

hogy az R_b ellenállás a feszültségforrás része-e vagy egy, az áramforrástól független külső ellenállás.

A feszültséggenerátor szót a továbbiakban két különböző értelemben fogjuk használni. Egyrésztől minden feszültségforrást feszültséggenerátornak nevezünk, másrésztől feszültséggenerátornak nevezzük az olyan idealizált feszültségforrásokat, melyek belső ellenállása zéró. Amennyiben valahol a szóhasználat félrevezető lenne, úgy az utóbbit „ideális feszültséggenerátor”-nak fogjuk nevezni.

Egy telep áramköri szimbólumát és a megfelelő feszültséggenerátor rajzát az 1. a. és b. ábra mutatja. A generátor mellé rajzolt nyíl a pozitív pólustól a negatív felé mutat. A generátorból ki-

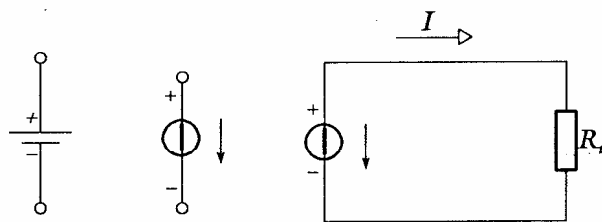
folyó áram irányát a vezetékek mellé rajzolt nyíl mutatja. Mint látható, a két nyíl iránya ellentétes. Ha a feszültséggenerátorhoz és az áramhoz egy a nyilakkal összhangban álló előjelet rendelünk, az áram és feszültség szorzata a generátor esetén negatívnak adódik. Ez kifejezi azt, hogy működés közben a generátor energiája csökken. Ha a generátort egy R_t ellenállással megterheljük (1. c. ábra), a terhelésre eső feszültség és az átfolyó áram iránya megegyezik, tehát az UI szorzat pozitív lesz. Ez kifejezi azt, hogy a terhelőellenálláson a generátor végez munkát, tehát a terhelés belső energiája növekszik.

Ha egy áramkörben több generátor és ellenállás található, akkor az áram- és a feszültségirányok figyelembevételére több gondot kell fordítani. Célszerű egy körüljárási irányt definiálni, és az ezzel egyenlő áramirányt pozitívnak tekinteni. (Ha a valóságos áramirány ezzel ellentétes, akkor a számítás eredménye negatív értéket ad.) A vonatkoztatási iránnyal megegyező feszültségű generátorokat az egyenlet jobb oldalán negatív, az ellentett irányításúakat pozitív előjellel kell figyelembe venni. Pl. a 2. a. ábrán látható áramköröknél:

$$i(r_1 + r_2 + r_3 + r_4) = -U_{G1} + U_{G2}.$$

(2.2 A)

Ha az áramkörben elágazások vannak, akkor két elágazási pont között, minden alkatrészén át ugyanaz az áram folyik. Az áramelágazási pontok közötti szakaszokat ágaknak nevezzük. A különböző ágakon általában különböző áramok folynak. Minden ágban ki kell jelölni egy áramirányt. Ha a kijelölt irány megegyezik a hurok kijelölt körüljárási irányával, akkor az áramot pozitívnak, ellenkező esetben negatívnak



1. ábra. a. Egy telep, b. a feszültség generátor áramköri jele.
c. A feszültség és az áram irányának jelölése.

Az egyes ágakban folyó áramok az ágakban található generátorok elektromotoros erejéből, a csomópontban mérhető potenciálból és az ágakban szereplő ellenállásokból számíthatók. Példaként tekintsük a 2. ábrán szereplő hálózatot!

Az áramkörben három csomópont található. Válasszuk vonatkoztatási pontnak az A pontot. Jelöljük az A ponthoz viszonyított potenciál különbségeket U_B -vel, ill. U_C -vel. Az egyes ágakban folyó áramok ekkor a következők:

$$I_1 = \frac{U_B - U_{G1}}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad (1.1)$$

$$I_2 = \frac{-U_B + U_{G2}}{R_4}, \quad (1.2)$$

$$I_3 = \frac{-U_C}{R_6 + R_7}, \quad (1.3)$$

$$I_4 = \frac{U_C}{R_8}, \quad (1.4)$$

$$I_5 = \frac{U_B - U_C}{R_5}. \quad (1.5)$$

Alkalmazzuk a B és C pontokban a Kirchhoff I. törvényét:

$$\begin{aligned} -I_1 + I_2 - I_5 &= 0 \\ I_5 + I_3 - I_4 &= 0 \end{aligned}$$

Az (1.1)–(1.5) kifejezések behelyettesítése után olyan egyenletrendszert kapunk, amely csak két ismeretlent tartalmaz:

$$\begin{aligned} -\frac{U_B - U_{G1}}{R_1 + R_2 + R_3} + \frac{-U_B + U_{G2}}{R_4} - \frac{U_B - U_C}{R_5} &= 0, \\ \frac{U_B - U_C}{R_5} + \frac{-U_C}{R_6 + R_7} - \frac{U_C}{R_8} &= 0 \end{aligned}$$

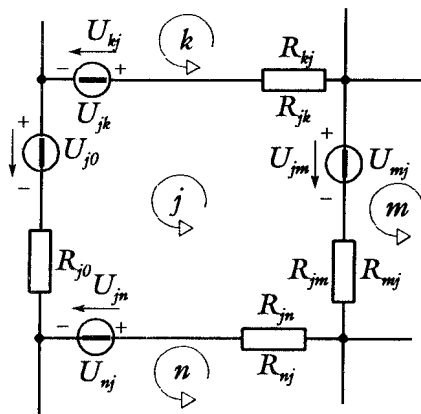
*

Ezt az egyenletrendszert már könnyű megoldani. Mielőtt az eljárás egyes lépéseit megfogalmaznánk, két dologra hívjuk fel a figyelmet: Az ágakban folyó áramok irányának megválasztása tetszőleges, de az áramokat leíró kifejezéseknél vigyázni kell az

egyenlet helyett elegendő volt a 3 hurokáramra vonatkozó 3 egyenlet felírása. Látható, hogy a csomóponti egyenletek felírására nem volt szükség. A hurokáramok módszerénél a csomóponti törvények automatikusan teljesülnek, hiszen a csomópontban minden befolyó hurokáram valamelyik ágban mint kifolyó áram is megjelenik.

I.B.3. Ellenállás-mátrix módszer

Az előző pontban leírt módszer áttekinthetőbbé válik, ha megfelelő jelölésrendszert vezetünk be. A hálózatban a hurkok kijelölését végezzük úgy, hogy minden ág leg-



4. ábra. A mátrixelemek indexeinek értelmezése.

feljebb két független hurokhoz tartozzon. A hurkok körbejárási irányait minden hurokban ugyanolyan értelemben (például az óramutató járásával ellentétesen) vegyük fel. Ez biztosítja azt, hogy a közös ágakban a hurokáramok ellentétes irányban folyjanak. Egy ágban szereplő feszültséggenerátorokat és ellenállásokat vonjuk össze. Most vegyük szemügyre a 4. ábrát, amelyen egy hálózatból kiragadva egyetlen hurok látható! A hurokra jellemző index legyen j . Minden elemet (generátort, ellenállást) két indexszel lássuk el. Azokat az elemeket, amelyek csak a j -edik hurokhoz tartoznak j és 0 indexszel jelöljük, a többi elemet a megfelelő hurkok indexeivel.

Minden közös ágban szereplő elem két jelölést is kapjon oly módon, hogy a j -edik körből vizsgálva az adott elemet, legyen az első index a j , a k -edik körből nézve ugyanazt az elemet, legyen az első index k . Ellenállásokra ez azt jelenti, hogy

$$R_{jk} = R_{kj} . \quad (3.1)$$

A generátorok feszültségének előjelét viszonyítsuk a hurok körüljárási irányához. Ennek következtében ugyanazon generátor előjele a két szomszédos hurokban ellentétes:

$$U_{jk} = -U_{kj} . \quad (3.2)$$

Ha felírjuk a huroktörvényt az ábrán látható körre, akkor

$$(R_{jk} + R_{jm} + R_{jn} + R_{j0})i_j - R_{jk}i_k - R_{jm}i_m - U_{jk} + U_{jm} + U_{jn} - U_{j0} = 0 . \quad (3.3)$$

szükséges még: $-R_{jn}i_n$

egyenletrendszer együtthatóiból alkotott mátrix, az ún. karakterisztika. Mivel 4 mennyiségből (sorrendre való tekintet nélkül) kettőt 6 féle módon lehet kiválasztani, így a kétpóluspárokat legfeljebb hatféle karakterisztikával vagy paraméterekkel lehet jellemezni. Az alábbi felsorolásban az első négyet az áramirányt a 2.a., az utolsó kettőt pedig a 2.b. ábrának megfelelően értelmezzük.

Ellenállás (impedancia) karakterisztika:

$$\begin{aligned} U_1 &= z_{11} I_1 + z_{12} I_2, \\ U_2 &= z_{21} I_1 + z_{22} I_2. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Vezetés (admittancia) karakterisztika:

$$\begin{aligned} I_1 &= y_{11} U_1 + y_{12} U_2, \\ I_2 &= y_{21} U_1 + y_{22} U_2. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Hibrid karakterisztika:

$$\begin{aligned} U_1 &= h_{11} I_1 + h_{12} U_2, \\ I_2 &= h_{21} I_1 + h_{22} U_2. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Inverz hibrid karakterisztika:

$$\begin{aligned} I_1 &= h_{11} U_1 + h_{12} I_2, \\ U_2 &= h_{21} U_1 + h_{22} I_2. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Lánc karakterisztika:

$$\begin{aligned} U_1 &= a_{11} U_2 + a_{12} I_2, \\ I_1 &= a_{21} U_2 + a_{22} I_2. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Inverz lánc karakterisztika:

$$\begin{aligned} U_2 &= b_{11} U_1 + b_{12} I_1, \\ I_2 &= b_{21} U_1 + b_{22} I_1. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Még egyszer emlékeztetünk arra, hogy I_2 esetén a lánc karakterisztikáknál a kétpóluspárból kifelé folyó áramirányt tekintjük pozitívnak, míg a másik négy esetén a befelé folyót.

Megjegyezzük, hogy vannak olyan kétpóluspárok, melyekre a fenti karakterisztikák nem mindegyike létezik. (Ilyen pl. a 7. ábrán látható KPP.) Az alábbiakban feltesszük, hogy valamennyi karakterisztika létezik.

A generátor helyzetének megválasztásával és a másik oldalon a szakadás vagy a rövidzár biztosításával az (1.1)–(1.6) egyenletek együtthatói meghatározhatók. A következő táblázatban a mért mennyiségek és az együtthatók közötti kapcsolatokat foglaltuk össze.

1. táblázat:

primer oldal	$U_1 = U_G$	$U_1 = U_G$	S Z	R Ö
szekunder oldal	S Z	R Ö	$U_2 = U_G$	$U_2 = U_G$
ellenállás/ vezetés	$z_{11} = \frac{U_1}{I_1}$ $z_{21} = \frac{U_2}{I_1}$	$y_{11} = \frac{I_1}{U_1}$ $y_{21} = \frac{I_2}{U_1}$	$z_{12} = \frac{U_1}{I_2}$ $z_{22} = \frac{U_2}{I_2}$	$y_{12} = \frac{I_1}{U_2}$ $y_{22} = \frac{I_2}{U_2}$
hibrid/ inverz hibrid	$k_{11} = \frac{I_1}{U_1}$ $k_{21} = \frac{U_2}{U_1}$	$h_{11} = \frac{U_1}{I_1}$ $h_{21} = \frac{I_2}{I_1}$	$h_{12} = \frac{U_1}{U_2}$ $h_{22} = \frac{I_2}{U_2}$	$k_{12} = \frac{I_1}{I_2}$ $k_{22} = \frac{U_2}{I_2}$
lánc/ inverz lánc	$a_{11} = \frac{U_1}{U_2}$ $a_{21} = \frac{I_1}{U_2}$	$a_{12} = \frac{U_1}{I_2}$ $a_{22} = \frac{-I_1}{I_2}$	$b_{11} = \frac{U_2}{U_1}$ $b_{21} = \frac{-I_2}{U_1}$	$b_{12} = \frac{U_2}{I_1}$ $b_{22} = \frac{-I_2}{I_1}$

A mérés feltétele a táblázat felső két sorában szerepel. S és R azt jelöli, hogy az adott oldalon szakadás vagy rövidzár található. A táblázatban a mért áramok irányait a 2.a. ábrának megfelelően értelmeztük, így a fenti kifejezések segítségével egy oszlopon belül az együtthatók egymásba átszámíthatók. Például

$$k_{12} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{\frac{I_2}{I_1}} = - \frac{1}{b_{22}}$$

átmeneti jelenségeket tranziens jelenségeknek nevezzük. Periodikus jelű generátorok alkalmazása esetén gyakran csak azokra a folyamatokra vagyunk kíváncsiak, amelyek a tranziensek lejátszódása után jellemzőek a rendszerre. A periodikus folyamatok vizsgálata bizonyos szempontból egyszerűbb, mint a tranzienseké. A periodikus jelek között kiemelt szerepe van a szinuszos lefutású jeleknek. Az ilyen generátorokat tartalmazó hálózatok egyszerű és kényelmes leírására külön módszereket is kidolgoztak, mint pl. az ún. szimbolikus vagy komplex impedanciák módszerét.

I.D.2. A határfeltételek

A kísérleti fizikából ismeretes, hogy az induktivitáson

$$-U_L = \cancel{L} \frac{dI}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

feszültség lép fel, tehát a feszültség az átfolyó áram deriváltjával arányos. A kapacitáson eső feszültség értékének megváltozása a kapacitáson lévő töltés értékének megváltozása miatt jön létre:

$$\Delta U_C = U_C(t_2) - U_C(t_1) = \frac{Q(t_2) - Q(t_1)}{C} = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} I_C dt ,$$

tehát a feszültségváltozás a kondenzátort töltő I_C áram időszerinti integráljától függ. Így könnyen belátható, hogy az induktivitásokat és kapacitásokat tartalmazó hálózatokat integro-differenciálegyenletekkel lehet leírni. A lejátszódó jelenségek teljes leírásához a differenciálegyenletek kezdeti feltételeit is meg kell adni. A kezdeti feltételek megválasztását a következő megfontolások korlátozzák: A feszültség és az áram értéke mindig véges. Ennek következtében az induktivitáson átfolyó áram értéke nem változhat meg ugrásszerűen, hiszen ehhez az induktivitáson végtelen nagy feszültségnek kellene fellépni. Az induktivitáson eső feszültség viszont változhat ugrásszerűen, mert ez nem jelenti az áram végtelenné válását. A kapacitáson eső feszültség ugrásszerű megváltozását a kapacitás töltésének végtelenül rövid idő alatti megváltozása, tehát végtelen nagy áram hozhatná létre, ami lehetetlen, tehát a kapacitás feszültsége csak folytonosan változhat. A kondenzátort töltő áram ugrásszerű megváltozása viszont megvalósulhat. Az ellenálláson átfolyó áram arányos a feszültséggel, így mindkét mennyiség tetszőlegesen változhat.

Ha egy hálózat valamely ágában több alkatrész (L , R vagy C) sorba van kapcsolva, az áramra vonatkozó erősebb korlátozás érvényes. Párhuzamosan kötött alkatrészek esetén az egyes ágakon eső feszültség megegyezik, tehát a feszültségre az erősebb

$$\cos \varphi = \frac{\exp(j\varphi) + \exp(-j\varphi)}{2}$$

(*)

és

$$\sin \varphi = (-j) \frac{\exp(j\varphi) - \exp(-j\varphi)}{2} \quad (2.2)$$

Most megmutatjuk, hogy az Euler-formula segítségével a Fourier-sorok elegánsabban is előállíthatók. Először (1.1)-be behelyettesítjük a trigonometrikus függvények (2.2) kifejezéseit:

$$\begin{aligned} f(t) &= a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \frac{\exp(jk\omega_0 t) + \exp(-jk\omega_0 t)}{2} - jb_k \frac{\exp(jk\omega_0 t) - \exp(-jk\omega_0 t)}{2} = \\ &= a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k - jb_k}{2} \exp(jk\omega_0 t) + \frac{a_k + jb_k}{2} \exp(-jk\omega_0 t) . \end{aligned} \quad (2.3)$$

Vezessük be a

$$C_k = \begin{cases} \frac{a_k - jb_k}{2} , & \text{ha } k > 0 , \\ a_0 , & \text{ha } k = 0 , \\ \frac{a_k + jb_k}{2} , & \text{ha } k < 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

komplex együtthatókat, amelyeket az $f(t)$ függvényből közvetlenül is kiszámíthatunk. Az (1.2) összefüggések felhasználásával (2.4)-ből $k > 0$ esetén a következő kifejezést kapjuk:

$$\begin{aligned} C_k &= \frac{2}{T} \left[\frac{1}{2} \int_0^T f(t) \cos k\omega_0 t \, dt - j \frac{1}{2} \int_0^T f(t) \sin k\omega_0 t \, dt \right] = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) [\cos k\omega_0 t - j \sin k\omega_0 t] \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jk\omega_0 t} \, dt . \end{aligned} \quad (2.5)$$

Azonnal látható, hogy a (2.5) kifejezés alkalmas C_k kiszámítására $k < 0$ esetén is, csak ekkor az exponens előjele pozitív lesz. Vezessük még be az

$$\omega_k = k \omega_0$$

jelölést. Ekkor a Fourier-sor kifejezése a következő:

$$Z_R = R + j\omega L = R \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_0} \right), \quad (1.5)$$

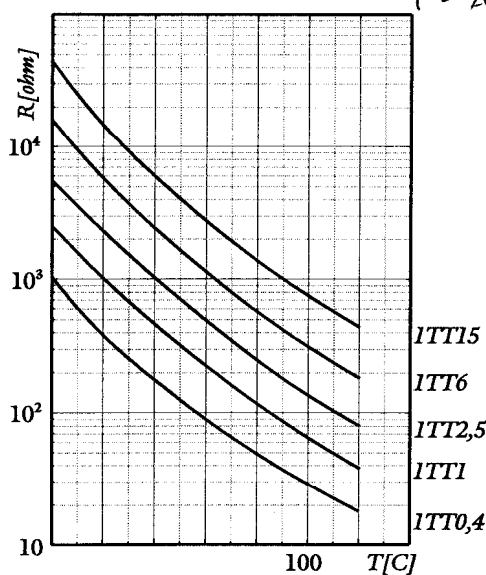
ahol $\omega_0 = R/L$. Az induktivitás értéke huzalellenállásoknál akár $10 \mu\text{H}$ is lehet. Az induktivitás csökkentése miatt a hitelesítési célokra gyártott huzalellenállásokat bifillárisan tekercselik. A köszörült fémréteg ellenállások induktivitása pH-nH nagyságrendbe esik, ezért elhanyagolható.

II.A.2. Különleges ellenállások

Speciális célokra különleges hőmérséklet- vagy feszültségfüggő ellenállások készülnek. Az NTK (negatív temperatúra együtthatú) ellenállások ellenállása a hőmérséklet növekedésével exponenciálisan csökken. A szokásos ellenállásokkal sorba kötve egy megfelelő értékű NTK ellenállást, elérhető, hogy az eredő ellenállás hőmérsékletfüggése egy bizonyos tartományban elhanyagolható legyen. Az NTK ellenállások értéke az

$$R = R_{ref} \cdot e^{(A + B/T + C/T^2 + \dots)} \quad A = -\frac{B}{T_0}$$

$$R(T) = R_{20} \exp\left[-\alpha(T - 293 \text{ K})\right] \quad (2.1)$$



3. ábra. Termisztorok ellenállásának hőmérsékletfüggése.

összefüggés szerint változik a hőmérséklettel, ahol az α értéke $(0,03 - 0,05)/\text{K}$. A hőmérséklet érzékelésére kifejlesztett NTK ellenállásokat termisztoroknak nevezik. Néhány termisztor ellenállásának hőmérsékletfüggése a 3. ábrán, képe a 4. ábrán látható.

A varisztorokat VDR-nek („voltage dependent resistor”-nak) is nevezik. A varisztorok árama a feszültség valamilyen (1-nél nagyobb) kitevőjű hatványa szerint változik. A varisztorok jellemzésére az

$$U = C |I|^\beta \quad (2.2)$$

összefüggésben szereplő β értékét és egy névleges áramhoz tartozó névleges fe-

ill.

$$B = \frac{A}{A - 1} \quad (2.5b)$$

Az A és B mennyiségeket egyenáramú vagy nagyjelű, az

$$\alpha = \left(\frac{\partial I_C(I_E, U_{CB})}{\partial I_E} \right) \bigg|_{U_{CB} = \text{áll.}} \quad \text{és} \quad \beta = \left(\frac{\partial I_C(I_B, U_{CB})}{\partial I_B} \right) \bigg|_{U_{CB} = \text{áll.}} \quad (2.6)$$

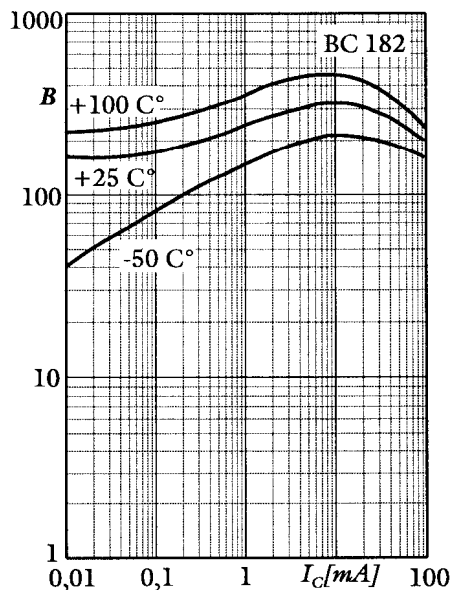
mennyiségeket kisjelű vagy differenciális áram átviteli, ill. áramerősítési tényezőknek nevezzük. Ezekre a fentiekhez hasonló módon érvényesek az

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \text{ill.} \quad \beta = \frac{\alpha}{\alpha - 1}$$

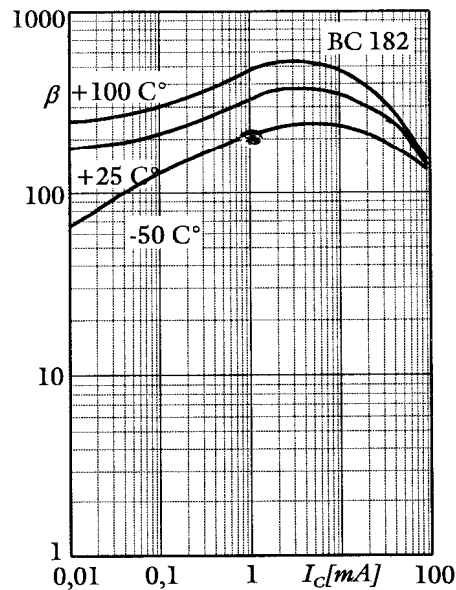


összefüggések.

Az 5. és a 6. ábrán B és β látható a kollektoráram függvényében állandó kollektorfeszültség esetén. A kétféle áramerősítési tényező eltérése szemmel láthatóan nem jelentős. Felhívjuk a figyelmet arra, hogy az ábrán a kollektoráram 5 nagyságrendet változik, amihez viszonyítva az áramerősítési tényezők megváltozása viszonylag jelentéktelen. Ha egy kapcsolatban a kollektoráram megváltozása kicsiny ($\Delta I_C / I_C \approx 0,2$) akkor az áramerősítési tényezők állandónak tekinthetők.

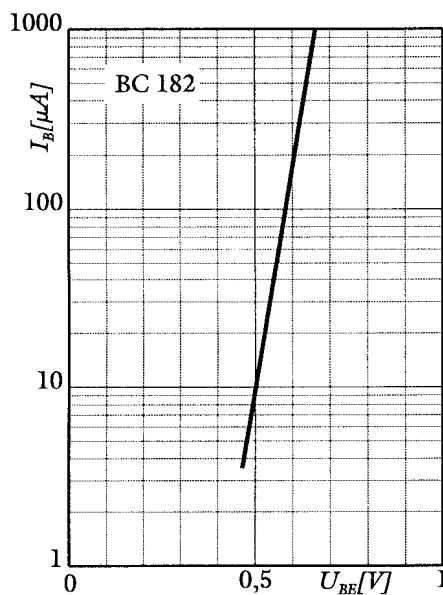


5. ábra. Az egyenáramú áramerősítési tényező a kollektoráram függvényében.

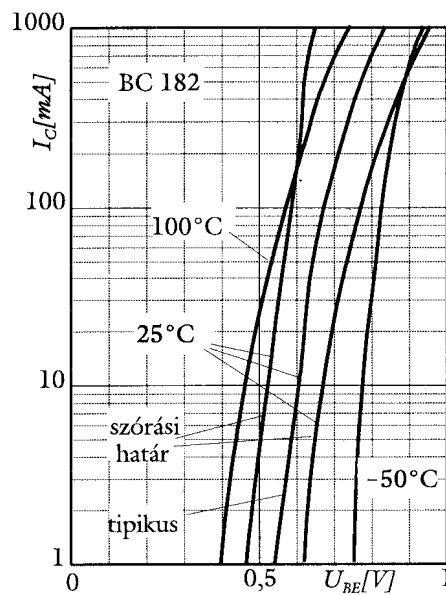


6. ábra. A kisjelű áramerősítési tényező a kollektoráram függvényében.

A 7. és 8. ábrán a bázisáramot és a kollektoráramot látjuk féllogaritmikus skálán a bázis-emitter feszültség függvényében, rögzített kollektor feszültségnél. Látható, hogy a bázisáram az U_{BE} feszültség exponenciális függvénye, ami összhangban van a dióda áram-feszültség karakterisztikájával, bár a grafikon alapján a termikus feszültségre kb. 34 mV adódik.



7. ábra. A bázisáram U_{BE} függvényében.



8. ábra. A kollektoráram U_{BE} függvényében.

A tranzisztor tulajdonságait célszerű lehetőleg szemléletes fizikai mennyiségek segítségével leírni.

A bázisáram és a bázis-emitter feszültség kapcsolatát a dinamikus r_B bázisellenállással jellemezzük. Ha a bázisáram eleget tesz a dióda törvénynek, akkor a gyakorlatilag fontos $|U_{BE}| \gg U_T$ tartományban a bázis-emitter dióda dinamikus ellenállása,

$$\frac{1}{r_{BE}} = \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} = \frac{\partial I_{B0} \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)}{\partial U_{BE}} = \frac{1}{U_T} I_{B0} \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) = \frac{I_B}{U_T}.$$

Általában a bázisréteg ellenállása nem hanyagolható el. A rétegellenállást közelítőleg egy soros ellenállással vehetjük figyelembe, így a bázisellenállás:

$$r_B = r_{BB'} + r_{BE} = r_{BB'} + \frac{U_T}{I_B}, \quad (2.7)$$

ahol $r_{BB'}$ a rétegellenállás, r_{BE} a bázis-emitter dióda U_T/I_B értékű dinamikus ellenállása. Kis teljesítményű Ge tranzisztoroknál $r_{BB'}$ értéke néhány száz ohm, Si tranzisztoroknál 10–100 ohm.

A tapasztalat szerint a (2.7) összefüggés akkor ad helyes eredményt, ha U_T helyett egy nagyobb $U_T^* = nU_T$ mennyiséget használunk, ahol $1 \leq n \leq 2$. Ennek értelmezésére a félvezető eszközök fizikájának feladata. Mi a továbbiakban az elméleti értéket fogjuk használni: $U_T^* = U_T = kT/q = 26 \text{ mV}$. Méretezésekhez egyes könyvek az $U_T^* \approx 40 \text{ mV}$ értéket ajánlják.

Gyakran szükség van a dinamikus emitter ellenállás fogalmára is, amit az

$$\frac{1}{r_E} = \left(\frac{\partial I_E}{\partial U_{BE}} \right)_{U_{CE}}$$

összefüggés definiál. A továbbiakban r_E értékét a dióda dinamikus ellenállásának megfelelően az

$$r_E = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} \quad (2.8)$$

összefüggésből számítjuk ki. Megjegyezzük, hogy

$$\beta / r_E = \left(\frac{\partial I_E}{\partial U_{BE}} \right)_{U_{CE}} = \frac{\partial I_E}{\partial I_B} \cdot \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} = (\beta + 1) r_{BE}. \quad (2.9)$$

A 8. ábra szerint az $I_C(U_{BE})$ függvény közelítőleg exponenciális, bár nagyobb U_{BE} esetén a görbe meredeksége csökken. Az $I_B(U_{BE})$ függvény exponenciális jellegéből állandó áramerősítési tényező (β) esetén következne $I_B(U_{BE})$ exponenciális jellege. Megjegyezzük, hogy vannak olyan speciális technikával készült tranzisztorok is, amelyeknél a kollektoráram 4–5 nagyságrenden keresztül is követi az exponenciális $I_C(U_{BE})$ karakterisztikát. Ezek fontos szerephez jutnak az exponenciális és logaritmus erősítők felépítésében.

A 9–10. ábrákon ugyanazon tranzisztor kollektorárama látható a kollektor-emitter feszültség függvényében különböző I_B , ill. U_{BE} értékek, mint paraméterek mellett. Ezek az ún. kimenő karakterisztikák. Látható, hogy kb. $U_{CE} > 0,3 \text{ V}$ esetén a kollektoráram gyakorlatilag nem függ a kollektorfeszültségtől.

A 11. és 12. ábrán ugyanazon tranzisztor kimenő karakterisztikái láthatók, de lényegesen nagyobb kollektoráramoknál. Ezeken az ábrákon a kollektoráram már jelentősen függ a kollektorfeszültségtől, de az $U_{CE} > 0,7 \text{ V}$ tartományban a karakterisztikák itt is lineárisak.

$$i_B = \frac{u_B}{r_B} = \frac{u_B}{r_{BB'} + r_{BE}} \quad (3.1)$$

bázisáram jön létre. A kollektorfeszültség megváltozása a következő:

$$u_C = U_C - U'_C = (U_t - I_C \cdot R_C) - (U_t - I'_C \cdot R_C) = i_C \cdot R_C \quad (3.2) \quad (*)$$

Mivel a kollektoráram a bázisáram β -szorososa, így

$$u_C = -\beta i_B R_C = \frac{u_B}{r_{BB'} + r_{BE}} \beta R_C = -\frac{\beta R_C}{r_{BB'} + (\beta + 1)r_E} u_B \quad (3.3)$$

A bázisra vonatkoztatott feszültség erősítést u_C és u_B hányadosa definiálja:

$$A_B = \frac{u_C}{u_B} = -\frac{\beta R_C}{r_{BB'} + (\beta + 1)r_E} \quad (3.4)$$

Látható, hogy az erősítés függ az emitteráramtól, hiszen $r_E = U_T / I_E$. Ez lehetővé teszi azt, hogy az emitteráram szabályozásával az erősítést megváltoztassuk. (Ekkor I_B -t a szabályozó feszültség segítségével állítjuk elő).

Példa. Tegyük fel, hogy a 14. ábrán látható kapcsolásnál $r_{BB'} \approx 70$ ohm és $\beta = 86$. Mivel $r_E = 26 \text{ mV} / 4,93 \text{ mA} = 5,27$ ohm, a (3.4) összefüggés nevezője $(70 + 87 \cdot 5,27)$ ohm $= 528$ ohm. Az erősítésre $A_B = -86 \cdot 1500 / 528 = -244$ adódik. Észrevehető, hogy $r_{BB'}$ figyelembevétele 20%-nál kisebb hatást gyakorol az eredményre.

Az erősítésnek az emitteráramtól való függése jelzi azt is, hogy az erősítő csak kis áramváltozások esetén tekinthető közelítőleg lineárisnak. Ennek pontosabb vizsgálatához írjuk fel a bázisáramot a bázisfeszültség függvényében! Tegyük fel, hogy a bázis-emitter dióda leírható a dióda egyenlettel és $U_{BE} \gg U_T$. Legyen $U_{BE} = U'_{BE} + u_B$ és jelöljük az átlagos bázisáramot I'_B -vel. Ekkor

$$I_B \approx I_{BS} \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) = I_{BS} \exp\left(\frac{U'_{BE}}{U_T}\right) \exp\left(\frac{u_B}{U_T}\right) = I'_B \exp\left(\frac{u_B}{U_T}\right) \quad (3.5)$$

ahol I_{BS} a dióda telítési árama. Fejtsük sorba az exponenciális kifejezést!

$$I_B = I'_B \left[1 + \frac{u_B}{U_T} + \frac{1}{2!} \left(\frac{u_B}{U_T}\right)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{u_B}{U_T}\right)^3 + \dots \right] \quad (3.6)$$

A bázisáram i_B megváltozása,

(3.11)-et (3.10)-zel összevetve észrevehető, hogy R_2 elhagyása miatt I_C értéke lényegesen megnövekedett. Ennek ellensúlyozására R_1 értékét is meg kell növelni, hogy az előzőekhez közel eső kollektoráramot kapjunk.

Példa: Legyen $R_1=1,2$ Mohm, $R_E=120$ ohm, $U_t=20$ V, $U_{BE}=0,7$ V. Ekkor $B=90$, ill. 220 esetén (3.11)-ből $I_C=1,434$ mA-t, ill. $I_C=3,462$ mA-t kapunk.

A 14. ábrán $R_E=0$, így a kollektoráram kifejezése a következő:

$$I_C = \frac{(U_t - U_{BE}) B}{R_1} \quad (3.12)$$

Általában R_1 3–4 nagyságrenddel nagyobb, mint R_E , ezért (3.11) értéke közelítőleg megegyezik (3.12) értékével. Ez azt jelenti, hogy a 14. ábrán, ill. a 15a. ábrán látható kapcsolásoknál a kollektoráram gyakorlatilag ugyanolyan mértékben függ B -től és a kollektorfeszültség B értékének (pl. a hőmérsékletváltozás miatti) megváltozásával jelentősen megváltozhat.

Példa: Legyenek ugyanazok az adatok érvényesek mint az előző esetben, de $R_E=0$. Ekkor a $B=90$ és a $B=220$ esetekben $I_C=1,447$ mA, ill. $I_C=3,538$ mA adódik, ami alig tér el az előző példában kapott értékektől.

Számítsuk ki a 15a., ill. 15b. ábrákon szereplő kapcsolások erősítését! A bázisfeszültség kifejezhető a bázisárammal:

$$\begin{aligned} u_B &= u_{BE} + u_E = (r_{BB'} + r_{B\beta}) i_B + R_E i_E = \\ &= [r_{BB'} + r_{B\beta} + (\beta + 1) R_E] i_B = [r_{BB'} + (\beta + 1)(r_E + R_E)] i_B. \end{aligned} \quad (3.13)$$

A kollektorfeszültség a bázisáramból kiszámítható:

$$u_C = -i_C R_C = -\beta i_B R_C = \frac{-\beta R_C u_B}{r_{BB'} + (\beta + 1)(r_E + R_E)}, \quad (3.14)$$

tehát

$$A_B = \frac{u_C}{u_B} = \frac{-\beta R_C}{r_{BB'} + (\beta + 1)(r_E + R_E)} \approx \frac{-R_C}{r_E + R_E}. \quad (3.15)$$

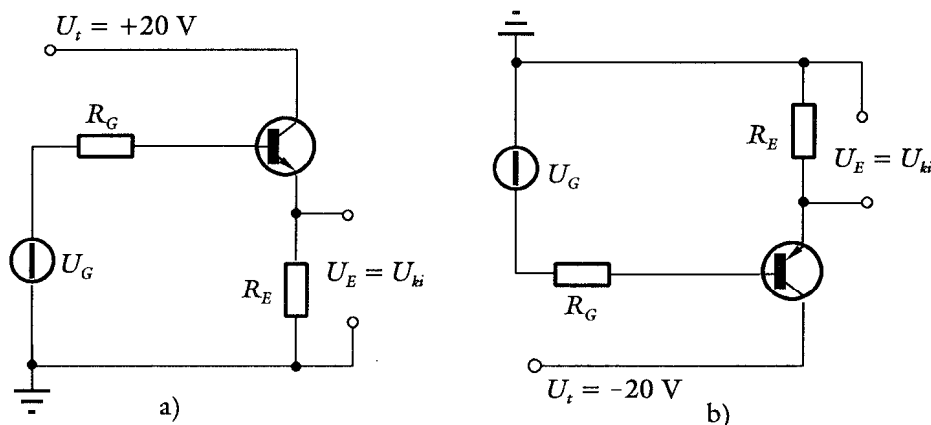
Az utóbbi, közelítő kifejezés az erősítés gyors megbecslésére alkalmas.

Példa: Legyen ismét $R_C=1,5$ kohm, $r_{BB'}=70$ ohm, $I_C=5$ mA, $\beta=86$ és $R_E=120$ ohm. Ekkor $r_E=(26 \text{ mV})/(5 \text{ mA})=5,2$ ohm, és (3.15) nevezője $70+87(5+120)=10945$ ohm, tehát A_B „pontos” értéke 11,79. Ezt összevetve a korábban számított

lentősen befolyásolja, a harmadiknál nem. Az u_B/u_G viszonyt a harmadik kapcsolásban szereplő R_2 ellenállás lényegesen csökkenti.

Megjegyezzük, hogy ebben a pontban a tranzisztor kollektoráramát U_{CB} -tól függetlennek, azaz r_C -t végtelennek tekintettük. Az eddigi összefüggések helyesebb eredményt adnának ha R_C helyett R_C és r_C párhuzamos eredőjével számolnánk. Sajnos, rendszerint r_C értéke ismeretlen, viszont általában $r_C \gg R_C$, így az elkövetett hiba lényegtelen.

b) A közös kollektoros vagy ún. emitterkövető kapcsolás a teljesítményerősítők végfokozatában gyakori. A kapcsolás legfontosabb jellemzője, hogy a kimenő ellenállása lényegesen kisebb, mint a bemenő ellenállás, de feszültséget nem erősít, sőt az erősítés értéke 0,8–0,9. A kapcsolás legegyszerűbb változatai a 16. ábrán láthatók. Az U_G feszültség generátor feszültsége határozza meg a bázisfeszültséget. A kimenet az emitter, amelynek feszültsége egy majdnem állandó (0,6–0,7 V) feszültséggel tér el



16. ábra. Emitterkövető v. közös kollektoros kapcsolás npn illetve pnp tranzisztorral.

a bázis feszültségétől. Számítsuk ki a kapcsolás erősítését! A generátorból kifolyó áram megegyezik a bázisárammal. A generátor u_G feszültségváltozása megegyezik az R_G -n létrejövő $R_G i_B$ feszültségesés, u_{BE} és u_E összegével:

$$u_G = R_G i_B + u_{BE} + u_E, \quad (3.20)$$

így

$$u_G = R_G i_B + (r_{BB'} + (\beta + 1)r_E) i_B + i_E R_E. \quad (3.21)$$

A kimenő feszültség az emitter u_E feszültsége, ami kifejezhető a bázisárammal: