FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 1999. március 19-20.

Idealizált e-osztályú erősítők hatásfokának optimalizálása feszültségugrások beállítással

Telegdy Attila

Abstract: Continuous voltage waveform (for the topology with shunt capacitance) is a necessary condition for lossless operation of the Class-E amplifier. Previous papers extend the continuous waveform requirement for the lossy (finite transition period) case too and consider that this is a condition for optimum operation. This paper shows that the discontinuous voltage waveform can improve the efficiency of the amplifier. At moderate voltage jump the turn-on loss produced by discharging the parasitic shunt capacitance is regained at turn-off because the voltage discontinuity decreases the current jump at turn-off. Up to the optimum limit of the voltage jump, overall switching loss improvement can be observed. A new efficiency formula is given for the idealized amplifier and the optimum voltage jump is calculated. Computer simulation (using PSPICE) has confirmed that continuous voltage waveform is not optimal from the efficiency point of view and the optimum tuning is with a discontinuous voltage waveform.

Bevezetés

Bár a kapcsolóüzemű erősítők elvi hatásfoka 100%, a nagyfrekvencián működő erősítők esetén a veszteség komoly problémát jelent. A kapcsolóként használt aktív eszköz minden egyes bekapcsoláskor kisüti a saját kapcsai között jelentkező nem kívánt kapacitást. A benne tárolt energia a kapcsolót melegíti és elvész. Az E-osztályú erősítő ezt a problémát úgy oldja meg, hogy megfelelő behangolás esetén a kapcsolót beágyazó külső hálózat nulla feszültséget kényszerít a tranzisztorra a bekapcsolás pillanatában és így a nemkívánt tárolt energia -amely a bekapcsolási veszteséget okozza- eltűnik¹ [1], [2].. Az E-osztályú erősítővel foglalkozó irodalom részletesen tárgyalja az erősítő beállításának, hatásfokának [5], optimális működésének kérdéseit és a szakadásmentes jelalakok elvi feltételét [3], [4]. E publikációk központi gondolata a nulla feszültségű bekapcsolás - mint az ideálist megközelítő -jó hatásfokú- működés feltétele. A következőkben bemutatott vizsgálatok kimutatták, hogy a ideális (lassú) kapcsolók alkalmazása esetén a nulla feszültségű bekapcsolás (ZVS-zero voltage switching) nem eredményezi a maximális hatásfokú működést. Kismértékű negatív feszültségugrás a bekapcsoláskor -amely az erősítő megfelelő hangolásával érhető el- kedvező hatással van az erősítő hatásfokára.

¹ Ehhez hozzájárul az is, hogy nemcsak a feszültség nulla a bekapcsolás előtt, hanem a kapcsolót tápláló áram is nulla a bekapcsolást közvetlenül követő pillanatban.

Bekapcsolási veszteség

A következő idealizálásokat vezetjük be a számítás során:

1. A kapcsoló telítési feszültsége nulla, és kikapcsolt állapotban az ellenállás végtelen.
2. A kapcsoló átkapcsolási idői nullák (gyors kapcsoló).
3. A kimeneti soros rezgőkör jósaági tényezője elegendően nagy az alapharmonikus teljes kiszűrésére.
4. A rádiófrekvenciás folyótékercs induktivitása végtelen, vesztesége nulla.
5. A kimeneti hálózat (a párhuzamos kapacitást is beleértve) lineáris és veszteségmentes.

Ezekkel a feltételekkel jó közelítéssel számolhatók az erősítő jelalakjai. A kikapcsolási veszteség figyelembevételénél a 2. feltételt figyelmen kívül hagyva, véges átkapcsolási idővel számolhatunk. Ez a vegyes módszer kis hibát eredményez, ha az átkapcsolási idők kicsik.

1. ábra. E-osztályú erősítő elvi kapcsolási rajza és ideális jelalakjai

Az 1. ábrán látható erősítő esetén a kapcsoló-söntkapacitás párost töltő teljes áram és a kapcsolón levő feszültség

$$i(t) = I_i + I_s \sin(\omega t) + I_c \cos(\omega t) = I_i + \text{Im}[(I_s + jI_c)e^{j\omega t}] \quad (1)$$

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau = \frac{1}{C} \left(I_i t + \frac{I_s}{\omega} - \frac{I_s}{\omega} \cos(\omega t) + \frac{I_c}{\omega} \sin(\omega t) \right) \quad (2)$$

Célunk úgy beállítani az áramkört, hogy a bekapcsolás $\theta = \Gamma$ elektromos szögének értékénél a kapcsolón levő feszültség ΔU legyen. További feltételként követeljük, hogy a párhuzamos kapacitást töltő áram $i(\Gamma/\omega) = 0$. Ezekkel a feltételekkel az kimeneti áram szinuszos és koszinuszos komponenseire egy lineáris egyenletrendszert kapunk, amely 50%-os kitöltési tényező esetén a (3) alakba írható.

$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\pi}{2} & \omega C \cdot \frac{1}{2} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3)$$

Az áram integrálásával a kapcsoló feszültség-időfüggvénye adódik, amelynek átlagértéke a V_0 tápfeszültség. A bekapcsolási veszteség a kapcsolóval párhuzamosan kapcsolt kapacitásban tárolt energiából adódik, amely arányos a bekapcsolási feszültség négyzetével. Ha Δ -val jelöljük a

fesztségugrás tápfeszültségre vonatkoztatott relatív értékét és P_0 a relatív teljesítmények referenciaértéke, akkor az (4) egyenlet adódik a relatív bekapcsolási veszteségre.

2. ábra Relatív kapcsolási veszteség

$$P_{rON} = -\frac{1}{8\pi} \frac{(\Gamma^2 - 4)\cos(\Gamma) - 4\Gamma \sin(\Gamma) + \Gamma^2 + 4}{2\pi(\cos(\Gamma) - 1) + (\sin(\Gamma) - \Gamma \cos(\Gamma))\Delta} \Delta^2 \quad (4)$$

50% kitöltési tényező esetén $\Gamma = \pi$ és

$$P_{rON} = \frac{\Delta^2}{\pi^2(4 - \Delta)} \quad (5)$$

Kikapcsolási veszteség

A kapcsolón kikapcsoláskor disszipálódó energia a kikapcsolt áram nagyságától függ. A (3) egyenletet az (1) be visszahelyettesítve megkapjuk a teljes áram időfüggvényt a Δ fesztségugrás

függvényében. Ez az áram a kikapcsolás $t = 0$ pillanatában éppen a kapcsoló áramugrásával egyenlő, amelynek a tápáramhoz viszonyított relatív értéke.

$$i_r(0) = \sqrt{\pi(4 - \Delta)} \quad (6)$$

Feltételezzük, hogy a kikapcsolás során az áram időben lineárisan csökken le nullára és az átkapcsolási időnek megfelelő elektromos szög Θ_0 . A lineáris csökkenés következtében a párhuzamos kapacitást töltő maradék áram $i_{chg}(t)$ időben egyenletesen növekszik.

$$i_{rsw}(t) = \sqrt{\pi(4 - \Delta)} \cdot \left(1 - \frac{\omega t}{\Theta_0}\right); \quad i_{rchg}(t) = \sqrt{\pi(4 - \Delta)} \cdot \frac{\omega t}{\Theta_0} \quad (7)$$

A kikapcsolás időtartama alatt a kapcsolón megjelenő feszültség a lineárisan változó töltőáram miatt négyzetesen növekszik. A kikapcsolási veszteségi teljesítmény

$$P_{OFF} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\Theta_0} v_{sw}(t) i_{sw}(t) dt \quad (8)$$

A számítások elvégzése után a kikapcsolási veszteség relatív értéke

$$P_{rOFF} = \frac{4 - \Delta}{48} \Theta_0^2 \quad (9)$$

A teljes kapcsolási veszteség a ki- és a bekapcsolási veszteség összegével egyenlő.

$$P_r = P_{rOFF} + P_{rON} = \frac{\Delta^2}{\pi^2(4 - \Delta)} + \frac{4 - \Delta}{48} \Theta_0^2 \quad (10)$$

Az erősítő kikapcsolási hatásfoka

$$\eta = 1 - P_r = 1 - (P_{rOFF} + P_{rON}) = 1 - \frac{\Delta^2}{\pi^2(4 - \Delta)} - \frac{4 - \Delta}{48} \Theta_0^2 \quad (11)$$

A (10) függvény kétdimenziós grafikus ábrázolása a 2. ábrán látható.

Fizikai jelentéssel csak a palást felső részének origóhoz közel eső tartománya bír. A lokális szélsőérték helye (a Δ ugrás függvényében) egy másodfokú egyenlet megoldásaként a parciális derivált nullázásából adódik.

$$\Delta_{1,2} = \frac{384 + 8\Theta_0^2\pi \pm \sqrt{144 + 3\Theta_0^2\pi^2}}{2(48 + \Theta_0^2\pi^2)} \quad (12)$$

Fizikai jelentése a negatív előjeles megoldásnak van. Az optimális hatásfok új kifejezése a kikapcsolási szög függvényében

$$\eta_{opt}(\Theta_0) = \frac{\pi^2 + 8}{\pi^2} - \frac{2(\Theta_0^2\pi^2 + 48)}{\pi^2\sqrt{144 + 3\Theta_0^2\pi^2}} \quad (13)$$

Új eredmények

Az idealizált elméleti vizsgálatok igazolják, hogy véges átkapcsolási idejű aktív eszközök használata esetén a -szakirodalomban széleskörűen elfogadott- nulla feszültségű bekapcsolási feltétel nem eredményezi az optimális hatásfokú működést. Kismértékű feszültségugrás a kapcsoló bekapcsolásakor kedvezően befolyásolja az erősítő hatásfokát. A bemutatott idealizált esetre új hatásfokképlet adódik, amely figyelembe veszi a beállított feszültségugrás kapcsoló áramra gyakorolt hatását. PSPICE program segítségével végzett számítógépes szimulációs vizsgálatok igazolják a feszültségugrásos beállítás szükségességét.

A jelen munkát a Magyar Köztársaság Országos Tudományos Kutatási Alapja (OTKA) támogatta. Nyilvántartási száma: T017576.

Hivatkozások

- [1] N. O. Sokal and A. D. Sokal, "Class E - A New Class of High-Efficiency Tuned Single-Ended Switching Power Amplifiers," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. SC-10, pp.168-176, June 1975.
- [2] F. H. Raab, "Idealized Operation of the Class E Tuned Power Amplifier," IEEE Trans. Circuits and Systems, vol. CAS-24, pp.725-735, Dec. 1977.
- [3] K. J. Harman and R. E. Zulinski, "The infesibility of a Zero-Current-Switching class E amplifier," IEEE Trans. Circuits Systems, vol. CAS-37, pp. 152-154, Jan. 1990.
- [4] B. Molnár, "Basic Limitations on Waveforms Achievable in Single Ended Switching Mode Tuned (Class E) Power Amplifiers," IEEE J. Solid state circuits, vol. SC-19, pp. 144-146, Feb. 1984.
- [5] J. A. Blanchard and J. S. Yuan, "Effect of Collector Current Exponential Decay on Power Efficiency for Class E Tuned Power Amplifier," IEEE Trans. Circuits and Systems, vol. CAS-41, pp. 69-72, Jan. 1994.

Telegdy Attila

Budapesti Műszaki Egyetem, Mikrohullámú Híradástechnika Tanszék

H-1111 Budapest, Goldmann György tér 3.

Tel. 00-36-1-4631837. Fax. 00-36-1-4633289

Email: attila@docs4.mht.bme.hu, d-telegdy@nov.mht.bme.hu