

Výstupní PI článek KV zesilovače jednoduše a bez matematiky...

Bc. Tomáš Kavalír, OK1GTH kavalir.t@seznam.cz, <http://ok1gth.nagano.cz>

Tento článek vznikl z důvodu, že jsem pro svoji diplomovou práci potřeboval sehnat dostatečné množství informací o návrhu výstupního PI článku, ale po prostudování dostupné literatury jsem došel k závěru, že prakticky neexistuje souhrnný soubor, který by tuto problematiku odpovídajícím způsobem řešil. Jediný článek, který jsem našel a který se trochu do hloubky zabývá návrhem výstupního PI článku koncového stupně pro KV je z roku 1986 [1]. Ale bohužel veškeré spočítané hodnoty jsou určeny pro zatěžovací impedanci 75 ohm, což bylo poplatné době. Proto vznikl tento prakticky zaměřený článek, který by pomohl vysvětlit pár základních principů návrhu a umožňuje si výstupní (zatěžovací) impedanci zvolit...

Samozřejmě někdo by mohl namítnout, že existuje obrovské množství různých softwarů, zabývajících se výpočtem parametrů výstupních obvodů koncových stupňů, tak proč to počítat ručně. Toto je samozřejmě pravda, ale také si myslím, že každý, kdo takovéto programy používá, by měl mít alespoň základní představu o fyzikálních vlastnostech obvodu, který navrhuje a také co se asi „děje“ uvnitř toho tajemného imaginárního obvodu, kterému říkáme program. A také je přeci zábava, vzít tužku a prázdný papír a něco vlastního si navrhnout a nespolehat jen na to, co navrhnul někdo před náma :) Takže hlavním úkolem je objasnit, co vlastně výstupní anodový obvod dělá, co je jeho úkolem. Tak jak již název napovídá, jeho úkolem je transformovat relativně nízkou impedanci připojené zátěže (antény) k optimální zatěžovací dynamické impedanci elektronky. Analogicky toto samé platí i pro tranzistorové zesilovače, akorát výstupní impedance těchto zesilovačů bývá naopak nižší, než zatěžovací impedance normovaná zpravidla na 50 ohm a museli bychom proto přehodit dva členy. Mimo vlastní transformaci impedance anodovým výstupním obvodem nám tento PI článek zásadním způsobem také ovlivňuje elektrickou účinnost vlastního zesilovače a filtrační schopnosti pro vyšší harmonické produkty. Tyto dvě vlastnosti jsou bohužel v přímém protikladu a je proto otázkou kompromisu, na kterou stranu se přikloníme. Volba této vlastnosti je řešena přes jakost (Q) rezonančního obvodu...

Při návrhu výstupních PI článků se dlouhodobě ustálila hodnota činitele jakosti zatíženého obvodu mezi 8 až 16, kdy $Q = 12$ se bere jako optimální kompromis. Toto je v souladu s výbornými prakticky zaměřenými články uvedenými zde [2] a zde [3]. Při vyšším Q se zlepšují filtrační schopnosti, ale zvyšují se cirkulační proudy a klesá účinnost a naopak při nižších hodnotách se zvyšuje obsah vyšších harmonických.

Celkové schéma anodového obvodu i s naznačenými parazitními prvky je na obr1. Vlastní výstupní PI článek je tvořen $C1$, $L1$ a $C2$. Dále se ale uplatňuje i kapacita Cak , což je kapacita rozhraní anoda – katoda, $Crad$ je kapacita anodového chladiče proti okolí, $Ctla$ je parazitní kapacita anodové tlumivky. S Cak toho mnoho neuděláme, to je dáno konstrukcí elektronky. $Crad$ a $Ctla$ jsou relativně malé a tudíž neškodné (pozor na vlastní rezonanci tlumivky, aby nepadla do některého radioamaterského pásma, kde by znemožnila provoz tohoto zesilovače v tomto pásmu) a můžeme je dále zmenšit vhodným konstrukčním uspořádáním tak, aby byly dostatečně vzdáleny od okolních předmětů. Tyto prvky bývají velmi důležité u zesilovačů především pro VKV a UKV, kdy i takto malé kapacity jednotek pF jsou stěžejní a hrají velkou roli a mohou být i důvodem neúspěchu při vlastní stavbě takového zesilovače. Pro nás je ale mnohem důležitější parazitní kapacita $C1'$, kterou někdy označujeme také jako počáteční kapacitu ladícího kondenzátoru. Tato je limitujícím faktorem při návrhu především na vyšších pásmech při vysoké dynamické impedanci elektronky a proto se snažíme, aby byla co nejmenší...Problém může nastat u návrhu zesilovačů s elektronkami typu SRS 457, které

vyžadují pro svou funkci poměrně vysoké anodové napětí a mívají proto také poměrně vysokou dynamickou impedanci. U takového zesilovače můžeme již právě narazit na problém s počáteční kapacitou $C1'$ a proto může být i výhodnější paralelní řazení elektronek nejenom z důvodu zvýšení výstupního výkonu, ale i z důvodu snazší realizace výstupního anodového obvodu. Snížení počáteční kapacity $C1'$ se řeší konstrukčními úpravami kondenzátoru $C1$, především vyosením rotoru oproti statoru, nevodivými čely a dostatečnou vzdáleností od okolních stěn zesilovače.

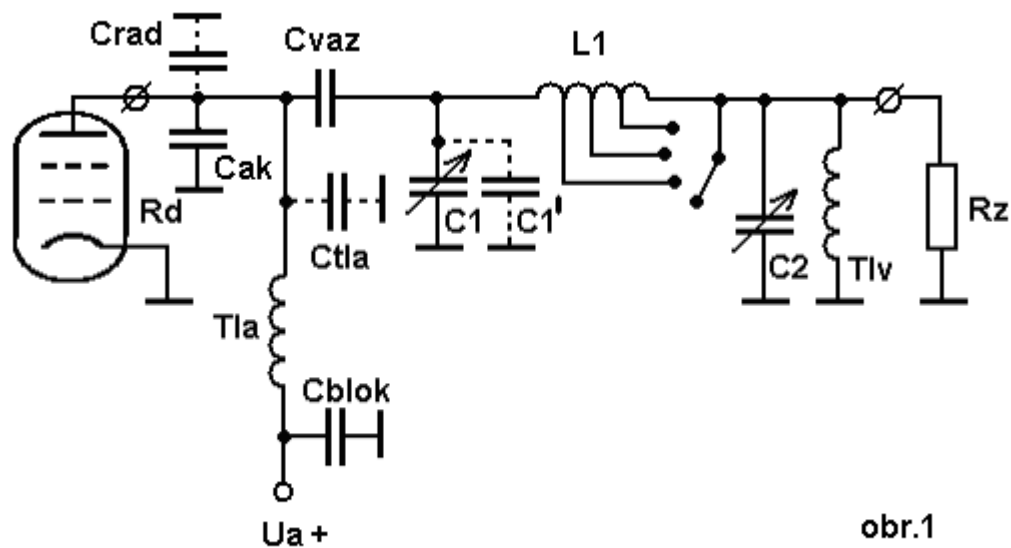
Dále jsou zde uvedeny upravené vzorce a), b), c), pro výpočet jednotlivých prvků výstupního PI článku, jejichž odvození není zrovna snadnou záležitostí a neobejdeme se bez znalostí z teoretické elektrotechniky a syntézy elektrických obvodů na vysokoškolské úrovni. R_d je dynamická impedance zesilovače a její přesné zvolení se dělá graficko-početní metodou z charakteristik zvolené elektronky v určitém pracovním bodě. Za předpokladu, že koncový stupeň provozujeme ve třídě B lze použít zjednodušený vztah d), kde U_a je anodové napětí a I_a je anodový proud při určitém buzení. Bohužel volba tohoto proudu je značně závislá na buzení a celkovém výstupním výkonu. Existují přesnější metody, kdy se uvažuje minimální a maximální proud při různém buzení a pro tyto dvě krajní hodnoty se pak na konci dá spočítat výsledné Q pro tyto dvě úrovně, případně pokud by vyšly nepříznivé hodnoty, tak znovu celý PI článek optimalizovat. Ale mějme stále na paměti, že teorie je krásná věc, ale praktický výsledek je závislý na mnoha dalších faktorech, které ve výpočtu nemůžeme zohlednit a proto je stejně nutné PI článek prakticky optimalizovat a nalézt ideální polohy odboček cívek. Zkusme praktický návrh, protože ten nás zajímá nejvíce. Vezměme si například zapojení malého koncového stupně o výkonu okolo 1 KW s elektronkou GU74b (4CX800). Anodové napětí uvažujeme naprázdno 3KV s tím, že nám při plném zatížení klesne o cca 10 až 15% pokud máme dobře dimenzovaný zdroj. Anodový proud při plném zatížení uvažujeme okolo 0,7 A a z toho nám vychází R_d asi 2200 ohm. Máme k dispozici ladící kondenzátor $C1$ 10 pF – 250 pF s mezerami mezi plechy alespon 2,5mm. Celkový součet parazitních kapacit odhadneme na cca 10 pF a C_{ak} najdeme v katalogu. Dejme tomu, že je okolo 15 pF. Dostaneme minimální ladící kapacitu 35 pF, která je limitujícím faktorem pro nejvyšší pásma. Nyní si můžeme udělat kontrolu, zdali je možné pro nejvyšší pásmo PI článek vůbec realizovat. Z tabulky 1. vidíme, že pro $R_d = 2200$ ohm můžeme dosáhnout přizpůsobení pro $Q = 14$ až 22. Volíme $Q = 14$ a z tabulky 3. odečteme indukčnost $L = 0,93$ uH a z tabulky 2. pro $C2$ odečteme kapacitu $C2 = 212$ pF. Pro ostatní nižší pásma již můžeme bez problémů najít odpovídající hodnoty prvků $C1$, $L1$ a $C2$ pro Q v rozmezí 10 – 14, protože vyšší kapacitu si poskládáme vždy, třeba přidáním paralelního kondenzátoru, kdežto pod určitou minimální kapacitu jít nemůžeme, protože ta je daná konstrukcí. Hodnoty prvků pro ostatní pásma již získáme snadno vynásobením odpovídající konstantou z tabulky č.4. Pokud bychom si udělali podrobnější analýzu, tak dojdeme k závěru, že pro dosažení co nejlepšího přizpůsobení, je nutná co největší přeladitelnost kondenzátoru $C1$ a zároveň s co nejmenší počáteční kapacitou. Také si musíme uvědomit, že celý výpočet je uvažován pro zatěžovací reálnou impedanci 50 ohm, ale skutečná zatěžovací impedance celé soustavy napáječ – anténa může být značně odlišná a pokud bychom chtěli do výpočtu zahrnout i možnost přizpůsobení k impedanci jiné, než 50 ohm, tak to už je nad rámec tohoto článku a pravděpodobně by se nám značně zkomplikoval výpočet... To už ale není úkolem tohoto článku ☺ Smyslem bylo ukázat, jak se postupuje při získání alespoň přibližných hodnot jednotlivých prvků $C1$, $L1$, $C2$ výstupního PI článku a jak velkou roli hrají další parazitní prvky, kdy ty nejmarkantnější jsme zmínili... Už vidíte, že nemá smysl bazírovat na úplně přesných absolutních hodnotách prvků $C1$, $L1$ a $C2$ navrženého (vypočteného) PI článku a jak moc se můžou měnit tyto hodnoty podle zvoleného Q obvodu a jak velký vliv hraje různý dynamický odpor, jehož přesné stanovení je velmi problematické a závisí především na pracovním bodě elektronky, což je

také spjato s úrovní buzení. Proto je daleko důležitější ve výsledné konstrukci zesilovače pro více pásem „odladit“ celý PI článek na co nejlepší vlastnosti a to tím pečlivěji, čím je vyšší pásmo... Trpělivost se vyplácí a výsledné hodnoty prvků se mohou dost markantně lišit od vypočtených, ale to je dáno tím, co je napsáno výše. Opět bych doporučil přečíst si výborné články [2] a [3] Jendy OK2BNG a Pepíka OK1PD, kde se dozvíme mnoho cenných především prakticky zaměřených informací o stavbě výkonového zesilovače pro KV s elektronkami. Díky přehledným tabulkám můžeme také postupovat obráceně a vycházet tak již z konkrétních prvků a hned vidíme, jaké Q nám bude přibližně vycházet a jestli je vůbec pro tyto hodnoty PI článek realizovatelný. Pokud bychom potřebovali tyto tabulky i pro jinou zatěžovací impedanci, tak na těchto internetových stránkách [4] můžeme najít jednoduchý program v excelu a zde pouze zadat jinou zatěžovací impedanci než je 50 ohm a program nám tyto tabulky již sám přepočítá a případně lze také zadat jiný kmitočet než 28 MHz a tabulky si nechat vypočítat pro námi zvolený kmitočet...Děkuji mé přítelkyni Petulce za trpělivost a gramatické korekce ☺

$$C1 = \frac{Qp}{2\pi f Rd} \quad a) \quad C2 = \frac{\sqrt{\frac{Rz}{Rd} (1 + Qp^2) - 1}}{Rz 2\pi f} \quad b) \quad L = \frac{Rd \left(Qp + \frac{Rz}{Xc2} \right)}{(1 + Qp^2) 2\pi f} \quad c)$$

kde: $Xc2 = \frac{1}{2\pi f C2}$ Tyto vtahy platí za podmínky: $Qp > \frac{Rd}{Rz} - 1$

$$Rd = \frac{0,55 \times Ua}{Ia} \quad d)$$



obr.1

Dynamická impedace R_d : [Ω]	Kapacita kondenzátoru C_1 v pF pro kmitočet: 28 MHz									
	Volba Q obvodu:									
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
400	56,86988	85,3048	113,74	142,175	170,61	199,045	227,48	255,914	284,349	312,784
600	37,91325	56,8699	75,8265	94,7831	113,74	132,696	151,653	170,61	189,566	208,523
800	28,43494	42,6524	56,8699	71,0874	85,3048	99,5223	113,74	127,957	142,175	156,392
1000	22,74795	34,1219	45,4959	56,8699	68,2439	79,6178	90,9918	102,366	113,74	125,114
1200	18,95663	28,4349	37,9133	47,3916	56,8699	66,3482	75,8265	85,3048	94,7831	104,261
1400		24,3728	32,4971	40,6213	48,7456	56,8699	64,9942	73,1184	81,2427	89,367
1600		21,3262	28,4349	35,5437	42,6524	49,7611	56,8699	63,9786	71,0874	78,1961
1800		18,9566	25,2755	31,5944	37,9133	44,2321	50,551	56,8699	63,1888	69,5076
2000		17,061	22,748	28,4349	34,1219	39,8089	45,4959	51,1829	56,8699	62,5569
2200		15,51	20,68	25,8499	31,0199	36,1899	41,3599	46,5299	51,6999	56,8699
2400		14,2175	18,9566	23,6958	28,4349	33,1741	37,9133	42,6524	47,3916	52,1307
2600		13,1238	17,4984	21,873	26,2476	30,6222	34,9969	39,3715	43,7461	48,1207
2800			16,2485	20,3107	24,3728	28,4349	32,4971	36,5592	40,6213	44,6835
3000			15,1653	18,9566	22,748	26,5393	30,3306	34,1219	37,9133	41,7046
3200			14,2175	17,7718	21,3262	24,8806	28,4349	31,9893	35,5437	39,098
3400			13,3611	16,7264	20,0717	23,417	26,7623	30,1076	33,4529	36,7982
3600			12,6378	15,7972	18,9566	22,1161	25,2755	28,4349	31,5944	34,7538
3800			11,9726	14,9658	17,9589	20,9521	23,9452	26,9384	29,9315	32,9247
4000			11,374	14,2175	17,061	19,9045	22,748	25,5914	28,4349	31,2784
4200			10,8324	13,5404	16,2485	18,9566	21,6647	24,3728	27,0809	29,789
4400			10,34	12,925	15,51	18,095	20,68	23,265	25,8499	28,4349

tab.1

Dynamická impedance R_d [Ω]	Kapacita kondenzátoru C_2 v pF pro kmitočet: 28 MHz									
	Volba Q obvodu:									
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
400	120,639	216,554	303,602	387,801	470,682	552,838	634,552	715,974	797,193	878,267
600	73,4187	164,169	239,034	309,754	378,658	446,589	513,931	580,89	647,585	714,089
800	28,4349	130,305	199,045	262,157	322,959	382,553	441,429	499,841	557,934	615,799
1000	#NUM!	104,863	170,61	228,897	284,349	338,364	391,536	444,168	496,432	548,433
1200	#NUM!	83,7102	148,662	203,729	255,387	305,372	354,393	402,8	450,793	498,491
1400		64,4844	130,748	183,652	232,502	279,432	325,275	370,435	415,133	459,506
1600		44,9596	115,503	167,017	213,735	258,273	301,598	344,169	386,234	427,943
1800		18,9566	102,085	152,833	197,913	240,533	281,811	322,263	362,166	401,684
2000		#NUM!	89,9192	140,458	184,279	225,337	264,918	303,602	341,693	379,369
2200		#NUM!	78,577	129,456	172,324	212,096	250,251	287,435	323,981	360,085
2400		#NUM!	67,6887	119,517	161,688	200,394	237,337	273,232	308,446	343,188
2600		#NUM!	56,8699	110,41	152,108	189,93	225,833	260,611	294,661	328,212
2800			45,5973	101,959	143,388	180,479	215,485	249,284	282,311	314,809
3000			32,8338	94,0218	135,377	171,869	206,096	239,034	271,153	302,713
3200			14,2175	86,4815	127,957	163,964	197,515	229,69	260,998	291,718
3400			#NUM!	79,2346	121,033	156,658	189,622	221,118	251,698	281,66
3600			#NUM!	72,1847	114,527	149,865	182,319	213,209	243,133	272,409
3800			#NUM!	65,2342	108,375	143,515	175,527	205,876	235,205	263,856
4000			#NUM!	58,2743	102,524	137,55	169,182	199,045	227,835	255,914
4200			#NUM!	51,1678	96,9254	131,92	163,228	192,655	220,954	248,511
4400			#NUM!	43,7162	91,5395	126,586	157,621	186,657	214,508	241,583

tab.2

Dynamická impedance R_d [Ω]	Indukčnost cívky L v μ H pro kmitočet: 28 MHz									
	Volba Q obvodu:									
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
400	0,62162	0,40857	0,30257	0,23977	0,19839	0,16911	0,14734	0,13051	0,11712	0,10621
600	0,93243	0,61286	0,45385	0,35965	0,29758	0,25367	0,221	0,19576	0,17568	0,15932
800	1,24324	0,81714	0,60513	0,47953	0,39677	0,33823	0,29467	0,26101	0,23424	0,21243
1000	1,55405	1,02143	0,75641	0,59941	0,49596	0,42279	0,36834	0,32627	0,29279	0,26554
1200	1,86486	1,22571	0,9077	0,7193	0,59516	0,50734	0,44201	0,39152	0,35135	0,31864
1400		1,43	1,05898	0,83918	0,69435	0,5919	0,51567	0,45677	0,40991	0,37175
1600		1,63429	1,21026	0,95906	0,79354	0,67646	0,58934	0,52203	0,46847	0,42486
1800		1,83857	1,36154	1,07895	0,89274	0,76101	0,66301	0,58728	0,52703	0,47796
2000		2,04286	1,51283	1,19883	0,99193	0,84557	0,73668	0,65253	0,58559	0,53107
2200		2,24714	1,66411	1,31871	1,09112	0,93013	0,81034	0,71779	0,64415	0,58418
2400		2,45143	1,81539	1,43859	1,19031	1,01469	0,88401	0,78304	0,70271	0,63728
2600		2,65571	1,96667	1,55848	1,28951	1,09924	0,95768	0,84829	0,76127	0,69039
2800			2,11796	1,67836	1,3887	1,1838	1,03135	0,91355	0,81983	0,7435
3000			2,26924	1,79824	1,48789	1,26836	1,10501	0,9788	0,87838	0,79661
3200			2,42052	1,91812	1,58709	1,35291	1,17868	1,04405	0,93694	0,84971
3400			2,5718	2,03801	1,68628	1,43747	1,25235	1,10931	0,9955	0,90282
3600			2,72309	2,15789	1,78547	1,52203	1,32602	1,17456	1,05406	0,95593
3800			2,87437	2,27777	1,88466	1,60659	1,39968	1,23981	1,11262	1,00903
4000			3,02565	2,39766	1,98386	1,69114	1,47335	1,30507	1,17118	1,06214
4200			3,17693	2,51754	2,08305	1,7757	1,54702	1,37032	1,22974	1,11525
4400			3,32822	2,63742	2,18224	1,86026	1,62069	1,43557	1,2883	1,16836

tab.3

Pásmo (MHz)	1,8	3,5	7	14	21	28
K	16	8	4	2	1,5	1

tab.4

[1] AR 3/1986 – Návrh PI článku koncového stupně pro vysílač KV - R.Hnátek a Ing. I.Kmet

[2] Konstrukční poznámky ke koncovým stupňům - Jan Boček, OK2BNG

[3] <http://www.crk.cz/CZ/PDPAC.HTM>

[4] <http://www.ok1gth.nagano.cz/>

Výstupní PI článek koncového stupně jednoduše a bez matematiky -Tomáš Kavalír OK1GTH