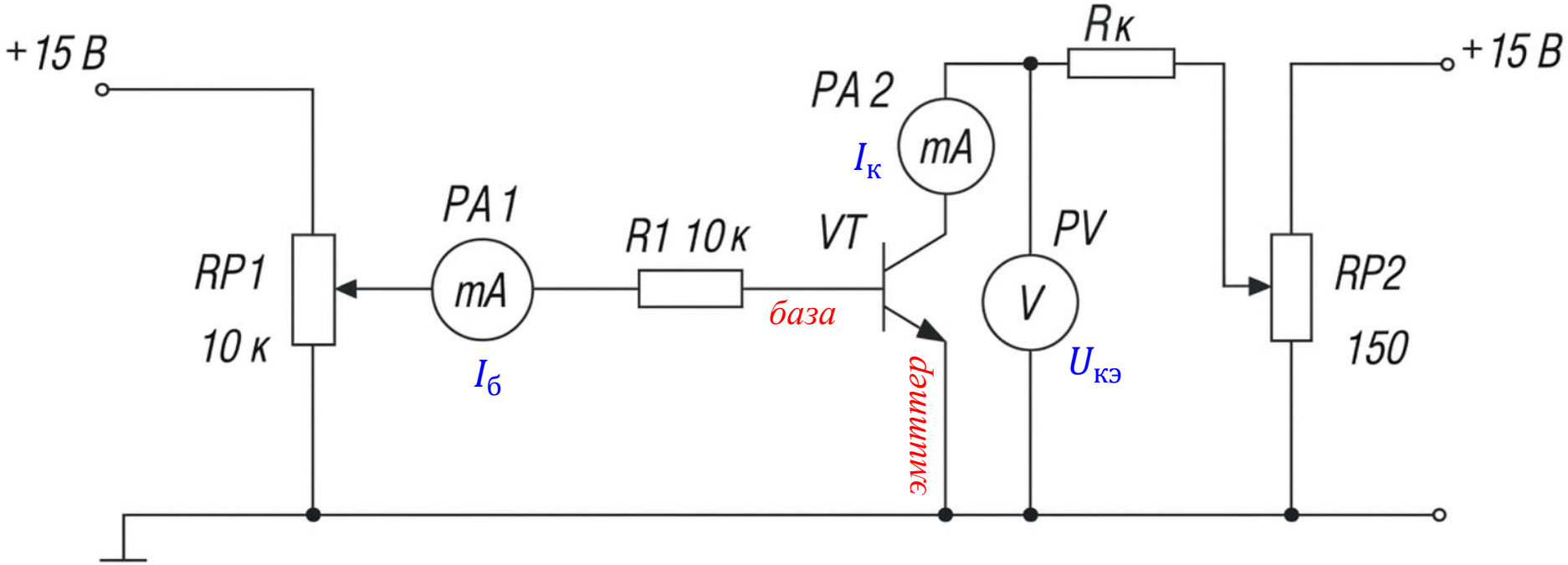
$$I_э = I_к + I_б,$$

$$I_к = \alpha I_э + I_{к0},$$

$$I_б = (1 - \alpha) I_э - I_{к0}.$$

$\alpha = \frac{I_{кр}}{I_э} = \gamma\delta$ – беріліс коэффициенті

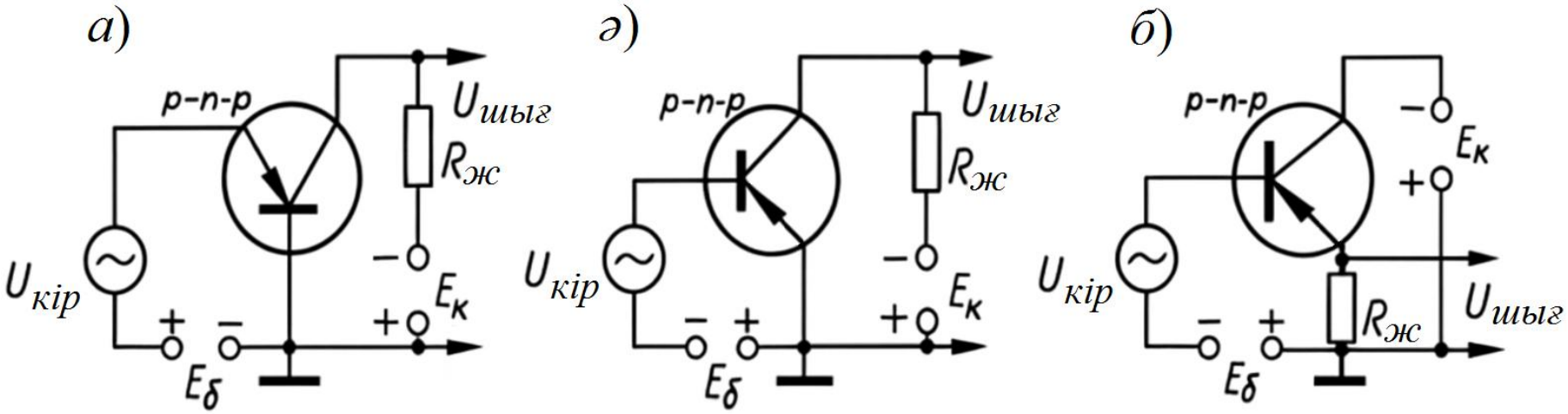
$n-p-n$ типті транзистордың *кіріс* және *шығыс сипаттамаларын* алуға арналған электр тізбегі



Кіріс (басқарушы) тізбегі

Шығыс (күштік) тізбегі

Транзистордың электр тізбегіне жалғану түрлері



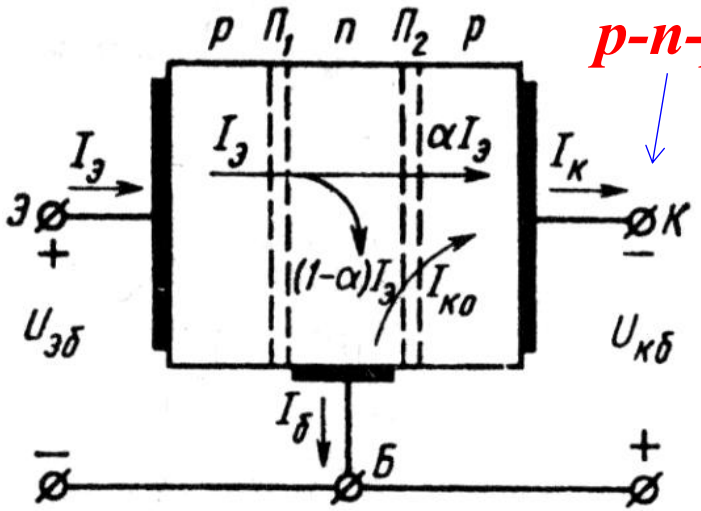
БО ЭО КО

5 сурет

Транзистордың электр тізбегіне БО жалғануы

$I_э = f(U_{эб})\ U_{кб} = const$

Кіріс сипаттама

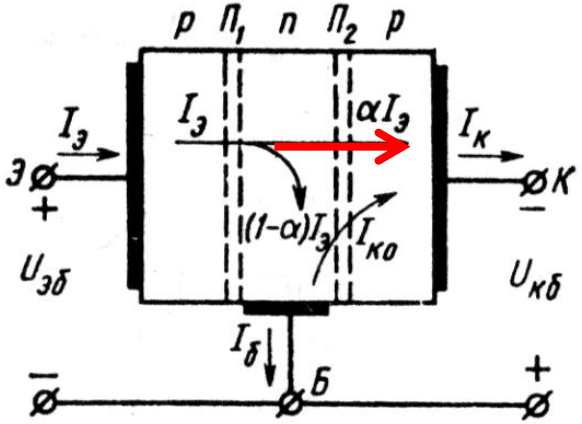


$I_к = f(U_{кб})\ I_э = const$

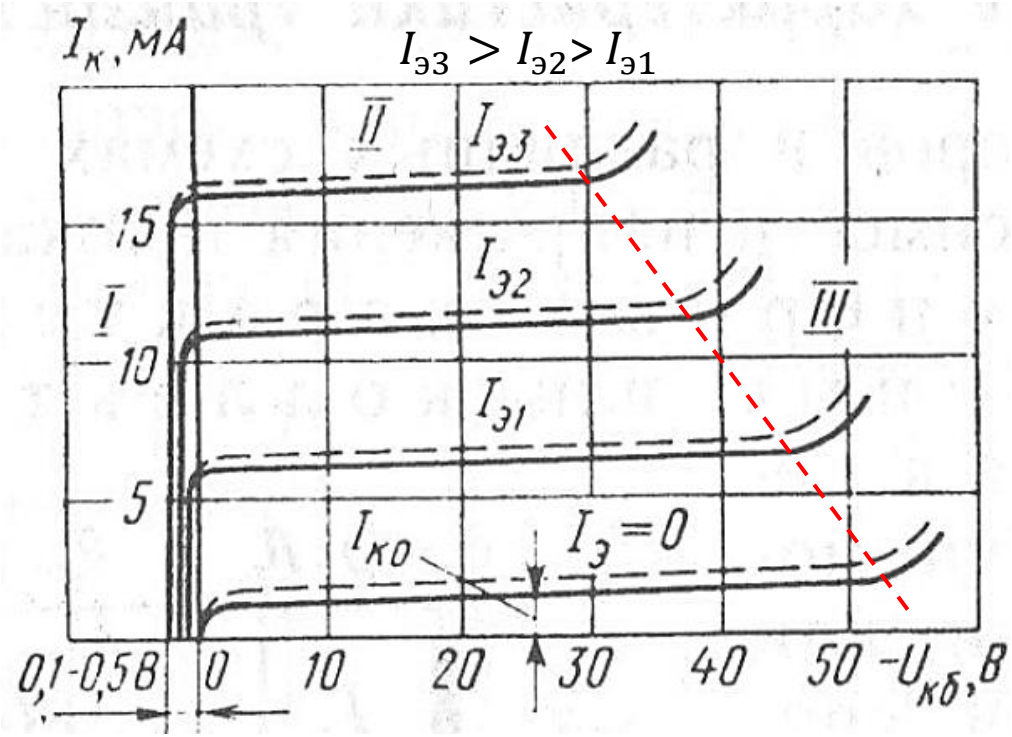
Шығыс (коллекторлық) сипаттама

Кіріс кедергісі аз (ондаған Ом), шығыс кедергісі жоғары. Сондықтан мұндай жалғау түрін күшейтілетін сигнал көзінің ішкі кедергісі аз болғанда қолданады. Ток бойынша күшейту коэффициенті бірден төмен, ал кернеу және қуат бойынша жақсы күшейткіш. Сонымен қатар токты тұрақтандыру қабілеті жоғары. БО жалғанған тізбекте шығыс сигналы инверсияланбайды.

БО жалғанған транзистордың шығыс сипаттамасы. $I_к = f(U_{кб})\ I_э = const$

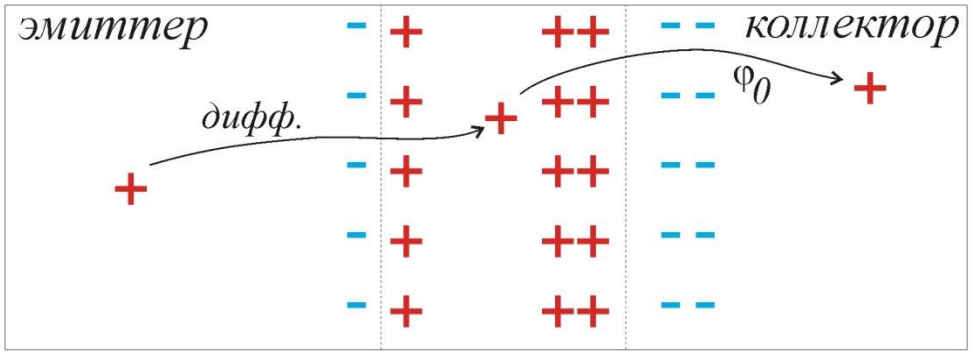


Сызықты емес аймақ, ($U_{кб}$=0) болғандағы φ_0 әсерінен кемтіктердің базадан коллекторға өтуінен туындайтын ток



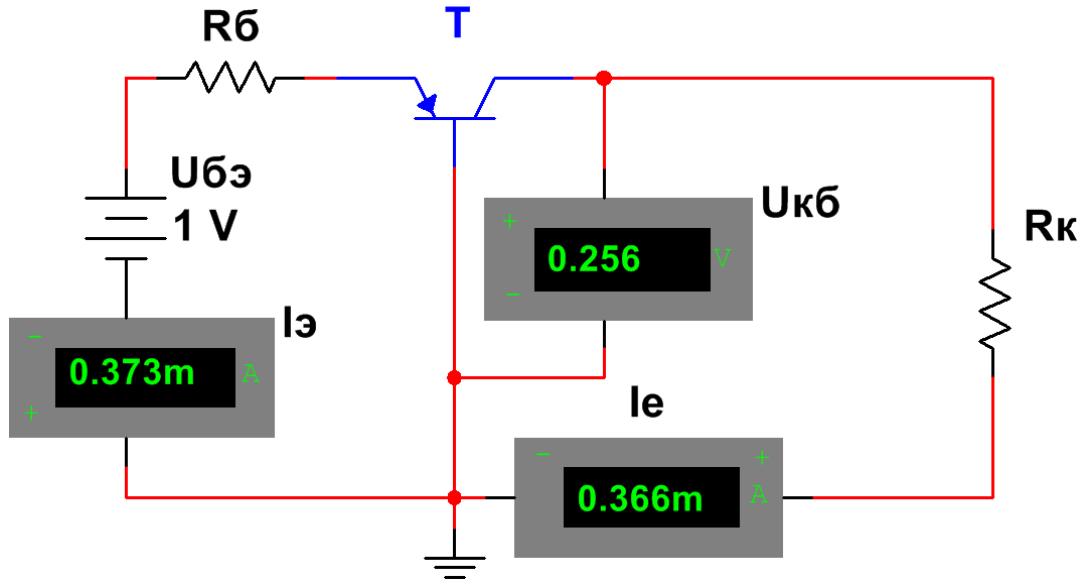
$\varphi_0 + U_{кб}$

6-сурет. I – сызықты емес, II – сызықты, III – КӨ-дің тесілуі

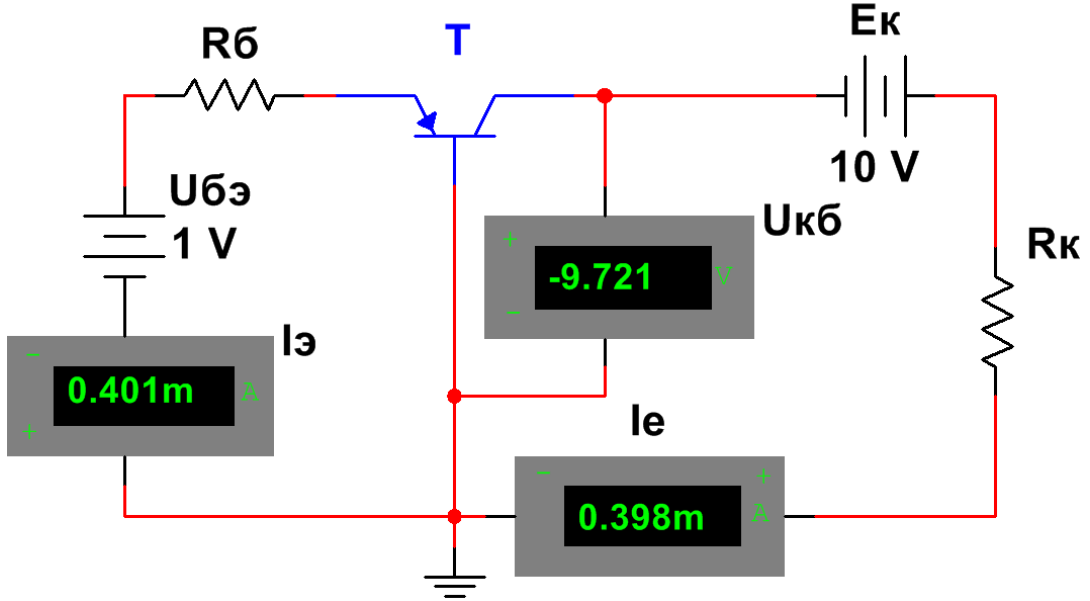


φ_0 – ішкі потенциалдар айырымы

Кері ығысқан коллекторлық өткел потенциалының әсері (p-n-p)



$E_к = 0$



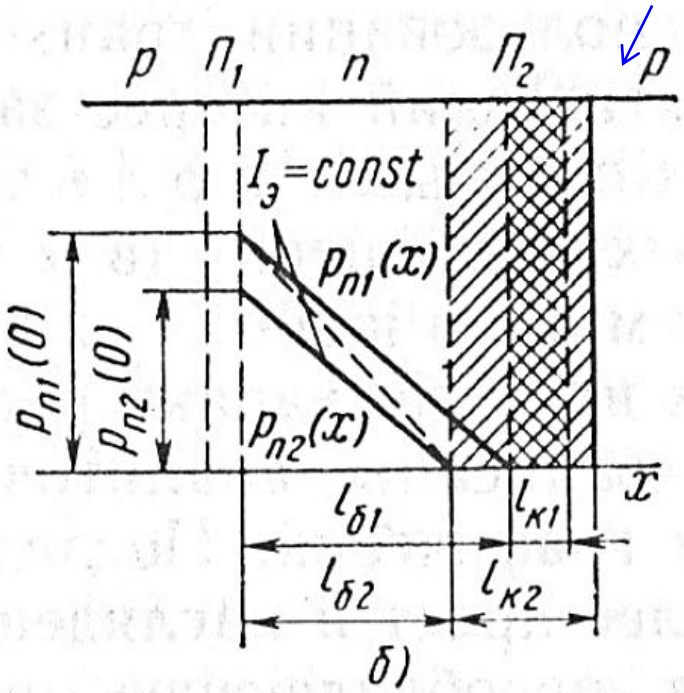
$E_к \neq 0$

БО жалғанған транзистордың шығыс сипаттамасы

Сәл жоғары көтерілетін сызықты аймақ



База модуляциясы коллекторлық өткелдің (КӨ) енденуіне байланысты



6-сурет

Кернеу бойынша ішкі кері байланыс әсерінен ЭӨ потенциалы төмендейді

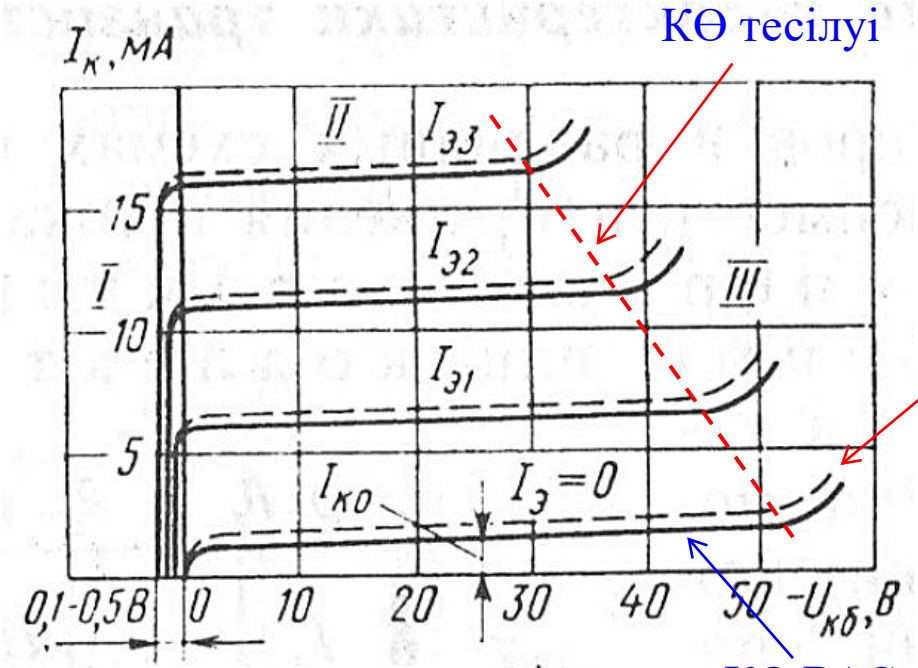
$$p_n(0) = p_{n0} e^{U_э/\varphi_т} \quad (1)$$

КӨ дифференциалдық кедергісі:

$$r_{к\ (б)} = \left.\frac{dU_{кб}}{dI_к}\right|_{I_э=\text{const}}$$

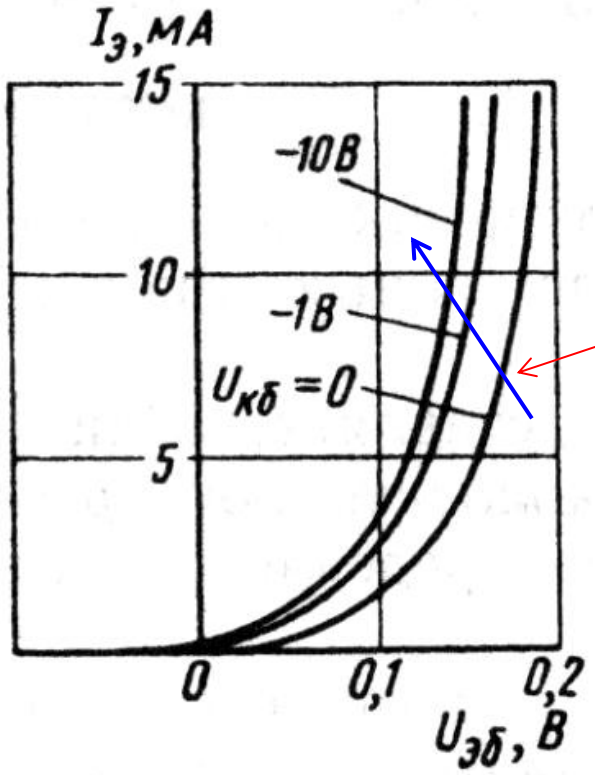
$\alpha = \frac{I_{кр}}{I_э}$ – беріліс коэффициенті

БО жалғанған транзистордың шығыс сипаттамасы



6 сурет

БО жалғанған транзистордың кіріс сипаттамасы



Базаның модуляциялану эффектісімен байланысты

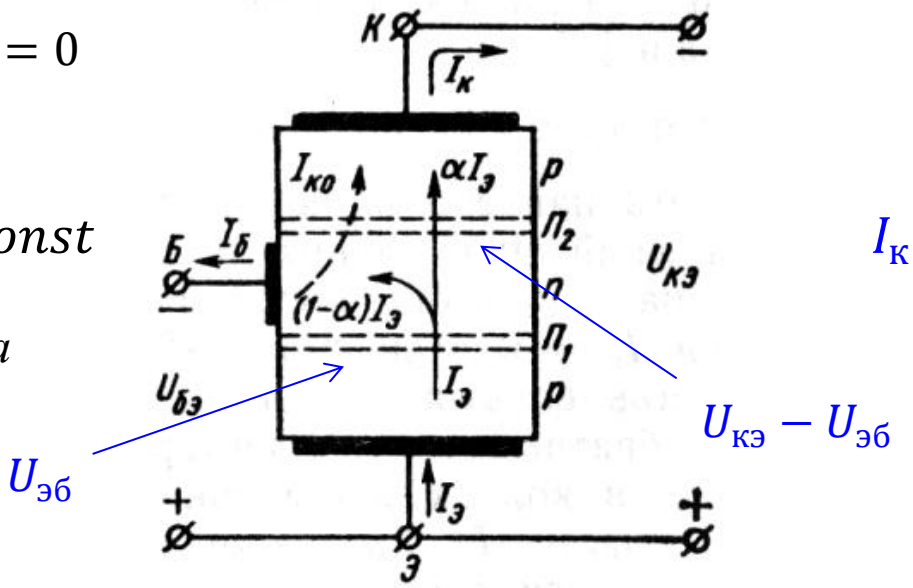
7 сурет

Транзистордың электр тізбегіне ЭО жалғануы

$$I_б = (1-\alpha)I_э - I_{к0} = 0$$

$I_б = f(U_{эб})\ U_{кэ} = const$

Кіріс сипаттама



$I_к = f(U_{кэ})\ I_б = const$

Шығыс сипаттама

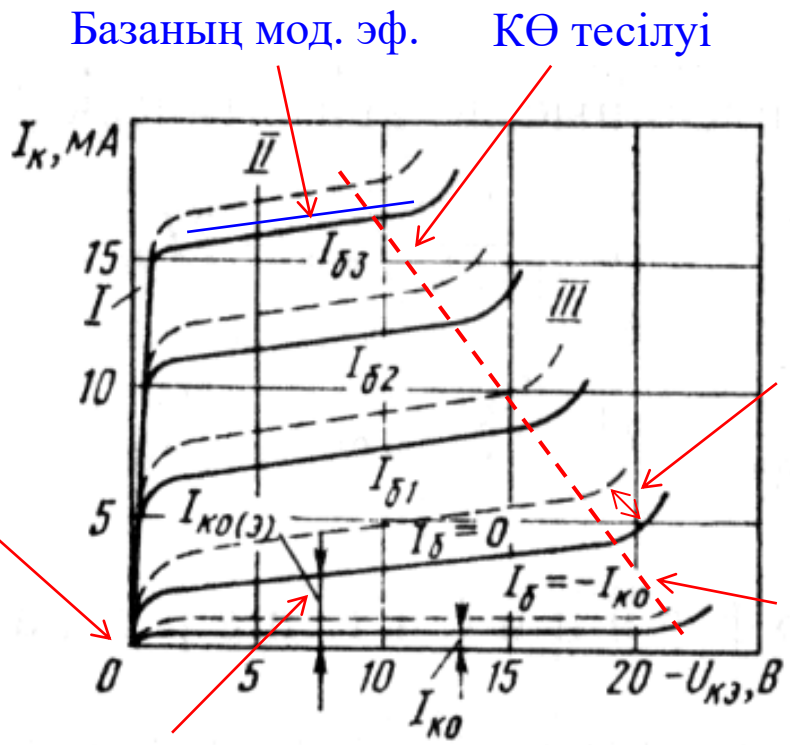
8 сурет

ЭО жалғанған тізбектің кіріс кедергісі жоғары (жүздеген Ом), ал шығыс кедергісі төмен болады. Ток, кернеу және қуат бойынша күшейту қабілеті жоғары. ЭО жалғанған тізбекте шығысында кіріс сигналы фаза бойынша инверсияланады.

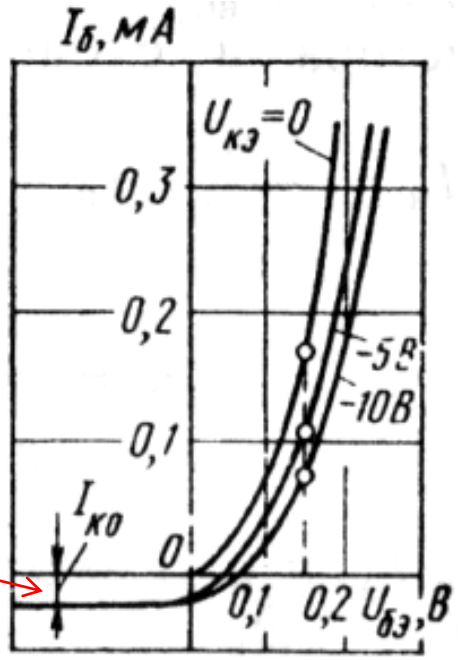
КО жалғанған тізбектің кіріс кедергісі өте жоғары, ал шығыс кедергісі өте төмен болады. Сондықтан мұндай жалғау түрін күшейтілетін сигнал көзінің ішкі кедергісі көп болғанда және жүктеме кедергісі төмен болғанда қолданады. Ток бойынша күшейту коэффициенті ЭО жалғанғанмен шамалас, кернеуді күшейтпейді. КО жалғанған тізбекті эмиттерлік (кернеу) қайталағыш депте атайды.

ЭО жалғанған биполярлы транзистордың сипаттамалары

Коллектордан базаға және эмиттерден коллекторға өтетін кемтіктер ағыны арасында тепе-тендік орнап, $I_к$=0 болады.



Температуралық тәуелділік



$U_{бэ} \le 0$

Қию аймағы

$$I_б = (1-\alpha)I_э - I_{к0} = 0$$

бастапқы ток

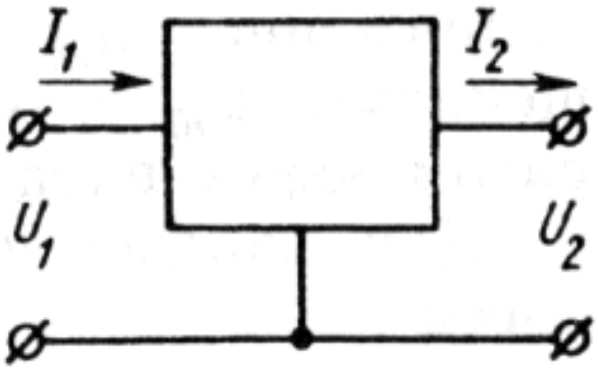
$$I_б = (1-\alpha)I_э + I_{к0}$$

9 сурет

$$I_к = \beta I_б + \frac{U_{кэ}}{r_{к(э)}} + I_{к0(э)} \longleftarrow \textit{шығыс сипаттамасы}$$

$$\beta = I_к / I_б = \alpha/(1-\alpha) = 9 \div 99 - \textit{ток бойынша беру коэфф.}$$

Активті төрт полюсті транзистордың h параметрлері



$$\Delta U_1 = h_{11}\Delta I_1 + h_{12}\Delta U_2,$$
$$\Delta I_2 = h_{21}\Delta I_1 + h_{22}\Delta U_2.$$

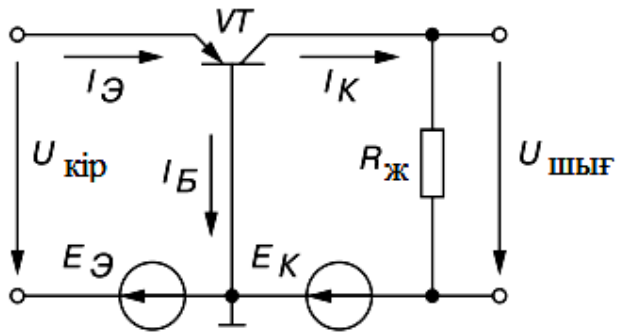
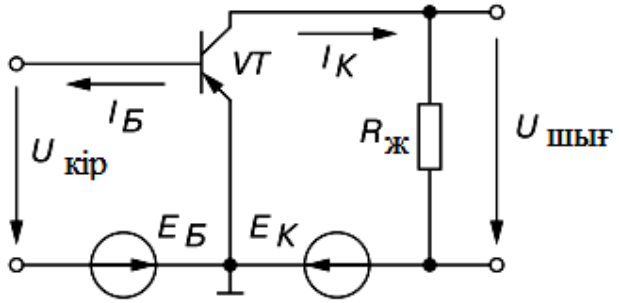
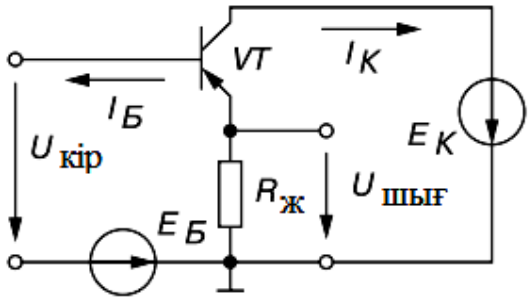
Осы теңдеулер жүйесіне кіретін екі параметрді тәуелсіз айнымалы деп таңдап, қалған екеуі анықталады. Әдетте тәуелсіз айнымалылар ретінде кіріс тогымен шығыс кернеуінің өсімшесі алынады. Ал кіріс кернеуімен шығыс тогының өсімшесі *h* параметрлер арқылы сипатталады.

$h_{11}=\Delta U_1/\Delta I_1$ - ($\Delta U_2=0$) кезіндегі кіріс кедергісі

$h_{21}=\Delta I_2/\Delta I_1$ - ($\Delta U_2=0$) кезіндегі ток бойынша беру коэф. $\longrightarrow$ $\alpha = \left.\dfrac{dI_к}{dI_э}\right|_{U_{кб}=const}$

$h_{12}=\Delta U_1/\Delta U_2$ - ($\Delta I_1=0$) кезіндегі кернеу бойынша кері байланыс коэф.

$h_{22}=\Delta I_2/\Delta U_2$ - ($\Delta I_1=0$) кезіндегі шығыс өткізгіштігі

ОБ	ОЭ	ОК
		
$R_{кір} = R_Э + R_Б(1-\alpha)$ (5...100 Ом) $h_{21Б} = \alpha \approx 1$ $K^*_{иБ} \approx \frac{R_н}{R_{ЭБ}}$ (1000-ға дейін) $K^*_{рБ} \approx \frac{R_ж}{R_{ЭБ}}$ (1000-ға дейін) $R_{шығ} = 0{,}1...1$ МОм	$R_{кір} = R_Б + R_Э(\beta+1)$ (100...1000 Ом) $h_{21Э} = \beta = -\alpha/(1-\alpha)$ (10...200) $K_{иЭ} = \frac{-\beta R_ж}{R_{БЭ}}$ (10...1000) $K_{рЭ} = \frac{\beta^2 R_ж}{R_{БЭ}}$ (10000-ға дейін) $R_{шығ} = 10...100$ кОм	$R_{кір} = R_Б +$ $+ (R_Э + R_ж)(\beta+1)$ (30...100 кОм) $h_{21К} = \beta + 1$ (10...100) $K_{иК} \approx 1$ $K_{рК} \approx \beta$ (10...200) $R_{шығ} = 10...100$ Ом

$K^*_{иБ}$ және $K^*_{рБ}$ — транзистордың кернеу және қуат бойынша күшейту коэффициенттері

Марченко А.Л. Основы электроники

Транзисторлардың жіктелуі

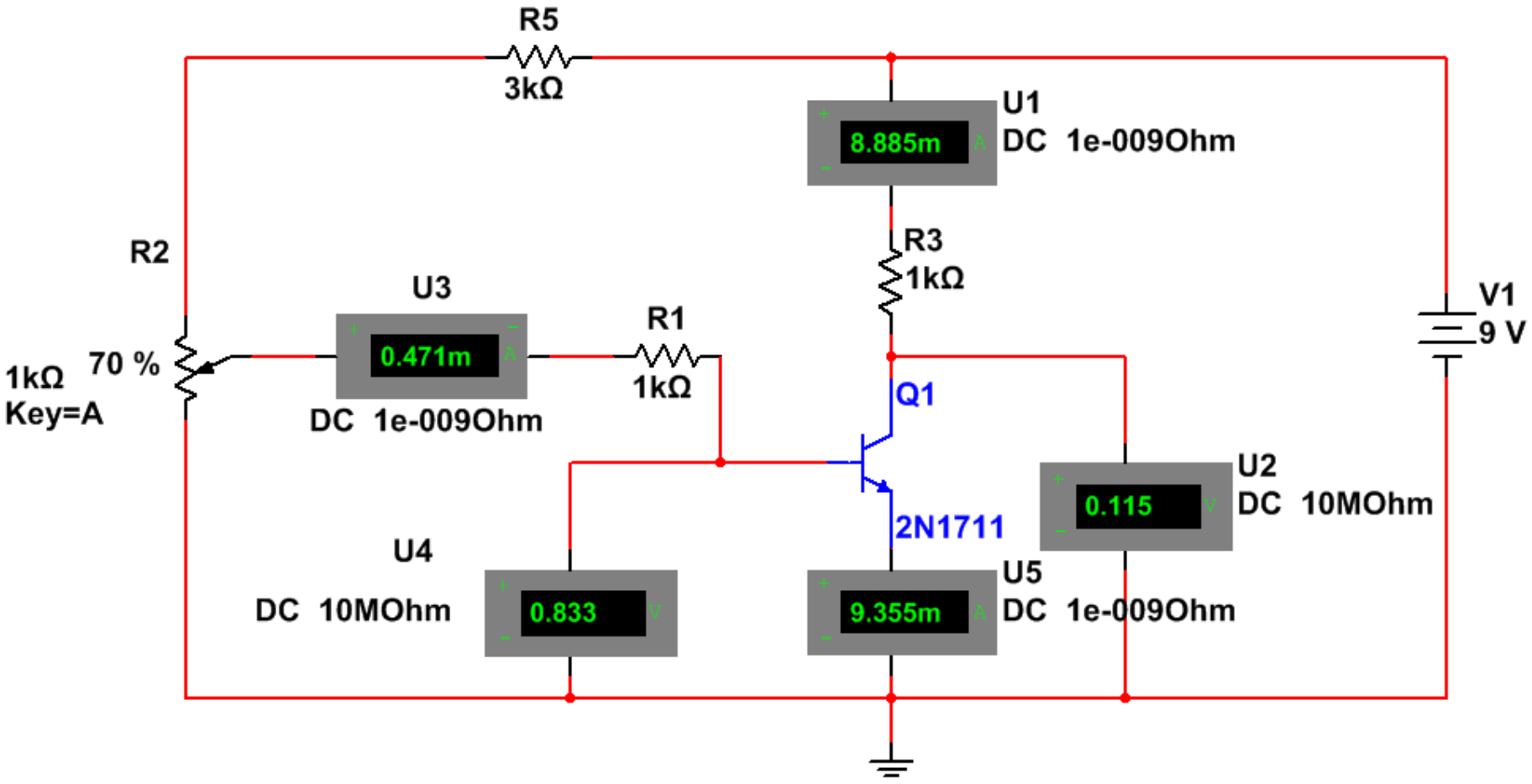
Шашырату қуаты бойынша:
Аз қуатты 0,3 Вт-қа дейін
Орташа қуатты 0,3-1,5 Вт
Қуатты 1,5 Вт-тын жоғары



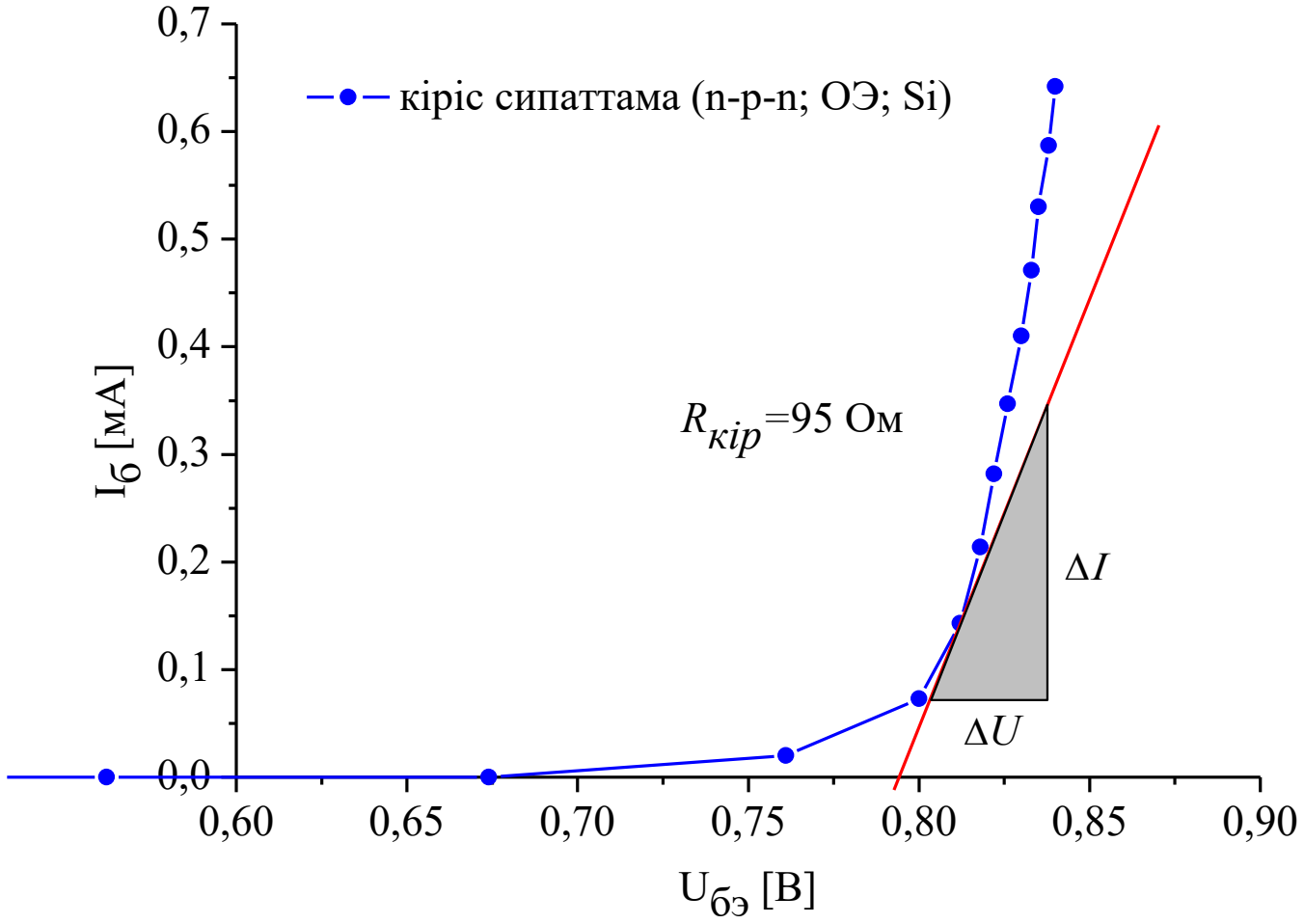
Жиіліктік сипаттамасы:
Төмен жиілікті 3 МГц-ке дейін
Орташа жиілікті 3-30 МГц
Жоғары жиілікті 30-300 МГц
Аса жоғары жиілікті 300 МГц жоғары

Дайындалу технологиясы бойынша, қортпалы, диффузиялы, диффузиялы-қорытпалы, конверсионды, эпитаксиалды және жазық (планарный) болып бөлінеді.

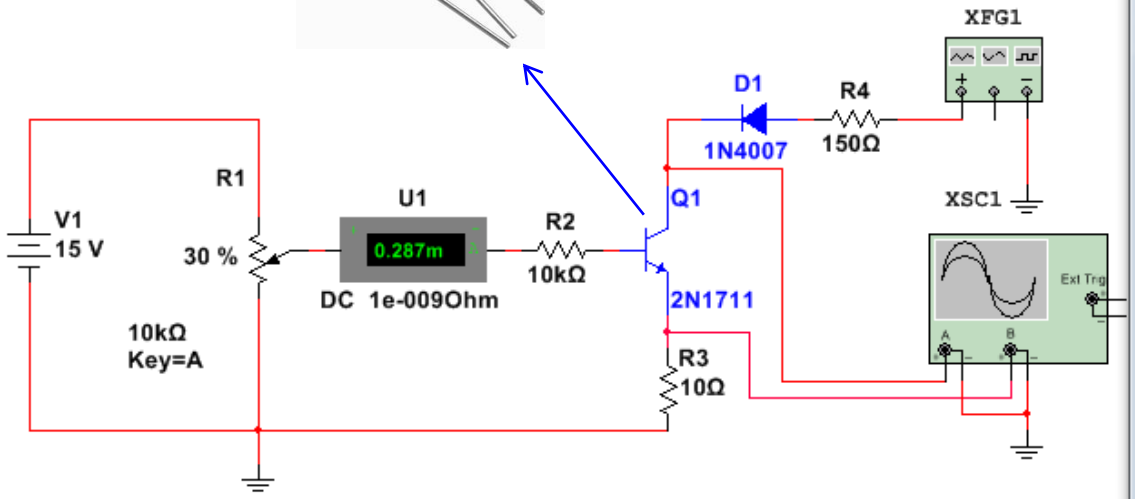
ЭО жалғанған $n-p-n$ типті биполяр транзистордың сипаттамаларын алуға арналған электр тізбегі

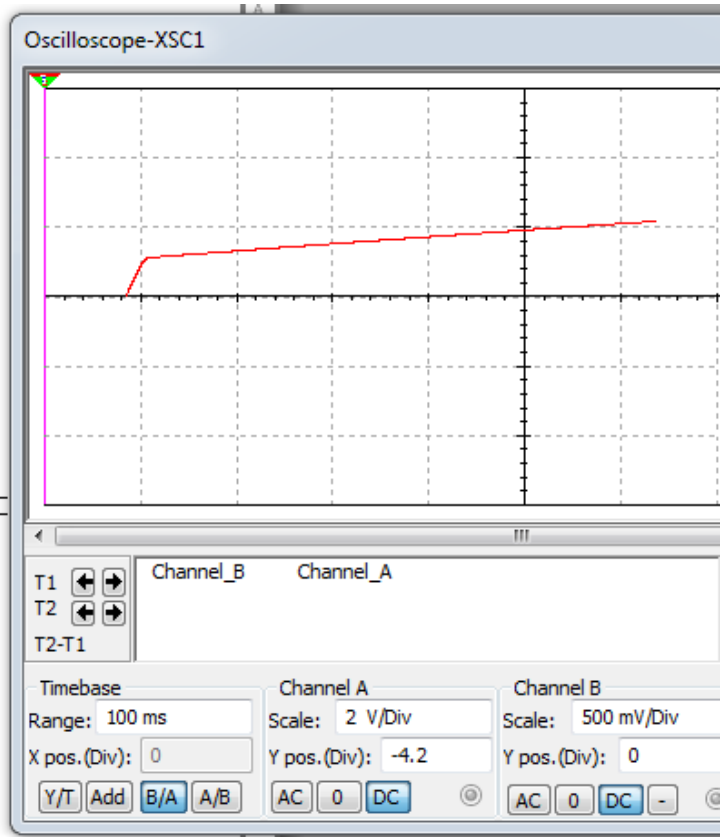


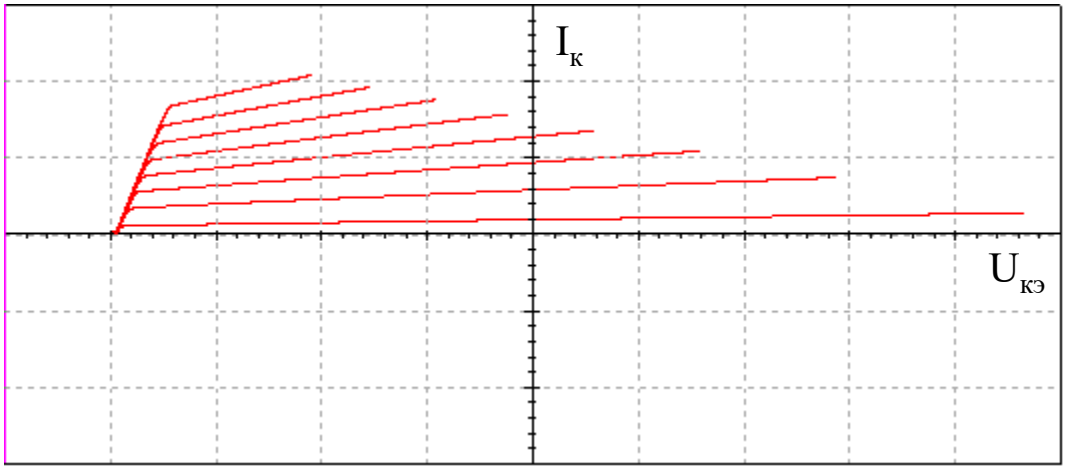
ЭО жалғанған биполяр транзистордың кіріс сипаттамасы





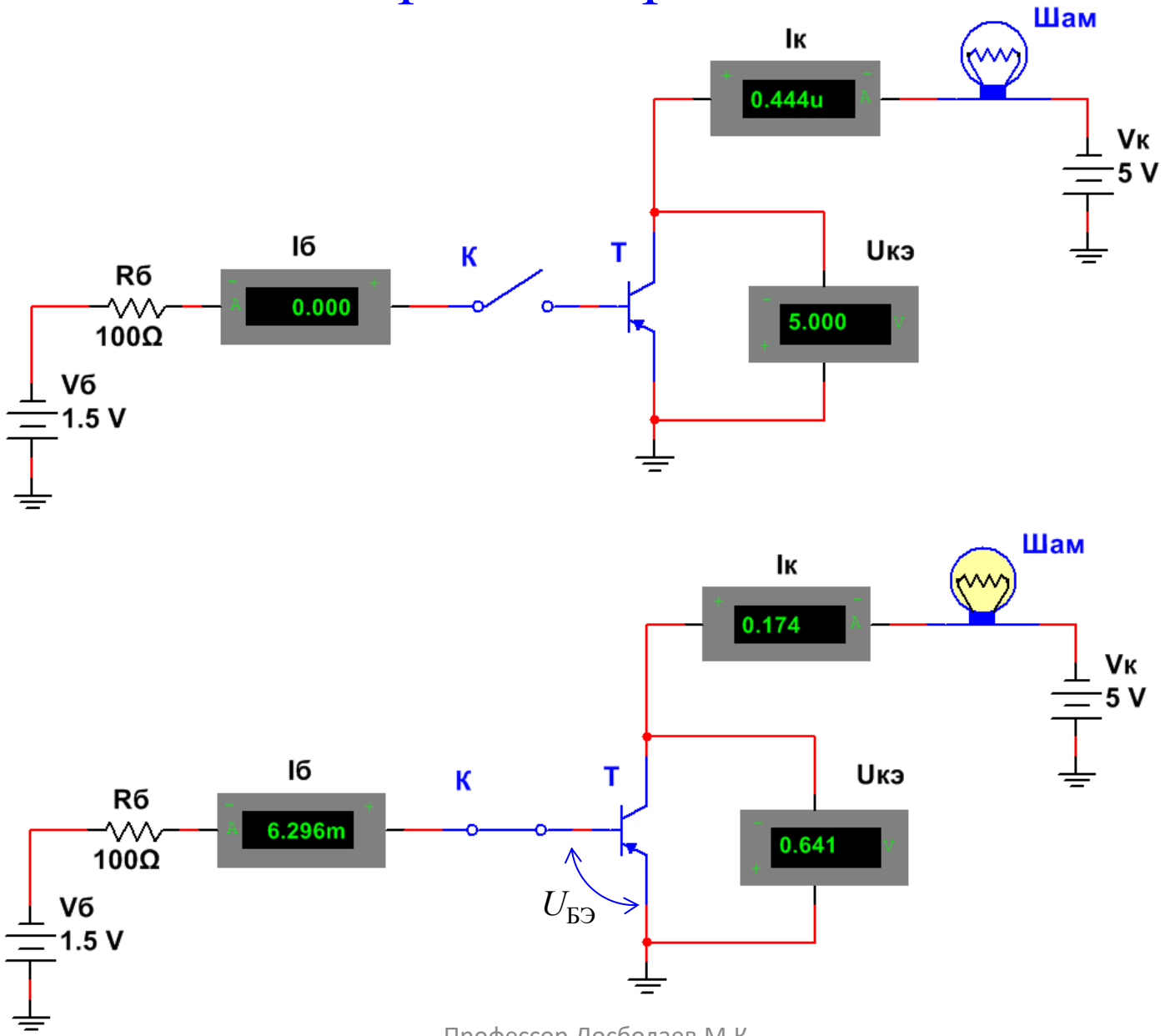




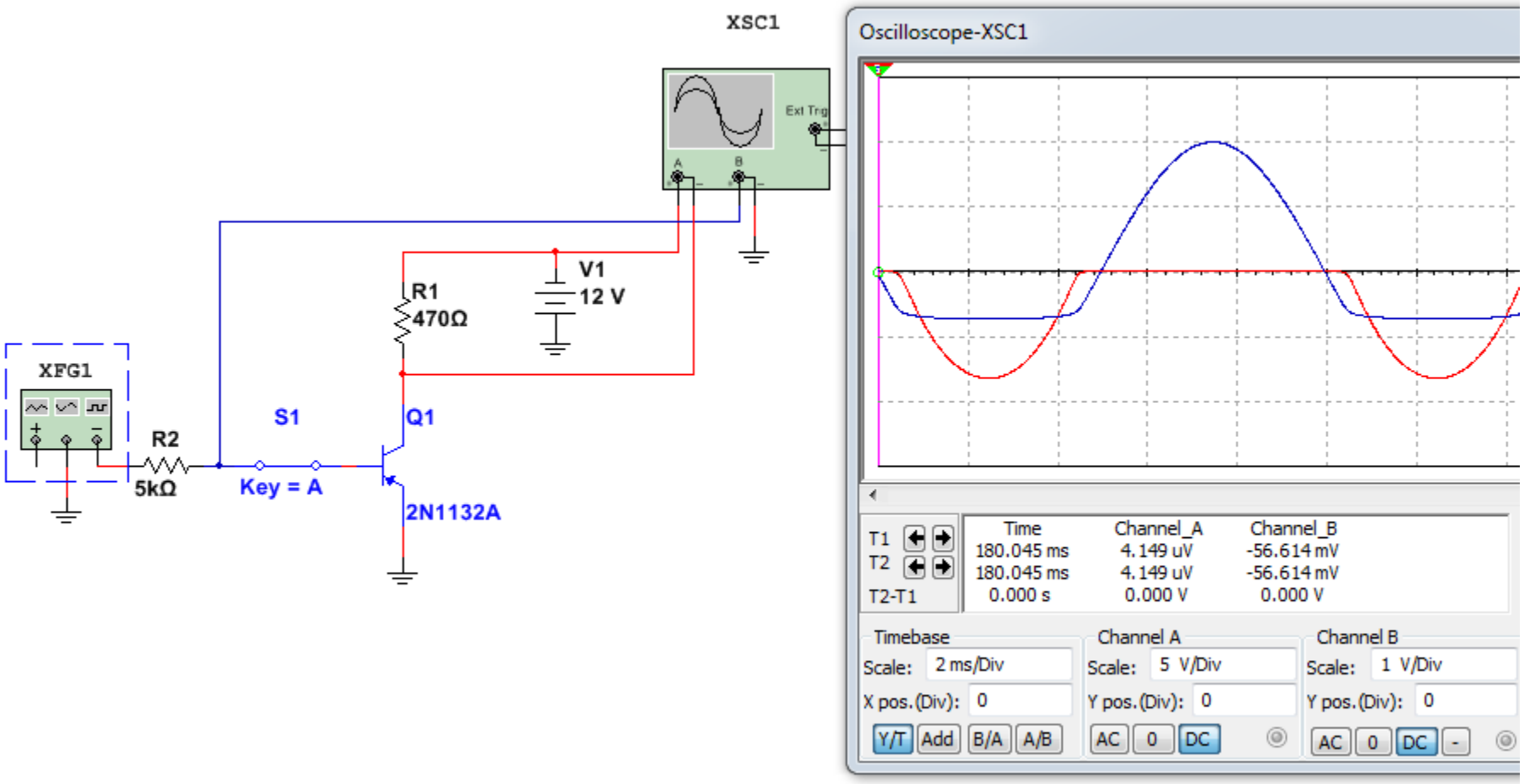


$I_{б8}$=0,93 мА
$I_{б7}$= 0,77 мА
$I_{б6}$= 0,63 мА
$I_{б5}$= 0,51 мА
$I_{б4}$= 0,40 мА
$I_{б3}$= 0,29 мА
$I_{б2}$= 0,18 мА
$I_{б1}$= 0,06 мА

Транзистор - кілт

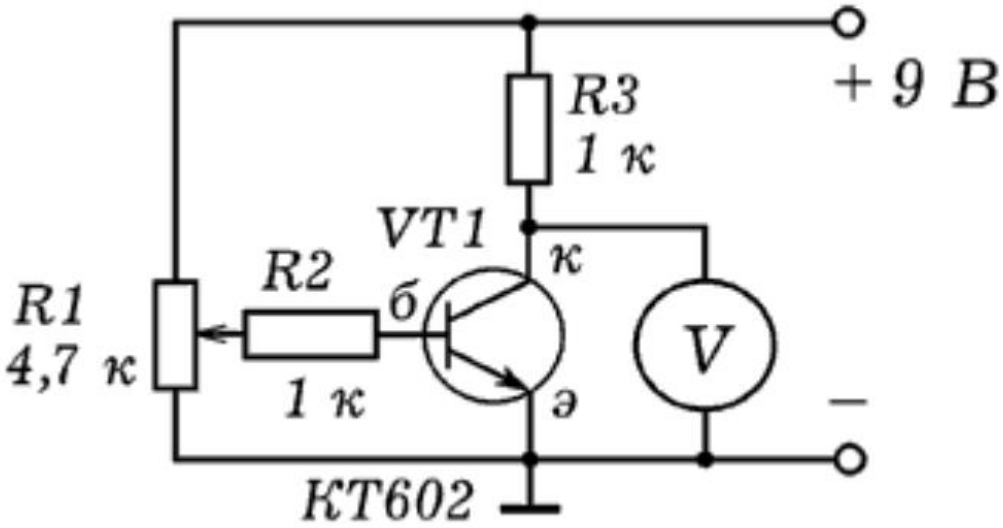


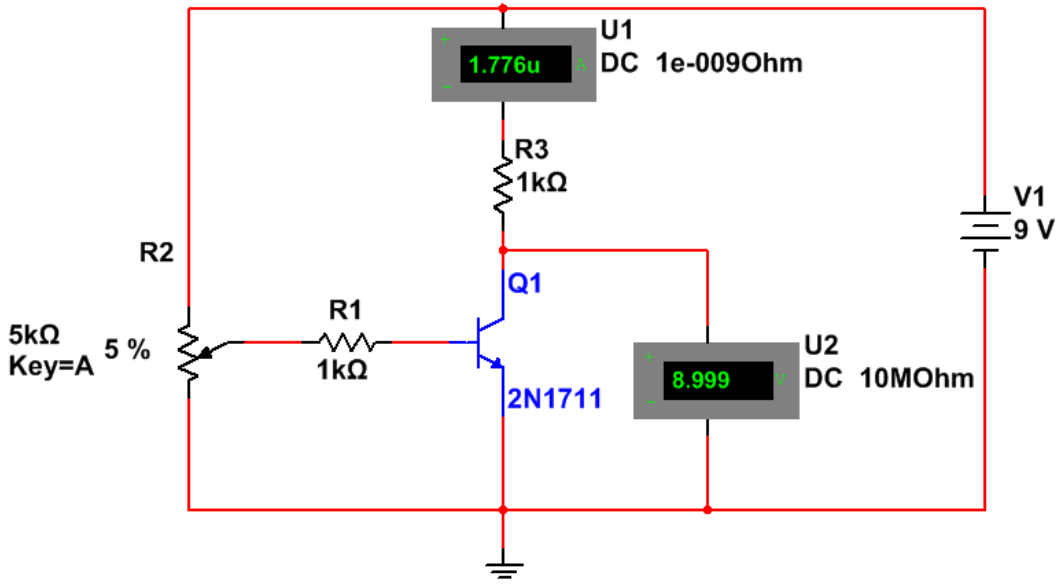
Транзистор - кілт

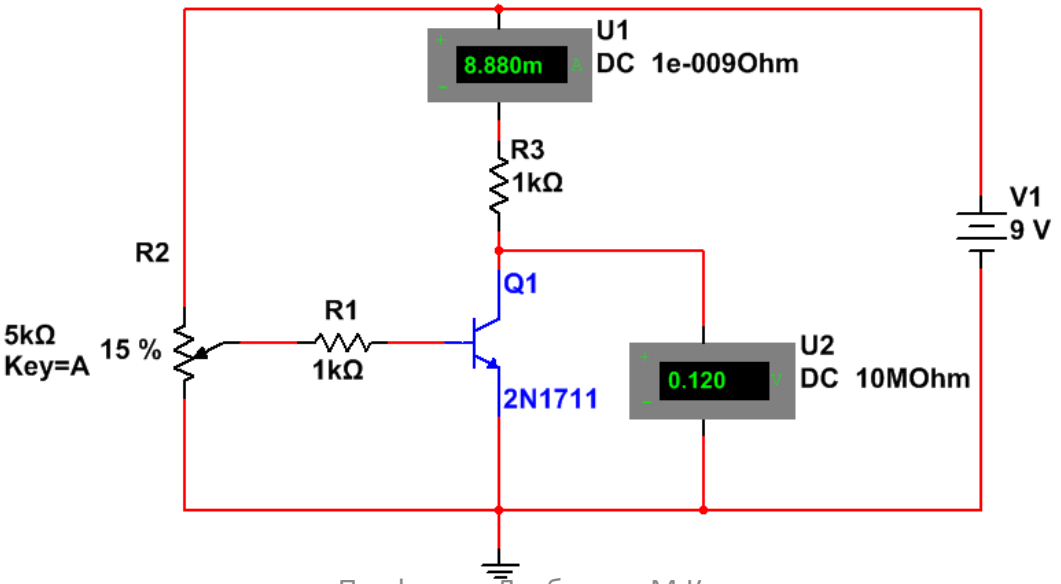


Транзисторлы кілт

инерциясы төмен




U1
1.776u
DC 1e-009Ohm
R3
1kΩ
V1
9 V
R2
Q1
R1
5kΩ
Key=A
5 %
1kΩ
2N1711
U2
8.999
DC 10MOhm

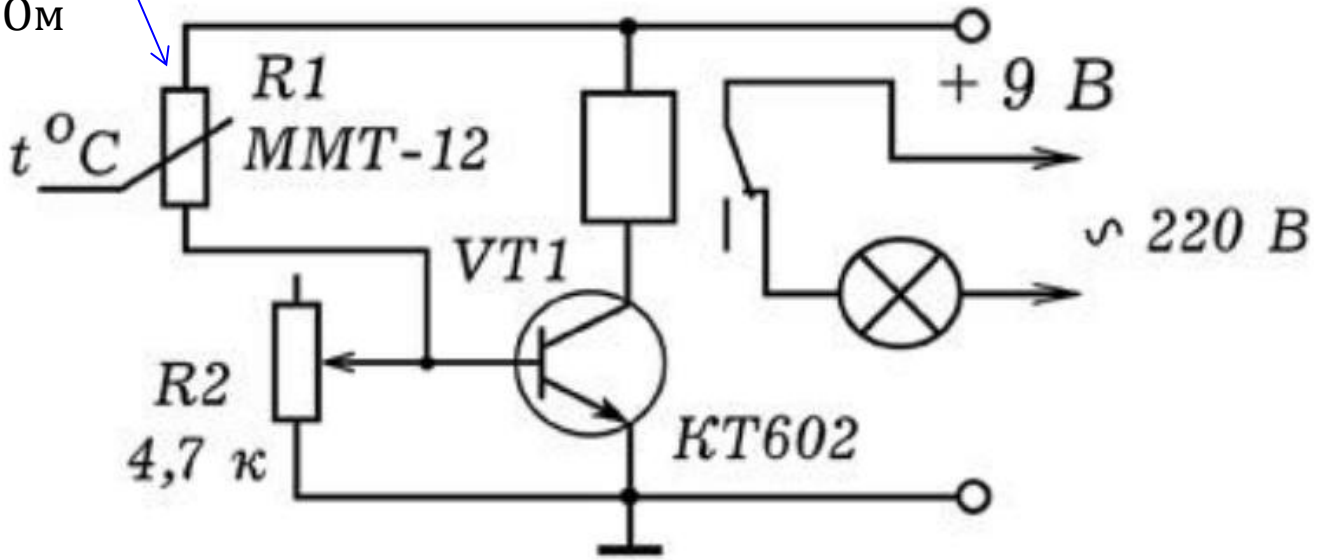

U1
8.880m
DC 1e-009Ohm
R3
1kΩ
V1
9 V
R2
Q1
R1
5kΩ
Key=A
15 %
1kΩ
2N1711
U2
0.120
DC 10MOhm

Термореле

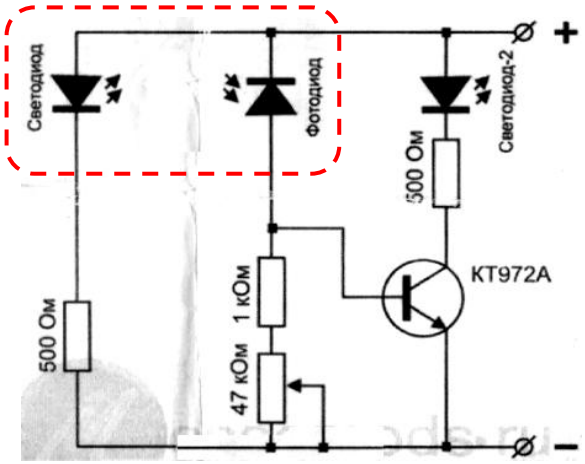
Темп. коэф. теріс

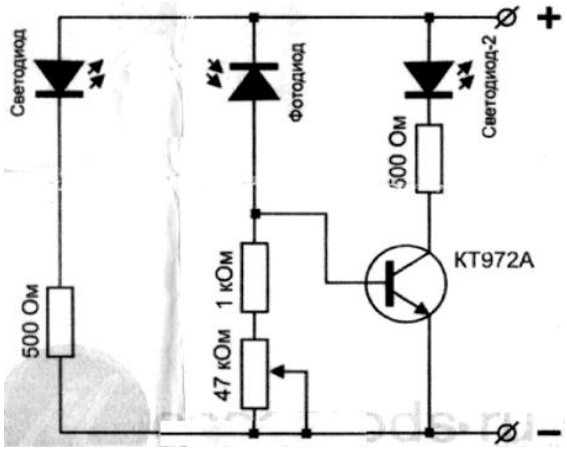


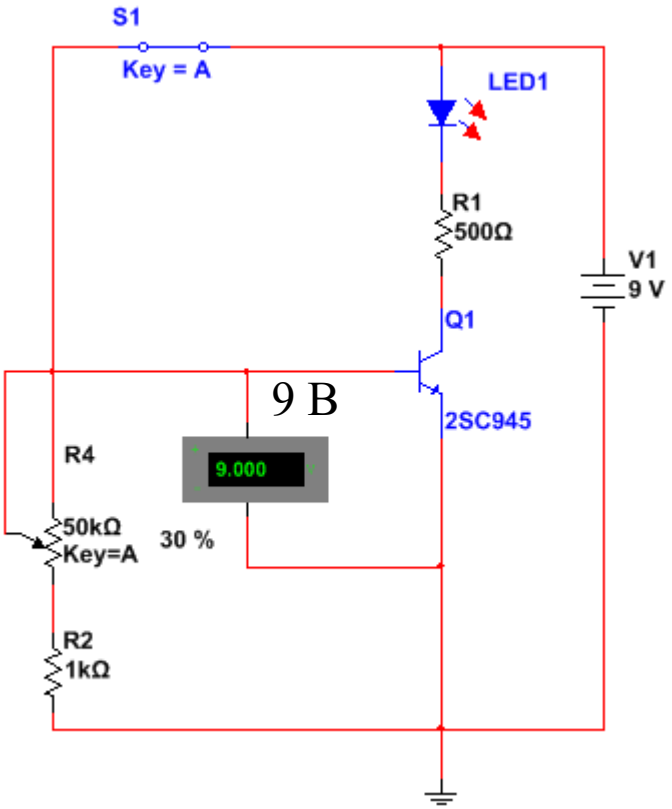
1000 ÷ 68 Ом

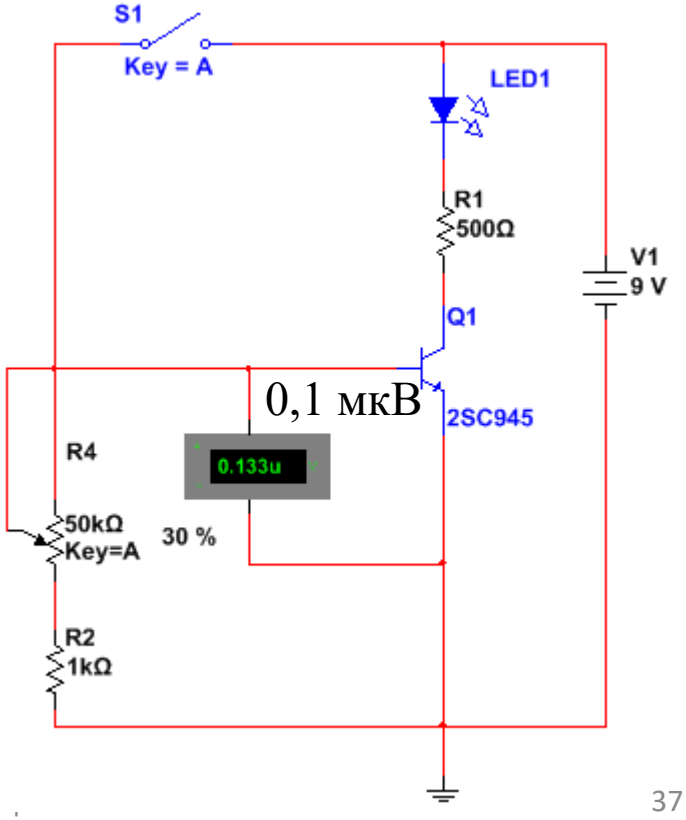


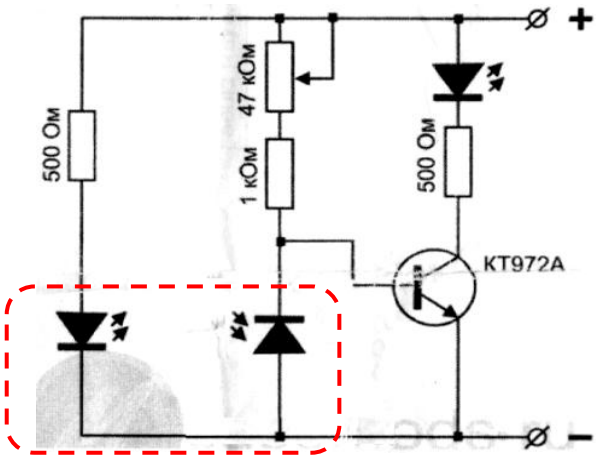
Оптикалық жұп



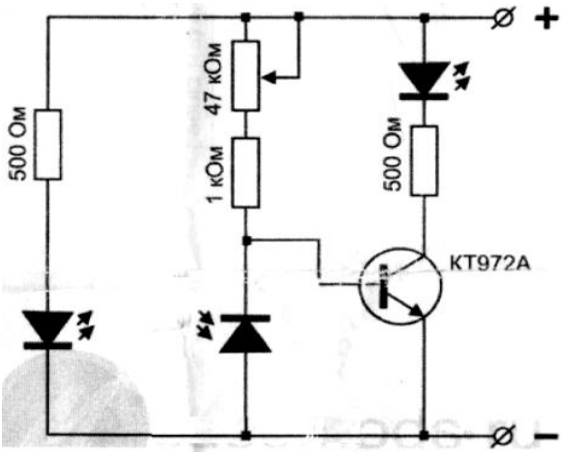

Светодиод
Фотодиод
Светодиод-2
500 Ом
1 кОм
47 кОм
500 Ом
KT972A
+
–


S1
Key = A
LED1
R1
500Ω
V1
9 V
Q1
9 В
2SC945
R4
9.000
50kΩ
Key=A
30 %
R2
1kΩ

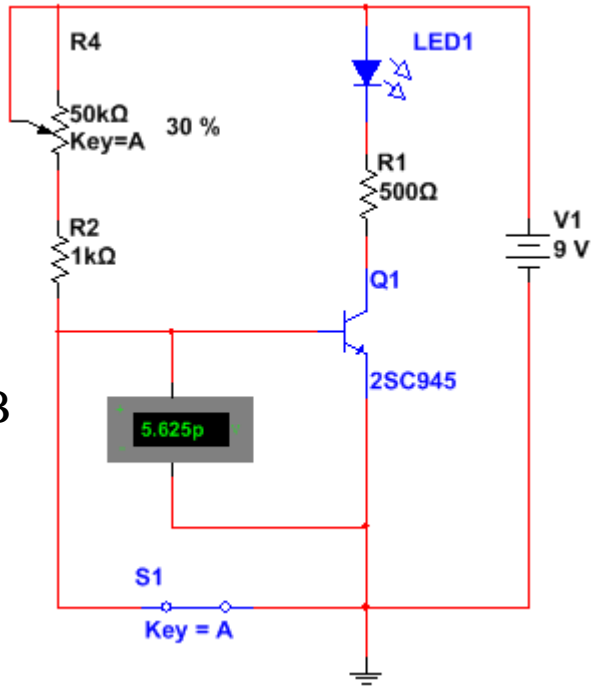

S1
Key = A
LED1
R1
500Ω
V1
9 V
Q1
0,1 мкВ
2SC945
R4
0.133u
50kΩ
Key=A
30 %
R2
1kΩ



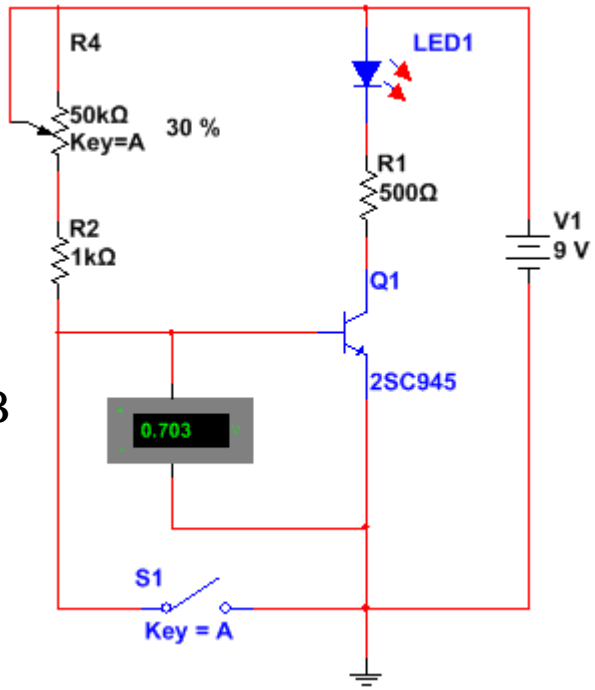
Оптикалық жұп

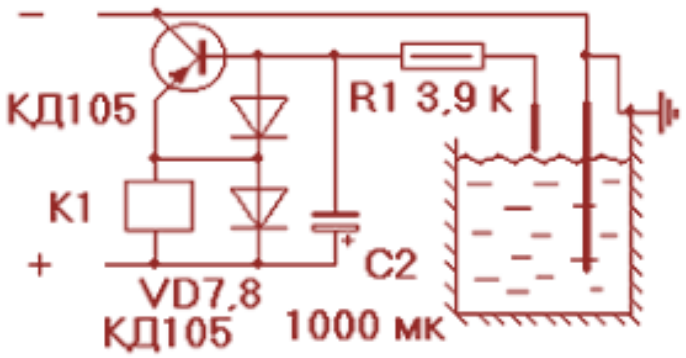

500 Ом
47 кОм
1 кОм
500 Ом
КТ972А
+
–

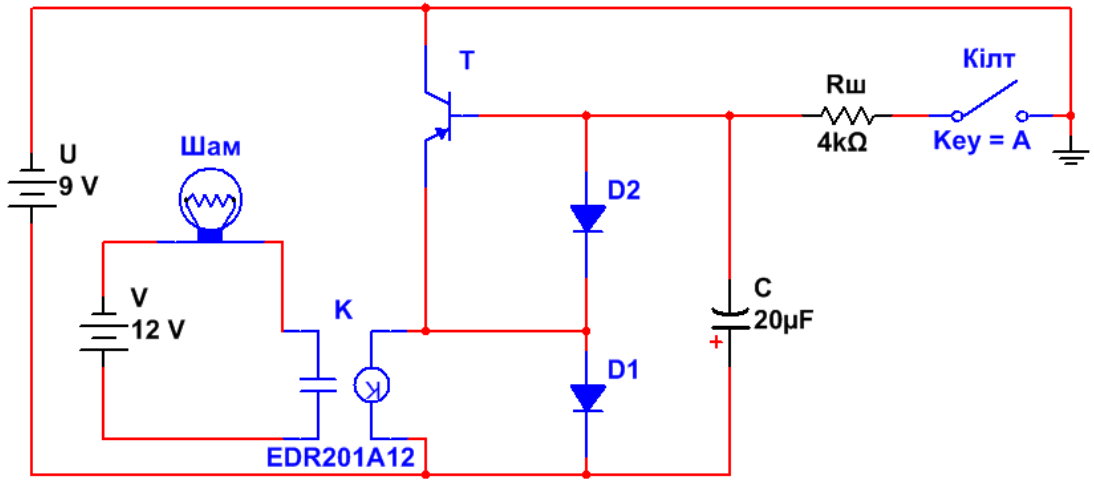
5,6 пВ

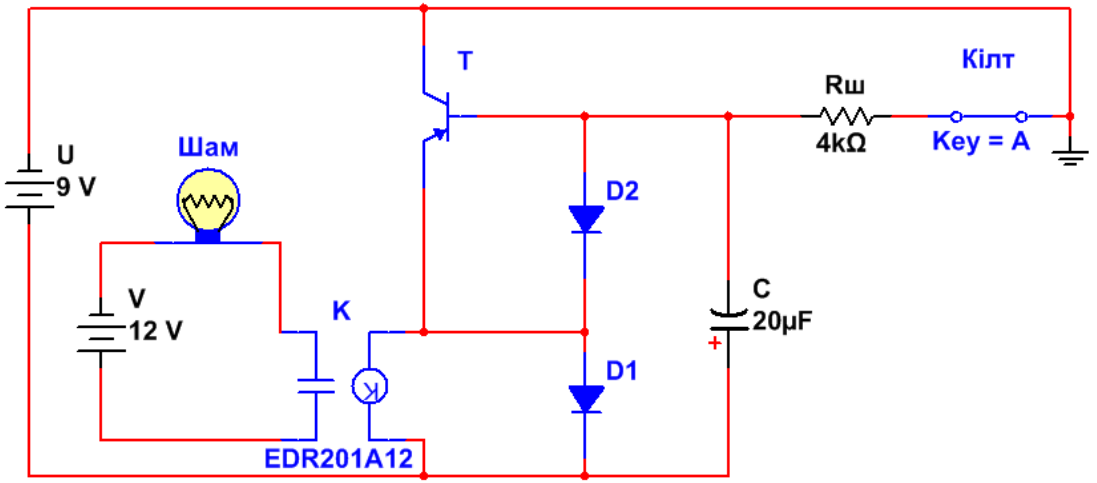

R4
50kΩ
Key=A
30 %
R2
1kΩ
LED1
R1
500Ω
V1
9 V
Q1
2SC945
5.625p
S1
Key = A

0,7 В


R4
50kΩ
Key=A
30 %
R2
1kΩ
LED1
R1
500Ω
V1
9 V
Q1
2SC945
0.703
S1
Key = A


КД105
R1 3,9 к
К1
+
C2
VD7,8
КД105
1000 мк


T
Кілт
Rш
4kΩ
Key = A
U
9 V
Шам
D2
V
12 V
K
C
20μF
D1
EDR201A12


T
Кілт
Rш
4kΩ
Key = A
U
9 V
Шам
D2
V
12 V
K
C
20μF
D1
EDR201A12