

B-osztályú hangerősítők teljesítményviszonyai

Záborszky László okl. villamosmérnök

Különböző üzemmódú hangerősítők összehasonlítása

Megkülönböztetünk A-, AB- és B-osztályú teljesítményerősítőket, újabban pedig modern készülékekben pl. házimozi-rendszerekben kapcsolóüzemű hangerősítőket is előszeretettel használnak. Ez a sorrend egyre jobb hatásfokot jelent. Hatásfok (η) alatt a leadott hasznos teljesítmény és a tápegységből felvett összes teljesítmény hányadosát értjük:

$$\eta = 100P_H/P_0 [\%]$$

Legrosszabb hatásfoka az A-osztályú erősítőnek, legjobb hatásfoka pedig a kapcsolóüzemű erősítőnek van. Az A-osztályú erősítő lehet együtemű, lehet ellenütemű is, de az AB- és B-osztályú erősítők csak ellenüteműek lehetnek. Az analóg elven működő erősítők közül a B-osztályú erősítő a legjobb hatásfokú. B-osztályúnak tekinthetjük azt az erősítőt, ahol a teljesítményerősítő eszközökön (bipoláris tranzisztor, vagy FET) csak csekély nyugalmi áramot folyatunk át, akkorát, hogy a keresztelési torzítás éppen eltűnjön. Az AB-osztályú erősítő abban különbözik az előzőtől, hogy jelentősebb a nyugalmi árama. Az AB-osztályú erősítő kis kivezérléseknél A-osztályúként működik, nagyobb kivezérlésnél átmeny B-osztályú működésbe. Vizsgálatainkban szinuszzel történő vezérléssel számolunk. B-osztályban az erősítő eszközök felváltva működnek. A szinuszel egyik félperiódusában

az egyik tranzisztor szolgáltatja az áramot a terhelés (hangszóró) felé, ezalatt a másik tranzisztor le van zárva, nem vezet. A másik félperiódusban felcserélődnek a szerepek, amelyik vezetett, az lezár, és amelyik lezárt volt az vezet.

A B-osztályú erősítő maximális elméleti hatásfoka 78,5%, az A-osztályúé pedig 50%. Ez csak elméleti határeset, akkor valósulna meg, ha az erősítőt teljesen, a tápfeszültségig ki lehetne vezélni, tehát az erősítő eszközökön nulla lenne a maradékfeszültség. A tényleges maximális hatásfok az előbbi értékeknél mindig kisebb. Az AB-osztályú erősítő hatásfoka valahol a két érték között van. Ez az összehasonlítás azonban nagyon csalóka, mert csak a maximális kivezérlésre vonatkozik. Kisebb kivezérléseknél sokkal nagyobbak a különbségek. Ezt az **1. táblázat** mutatja.

E nagy eltérésnek oka az, hogy a B-osztályú erősítő hatásfoka a kivezérlés csökkenésével lineárisan csökken, az A-osztályúé pedig négyzetesen. A fizikai ok az, hogy az A-osztályú erősítő tápegységből felvett teljesítménye, akár van kivezérlés, akár nincs, mindig maximális. A B-osztályú erősítő tápegységből felvett teljesítménye pedig a kivezérléssel arányos, kis kivezérlésnél a felvett teljesítmény is kisebb. Ezért azonos kimenőteljesítmények esetén az A-osztályban sokkal nagyobb hűtőborda szükséges.

Ezzel ellentétben, a kapcsolóüzemű erősítőknél alig találunk hűtőbordát. Egy 6 csatornás, több száz watt összteljesítményű házi-

mozi erősítő elfér egy aránylag lapos dobozban. Hogyan lehetséges ez? Úgy, hogy a kapcsolóüzemű erősítő elméleti hatásfoka 100%, a tényleges hatásfok persze valamivel kisebb. A kapcsolóüzemű erősítőben levő félvezetőkön alig disszipálódik hő, mert csak két állapotban lehetnek. Vagy teljesen kinyitnak, ekkor folyik rajtuk áram, de a félvezetőn minimális feszültség esik, vagy teljesen lezárnak, ekkor maximális rajtuk a feszültség, de az áram nulla. A két állapot közötti átváltás nagyon gyors és szapora. A kapcsolgatás frekvenciájának a maximális üzemi frekvencia felett kell lennie.

Most a kapcsolóüzemű erősítők részletes működési elvével nem foglalkozunk, ehelyett maradjunk csak a B-osztályú erősítőnél, amelynek teljesítményviszonyait elemezzük. Négy esetet tárgyalunk, és tárgyalásunk során szinuszzel történő vezérlést tételezünk fel. Vizsgáljuk a vezérlőjel egy periódusára integrált átlag teljesítményeket ohmos terhelés és reaktív terhelés esetére. Továbbá kiszámítjuk a félvezető (tranzisztor) perióduson belüli pillanatnyi maximális teljesítményeit és az ehhez tartozó fázisszögeket, szintén ohmos terhelés és reaktív terhelés esetén. A számításokhoz nélkülözhetetlen bizonyos trigonometriai összefüggések és az integrálszámítás ismerete, de az integrálszámításoknál csak a kiinduló képletet és a végeredményt közlöm. Azoknak az olvasóknak, akik nem eléggé járatosak a matematikában, azt javasolom, hogy csak a végképletet és a hozzájuk fűzött magyarázatokat értelmezzék.

Átlag teljesítmények ohmos terhelés esetén

Az **1. ábra** két-tápfeszültségű ellenütemű végfokozatot, a **2. ábra** pedig egy-tápfeszültségű, kondenzátoros kicsatolású ellenütemű

1. táblázat

Kivezérlés [%]	Hatásfok [%]	
	A-osztályú	B-osztályú
100	50	78,5
50	12,5	39,3
25	3,1	19,6
10	0,5	7,85

végfokozatot mutat vázlatosan, csak a számítás szempontjából fontos elemek feltüntetésével. A T_1 végtranzisztor npn, a T_2 pnp típusú. A számítást az 1. ábra szerinti elrendezésre végezzük. A kiszámított képletek érvényesek a 2. ábra szerinti elrendezésre is, azzal a különbséggel, hogy U_T helyébe mindenütt $U_T/2$ értéket kell beírni. A kimeneti terhelésen megjelenő „f” frekvenciájú szinuszos váltófeszültség:

$$U_{ki} = U_{cs} \sin 2\pi ft$$

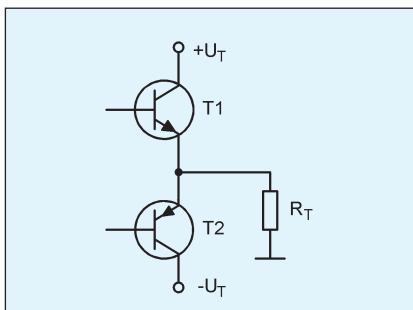
Mivel a teljesítmények számításánál a frekvenciának nincs jelentősége, a szinuszfüggvény változóját az egyszerűség kedvéért jelöljük x -szel:

$$U_{ki} = U_{cs} \sin x$$

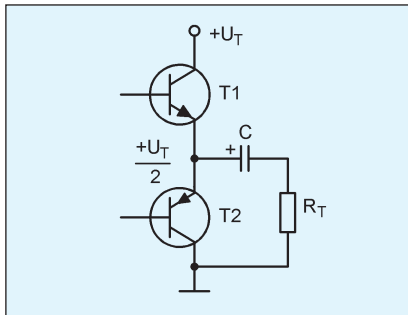
A 3. ábra a kimenőfeszültség időbeli változását mutatja. Az ábrán berajzoltuk a pozitív és a negatív tápfeszültség egyenesét, amelyeket a kimenőfeszültség csúcserőke csak megközelíthet, de teljesen nem érhet el, mert az erősítő eszközökön (tranzisztorokon) is marad valamekkora feszültség. Az a jobb hatásfokú erősítő, amely jobban kivezérelhető, amelynél a kimenőfeszültség csúcserőke minél jobban megközelíti a tápfeszültséget. A jel pozitív félperiódusában a T_1 tranzisztor szolgáltatja az áramot a terhelés felé a pozitív tápegységből (ekkor T_2 nem vezet), a negatív félperiódusban pedig a T_2 szolgáltatja a kimenőáramot a negatív tápegységből.

A „k” kivezérlési tényezőt viszonyítsuk a tápfeszültség értékéhez:

$$k = U_{cs} / U_T$$



1. ábra



2. ábra

Ha így számolunk, akkor k maximális értéke mindig kisebb 1-nél:

$$0 \leq k < 1$$

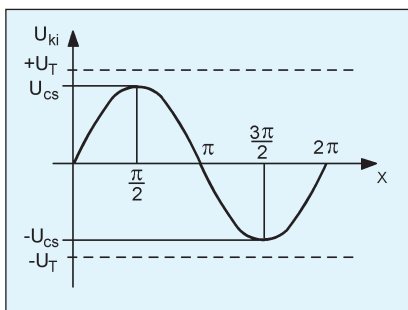
Ezzel a módszerrel a tranzisztorokon maradó veszteségi teljesítmény kiszámítása egyszerűbb. Először számítsuk ki a terhelésen megjelenő hasznos teljesítményt:

$$P_H = U_{ki}^2 / R_T$$

Az U_{ki} feszültség szinuszfüggvény szerint pillanatról pillanatra változik, ezért, hogy az átlagos teljesítményt kiszámíthassuk integrálni (átlagolni) kell. A pozitív és negatív félperiódus szimmetriája miatt elég, ha az integrálást 0 és π között végezzük el, π -vel azért kell osztani, mert a teljesítményt időegységre kell számítani. Definíció szerint, a teljesítmény időegység alatt végzett munka.

$$\begin{aligned} P_H &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \frac{(U_{cs} \cdot \sin x)^2}{R_T} \cdot dx = \\ &= \frac{U_{cs}^2}{\pi \cdot R_T} \left[\frac{\pi}{2} \right] = \frac{U_{cs}^2}{2 \cdot R_T} \end{aligned}$$

A hasznos, leadott teljesítmény után számítsuk ki a tápegységből felvett összes teljesítményt. A táp-



3. ábra

egység által leadott teljesítményt megkapjuk, ha a tápfeszültséget szorozzuk a tápegységből kifolyó árammal. Ez az áram a végtranzisztorokon keresztül a terhelésbe folyik, azonos a terhelésen átfolyó árammal, amely szinuszfüggvény szerint változik:

$$I = \frac{U_{cs} \cdot \sin x}{R_T}$$

Az összes teljesítmény pedig:

$$P_{\text{Ö}} = U_T \cdot I = \frac{U_T \cdot U_{cs} \cdot \sin x}{R_T}$$

Mivel ez a teljesítmény is pillanatról pillanatra változik, az átlagos teljesítményt úgy kapjuk meg, ha integrálunk:

$$\begin{aligned} P_{\text{Ö}} &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \frac{U_T \cdot U_{cs} \sin x}{R_T} \cdot dx = \\ &= \frac{2 \cdot U_T \cdot U_{cs}}{\pi \cdot R_T} \end{aligned}$$

A pozitív félperiódusban ezt a teljesítményt adja le a pozitív tápegység, de a negatív félperiódusban a szimmetria miatt ugyanekkora teljesítményt ad le a negatív tápegység is. Tehát a teljes tápegység átlagos teljesítménye ugyanekkora. Mit látunk ebből a képletből? Azt, hogy a tápegység által leadott teljesítmény arányos a kimenőfeszültség csúcserőkével. Ha kisebb a kimenőamplitúdó, akkor kisebb a fogyasztás is. Ha nincs kivezérlés, nulla az amplitúdó, akkor elvileg nulla a fogyasztás is. A valóságban a beállított csekély nyugalmi áram azonban ilyenkor is eredményez valamekkora fogyasztást.

A hasznos és az összes teljesítmény ismeretében a hatásfokot is ki tudjuk számítani:

$$\begin{aligned} \eta &= 100 \cdot \frac{P_H}{P_{\text{Ö}}} = \\ &= 100 \cdot \frac{U_{cs}^2}{2 \cdot R_T} \cdot \frac{\pi \cdot R_T}{2 \cdot U_T \cdot U_{cs}} = \\ &= 100 \cdot \frac{U_{cs} \cdot \pi}{4 \cdot U_T} \end{aligned}$$

Mivel a „k” kivezérési tényező: $k = U_{cs}/U_T$, a hatásfok így is felírható:

$$\eta = 100 \cdot \frac{k \cdot \pi}{4}$$

A hatásfok egyenesen arányos a kivezéréssel, annál jobb, minél nagyobb lehet a csúcshatásfokhoz viszonyítva. Elméleti maximális hatásfok akkor van, ha a csúcshatásfok eléri a tápfeszültséget ($U_{cs} = U_T$) és $k=1$, ekkor a hatásfok:

$$\eta_{max} = 100 \cdot \frac{\pi}{4} = 78,54\%$$

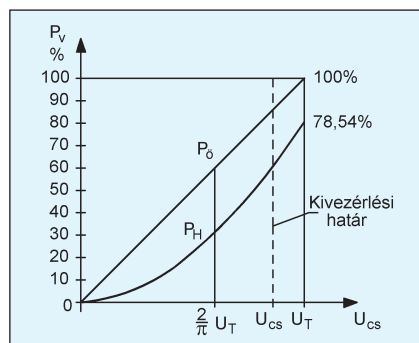
A gyakorlatban ezt az elméleti maximális hatásfokot nem lehet elérni, mert az erősítőt nem lehet teljesen a tápfeszültség kivezérelni.

A 4. ábrán láthatjuk az összes és a hasznos teljesítményt a kivezérés függvényében. Az ábrán 100%-nak tekintjük az összes teljesítmény maximális értékét. Látható, hogy a hasznos teljesítmény négyzetesen emelkedik, az összes teljesítmény pedig lineárisan.

Ezzel még nem értünk a számításaink végére. Ki kell még számítani a veszteségi teljesítményt is, azt a teljesítményt, ami a tranzisztorokon marad, amit el kell disszipálni a hűtőbordán. A tranzisztoron maradó teljesítmény kiszámítható, ha a tranzisztoron eső feszültséget szorozzuk a kimenő árammal:

$$P_V = (U_T - U_{ki}) I_{ki}$$

P_V értékét megkaphatjuk integrálással, de egyszerűbben úgy is,



4. ábra

hogy az összes teljesítményből kivonjuk a hasznos teljesítményt (mindkét számítással ugyanazt az eredményt kapjuk):

$$\begin{aligned} P_V &= P_O - P_H = \\ &= \frac{2 \cdot U_T \cdot U_{cs}}{\pi \cdot R_T} - \frac{U_{cs}^2}{2 \cdot R_T} = \\ &= \frac{U_T \cdot U_{cs}}{R_T} \left[\frac{2}{\pi} - \frac{U_{cs}}{2 \cdot U_T} \right] \end{aligned}$$

P_V kifejezhető a „k” kivezérési tényező segítségével is:

$$P_V = \frac{U_T^2}{R_T} \left[\frac{2 \cdot k}{\pi} - \frac{k^2}{2} \right]$$

Érdekes, hogy nem a maximális kivezéréskor legnagyobb a veszteségi teljesítmény, hanem egy közbelső kivezéréskor maximuma van, pontosan akkor, ha:

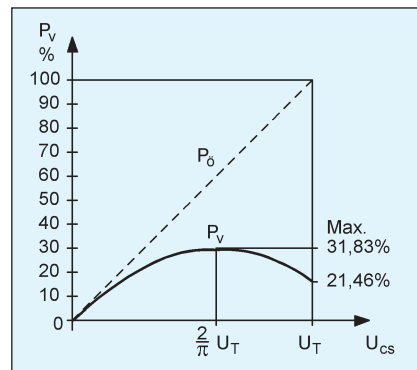
$$k = U_{cs}/U_T = 2/\pi = 0,6366$$

Számítsuk ki ezt a maximális disszipációt, $U_{cs} = 2U_T/\pi$ behelyettesítéssel elvégezve:

$$\begin{aligned} P_{Vmax} &= \frac{2 \cdot U_T^2}{\pi \cdot R_T} \cdot \left[\frac{2}{\pi} - \frac{2 \cdot U_T}{2 \cdot \pi \cdot U_T} \right] = \\ &= \frac{2 \cdot U_T^2}{\pi^2 \cdot R_T} \end{aligned}$$

B-osztályú erősítőknél tehát 63,66%-os kivezéréskor legjobban a hűtőborda, ekkor a hasznos és a veszteségi teljesítmény azonos, a hatásfok éppen 50%. 63,66% kivezérés alatt a hatásfok kisebb, mint 50%. Az 5. ábra mutatja a veszteségi teljesítményt a kivezérés függvényében a 4. ábrával azonos léptékben, a görbének lapos maximuma van.

A veszteségi teljesítmény a pozitív félperiódusban a „felső” npn tranzisztoron, a negatív félperiódusban az „alsó” pnp tranzisztoron keletkezik. Mivel a két tranzisztor legtöbbször egy hűtőbordára van (szigetelten) felszerelve, a hűtőborda szempontjából az a helyzet, mintha folyamatosan a fentebb kiszámított teljesítmény jutna rá. Természetesen az egyik tranzisztorra jutó, egész periódusra számított átlag teljesítmény fele a kiszámított P_V értékének. De a tranzisztor szempontjából nemcsak az átlagteljesítmény, hanem a rövid idő alatt fellépő pillanatnyi maximális teljesítmények is számítanak. Ezek a pillanatnyi maximális teljesítmények, mint a későbbi számításokban látni fogjuk, még a félperiódusra átlagolt P_V értékénél is nagyobbak.



5. ábra

Ahhoz, hogy a számítás szemléletesebb legyen, nézzünk egy konkrét példát! Legyen egy B-osztályú erősítőnk, amelyik $R_T = 8 \Omega$ terhelésre kb. 50 W hasznos teljesítményt tud leadni. A tápfeszültség legyen ± 32 V. Az erősítő legyen jól kivezérhető, a maximálisan, torzítatlanul kivehető szinuszfeszültség csúcserőértéke legyen a tápfeszültség 90%-a, tehát $\pm 28,8$ V. Ekkor a 8Ω -os terhelésen megjelenő maximális teljesítmény: $P_H = 51,84$ W. 28,8 V csúcshatásfoknál a tápegység által leadott összes teljesítmény: $P_O = 73,34$ W. Az előbbi két adatból számított hatásfok: $\eta = 70,69\%$, tehát kisebb, mint az elméleti maximális 78,5%.

A maximális kimenőteljesítménynél (90%-os kivezérés) a veszteségi teljesítmény:

$$P_V = 73,34 - 51,84 = 21,5 \text{ W}$$

A hűtőbordán fellépő maximális veszteségi teljesítmény azonban ennél nagyobb, akkor maximális, amikor a kimeneti csúcshatásfok a tápfeszültség $2/\pi$ szerese. Ekkor $U_{cs} = 20,37$ V, és $P_{Vmax} = 25,94$ W.

(Folytatjuk)