

NÁVRH VÝSTUPNÍHO TRANSFORMÁTORU

M. Krňák

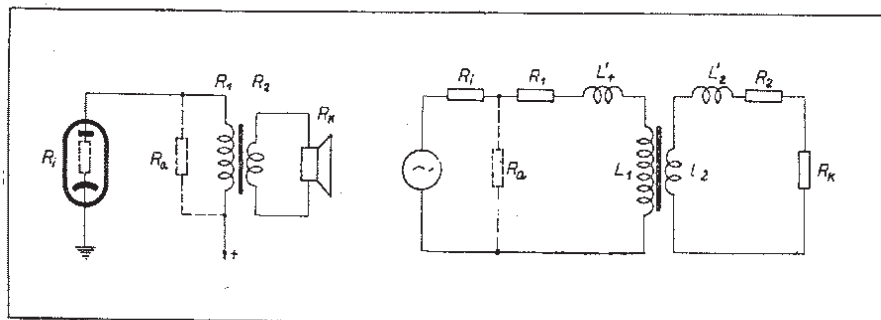
V č. 8. AR jsme si v čl. „Přizpůsobení reproduktorů a 100 V rozvod“ objasnili otázku přizpůsobení reproduktorů ke koncovému stupni zesilovače. Toto přizpůsobení impedancí provádí mezičlánek, vkládaný mezi koncovou elektronku a reproduktor – výstupní transformátor. Musí být zkonstruován tak, aby výkon koncových elektronek byl co největší při nejmenším možném skreslení a za cenu minimálních ztrát ve výstupním transformátoru. Je pochopitelné, že transformátor bude mít vlivem indukčnosti vinutí účinnost závislou na kmitočtu přenášeného střídavého prou-

mátor o převodu 1 : 1, pak $L_1 = L_2 = L$; $R_1 = R_2 = R$; $L'_1 = L'_2 = L'a$

$$R_k = R'_k = R_a,$$

takže náhradní schema se zjednoduší podle obr. 2.

Budeme-li nyní napájet náhradní obvod podle obr. 2 střídavým proudem o kmitočtu několika desítek c/s, vidíme, že malé rozptylové indukčnosti lze zanedbat. Obvod bude působit jako dělič napětí, který je možno podle vztahů platných pro děliče napětí překreslit do náhradního schematu na obr. 3, platného pro nízké kmitočty.



Obr. 1

du. Z toho vyplývá další podmínka, aby rozsah kmitočtů, při kterých bude výstupní transformátor pracovat s maximální účinností, odpovídal požadovanému rozsahu celého zařízení.

Abychom si ujasnili vliv základních veličin výstupního transformátoru hlavně na jeho kmitočtový rozsah a účinnost, překreslíme si normální zapojení výstupního transformátoru do jednodušší formy – náhradního schematu (obráz. 1). Kromě vnitřního odporu R_i a odporu reproduktoru R_k , primární a sekundární indukčnosti L_1 a L_2 jsou zde ještě stejnosměrné odpory obou vinutí R_1 a R_2 na rozptylové indukčnosti L_1 a L_2 . Čárkované je zakreslena anodová impedance R_a . V těchto bodech má být impedance naměřená na primárním vinutí, rovna anodovému odporu R_a koncové elektronky. Ve skutečnosti je zastoupena odporem reproduktoru, převedeným druhou mocninou převodu transformátoru na primární vinutí.

Převedeme-li všechny veličiny, vystupující na sekundární straně transformátoru, podle převodu na stranu primární, nebo vezmeme-li transfor-

Předpokládáme-li přípustné odchylky užitečného střídavého napětí na transformátoru $U_{o-3\text{ dB}}$, to jest jeho pokles na polovinu, vidíme, že tato podmínka bude platit tehdy, jestliže zdánlivý odpor indukčnosti Z_L se bude rovnat výslednému odporu paralelní dvojice. Jelikož však je vnitřní odpor větší než odpor anodový a ohmické odpory obou vinutí naproti tomu menší, lze zjednodušeně psát:

$$Z_L = R_a = \omega L = 2\pi f L.$$

Z toho vyplýne vztah pro nejnižší přenášený kmitočet:

$$f_{\min} = \frac{R_a}{2\pi L} \quad (1)$$

Transformátor bude tedy přenášet tím nižší kmitočet, čím větší bude indukčnost transformátoru. Ta se dá zvýšit větším počtem závitů, zmenšením magnetického odporu – zvětšením průřezu jádra. Proto tedy vycházejí transformátory pro dobrý přenos basů celkově větší.

Pro vysoké kmitočty (kolem 10 kc/s) můžeme naproti tomu zanedbat zdán-

livý odpor indukčnosti L_1 , který bude značně větší než kterýkoliv jiný odpor v obvodu. Bude proto možno obdobně podle schematu pro nízké kmitočty zjednodušit náhradní schema transformátoru podle obr. 4.

Při zavedení stejných zjednodušení bude pak pro pokles užitečného napětí na transformátoru $U_{o-3\text{ dB}}$:

$$f_{\max} = \frac{R_a}{2\pi f L} \quad (2)$$

Transformátor bude tedy přenášet tím vyšší kmitočet, čím menší bude rozptylová indukčnost obou vinutí. Ta se dá snížit zmenšením celkových rozměrů vinutí, prostrháním sekcí vinutí primáru a sekundáru at ve vrstvách, nebo ve formě deskového vinutí.

Z obou náhradních zapojení pak vyplývá, že ztráty v obou vinutích budou úměrné jeho stejnosměrnému odporu. Pro účinnost transformátoru 90% pak bude platit:

$$\begin{aligned} 2R &= 0,1 R_a \\ \text{nebo } R_1 &= 0,05 R_a \\ R_2 &= 0,05 R_k \end{aligned}$$

To je další důvod, který vede k většímu rozměru výstupního transformátoru s dobrou účinností, neboť průměr drátu pro vinutí výstupního transformátoru nelze počítat podle proudové hustoty.

Ztráty v železe můžeme zmenšit použitím kvalitních tenkých plechů, dobře izolovaných. Permalloy a podobné materiály smíme použít jen u transformátorů bez stejnosměrné magnetisace, tedy ve dvojčinných stupních nebo při napájení výstupního transformátoru přes kondensátor.

Při praktickém výpočtu obvykle vycházíme z výkonu, který má výstupní transformátor přenášet. Ten je dán koncovými elektronkami a jejich pracovními podmínkami podle továrních údajů v katalogích.

Pro průřez jádra v transformátoru platí přibližný vztah:

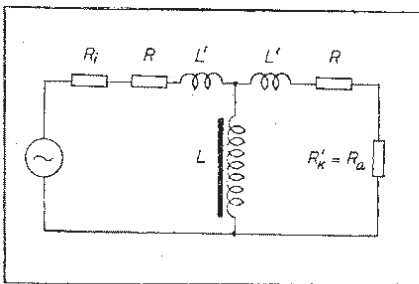
$$S_{\min} \doteq \sqrt{N_{st}} \text{ [cm}^2, W\text{]}$$

$$S_{\max} \doteq 20 \sqrt{\frac{N_{st}}{f_{\min}}} \text{ [cm}^2, W, \text{ c/s}]$$

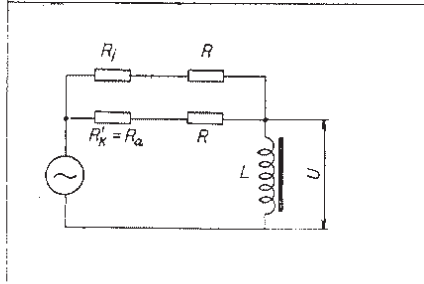
Průřez jádra volíme spíše vyšší; vzorec pro minimální průřez použijeme hlavně při návrhu výstupního transformátoru pro omezený přenos nízkých kmitočtů, na příklad u malých přenosných přijímačů s malými reproduktory.

Dále si vypočítáme střídavé napětí na primárním vinutí:

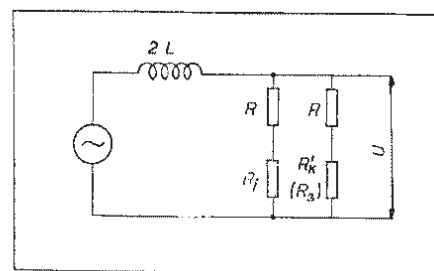
$$U_1 = \sqrt{R_a \cdot N_{st}} \text{ [V, } \Omega, W\text{]}$$



Obr. 2



Obr. 3



Obr. 4

Počet závitů na primárním vinutí je pak dán upraveným základním vzorcem pro transformátory:

$$n_1 = \frac{2,3 \cdot U_1 \cdot 10^7}{B_{st} \cdot S \cdot f_{min}} [z, V, \text{gauss}, \text{cm}^2, \text{c/s}]^*$$

Střídavou magnetickou indukci volíme podle kvality plechů a jejich magnetizačních křivek. U neznámých plechů pro jednoduché stupně se stejnosměrným sycením volíme $B_{st} = 5\,000$; pro dvojitě sycením $8\,000$ – $10\,000$ gaussů.

Nejnižší přenášený kmitočet volíme podle tabulky 1, kde ve sloupci A jsou hodnoty pro malé přenosné přijímače, pouliční rozhlas a pro přenos řeči. Ve sloupci B jsou hodnoty pro běžné přijímače a závodní rozhlas, pro přenos řeči a zábavní hudby. Hodnoty ve sloupci C jsou určeny pro dokonalý přednes, jak je požadován v kinech, divadlech, koncertech, při přenosu symfonické hudby.

Tabulka 1.

Průměr reproduktoru d-cm	f_{min} c/s		
	A	B	C
8	200		
10	160		
12	140		
14	130		
16	120	70	
18	110	60	
20	100	55	
22	90	50	45
25	80	45	40
30			35
35			30

Známe-li dolní rezonanční kmitočet použitého reproduktoru nebo dolní mezní kmitočet u pouličních reproduktorů s konickým nebo exponenciálním zvukovodem, bude:

$$f_{min} = 0,7 \cdot f_{res} \quad [\text{c/s}]$$

Ze zatěžovacího odporu reproduktoru, který se přibližně rovná:

$$R_k = 1,2 \div 1,5 R_{sk} [\Omega]$$

nebo ze zatěžovacího odporu pro 100 V rozvod:

$$R_{100} = \frac{10\,000}{N_{st}} [\Omega, W]$$

a anodového odporu koncových elektronek R_a vypočítáme převod transformátoru, t. j. poměr počtu závitů na primáru a sekundáru:

$$p = \sqrt{\frac{R_a}{R_k}} [\Omega]$$

Počet závitů na sekundárním vinutí s ohledem na 10% ztráty v mědi bude:

$$n_2 = 1,1 \frac{n_1}{p}$$

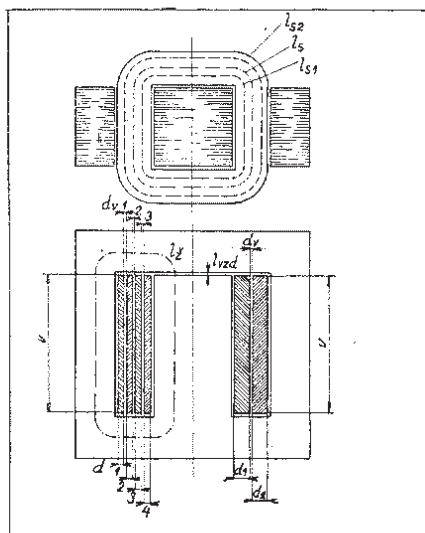
Nyní určíme střední délku jednoho závitu primárního a sekundárního vinutí z náčrtku, jak je naznačeno na obr. 5.

Průměr drátu obou vinutí d_1 a d_2 zjistíme z diagramu na obr. 6, když z celkové délky vinutí a příslušného zatěžovacího odporu vypočteme odpor 10 m drátu příslušného vinutí:

$$r_1 = \frac{50 R_a}{n_1 l_{s1}} [\Omega/10\text{ m}, \Omega, z, \text{cm}]$$

$$r_2 = \frac{50 R_k}{n_2 l_{s2}} [\Omega/10\text{ m}, \Omega, z, \text{cm}]$$

*) Poznámka: $10^7 = 10$ milionů.



Obr. 5

Kontrolujeme pak z náčrtku podle obr. 5 odměřenou plochu okénka (F) a plochu vinutí. V činiteli 50 je zahrnuta rezerva pro izolaci vinutí a kostru cívk.

$$50 F \geq (d_1^2 \cdot n_1) + (d_2^2 \cdot n_2) [\text{cm}^2, \text{mm}, z]$$

V případě, že se nám obě vinutí do okénka nevejdou, bude nejlépe volit větší svazek plechů a tím i větší průřez jádra, nebo použít plechů s větším okénkem a celý výpočet opakovat znovu.

Abychom při jednoduchých koncových stupních omezili vliv sycení jádra stejnosměrným anodovým proudem, zvětšíme úmyslně jeho magnetický odpor vzduchovou mezerou. Jí velikost je dána vztahem:

$$l_{vzd} = \frac{1,6 n_1 \cdot I_a - 1,3 \cdot B_{ss} \frac{l_z}{\mu}}{B_{ss}} [\text{cm}, z, A, \text{gauss}, \text{cm}]$$

Přípustné sycení směrným proudem B_{ss} zjistíme buď podle magnetizačních křivek tak, aby hodnota $B_{ss} + B_{st}$ byla pod ohbim magnetizační křivky, nebo volíme mezi $5000 \div 7000$ gaussů. Větší hodnota připouští možnost skreslení při větším B_{ss} , tedy při větším napětí na transformátoru.

Dále kontrolujeme indukčnost pri-

márního vinutí, aby vyhovovala základní podmínce pro nejnižší přenášený kmitočet f_{min} .

Pro výpočet indukčnosti použijeme upravených základních vzorců. Pro transformátor bez magnetisace stejnosměrným proudem musíme nejdříve vypočítat magnetický odpor jádra:

$$R_m = R_z + R_{vzd}$$

R_z je magnetický odpor v železe a rovná se

$$R_z = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l_z}{s} [\text{mag } \Omega, \text{cm}, \text{cm}^2]$$

Permeabilitu μ zjistíme z magnetizačních křivek použitého transformátorového plechu; pro normální křemíkové plechy volíme $\mu = 4000$.

R_{vzd} je odpor vzduchové mezery, která vznikne i u střídavě skládaných plechů, kde předpokládáme délku vzduchové mezery $0,005$ cm.

Magnetický odpor vzduchové mezery se pak rovná:

$$R_{vzd} = \frac{0,005}{1,25 s} = \frac{4}{S \cdot 10^8} [\text{mag } \Omega, \text{cm}^2]$$

Součet obou magnetických odporů pak dosadíme do vzorce pro indukčnost:

$$L_1 = \frac{1,26 \cdot n_1^2}{R_m \cdot 10^8} [H, z, \text{mag } \Omega]$$

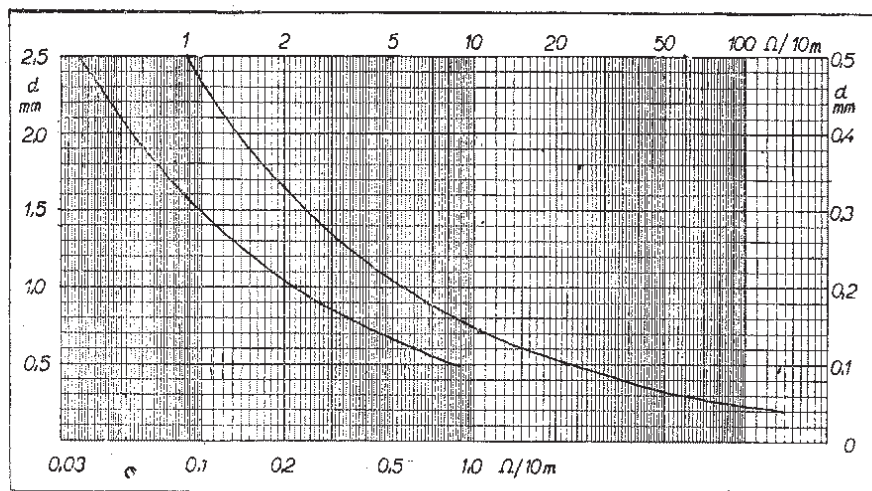
Pro výstupní transformátory s magnetisací stejnosměrným proudem můžeme použít zjednodušeného vzorce, protože vliv magnetického odporu jsme již zahrnuli do výpočtu vzduchové mezery:

$$L_1 = \frac{B_{ss} \cdot S \cdot n_1}{I_a \cdot 10^8} [H, \text{gauss}, \text{cm}^2, z, A]$$

Podle vzorce (1) pak kontrolujeme, zda nyní vypočítané f_{min} je stejné nebo menší než hodnota, kterou jsme si položili za podmínku správné činnosti.

Kontrola nejvyššího přenášeného kmitočtu podle vzorce (2) se obvykle u běžných výstupních transformátorů neprovádí; pro speciální případy se zvláště vysokými nároky ($f_{max} \geq 12$ kc/s) uvádíme vzorce pro rozptylovou indukčnost:

$$2 L' = \frac{\pi \cdot n_1^2 \cdot l_s}{v} \cdot \left(d_{vzd} + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) [H, z, \text{cm}]$$



Obr. 6

Pro transformátory s prostřídávanými sekundárními vinutími:

$$2L' = \frac{\pi \cdot n_1^2 \cdot l_s}{v} \cdot \left(d_{v1} + d_{v2} + d_{v3} \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4}{4} \right) [H, z, \text{cm}]$$

Vyjde celková rozptylová indukčnost vztažená na primární vinutí. Za l_s dosazujeme střední délku cívky, d_v je síla izolace mezi sekcemi, d jsou rozměry jednotlivých sekcí vinutí (obr. 6., 7).

Jestliže podle kontrolních výpočtů navrhovaný transformátor vyhovuje daným podmínkám, zbývá si pohovořit o konstrukci.

Vzhledem k tomu, že napětí na primárním vinutí může u výkonných stupňů dosáhnout hodnot řádu set voltů, je nutno věnovat zvýšenou pozornost izolaci vrstev primárního vinutí nejen mezi jednotlivými vrstvami, ale i proti kostře. Nejtěžší zkouškou, která málokdy končí pro výstupní transformátor bez pohromy, je odpojení zátěže od plně vybuzeného zesilovače. Uvažujme, že anodová impedance s přípojnou zátěží je 5000Ω a indukčnost primárního vinutí transformátoru je 18 H . Primárním vinutím teče při plném výkonu zesilovače střídavý proud:

$$I_1 = \sqrt{\frac{N_{st}}{R_a}} = \sqrt{\frac{50}{5000}} = 0,1 \text{ A}$$

Odlehčíme-li nyní výstupní transformátor a tím i zesilovač, bude nyní anodová impedance dána jediné impedancí primárního vinutí, která pro střední kmitočet 1000 c/s tónového pásma je:

$$Z_{1000} = 2\pi \cdot f \cdot L_1 = 2\pi \cdot 1000 \cdot 18 \approx 100\,000 \Omega$$

Na primárním vinutí tedy vznikne napětí:

$$U_{1000} = I_1 \cdot Z_{1000} = 0,1 \cdot 100\,000 = 10 \text{ kV}$$

Toto je max. hodnota při zjednodušeném theoretickém případě. V praxi je omezena většími magnetickými ztrátami jádra při jeho přesycení. Rozhodně však mohou tato špičková napětí v zesilovačích se slabou zápornou zpětnou vazbou dosáhnout při vyšších kmitočtech řádu tisíců voltů, které však málokteré vinutí snese bez průrazu.

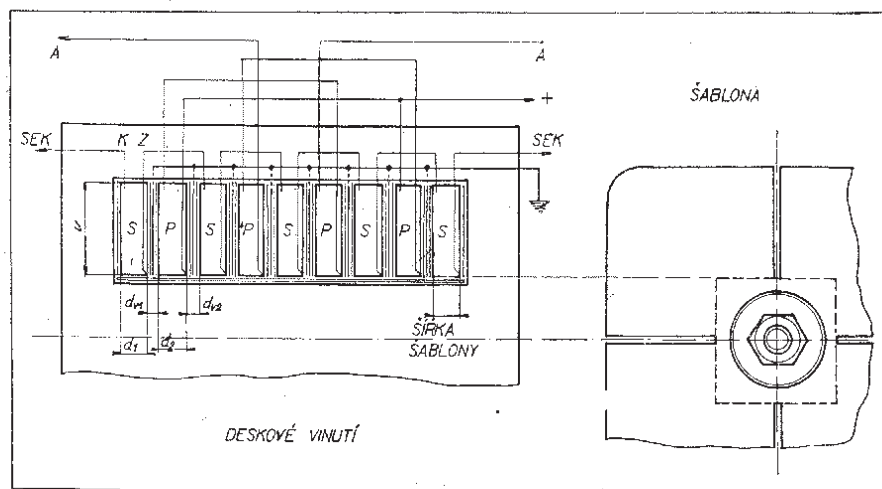
Věnujeme proto izolaci vinutí výstupního transformátoru největší péči. Z tohoto důvodu i s ohledem na menší rozptylovou indukčnost je výhodné deskové vinutí, které dovoluje dobře využít plochy okénka a pro amatérské vinutí transformátorů je pohodlnější.

Při tomto způsobu vinutí postupujeme tak, že si vinutí primární i sekundární rozdělíme do několika sekcí. Na příklad primár do čtyřech sekcí a sekundár do pěti sekcí. To znamená, že plocha okénka bude rozdělena na 9 dílů. Z náčrtku si pak s ohledem na izolaci proti jádru a mezi jednotlivými sekcemi stanovíme rozměry jedné sekce. Potom si z překližky vyřízneme čela a jádro šablony (Obr. 7). Čela s jádrem stáhneme uprostřed silným šroubem a upneme do navijáčky, vrtáčky ve svěráku a pod.

Do výřezu v čele šablony vložíme tenké provázky, na ně pak navineme asi 2 závity tenké lesklé lepenky a nyní navineme příslušný počet závitů, připadající na jednu sekci primárního nebo sekundárního vinutí. Po navinutí celé sekce zajistíme obvyklým způsobem konec drátu a celé vinutí svážeme vloženými provázky. Potom šablonu opatrně rozebereme a hotové vinutí omotáme igelitovou páskou. Při montáži celého transformátoru si připravíme obal z lesklé lepenky na střední sloupek jádra, na který pak naskládáme střídavě primární a sekundární sekce, proložené vhodné vystříženými destičkami z lesklé lepenky. Vývody sekcí vinutí spojíme opět střídavě, jak je naznačeno na obrázku.

zesilovač by oscilloval na nadzvukových kmitočtech. Je výhodné celý transformátor s dobře staženými plechy impregnovat buď ponořením do řídkého roztoku šelaku v lihu, do roztopené kalafuny s parafinem, nebo alespoň jádro a vinutí natřít nějakým izolačním lakem.

Při montáži transformátoru do zesilovače dbáme, aby rozptylové magnetické pole se nevázovalo s jiným transformátorem, na dobrou izolaci a na co nejkratší přívody k anodám koncových elektronek. Spoje sekundárního vinutí se svorkovnicí provedeme ze silného drátu ($1 \div 1,5 \text{ mm}$), protože sekundárním vinutím protékají poměrně velké proudy (nepřipadá v úvahu při 100 V rozvodu).



Obr. 7

U zesilovačů se silnou zápornou zpětnou vazbou ze sekundárního vinutí je výhodné mezi každou sekci vložit plíšek z měděné nebo staniolové folie (rozříznutý – jinak závit na krátko!) pro omezení kapacitní vazby mezi primárem a sekundárem při vysokých kmitočtech, kde by se jiným fázovým posunem změnila zpětná vazba ve vazbu kladnou a

V tabulce 2 jsou udány hodnoty výstupních transformátorů pro různé koncové stupně. Při použití těchto hodnot je nutno vypočítat podle použitého jádra vzduchovou mezeru a provést všechny kontrolní výpočty. Nemá tedy tato tabulka sloužit jako přesný návod, nýbrž jako vodítko pro případné srovnávání vypočítaných hodnot.

TABULKA 2.

	N_{st}	R_a	I_{min}	L_{1min}	S	U_1	n_1	d_1	R_b	p	U_2	n_2	d_2	F	Vhodné elektronky
	W	kΩ	c/s	H	cm²	V	Z	mm	Ω		V	z	mm	cm³	
Přenosné přijímače	0,25	8	150	8	0,8	45	1720	0,08	3	51,6	0,87	37	0,6	0,50	1L33
	0,50	5	150	5	1,2	50	1280	0,1	3	40,8	1,22	35	0,6	0,52	3L31
	4	3,25	100	4,8	4	114	1310	0,15	3	33,0	3,45	44	0,8	1,20	UBL21
Normální přijímače	4	3,25	50	10	6	114	1750	0,18	5	25,5	4,47	76	1,0	2,70	UBL21
	4	7	50	21	6	167	2560	0,15	5	37,5	4,45	75	1,0	2,60	EBL21
	8	3,5	40	13	9	167	2140	0,20	5	26,5	6,3	89	1,2	4,30	BL5, 6, 12
Dokon. přednes	10	10	40	38	10	316	2270	0,15	10	31,6	10,0	79	0,8	2,20	2 × EBL21
	13	5	30	26	12	255	2040	0,20	10	22,4	11,4	100	0,9	3,20	2 × 4654 triod.
	25	10	50	30	14	500	2060	0,20	400	5,0	100	412	0,4	3,00	2 × 4654
Rozhlas. ústředn.	50	5	50	16	18	500	1600	0,25	200	5,0	100	350	0,6	4,60	2 × 4654