

Po přehledu základních elektrických a magnetických vztahů platných pro výstupní transformátory jsou v knize uvedeny požadavky kladené na tyto transformátory a charakteristické vlastnosti jednotlivých jejich typů. Poté následují podklady pro výpočet a konstrukci různých druhů výstupních transformátorů, popis technologie jejich výroby a technika jejich proměrování. Závěrem je podán přehled vyráběných typizovaných výstupních transformátorů. Kniha je určena pro techniky ve výrobních závodech a laboratořích slaboproudého průmyslu i pro vyspělejší radioamatéry.

Lektor inž. Ctirad Smetana

Redakce elektrotechnické literatury
hlavní redaktor inž. dr. František Kašpar

© Luboš Slezák, 1984

Obsah

I. Předmluva	7
II. Teorie	8
1. Princip výstupního transformátoru	8
2. Ztráty ve výstupním transformátoru	10
3. Náhradní schéma výstupního transformátoru	18
4. Zkreslení výstupního transformátoru	27
5. Teorie magnetického obvodu	31
6. Přenos pulsní transformátorem	39
7. Přizpůsobení na 100V rozvod	42
8. Výstupní transformátor s kompenzací brumového signálu	43
III. Požadavky na výstupní transformátory	45
9. Požadavky na elektrické vlastnosti	45
10. Požadavky na mechanické vlastnosti	52
11. Požadavky zvláštní	52
IV. Provedení výstupních transformátorů	53
12. Feromagnetická jádra	54
13. Cívková těleska	68
14. Navíjecí vodiče a prokladky	80
15. Pomočné materiály	85
16. Provedení cívek	87
17. Stahování výstupních transformátorů	90
V. Určení konstrukčních parametrů výstupního transformátoru	95
VI. Výpočet a návrh výstupního transformátoru	115
18. Výpočet výstupního transformátoru se stejnosměrnou předmagnetizací na plechách EI	115
19. Výpočet výstupního transformátoru pro dvojčinné zapojení třídy AB na jádře C	124
20. Výpočet výstupního transformátoru pro ultralineární zapojení na plechách tvaru M	130
21. Výpočet výstupního transformátoru pro dvojčinné zapojení třídy B (s tranzistory) na plechách E/B	134
VII. Technologie výroby	139
22. Příprava materiálu a navijecího stroje	139
23. Navíjení a úprava cívek	141
24. Montáž a impregnace transformátorů	145

VIII. Zkoušení a měření výstupních transformátorů	148
25. Zkušební metody	148
26. Měřicí metody	149
27. Měření výstupních transformátorů při sériové výrobě	158
IX. Typizované výstupní transformátory n. p. ADAST, Dubnica	162
X. Závěr	176

I. Předmluva

Kniha o výstupních transformátořech je určena pro široký okruh čtenářů se středním technickým vzděláním i radioamatérům, kteří se budou při zaměstnání, nebo při své amatérské činnosti setkávají s výpočty, návrhy, praktickým provedením a měřením výstupních transformátorů.

V knize jsou dostupnou formou probrány potřebné teoretické základy, a to se zaměřením na jejich praktické využití při vlastním návrhu transformátoru. Mnohé vztahy jsou vyjádřeny grafy, které zjednoduší některé, jinak složité výpočty. Jsou zde popsány způsoby provádění výstupních transformátorů u nás i v zahraničí. Typizované díly, používané při výrobě transformátorů nejčastěji, jsou zpracovány do přehledných tabulek. Dále jsou zde grafy závislostí používaných magnetických materiálů. Kniha obsahuje praktické výpočty a návrhy základních typů výstupních transformátorů. V krátkosti je také popsána vlastní technologie výroby od přípravy materiálu, přes navíjení až po konečnou montáž a různé úpravy po ní. Samostatná část je věnována měření výstupních transformátorů. Závěrem je popsána řada typizovaných výstupních transformátorů ADAST s potřebnými technickými údaji.

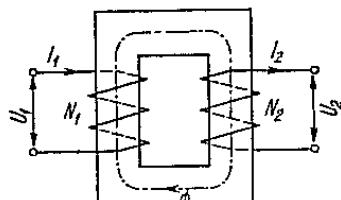
II. Teorie

1. Princip výstupního transformátoru

Výstupního transformátoru se používá v koncových stupních nízkofrekvenčních zesilovačů, v nichž má za úkol vzájemně přizpůsobit pracovní odpor výkonové elektronky nebo tranzistoru skutečné zátěži zesilovače, kterou bývají zpravidla reproduktory, vychylovací cívky v televizorech apod. U koncových zesilovacích stupňů je nutné, aby pro určité zapojení bylo použito výrobcem stanoveného pracovního odporu elektronky (tranzistoru), protože jen za těchto podmínek je zaručeno, že zesilovač předá svoje optimální zesilovací vlastnosti, tj. maximální výkon při minimálním zkreslení. Pracovní odpory elektronek jsou vždy mnohem větší než skutečné zatěžovací odpory. Oba tyto odpory je nutno vzájemně přizpůsobit. To je tedy hlavní funkce výstupního transformátoru. Dále musí výstupní transformátor oddělit stejnosměrnou složku koncového stupně od zátěže tak, aby k zátěži byla přivedena pouze složka střídavá. Přitom musí výstupní transformátor přenášet poměrně velmi široké kmitočtové pásmo určitého výkonu, s pokud možno nejmenším zkreslením.

Návrh takového transformátoru není jednoduchý. Je nutné si uvědomit, že jeho nesprávnou volbou mohou být znehodnoceny kvality jinak dobrého zesilovače, nebo naopak může být transformátor předimenzován a tím být nehostopodárný. Ani jedno, ani druhé si nemůže konstruktér dovolit.

Výstupní transformátor se v podstatě skládá, jako každý jiný transformátor, z uzavřeného feromagnetického jádra a z cívek, které jsou na toto jádro nasunuty. Cívky bývají nejméně dvě, a to cívka primární, na kterou se přivádí střídavé napětí, a cívka sekundární, ze které se indukované střídavé napětí odebírá. Na obr. 1 je základní schéma výstupního transformátoru. Z teorie transformátoru je známé, že připojí-li se na primární vinutí s N_1 závitů zdroj střídavého napětí U_1 , začne vinutím protékat střídavý proud I_1 . Tento proud



Obr. 1. Principiální schéma transformátoru

vytvoří v jádře transformátoru střídavé magnetické pole Φ , které u ideálního transformátoru, jaký je uvažován, prochází celé a bez ztrát jádrem; přitom protíná závity sekundárního vinutí, ve kterých indukuje střídavé napětí U_2 .

Zatíží-li se sekundární vinutí odporem R_2 , začne jím protékat proud I_2 . Napětí a proud sekundárního vinutí jsou závislé na velikosti napětí přiváděného na primární vinutí, na vzájemném poměru počtu závitů primárního a sekundárního vinutí a na velikosti odporu R_2 , kterým je sekundární vinutí zatíženo.

Vzájemný poměr mezi počtem závitů N_1 primárního vinutí a počtem závitů N_2 sekundárního vinutí transformátoru se nazývá převodem transformátoru a lze ho vyjádřit vztahem

$$p = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

Protože lze vyjádřit převod transformátoru i zpětně, tj. obráceným poměrem počtu závitů

$$p = \frac{N_2}{N_1} \quad (2)$$

bývá, pro jednoznačnost určení, zvykem vyjadřovat převod transformátoru jako poměr počtu závitů vyššího napětí (většího počtu závitů) k počtu závitů nižšího napětí (menšího počtu závitů).

Vztah mezi převodem transformátoru, napětími a proudy jednotlivých vinutí je

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3)$$

Pro výkon P_2 na sekundárním vinutí platí

$$P_2 = U_2 I_2 = U_2 \cdot \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_2^2}{R_2}$$

Protože u ideálního transformátoru je výkon na sekundárním vinutí stejný jako výkon na primárním vinutí, lze napsat

$$P_2 = P_1 = U_1 I_1 = U_1 \cdot \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_1^2}{R_1}$$

a tedy

$$\frac{U_2^2}{R_2} = \frac{U_1^2}{R_1} \quad (4)$$

kde R_1 je zdánlivý odpor primárního vinutí (impedance), tedy odpor, kterým je zatížen zdroj střídavého napětí.

Z rovnice (3) lze napsat

$$U_2 = \frac{U_1}{p} \quad (5)$$

Dosazením do rovnice (4) dostaneme

$$\frac{U_2^2}{R_2} = \frac{U_1^2}{R_1} = \left(\frac{U_1}{p} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_2} = \frac{U_1^2}{p^2 R_2}$$

Dělením celé rovnice výrazem U_1^2

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{p^2 R_2}$$

neboli

$$R_2 = p^2 R_1 \quad (6)$$

Z rovnice (6) vyplývá, že je-li sekundární vinutí zatíženo odporem R_2 , převádí se jeho velikost s druhou mocninou převodu na primární stranu, kde je tímto převedeným odporem zatížen zdroj střídavého napětí. Lze tedy při daném zatěžovacím odporu R_2 vhodnou změnou převodu transformátoru dosáhnout potřebné velikosti odporu R_1 .

Z rovnice (6) lze vypočítat převod transformátoru, platící pro impedanční přizpůsobení

$$p = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \quad (7)$$

2. Ztráty ve výstupním transformátoru

Všechno co bylo dosud řečeno, platí pro ideální transformátor, tedy pro takový, který nemá ztráty. Ve skutečnosti však každý transformátor ztráty má. U výstupního transformátoru lze ztráty rozdělit na několik složek:

- a) Ztráty v magnetickém jádře transformátoru.
- b) Ztráty stejnosměrnými odpory vinutí.
- c) Ztráty rozptylovou indukčností.
- d) Ztráty kapacitami transformátoru.

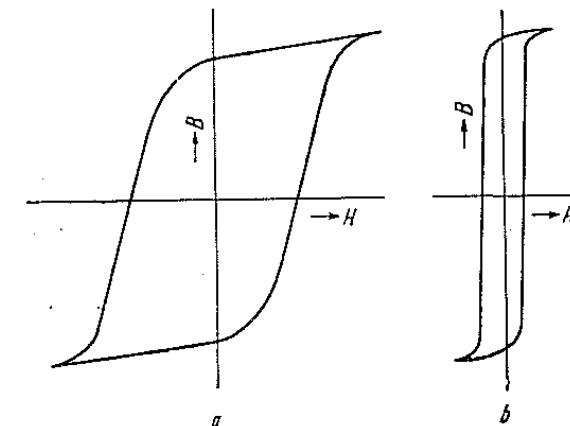
Ztráty v magnetickém jádře transformátoru

Na ztráty v magnetickém jádře transformátoru má vliv jakost použitých transformátorových plechů. Tato jakost se vyjadřuje měrnými ztrátami (ztrátovým číslem), tj. výkonem ve wattech, kterého je zapotřebí ke zmagnetizování 1 kg materiálu při udaném kmitočtu a magnetické indukci.

Ztráty v magnetickém jádře se dají rozdělit na dvě složky:

ztráty magnetickou hysterezí
a ztráty vývými proudy.

Na ztráty magnetickou hysterezí má vliv magnetická setrvačnost materiálu, která se projevuje tím, že magnetická indukce materiálu B je stále o něco zpozděna za intenzitou magnetického pole H , která indukci způsobuje. To je vyvoláno molekulárním třením při magnetickém orientování materiálu. Při střídavé magnetizaci materiálu neprobíhá závislost B na H po jednoduché křivce, nýbrž po křivkách dvou. Vytváří se tak smyčka, zvaná hysterezní,



Obr. 2. Hysterezní smyčky feromagnetických materiálů:
a) magneticky tvrdého materiálu; b) magneticky měkkého materiálu

a velikost této smyčky je přímo úměrná hysterezním ztrátám materiálu. Při každém celém kmitu budicího proudu se ztrácí energie, uměrná ploše hysterezní smyčky. Čím je materiál magneticky tvrdší, tím jsou hysterezní ztráty větší, a naopak, čím je materiál magneticky měkčí, tím jsou hysterezní ztráty menší.

Na obr. 2a je hysterezní smyčka magneticky tvrdého materiálu. Vyznačuje se tím, že má velkou plochu. Hysterezní ztráty takového materiálu, určené plochou této smyčky, jsou velké. Z takového materiálu se dělají různé trvalé magnety, např. magnety v reproduktorech.

Na obr. 2b je charakteristická hysterezní smyčka magneticky měkkého materiálu. Také zde jsou hysterezní ztráty úměrnny ploše smyčky; je vidět, že ztráty jsou podstatně menší. Takového materiálu se používá mimo jiné i na transformátorové plechy.

Velikost hysterezních ztrát je dána přibližně vztahem

$$P_h = k_n \cdot f \cdot B_m^x \cdot V$$

kde P_h jsou hysterezní ztráty v jádře [W],

x je exponent 1,6 při B do 1,2 T, nebo 2 při větších magnetických indukčích B ,

f kmitočet [Hz],

B_m	maximální magnetická indukce [T],
V	objem železného jádra [m^3],
k_n	konstanta závislá na druhu materiálu.

Ztráty výřivými proudy

Střídavé magnetické pole má tu vlastnost, že ve všech kovových předmětech, které mají rovinu kolmou na magnetické pole, indukuje střídavé napětí. Proto se i v jednotlivých železných plechách, z nichž je složeno transformátorové jádro a které vlastně tvoří závity nakrátko, indukuje napětí, a tedy jimi protékají i proudy. Tento proudům se říká proudy výřivé a po jejich objeviteli proudy Foucaultovy. Průtokem proudů plechy vzniká tepelná energie, která působí transformátoru ztráty. Na velikost indukovaného střídavého napětí v transformátorovém plechu má kromě velikosti magnetické indukce B a kmitočtu f vliv i plocha (průřez) plechu a elektrická vodivost materiálu. Aby se zmenšily ztráty výřivými proudy, používá se na jádra výstupních transformátorů co nejtenčích, vzájemně izolovaných plechů.

Výřivé proudy vyvolávají magnetické indukční toky opačného směru, než má hlavní magnetický tok v jádře transformátoru. To jednak zmenšuje hlavní indukční tok a jednak ho nerovnoměrně rozkládá v průřezu jádra. Nastává jakýsi druh povrchového magnetického jevu (obdoba skinefektu), který se zvětšuje při zvyšování kmitočtu, přičemž se jakoby zmenšuje magnetický průřez. Tím lze vysvětlit kmitočtovou závislost permeability.

Pro určení horního mezního kmitočtu f_h , od kterého se začíná uplatňovat popsaný povrchový magnetický jev, platí

$$f_h = \frac{\rho_z \cdot 10^4}{\pi^2 \cdot d^3 \cdot \mu_r}$$

kde f_h je horní mezní kmitočet,

ρ_z měrný odpor materiálu,

d tloušťka plechu,

μ_r poměrná permeabilita materiálu.

Z posledního vzorce je vidět, jak je důležité, aby pro dosažení co nejmenších ztrát výřivými proudy byly tloušťka transformátorových plechů pro výstupní transformátory co nejmenší.

Pro ztráty vzniklé výřivými proudy lze zjednodušeně napsat

$$P_v = k_v \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot d^2 \cdot V$$

kde P_v jsou ztráty způsobené výřivými proudy [W],

k_v je činitel, zahrnující v sobě měrnou vodivost materiálu i tvar křivky napětí a opracování plechů.

f kmitočet [Hz],

d tloušťka plechu [m],

V objem železného jádra [m^3].

Výrobce transformátorových plechů nerozlišuje při udávání velikosti magnetických ztrát v železe ztráty hysterezní a ztráty způsobené výřivými proudy, nýbrž je udává souhrnně pod názvem „měrné ztráty“. Měrné ztráty se udávají pro kmitočet 50 Hz a magnetickou indukci 1 T. Pro informaci lze uvažovat, že např. z měrných ztrát $Z_{10} = 1,3$ W/kg tvoří třetinu až čtvrtinu ztráty způsobené výřivými proudy.

Magnetické ztráty v jádře transformátoru lze potom vyjádřit

$$P_z = k_z \cdot Q$$

kde k_z jsou měrné ztráty v železe, udávané výrobcem, pro daný kmitočet a indukci [W/kg],

Q je váha jádra [kg],

P_z jsou magnetické ztráty v železe [W/kg].

Z uvedeného vyplývá, že pro snížení magnetických ztrát v jádře transformátoru je nutné:

1. Používat na jádra tenkých plechů.

2. Používat magnetického materiálu s malými měrnými ztrátami (s velkou permeabilitou), tj. s malou plochou hysterezní smyčky a s velkým měrným odporem. Těchto vlastností se dosahuje např. zvětšováním obsahu křemíku v železe.

3. Plechy vzájemně izolovat lakem, nebo používat přirozené oxydace plechů.

Ztráty stejnosměrným odporem vinutí

Každé vinutí transformátoru má určitý stejnosměrný odpor; jeho velikost určuje materiál, průřez a délka použitého vodiče. Výkon, který spotřebuje stejnosměrný odpor vinutí průchodem proudu, se proměňuje v teplo a způsobuje tak transformátoru ztráty. Stejnosměrný (činný) odpor vinutí je dán vztahem

$$R_{ss} = \rho \cdot \frac{4 \cdot l_s \cdot N}{\pi \cdot d^2} \quad (8)$$

kde R_{ss} je stejnosměrný odpor vinutí [Ω],

ρ měrný odpor materiálu vodiče (pro měď 0,0189 $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$),

l_s střední délka jednoho závitu [m],

N počet závitů,

d průměr vodiče [mm].

Ztráty způsobované stejnosměrným odporem vinutí jsou kmitočtově nezávislé, a proto se uplatňují v celé šíři přenášeného kmitočtového pásma.

Aby bylo možné určit celkový stejnosměrný odpor všech vinutí transformátoru, je nutné převést velikosti stejnosměrných odporů všech vinutí do primárního vinutí [a to podle rovnice (6)] a zde je algebraicky sečist.

Výsledný stejnosměrný odpor vinutí u transformátoru se dvěma vinutími je

$$R_{ss} = R_{ss1} + p^2 R_{ss2} \quad (9)$$

kde R_{ss} je celkový stejnosměrný odpor vinutí transformátoru,

R_{ss1} stejnosměrný odpor primárního vinutí,

R_{ss2} stejnosměrný odpor sekundárního vinutí,

p převod transformátoru.

Velikost stejnosměrných odporů vinutí transformátoru má vliv na časovou konstantu vinutí transformátoru τ , kterou určuje vztah

$$\tau = \frac{L_1}{R_{ss}} \quad (10)$$

kde τ je časová konstanta transformátoru [s],

L_1 primární indukčnost transformátoru [H],

R_{ss} stejnosměrný odpor vinutí podle vzorce (9) [Ω].

Vliv časové konstanty τ na šířku přenášeného kmitočtového pásma je uveden v kap. 3.

Ztráty způsobené rozptylovou indukčností transformátoru

Rozptylová indukčnost transformátoru je určena velikostí magnetického toku, který neprochází společně oběma vinutími transformátoru, tj. vinutím primárním a sekundárním, nýbrž mimo ně, takže nemůže svou energii předat. Jsou to ztráty, jejichž velikost určuje vzájemné mechanické uspořádání primárního a sekundárního vinutí transformátoru. Na tyto ztráty nemá vliv tvar ani jakost jádra transformátoru.

Označí-li se část magnetického toku, který prochází oběma vinutími, jako činitel vazby k , potom lze napsat pro rozptylovou indukčnost primárního vinutí

$$L_{s1} = L_1 \cdot (1 - k) \quad (11)$$

a pro rozptylovou indukčnost sekundárního vinutí

$$L_{s2} = L_2 \cdot (1 - k) \quad (12)$$

kde L_{s1} je rozptylová indukčnost primárního vinutí,

L_{s2} rozptylová indukčnost sekundárního vinutí,

L_1 indukčnost primárního vinutí,

L_2 indukčnost sekundárního vinutí,

k činitel vazby.

Pro rozptylové indukčnosti transformátoru lze nakreslit náhradní schéma, obr. 3a.

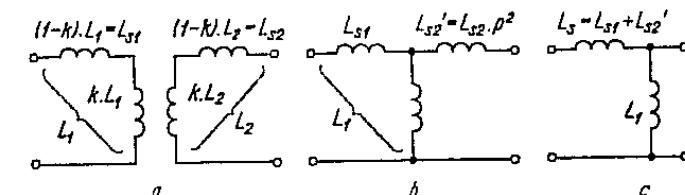
Pro převedení indukčnosti ze sekundární strany na primární se používá obdobného vztahu jako (7)

$$p = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (13)$$

Rozptylovou indukčnost sekundárního vinutí lze tedy převést na primární stranu podle (13)

$$L'_{s2} = L_{s2} \cdot p^2 = L_{s1} \quad (14)$$

a tím i zjednodušit náhradní schéma, obr. 3b.



Obr. 3. Náhradní schéma pro rozptylovou indukčnost výstupního transformátoru

Obě rozptylové indukčnosti převedené na primární stranu ($L_{s1} + L'_{s2}$) lze sloučit

$$L_{s1} + L'_{s2} = L_s \quad (15)$$

Tím nastane další zjednodušení náhradního schématu, viz obr. 3c.

Poměr rozptylové indukčnosti L_s k primární indukčnosti L_1 se nazývá činitelem rozptylu σ a platí pro něj

$$\sigma = \frac{L_s}{L_1} = \frac{L_{s1} + L'_{s2}}{L_1} = \frac{2 \cdot (1 - k) \cdot L_1}{L_1} = 2(1 - k) \quad (16)$$

U výstupních transformátorů se železným jádrem, kde je pevná vazba, lze říci, že $k \approx 1$. Úpravou rovnice (16) dostaneme

$$\sigma \approx 1 - k^2 \quad (17)$$

Vlivy rozptylové indukčnosti (činitele rozptylu) na přenosové vlastnosti výstupního transformátoru jsou probrány v kap. 3 a konstrukční výpočet v kap. XX.

Ztráty kapacitami transformátoru

Celkovou kapacitu transformátoru lze rozdělit na dvě složky:

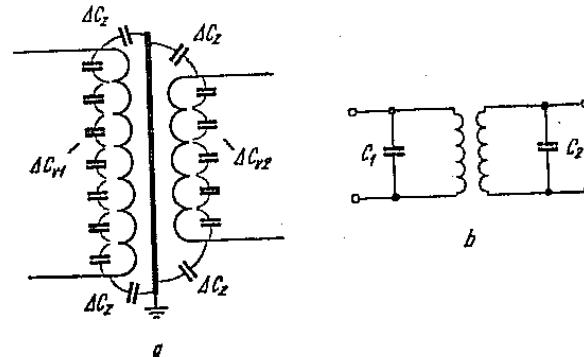
a) kapacitu vlastního vinutí,

b) kapacitu vnější (tj. kapacitu mezi vinutími a jádrem).

Kapacita vlastního vinutí je tvořena jednotlivými vrstvami navinutého vodiče, které jsou od sebe odděleny tenkými izolačními vrstvami. Jednotlivé vrstvy vodičů jsou potom spojeny za sebou přes poměrně velký stejnosměrný a indukční odpor svého vinutí, takže celek působí jako v sérii zapojené malé

Kapacitu sekundárního vinutí C_2 lze převést na primární stranu a zde ji sloučit s kapacitou primárního vinutí C_1

$$C_0 = C_1 + C_2 \cdot \frac{1}{p^2} \quad (19)$$



Obr. 4. Schematické zapojení kapacit u vinutí výstupního transformátoru

válcové kapacity, viz obr. 4a, označení ΔC_v . Na tomto obrázku je schematicky znázorněno zapojení kapacit u transformátoru.

Výsledná kapacita vinutí je dána mechanickým uspořádáním vinutí. Záleží na množství navinutých vrstev, na tloušťce a jakosti izolace vodičů, na množství a druhu použitých prokladů a na vlastním uspořádání (uložení) vinutí. Teoreticky lze říci, že velikost kapacity vinutí není závislá na počtu závitů, ani na průměru vodiče.

U válcového vinutí platí pro stanovení velikosti kapacity vinutí vztah

$$C_v = \frac{0,12 \cdot l_s \cdot b \cdot \epsilon \cdot (n - 1)}{d \cdot n^2} \quad (18)$$

kde C_v je kapacita vinutí [pF],

l_s střední délka jednoho závitu [cm],

b šířka vinutí [cm],

ϵ poměrná permitivita izolantu mezi vrstvami (pro lak je $\epsilon \approx 6$),

n počet vrstev vinutí,

d vzdálenost vodičů (vrstev) [cm].

Vnější kapacita u transformátoru, tj. kapacita mezi vinutími a jádrem transformátoru (na obr. 4a označena jako ΔC_z), bývá asi pětina celkové kapacity transformátoru.

Vlastní kapacitu vinutí a vnější kapacitu transformátoru lze spojit vždy v jednu společnou kapacitu (C_1, C_2), které jsou připojeny paralelně k primárnímu a sekundárnímu vinutí transformátoru, jak je znázorněno na obr. 4b.

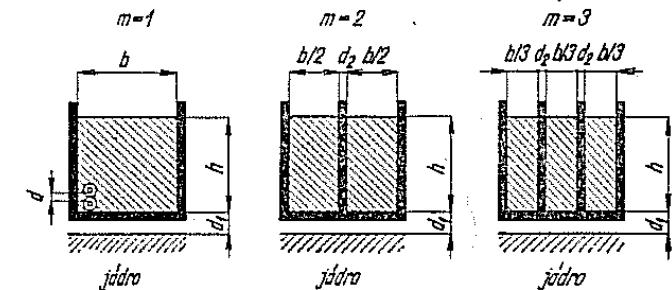
Má-li transformátor větší převod než $p = 3$, (což u výstupního transformátoru vždy je), lze zanedbat kapacitu C_2 a potom

$$C_0 = C_1 \quad (20)$$

Vlivy kapacity transformátoru na jeho přenosové vlastnosti jsou uvedeny v kap. 3.

Kapacitu vinutí lze změnit rozdelením vinutí do několika komor; vliv rozdělení na výslednou kapacitu vinutí udává tab. 1.

Tab. 1. Vliv rozdělení vinutí do několika komor na kapacitu vinutí
m = počet komor

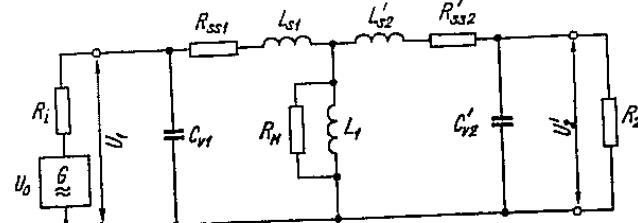


Kapacita vinutí při počtu komor m	
m	
1	$C_{v1} = \frac{0,12 l_s \cdot b \cdot \epsilon \cdot (n - 1)}{d \cdot n^2}$ kde n je počet vrstev vinutí, l_s střední délka jednoho závitu [cm], ϵ permitivita izolace mezi vodiči
2	$C_{v2} = \frac{1}{4} \left(C_{v1} + \frac{0,09 \cdot l_s \cdot h \cdot \epsilon}{d_2} + \frac{0,045 \cdot l_s \cdot h \cdot \epsilon}{d_1} \right)$
3	$C_{v3} = \frac{1}{9} \left(C_{v1} + \frac{0,18 \cdot l_s \cdot h \cdot \epsilon}{d_2} + \frac{0,15 \cdot l_s \cdot h \cdot \epsilon}{d_1} \right)$
	Kapacita [pF], rozměry [cm]

3. Náhradní schéma výstupního transformátoru

Jsou-li známy složky, které způsobují u výstupního transformátoru ztráty, lze nakreslit pro výstupní transformátor náhradní schéma. Na obr. 5 je takové schéma nakresleno. Význam označení na obrázku je následující:

- U_0 je střídavé napětí zdroje (elektronky),
- R_i vnitřní odpor zdroje (elektronky),
- U_1 střídavé napětí na primárním vinutí,
- C_1 kapacita primárního vinutí paralelně s kapacitou zdroje,



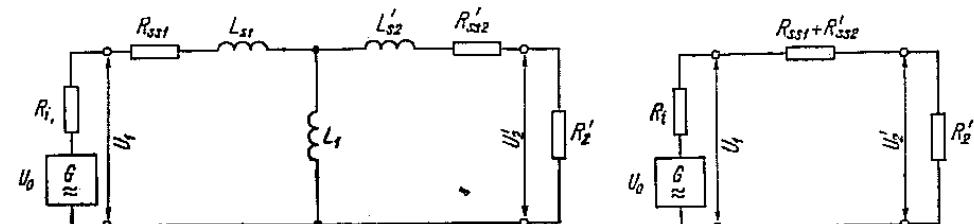
Obr. 5. Náhradní schéma výstupního transformátoru

- R_{ss1} stejnosměrný odpor primárního vinutí,
- L_{s1} rozptylová indukčnost primárního vinutí,
- L_1 indukčnost primárního vinutí,
- R_m magnetický odpor jádra,
- L'_{ss2} rozptylová indukčnost sekundárního vinutí, přepočtená do primárního vinutí ($= L_{ss2} \cdot p^2$),
- R'_{ss2} stejnosměrný odpor sekundárního vinutí, přepočtený do primárního vinutí ($= R_{ss2} \cdot p^2$),
- C'_2 kapacita sekundárního vinutí paralelně s kapacitou zátěže, přepočtená do primárního vinutí ($= C_2 \cdot \frac{1}{p^2}$),
- U'_2 napětí na sekundárním vinutí, přepočtené do primárního vinutí ($= U_2 \cdot p^2$),
- R'_2 zatěžovací odpor sekundárního vinutí, přepočtený do primárního vinutí ($= R_2 \cdot p^2$).

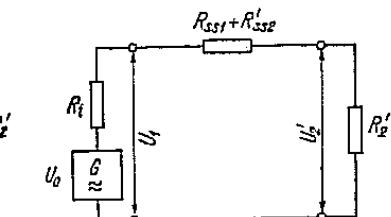
Uvedené označení bude používáno i v dalším textu.

Protože všechny ztrátové složky výstupního transformátoru nejsou kmitočtově nezávislé, lze pomocí náhradního schématu určit, jak se tyto složky budou chovat v různých kmitočtových oblastech. Pro tento účel je vhodné zjednodušit schéma na obr. 6, a to zanedbáním magnetických ztrát v jádru náhradní zapojení, viz obr. 6, a to zanedbáním magnetických ztrát v jádru transformátoru a zanedbáním kapacit vinutí.

Kmitočtová závislost podle náhradního schématu se prošetří ve třech charakteristických oblastech, a to ve středním pásmu přenášených kmitočtů, v dolním pásmu přenášených kmitočtů a v oblasti horních přenášených kmitočtů.



Obr. 6. Zjednodušené náhradní schéma výstupního transformátoru



Obr. 7. Náhradní schéma výstupního transformátoru při středním kmitočtovém přenášeném pásmu

Zvukové kmitočty, které má výstupní transformátor přenášet, se zhruba rozdělují do tří kmitočtových pásem:

- pásmo dolních kmitočtů, s rozsahem od 16 do 400 Hz,
- pásmo středních kmitočtů, od 400 do 2000 Hz,
- pásmo horních kmitočtů, od 2000 do 20 000 Hz.

Přenos středního kmitočtového pásmu

Při přenosu středního kmitočtového pásmu lze u výstupního transformátoru zanedbat jeho primární indukčnost L_1 , protože induktance $\omega_s L_1$ je podstatně větší než zatěžovací odpor R'_2 . Rovněž je možné zanedbat rozptylovou indukčnost L_{ss1} a L'_{ss2} , protože také jejich induktance je při ω_s zanedbatelně malá. Lze tedy pro přenos středního kmitočtového pásmu upravit náhradní schéma podle obr. 7. Je vidět, že v zapojení nezůstaly žádné reaktanční prvky, z čehož vyplývá, že v oblasti středních přenášených kmitočtů bude kmitočtová charakteristika rovná, bez kmitočtově závislých výkyvů v zesílení.

Střídavé napětí U_1 , přiváděné na primární vinutí transformátoru, se dělí v poměru odporek R'_2 , R_{ss1} a R'_{ss2} . (Význam značení viz str. 18.) Oba stejnosměrné odpory vinutí zde představují ztráty, které způsobují transformátoru pokles v zesílení (útlum). Tomuto poklesu v zesílení se říká provozní (vložný) útlum transformátoru, značí se b_1 (viz obr. 10), a protože je kmitočtově nezávislý, zůstává konstantní v celém přenášeném pásmu.

Zesílení (zeslabení—útlum) b se vyjadřuje v radiotechnice logaritmickými měřítky v decibelech [dB] nebo neperech [Np].

Činitel zesílení k je definován poměrem výkonů, proudu a napětí, tedy:

$$\text{činitel zesílení pro napětí } k_n = \frac{U_1}{U_2} \quad (21)$$

$$\text{činitel zesílení pro napětí } k_p = \frac{I_1}{I_2} \quad (22)$$

$$\text{činitel zesílení pro výkon } k_v = \frac{P_1}{P_2} \quad (23)$$

Činitel zesílení je bezrozměrné číslo!

Pro vyjádření skutečného zesílení (zeslabení) b v desibelech [dB] platí

$$\text{pro napětí } b_n = 20 \log k_n = 20 \log \frac{U_1}{U_2} \quad (24)$$

$$\text{pro proud } b_p = 20 \log k_p = 20 \log \frac{I_1}{I_2} \quad (25)$$

$$\text{pro výkon } b_v = 10 \log k_v = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (26)$$

Pro vyjádření zesílení b v neperech [Np] platí

$$\text{pro napětí } b_n = \ln k_n = \ln \frac{U_1}{U_2} \quad (27)$$

$$\text{pro proud } b_p = \ln k_p = \ln \frac{I_1}{I_2} \quad (28)$$

$$\text{pro výkon } b_v = \frac{1}{2} \ln k_v = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (29)$$

Vztah mezi decibely a nepery je

$$1 \text{ dB} = 0,115 \text{ Np}$$

$$1 \text{ Np} = 8,686 \text{ dB}$$

Zesílením b lze vyjádřit jak zesílení, tak i zeslabení. Je-li činitel zesílení $k = 10$, potom zesílení vyjádřené v [dB] je

$$\text{pro napětí } b_n = 20 \text{ dB},$$

$$\text{pro proud } b_p = 20 \text{ dB},$$

$$\text{pro výkon } b_v = 10 \text{ dB}$$

a pro zesílení vyjádřené v [Np]

$$\text{pro napětí } b_n = 2,302 \text{ Np},$$

$$\text{pro proud } b_p = 2,302 \text{ Np},$$

$$\text{pro výkon } b_v = 1,151 \text{ Np}.$$

Činitel zesílení transformátoru při přenosu středních kmitočtů k_1 je dán vztahem

$$k_1 = 1 + \frac{R_{ss}}{R_1 + R_2} \quad (30)$$

$$(\text{kde } R_{ss} = R_{ss1} + R'_{ss2})$$

potom je provozní zesílení (vložný útlum) při středních kmitočtech

$$b_1 = 20 \log \left(1 + \frac{R_{ss}}{R_1 + R'_2} \right) \quad [\text{dB}; \Omega] \quad (31)$$

nebo

$$b_1 = \ln \left(1 + \frac{R_{ss}}{R_1 + R'_2} \right) \quad [\text{Np}; \Omega] \quad (32)$$

Provozní zesílení b_1 je jedním ze základních ukazatelů pro vyjádření účinnosti výstupního transformátoru η , kterou lze vyjádřit

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_{ss1} + R'_{ss2}}{R'_2}} \quad (33)$$

Pro výpočet maximální přípustné velikosti stejnosměrného odporu R_{ss} při dodržení předepsaného zesílení b_1 platí následující vztahy

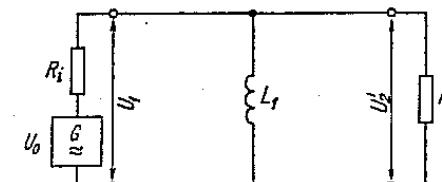
$$R_{ss} = R_{ss1} + R'_{ss2} = (R_1 + R'_2) \cdot (10^{0,05b_1} - 1) \quad [\Omega, \text{dB}] \quad (34)$$

$$R_{ss} = R_{ss1} + R'_{ss2} = (R_1 + R'_2) \cdot (e^{b_1} - 1) \quad [\Omega, \text{Np}] \quad (35)$$

Přenos dolního kmitočtového pásma

Pro tento případ je upraveno náhradní schéma podle obr. 8. Při přenosu dolních kmitočtů se hlavně uplatňuje velikost primární indukčnosti transformátoru L_1 . Indukčnost musí být takové velikosti, aby pro nejnižší dolní přenášený kmitočet ω_d byla induktance $\omega_d \cdot L_1$ rovna zatěžovacímu odporu R'_2 ($= R_2 \cdot p^2$), přesněji

$$\omega_d \cdot L_1 = \frac{R_1 \cdot R'_2}{R_1 + R'_2} \quad [\text{Hz, H; } \Omega] \quad (36)$$



Obr. 8. Náhradní schéma výstupního transformátoru při přenosu dolního kmitočtového pásma

Z rovnice (36) lze vypočítat potřebnou primární indukčnost L_1

$$L_1 = \frac{1}{\omega_d} \cdot \frac{R_1 \cdot R'_2}{R_1 + R'_2} \quad [\text{H; Hz, } \Omega] \quad (37)$$

Takto vypočítaná a použitá primární indukčnost však způsobuje při paralelním zapojení s odporem R'_2 při ω_d pokles v zesílení $b_2 = 3 \text{ dB} (= 0,35 \text{ Np})$, viz obr. 10. V praxi je ověřeno, že pokles v zesílení o 3 dB ($\pm 0,30\%$) při mezních kmitočtech lidské ucho téměř nepostřehne.

Je-li nutné zjistit dolní mezní kmitočet ω_d , při kterém nastává pokles v zesílení o 3 dB, lze použít upraveného vztahu (37)

$$\omega_d = \frac{R_1 \cdot R'_2}{L \cdot (R_1 + R'_2)} \quad [\text{Hz; } \Omega, \text{H}] \quad (38)$$

Od tohoto mezního kmitočtu se při dalším jeho snižování zmenšuje zesílení podle $\frac{1}{\omega}$, viz obr. 10.

Pro výpočet primární indukčnosti výstupního transformátoru, potřebné pro přenos ω_d s libovolným zesílením b_2 , platí

$$L_1 = \frac{1}{\omega_d \sqrt{10^{0,1b_2} - 1}} \cdot \frac{R_1 \cdot R'_2}{R_1 + R'_2} \quad [\text{H; Hz, dB, } \Omega] \quad (39)$$

$$L_1 = \frac{1}{\omega_d \sqrt{e^{2b_2} - 1}} \cdot \frac{R_1 \cdot R'_2}{R_1 + R'_2} \quad [\text{H; Hz, Np, } \Omega] \quad (40)$$

Je-li nutné zjistit zesílení b_2 při ω_d pro známé hodnoty výstupního transformátoru, je nutné určit

a) činitele zesílení k_3 při ω_d

$$k_3 = \sqrt{1 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{R_1 + R'_2} \cdot \frac{1}{\omega_d \cdot L_1} \right)^2} \quad (41)$$

b) vlastní zesílení b_2

$$b_2 = 20 \log \sqrt{1 + \left[\frac{R_1 \cdot R'_2}{(R_1 + R'_2) \cdot \omega_d \cdot L_1} \right]^2} \quad [\text{dB; } \Omega, \text{Hz, H}] \quad (42)$$

$$b_2 = \ln \sqrt{1 + \left[\frac{R_1 \cdot R'_2}{(R_1 + R'_2) \cdot \omega_d \cdot L_1} \right]^2} \quad [\text{Np; } \Omega, \text{Hz, H}] \quad (43)$$

Přenos horního kmitočtového pásma

Při přenosu vysokých kmitočtů lze upravit náhradní schéma pro výstupní transformátor podle obr. 9. V této kmitočtové oblasti se již v obvodě neuplatňuje primární indukčnost L_1 , protože induktance $\omega_h \cdot L_1$ je příliš velká. Hlavní význam zde začíná mít rozptylová indukčnost $L_s (= L_{s1} + L_{s2} \cdot p^2)$. Z náhradního schématu pro vysoké kmitočty je vidět, že induktance $\omega_h \cdot L_s$ a R'_2 jsou zapojeny v sérii. Tím vzniká dělič napětí, který rozděluje napětí U_1 v poměru jednotlivých impedancí. Induktance $\omega_h \cdot L_s$ je závislá na kmitočtu a při zvyšování kmitočtu se zvětšuje. Následkem toho se napětí U_2 na odpornu R'_2 úměrně zmenšuje a tudíž se zmenšuje i přenášený výkon.

Pro činitele zesílení na vysokých kmitočtech k_3 lze napsat

$$k_3 = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_h \cdot L_s}{R_1 + R'_2} \right)^2} \quad [-; \text{Hz, H, } \Omega] \quad (44)$$

a tedy zesílení b_3 na horních kmitočtech je

$$b_3 = 20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_h \cdot L_s}{R_1 + R'_2} \right)^2} \quad [\text{dB; Hz, H, } \Omega] \quad (45)$$

$$b_3 = \ln \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_h \cdot L_s}{R_1 + R'_2} \right)^2} \quad [\text{Np; Hz, H, } \Omega] \quad (46)$$

Stanovení maximální přípustné hodnoty L_s pro daný horní mezní kmitočet ω_h a pro povolený pokles v zesílení b_3 lze provést podle následujících rovnic

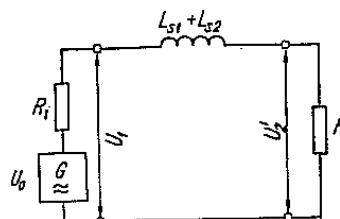
$$L_s = \frac{R_1 + R'_2}{\omega_h} \cdot \sqrt{10^{0,1b_3} - 1} \quad [\text{H; } \Omega, \text{Hz, dB}] \quad (47)$$

$$L_s = \frac{R_1 + R'_2}{\omega_h} \cdot \sqrt{e^{2b_3} - 1} \quad [\text{H; } \Omega, \text{Hz, Np}] \quad (48)$$

Je-li nutné vypočítat pro určité b_3 činitele rozptylu σ , platí obdobné vztahy

$$\sigma = \frac{R_1 + R'_2}{\omega_h \cdot L_1} \cdot \sqrt{10^{0,1b_3} - 1} \quad [-; \text{Hz, H, dB}] \quad (49)$$

$$\sigma = \frac{R_1 + R'_2}{\omega_h \cdot L_1} \cdot \sqrt{e^{2b_3} - 1} \quad [-; \text{Hz, H, Np}] \quad (50)$$



Obr. 9. Náhradní schéma výstupního transformátoru při přenosu horního kmitočtového pásma

Při povoleném poklesu v zesílení $b_3 = 3$ dB ($= 0,35$ Np) na kmitočtu ω_h potom platí pro L_s

$$L_s = \frac{R_1 + R'_2}{\omega_h} \quad [\text{H}; \Omega, \text{Hz}] \quad (51)$$

a pro činitele rozptylu σ

$$\sigma = \frac{R_1 + R'_2}{\omega_h \cdot L_1} \quad [-; \Omega, \text{Hz}, \text{H}] \quad (52)$$

Pro zesílení $b_3 = 3$ dB lze určit horní mezní kmitočet ω_h

$$\omega_h = \frac{R_1 + R'_2}{L_s} \quad [\text{Hz}; \Omega, \text{H}] \quad (53)$$

Pro stanovení přípustné velikosti kapacity transformátoru C_1 , která zaručuje přesnost horního mezního kmitočtu ω_h s libovolným zesílením b_3 lze napsat

$$C_1 = \frac{R_1 + R'_2}{R_1 \cdot R'_2 \cdot \omega_h} \sqrt{10^{0,1b_3} - 1}$$

$$C_1 = \frac{R_1 + R'_2}{R_1 \cdot R'_2 \cdot \omega_h} \sqrt{e^{2b_3} - 1}$$

Přenášená šířka kmitočtového pásma

Bylo vysvětleno, že na šířku pásma, která má být výstupním transformátorem přenášena, mají vliv tři veličiny:

- provozní zesílení na středních kmitočtech b_1 ,
- zesílení na dolních kmitočtech b_2 ,
- zesílení na horních kmitočtech b_3 .

Proto se pro určení šířky přenášeného pásma udávají povolené poklesy v zesílení b_2 a b_3 na okrajových kmitočtech a zesílení b_1 v oblasti středních kmitočtů.

Pro střední kmitočet přenášeného kmitočtového pásma ω_0 platí vztah

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_d \cdot \omega_h}$$

Poměrnou šířku přenášeného kmitočtového pásma určuje vztah

$$\left(\frac{\omega_h}{\omega_d} \right) = \frac{R_1 + R'_2}{R_1 \cdot R'_2} \cdot \frac{L_s}{L_1}$$

Uvedený vztah platí, ovlivňuje-li horní mezní kmitočet ω_h velikost rozptylové indukčnosti transformátoru L_s . V případě, že ω_h je závislá na kapacitě transformátoru C_1 , potom platí pro poměrnou šířku přenášeného kmitočtového pásma vztah

$$\left(\frac{\omega_h}{\omega_d} \right) = \frac{R_1 + R'_2}{R_1 \cdot R'_2} \cdot \frac{L_1}{C_1}$$

Zesílení b_2 při dolním mezním kmitočtu ω_d a zesílení b_1 lze vyjádřit souhrnně časovou konstantou τ

$$\tau = \frac{L_1}{R_{ss}} = \frac{1}{2 \cdot \omega_d (10^{0,05b_1} - 1) \sqrt{10^{0,1b_2} - 1}} \quad [\text{s}; \text{Hz}, \text{dB}]$$

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot \omega_d (e^{b_1} - 1) \sqrt{e^{2b_2} - 1}} \quad [\text{s}; \text{Hz}, \text{Np}]$$

Na obr. 10 je vidět, jak lze konstrukčně upravit šířku přenášeného kmitočtového pásma:

1. Zvětšením počtu závitů primárního vinutí N_1 , při zachování převodu. V takovém případě se posune ω_d k nižším kmitočtům, a protože s počtem závitů obvykle vzrůstá rozptylová indukčnost, posouvá se současně i ω_h k nižším kmitočtům (obr. 10a).

2. Je-li nutné zvětšit šířku pásma v oblasti dolních kmitočtů, musíme zvětšit permeabilitu jádra. Toho lze dosáhnout změnou jakosti železného jádra, nebo změnou rozdílu vzduchové mezery (obr. 10 b).

3. Je-li nutné zvětšit šířku pásma v oblasti horních kmitočtů, musí být zmenšena rozptylová indukčnost transformátoru. Toho lze dosáhnout rozdělením vinutí do několika souosých sekcí (obr. 10 c).

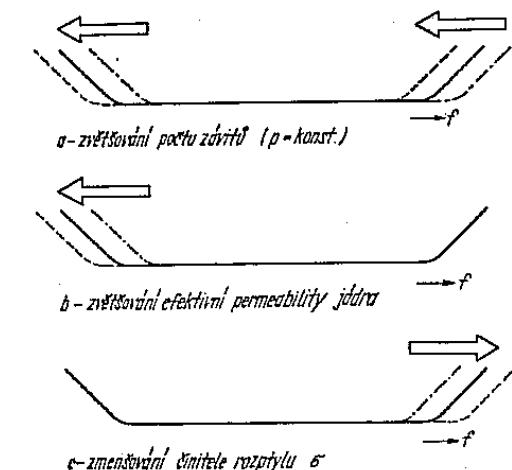
Rezonance u výstupního transformátoru

U výstupního transformátoru se může vyskytnout při vysokých kmitočtech dvojí druh rezonance:

1. Paralelní rezonance obvodu, tvořeného primární indukčností transformátoru L_1 s paralelně připojenou kapacitou transformátoru C_1 . Pro rezonanční kmitočet platí

$$\omega_{rez1} = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}$$

2. Sériová rezonance obvodu, tvořeného rozptylovou indukčností transfor-



Obr. 10. Úprava šířky přenášeného kmitočtového pásma

mátoru L_s se sériově připojenou kapacitou C_1 . V tomto případě platí pro rezonanční kmitočet vztah

$$\omega_{\text{rez}\ 2} = \frac{1}{\sqrt{L_s \cdot C_1}}$$

U některých méně jakostních zesilovačů se někdy využívá paralelní rezonance $\omega_{\text{rez}\ 1}$ výstupního transformátoru k vyrovnání poklesu v zesílení v oblasti horních kmitočtů. Proto se připojuje paralelně k primárnímu vinutí kapacita vhodné velikosti, aby rezonance byla na požadovaném kmitočtu.

Pro usnadnění výpočtu výrazů

$$x = 10^{0.1b} - 1$$

$$x = e^{2b} - 1$$

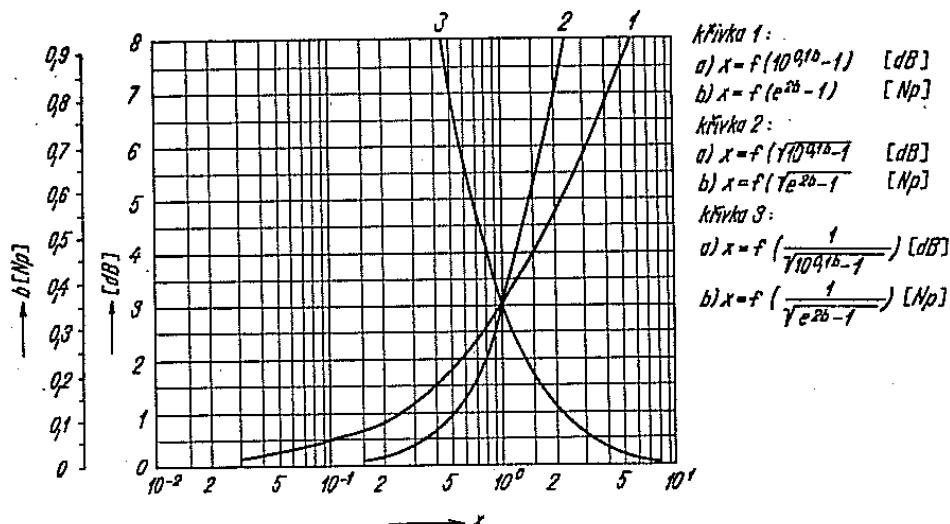
$$x = \frac{1}{\sqrt{10^{0.1b} - 1}}$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{e^{2b} - 1}}$$

$$x = \sqrt{10^{0.1b} - 1}$$

$$x = \sqrt{e^{2b} - 1}$$

používaných v rovnicích (34, 35, 39, 40, 47, 49, 50) lze použít obr. 11, kde pro určené b v [dB] či [Np] se vyhledá přímo výsledná velikost x .



Obr. 11. Pomočný graf k výpočtu útlumu

4. Zkreslení výstupního transformátoru

U výstupního transformátoru se rozeznává trojí druh zkreslení:

- a) zkreslení kmitočtové,
- b) zkreslení tvarové,
- c) zkreslení fázové.

Zkreslení kmitočtové

Kmitočtové zkreslení se projevuje tím, že výkon, který je přiveden na primární vinutí výstupního transformátoru není tímto přenášen s konstantní úrovní v celém kmitočtovém pásmu. Zavírají to kmitočtové závislé prvky, které byly probrány v kap. 3. Pro toto zkreslení nastává v okrajových oblastech přenášených kmitočtů pokles v zesílení, který je závislý na kmitočtu. Pokles v zesílení, nebo-li kmitočtové zkreslení, určuje šířku přenášeného kmitočtového pásma. Za mezní dolní nebo horní kmitočty se obyčejně považují takové kmitočty, při nichž dosahuje zkreslení hodnoty -3 dB, vztáženo ke střednímu základnímu (referenčnímu) kmitočtu, obvykle 1000 Hz.

Kmitočtové zkreslení je jedna z důležitých veličin, určujících jakost výstupního transformátoru.

Součinitel kmitočtového zkreslení výstupního transformátoru v oblasti dolních přenášených kmitočtů k_3 lze vypočítat ze vztahu (41) a vlastní kmitočtové zkreslení na horních kmitočtech b_3 ze vztahu

$$b_3 = 20 \cdot \log k_3 \quad [\text{dB}]$$

nebo

$$b_3 = \ln k_3 \quad [\text{Np}]$$

Součinitel kmitočtového zkreslení k_3 v oblasti horních přenášených kmitočtů lze pro výstupní transformátor vypočítat z rovnice (44) a vlastní kmitočtové zkreslení na horních kmitočtech b_3 je

$$b_3 = 20 \log k_3 \quad [\text{dB}]$$

nebo

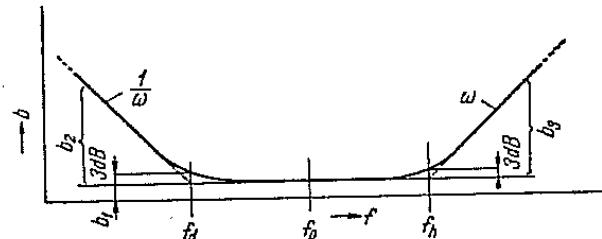
$$b_3 = \ln k_3 \quad [\text{Np}]$$

Kmitočtové zkreslení se obyčejně zakresluje do grafu, čímž vzniká kmitočtová charakteristika výstupního transformátoru, obr. 12. Na vodorovné osu grafu jsou vyneseny v logaritmickém měřítku hodnoty kmitočtů, na svislou osu v lineárním měřítku kladné a záporné hodnoty zkreslení v decibelech nebo neprech. Základem pro výpočet kmitočtového zkreslení bývá, jak již bylo řečeno, referenční kmitočet $f_0 = 1000$ Hz. Na obrázku je znázorněn základní provozní útlum transformátoru b_1 . Tomuto útlumu se také říká útlum vložný a lze jej vyjádřit výrazem

$$b_1 = 20 \log \frac{U_{20}}{U_2} \quad (59)$$

kde b_1 je základní provozní vložný útlum [dB],

- U_{20} efektivní napětí na sekundárním vinutí transformátoru při kmitočtu f_0 , které by tam bylo při ideálním transformátoru, tedy kdyby transformátor neměl ztráty [V],
- U_2 skutečné efektivní napětí na sekundárním vinutí transformátoru při kmitočtu f [V].



Obr. 12. Kmitočtové zkreslení u výstupního transformátoru

Součinitel kmitočtového zkreslení k_2 na dolních kmitočtech a k_3 na horních kmitočtech je udáván vztahem

$$k_2 = k_3 = \frac{U_2}{U_{20}} \quad (60)$$

kde U_2 je skutečné efektivní napětí na sekundárním vinutí transformátoru při kmitočtu f a jmenovitém zatížení [V],

U_{20} skutečné efektivní napětí na sekundárním vinutí transformátoru při kmitočtu f_0 a jmenovitém zatížení [V].

Zkreslení tvarové (nelineární)

Ve většině magnetických materiálů je závislost intenzity magnetického pole na magnetické indukci nelineární. Přivede-li se tedy na primární vinutí transformátor s feromagnetickým jádrem sinusové napětí, neobjeví se na sekundárním vinutí ryze sinusový průběh, nýbrž průběh zkreslený, který obsahuje amplitudy vyšších harmonických.

Má-li totiž periodické napětí (jeho časový průběh) nesinusový tvar, potom lze jeho průběh rozložit na celou řadu sinusových napětí, kterým se říká vyšší harmonické. Je-li kmitočet harmonické shodný s kmitočtem původním nesinusového napětí, říká se mu základní harmonická. Další kmitočty, ze kterých se skládá nesinusový průběh, jsou vyšší harmonické a číslují se postupně: druhá, třetí, čtvrtá atd. harmonická a značí, kolikrát je kmitočet dané harmonické vyšší než kmitočet základní (první) harmonické.

Podle tvaru nesinusového průběhu mívají vyšší harmonické různou amplitudu a fázi.

Na tvarové zkreslení výstupního transformátoru má vliv velikost přenášeného výkonu a jakost feromagnetického materiálu použitého na jádro. Vliv hystereze na intenzitu magnetického pole je vidět z rovnice pro ztráty vznikající hysterezním odporem R_h

$$R_h = h \cdot L \cdot f \cdot H \quad [\Omega; H, \text{kHz}, A/\text{cm}]$$

kde h vyjadřuje hysterezní vlastnosti materiálu při 1 H, 1 kHz, 1 A/cm.

Záleží na magnetické indukci jádra a na poměru induktance primárního vinutí ωL_1 k paralelně zapojeným odporům R_1 a R'_2 .

Není-li jádro transformátoru předmagnetizováno stejnosměrným proudem, vzniká v transformátoru zkreslení způsobené lichými násobky základní harmonické. Přitom je amplituda třetí harmonické největší, pátá harmonická je už asi jen čtvrtinová, sedmá devítinová, atd. Je tedy třetí harmonická rozhodující při posuzování velikosti tvarového zkreslení.

Je-li feromagnetické jádro výstupního transformátoru stejnosměrně předmagnetizováno, vyskytuje se ve zkreslení i sudé vyšší harmonické.

Provozní tvarové zkreslení výstupního transformátoru lze odvodit ze zkreslení při nezatíženém sekundárním vinutí, tedy když je výsledná hodnota paralelně zapojených odporů R_1 a R'_2 mnohonásobně větší než ωL_1 . Je-li při nezatíženém sekundárním vinutí velikost napětí třetí harmonické $U_{3\omega}$, je činitel tvarového zkreslení třetí harmonickou $k_{3\omega}$. Z tohoto činitele naprázdno lze určit činitele provozního tvarového zkreslení $k'_{3\omega}$ při zatíženém sekundárním vinutí

$$k'_{3\omega} = k_{3\omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(3 \frac{\omega \cdot L_1}{R'}\right)^2}}$$

$$\text{kde } R' = \frac{R_1 \cdot R'_2}{R_1 + R'_2}$$

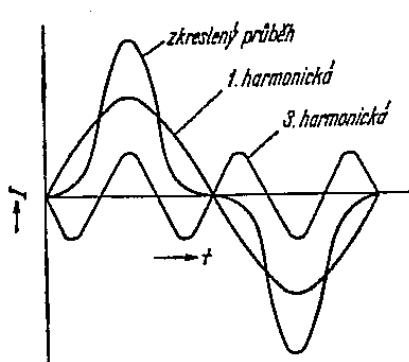
Za předpokladu, že $\frac{\omega \cdot L_1}{R_1 \cdot R'_2} = 1$, platí přibližně, že při zatížení se změní $\frac{R_1 + R'_2}{R_1 \cdot R'_2}$

zkreslení $k'_{3\omega}$ proti zkreslení naprázdno $k_{3\omega}$ podle vztahu

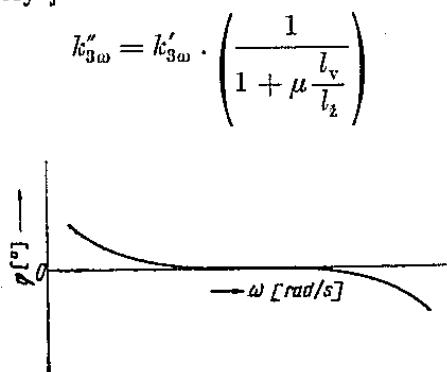
$$k'_{3\omega} \doteq 0,3 k_{3\omega}$$

Používá-li se u výstupního transformátoru stejnosměrné předmagnetizace, vzniká nebezpečí, že změnou předmagnetizace se změní i permeabilita a tím se může zvětšit nelineární zkreslení. Současně se změnou permeability se změní i primární indukčnost, což má vliv na změnu kmitočtového zkreslení na nejnižších kmitočtech. Zvětšuje-li se neúměrně stejnosměrná předmagnetizace, začne se poněkud zmenšovat zkreslení způsobované lichými harmonickými, avšak současně se začnou zvětšovat amplitudy sudých harmonických. Proto

se do obvodu feromagnetického jádra zařazuje vzduchová mezera, která vhodně upraví efektivní permeabilitu μ_{ef} . Činitel tvarového zkreslení třetí harmonickou k_3 zavedením vzduchové mezery je



Obr. 13. Rozložení nelineárního průběhu na vyšší harmonické kmitočty



Obr. 14. Typický průběh fázového zkreslení výstupního transformátoru

kde $k''_{3\omega}$ je činitel tvarového zkreslení při ω_3 se zavedením vzduchové mezery, $k'_{3\omega}$ činitel tvarového zkreslení při ω_3 bez zavedení vzduchové mezery,

$$\frac{1}{1 + \mu \frac{l_v}{l_z}} \text{ vliv vzduchové mezery na } \mu_{\text{ef}}.$$

Na obr. 13 je znázorněno zkreslení které vznikne působením třetí harmonické.

Pro výpočet činitele tvarového zkreslení k_t se vychází z velikosti amplitud proudů nebo napětí jednotlivých vyšších harmonických. Lze tedy napsat

$$k_t = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}} \quad (61)$$

kde I_1, U_1 je amplituda základní (první) harmonické proudu či napětí, I_2, I_3, \dots amplitudy vyšších harmonických proudů,

U_2, U_3, \dots amplitudy vyšších harmonických napětí.

Tvarové zkreslení b_t lze udávat v decibelech či neperech; potom platí

$$b_t = 20 \log \frac{1}{k_t} \quad [\text{dB}]$$

$$b_t = \ln \frac{1}{k_t} \quad [\text{Np}]$$

nebo v procentech

$$b_t = 100 k_t \quad [\%]$$

Zkreslení fázové

Fázové zkreslení transformátoru se projevuje tím že napětí na sekundárním vinutí výstupního transformátoru nemí ve fázi s napětím přiváděným na primární vinutí. Na velikost fázového zkreslení má při dolních přenášených kmitočtech vliv indukčnost primárního vinutí transformátoru a při horních kmitočtech rozptylová indukčnost. Fázové zkreslení se vyjadřuje v úhlových mírách.

Při dolních kmitočtech platí pro fázové zkreslení

$$\tg \varphi_d = - \frac{R_1 \cdot R'_2}{R_1 + R'_2} \quad [\Omega, \text{Hz}, \text{H}] \quad (62)$$

Fázový zdvih se zde dostává do kladných hodnot, obr. 14.

V oblasti středních přenášených kmitočtů nemá přenos výstupním transformátorem fázové zkreslení.

Při přenosu horních kmitočtů nabývá fázový zdvih působením rozptylových indukčností transformátoru záporných hodnot. Pro fázový zdvih zde platí

$$\tg \varphi_h = - \frac{\omega \cdot L_s}{\frac{R_1 \cdot R'_2}{R_1 + R'_2} (1 + \alpha)} \quad [\text{Hz}, \text{H}, \Omega] \quad (63)$$

$$\text{kde } \alpha = \frac{R'_2}{\frac{R_1 \cdot R'_2}{R_1 + R'_2}}$$

U běžných nízkofrekvenčních zesilovačů se fázové zkreslení neprojevuje nijak škodlivě, protože lidské ucho fázové zkreslení nerozezná. Škodlivě se však fázové zkreslení projevuje při přenosu signálů impulsních průběhů, jak je tomu např. v koncových stupních obrazového rozkladu v televizních přijímačích. Zde musí být přenášeny pokud možno nezkresleně jak kmitočtově, tak i tvarově a fázově všechny vyšší harmonické kmitočty, které impulsní průběh obsahuje.

5. Teorie magnetického obvodu

Jak již bylo řečeno v kap. 1, skládá se transformátor ze tří základních částí: z primární cívky, ze sekundární cívky a z feromagnetického jádra.

Protéká-li vinutím primární cívky o N_1 závitech stejnosměrný proud I_1 , vytvoří se uvnitř cívky magnetický tok Φ , který je složený z mnoha indukčních silových čar, které se uzavírají cestou nejmenšího magnetického odporu, tedy

jádrem transformátoru. Hustotu indukčních silových čar v určité ploše S , kudy prochází magnetický tok, udává magnetická indukce B

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (64)$$

Pro jednoduchost lze uvažovat, že magnetické pole Φ je homogenní. Protože má jádro transformátoru lepší magnetickou vodivost než vzduch, uzavírá se magnetický tok transformátoru jeho jádrem. Magnetický tok procházející tímto jádrem je závislý na magnetické vodivosti obvodu a na síle, která ho způsobila, které se říká magnetomotorická síla F_m . Pro magnetický tok Φ tedy platí

$$\Phi = \frac{1}{R_m} \cdot F_m \quad (65)$$

kde R_m je magnetický odpor obvodu,

F_m magnetomotorická síla, která je dána proudem I_1 a počtem závitů N_1 , tedy

$$F_m = I_1 \cdot N_1 \quad [\text{Az}] \quad (66)$$

Magnetický odpor obvodu R_m je dán magnetickou permeabilitou materiálu μ , průřezem magnetického obvodu S a jeho délkou l_t

$$R_m = \frac{l_t}{\mu \cdot S} \quad (67)$$

Permeabilita μ je materiálová konstanta prostředí, ve kterém působí magnetické pole. Je různá pro různé materiály a mění se s magnetickou indukcí materiálu. Pro permeabilitu platí vztah

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (68)$$

kde H je magnetomotorická síla F_m na jeden metr magnetického obvodu $\left[\frac{\text{Az}}{\text{m}}\right]$

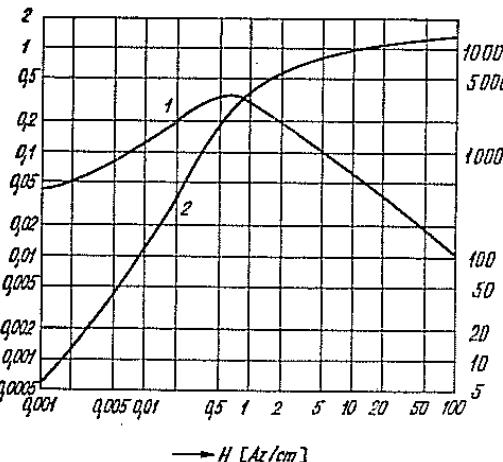
Také se jí říká intenzita magnetického pole.

Pro vzduch a materiály nemagnetické, tj. takové, které nelze zmagnetizovat, platí

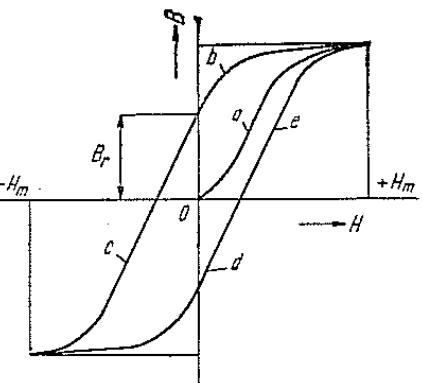
$$\mu_0 = 0,4 \pi \cdot 10^{-6} \text{ H/m} \quad (69)$$

Průběh permeability feromagnetického materiálu se obyčejně vypočítává ze závislosti $\mu = \frac{B}{H}$ a zakresluje se do grafu. Na obr. 15 je stejnosměrná, statická permeabilita materiálu pro transformátorové plechy s obsahem 3 až 4 % křemíku, tloušťky 0,35 mm.

Zvětšuje-li se plynule stejnosměrný proud protékající primárním vinutím N_1 od nuly, zvětšuje se i intenzita magnetického pole H . Za předpokladu, že je materiál dokonale odmagnetizován, zvětšuje se současně intenzita magnetického pole H i magnetická indukce B (obr. 16, křivky a) až do stavu nasycení materiálu, tj. při $+H_m$, kdy i při dalším zvětšování H už B nevzrůstá. Začne-li se nyní zmenšovat proud vinutí N_1 , zmenšuje se i H a rovněž magnetická



Obr. 15. 2 - Statická magnetizační křivka materiálu $B = f(H)$; 1 - statická permeabilita téhož materiálu $\mu = f(H)$



Obr. 16. Magnetizační cyklus materiálu

indukce B výkazuje pokles, který však neprobíhá po křivce a , ale po křivce b . Při nulové hodnotě H neklesne indukce B na nulu, nýbrž zůstává na určité hodnotě B_r , zvané remanence. Změní-li se smysl intenzity magnetického pole a zvětšuje-li se intenzita do záporných hodnot, zmenšuje se i indukce postupně na nulu a potom dále podle křivky c do záporných hodnot. Také zde nastává nasycení materiálu při hodnotě $-H_m$. Zmenšuje-li se $-H$ zpět k nule, probíhá indukce podle křivky d a při dalším zvětšování H opět do kladných hodnot, vznrůstá indukce podle křivky e .

Celým cyklem, právě popsaným, vznikne známý průběh hysterezní smyčky, ze které se používá části křivky b , nazývané magnetizační křivkou. Na obr. 15, křivka 2, je znázorněn průběh statické magnetizační křivky materiálu pro transformátorové plechy s obsahem 3 až 4 % křemíku, tloušťky 0,35 mm.

Nechá-li se cívkou N_1 procházet střídavý proud, sledují okamžité hodnoty B obrys hysterezní smyčky, jejíž velikost a sklon určuje amplituda proudu. Dynamická (střídavá) permeabilita μ_d materiálu má tedy vliv na velikost $B_{stř}$. Na obr. 17 je průběh dynamické permeability $\mu_d = f(H_{stř})$. Křivka platí pro transformátorový plech TN 1,3–0,35 mm.

Pro indukčnost cívky s feromagnetickým jádrem platí obecně vztah

$$L = 0,4 \pi \cdot \frac{S \cdot N^2}{l_z} \cdot \mu_{\text{ef}} : 10^{-8} \quad (70)$$

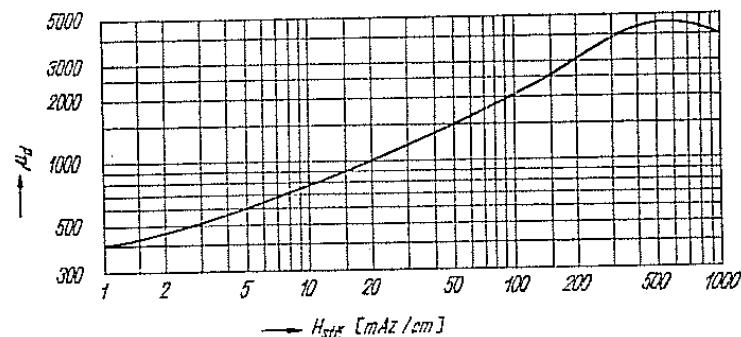
kde L je indukčnost cívky [H],

S efektivní průřez jádra [cm^2],

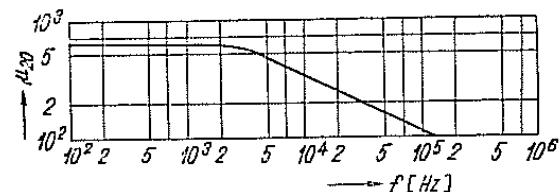
N počet závitů,

l_z střední délka magnetické silové čáry [cm],

μ_{ef} efektivní permeabilita, vyjadřující magnetické vlastnosti jádra.



Obr. 17. Průběh dynamické permeability materiálu $\mu_d = f(H_{\text{stř}})$



Obr. 18. Kmitočtová závislost dynamické permeability $\mu_d = f(f)$

Je-li jádro syceno pouze střídavě, platí $\mu_{\text{ef}} = \mu_d$.

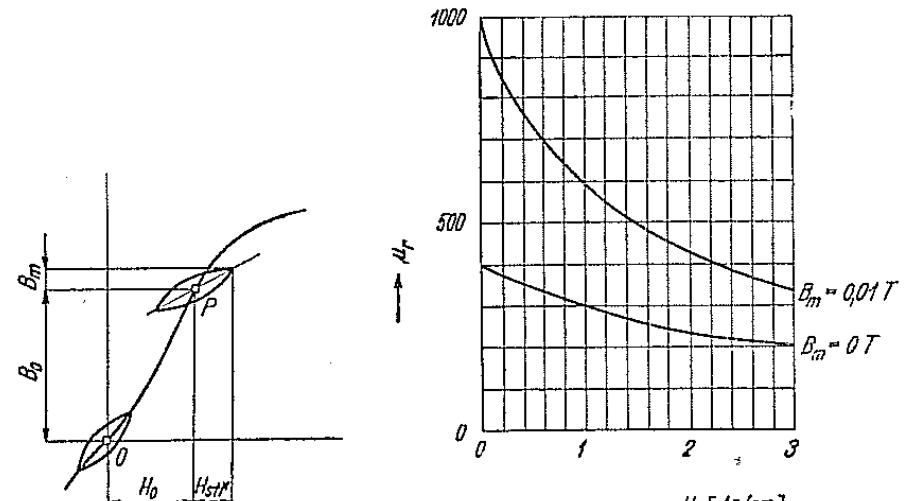
Dynamická permeabilita je kmitočtově závislá. Na obr. 18 je kmitočtová závislost μ_d běžných transformátorových plechů TN 1,3–0,35 mm, $\mu_d = f(f)$. Zde se vyskytuje permeabilita materiálu, označená μ_{20} . Je to permeabilita, kterou má určitý materiál při intenzitě magnetického pole $H = 20 \text{ mOe}$. (Každou hodnotou permeability je totiž nutné uvádět s příslušnou velikostí intenzity magnetického pole H .)

Je-li v jádře zavedena stejnosměrná předmagnetizace, posune se pracovní bod O po statické magnetizační křivce podle velikosti H_0 do určité polohy a kolem tohoto bodu vznikne působením střídavé magnetizace nová hysterezní smyčka, obr. 19.

Sklon nově vzniklé hysterezní smyčky určuje tzv. vratnou (reverzibilní) permeabilitu μ_r

$$\mu_r = \frac{B_m}{H_{\text{stř}}} \cdot 0,8 \quad (71)$$

Vratná permeabilita se zmenšuje při zvětšování intenzity stejnosměrného magnetického pole H_0 . Na obr. 20 je naznačeno, jak se mění μ_r se zvětšující se předmagnetizací H_0 .



Obr. 19. Vliv stejnosměrné předmagnetizace na současné střídavé sycení jádra

Obr. 20. Závislost vratné permeability $\mu_r = f(H_0)$, při $B_m = \text{konst}$

Aby se zlepšily vlastnosti jádra, které je syceno současně střídavě i stejnosměrně, zavádí se do magnetického obvodu o délce l_z vzduchová mezera l_v . Tím se zvětší magnetický odpor jádra, čímž se současně zmenší střídavě i stejnosměrné sycení jádra.

Zavedení vzduchové mezery l_v se tedy projevuje obdobně jako zmenšení intenzity magnetického pole H_0 a μ_r .

Rovnici (70) lze upravit tak, aby měla tvar [1]

$$L \cdot I_0^2 = 0,4 \pi S \cdot \mu_{\text{ef}} \cdot l_z \cdot 10^{-8} \left(\frac{I_0 \cdot N}{l_z} \right)^2 = 0,4 \pi S \cdot \mu_{\text{ef}} \cdot l_z \cdot 10^{-8} \cdot H_0^2 \quad (72)$$

Protože velikost indukčnosti je přímo úměrná μ_{ef} , je nutné předběžně stanovit μ_{ef} v závislosti na velikosti součinu $L I_0^2$.

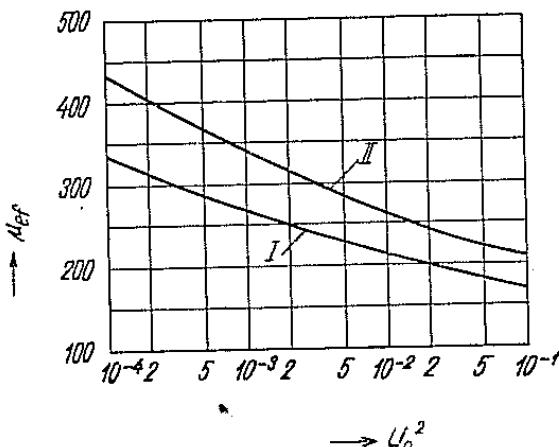
Efektivní permeabilitu lze určit ze vztahu

$$\mu_{\text{ef}} = \frac{\mu_r}{1 + \frac{\mu_r}{\alpha}} \quad (73)$$

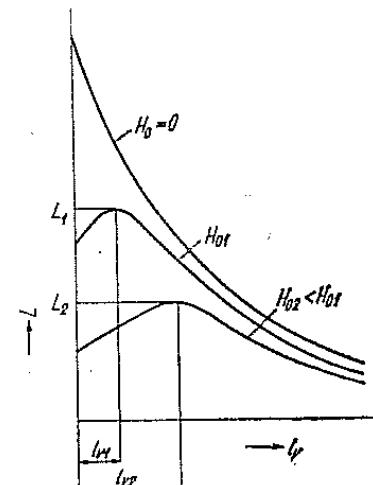
kde μ_{ef} je efektivní permeabilita materiálu,

μ_r vratná permeabilita materiálu (nebo μ_d),

$$\alpha = \frac{l_z}{l_v}.$$



Obr. 21. Závislost efektivní permeability na součinu LI^2



Obr. 22. Závislosti mezi indukčnostmi slyky se železným jádrem; velikostmi vzduchových mezér a velikostmi stejnosměrné předmagnetizace

V praxi slouží pro snadné zjištění efektivní permeability μ_{ef} graf na obr. 21, v němž platí křivka I pro transformátorový plech TN 1,3–0,35 mm a křivka II pro Ortoperm.

Intenzita magnetického pole H_0 je závislá na velikosti vzduchové mezery l_v a tedy je na ní závislá i velikost indukčnosti L . Na obr. 22 je nakresleno, jaký vliv má velikost l_v při určitém H_0 na indukčnost L . Z obrázku je patrno, že pro každou velikost H_0 existuje optimální velikost l_v , při níž je indukčnost L maximální.

Potřebný počet závitů N pro dodržení požadované indukčnosti L při stanovené μ_{ef} je dán vztahem

$$N = 8,92 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{L \cdot l_z}{\mu_{\text{ef}} \cdot S}} \quad (74)$$

kde N je počet závitů,

L indukčnost [H],

l_z střední délka magnetické silové čáry [cm],

S efektivní průřez jádra [cm^2],

μ_{ef} předběžně stanovená efektivní permeabilita.

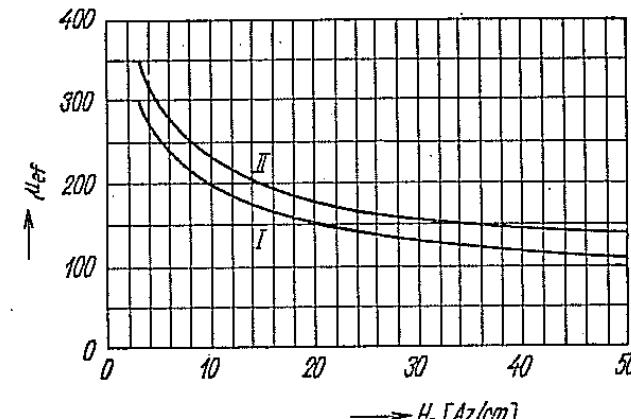
Z vypočteného počtu závitů N lze zjistit velikost H_0

$$H_0 = \frac{I_0 N}{l_z} \quad (75)$$

kde H_0 je intenzita magnetického pole [Az/cm],

I_0 stejnosměrný (anodový) proud protékající vinutím [A],

l_z střední délka magnetické silové čáry [cm].



Obr. 23. Závislost efektivní permeability na stejnosměrné předmagnetizaci;
I. — plechy TN 1,3–0,35 mm, II. — Ortoperm

Pro vypočítanou intenzitu magnetického pole H_0 lze zjistit opravnou hodnotu μ_{ef} podle obr. 23. Zde platí křivka I pro transformátorový plech TN 1,3–0,35 mm, křivka II pro Ortoperm.

Podle opravné hodnoty μ_{ef} musíme poopravit počet závitů N podle vztahu (74)

$$N = 8,92 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{L \cdot l_z}{\mu_{\text{ef}} \cdot S}}$$

Optimální rozměr vzduchové mezery l_v lze určit výpočtem podle obr. 24, kde

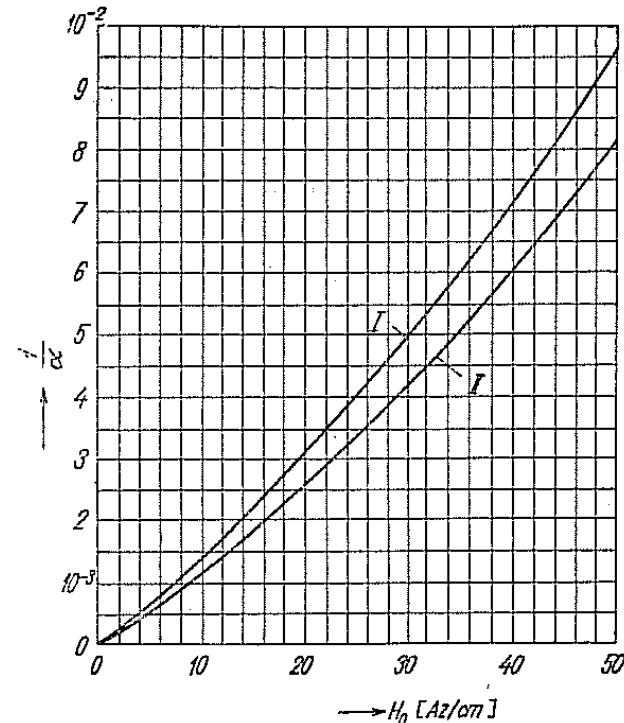
$$\alpha = \frac{l_z}{l_v} \quad (76)$$

Křivka I platí pro transformátorový plech TN 1,3–0,35 mm, křivka II pro Ortoperm.

Vlastní rozměr l_v lze vypočítat ze vztahu

$$l_v = l_z \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot 10^{-1} \quad (77)$$

kde l_v je velikost vzduchové mezery [mm],
 l_z střední délka magnetické silové čáry [cm],
 $\frac{1}{\alpha}$ z obr. 24.



Obr. 24. Závislost pro určení optimálního rozměru vzduchové mezery pro určitou velikost stejnosměrné předmagnetizace;

I. — plechy TN 1,3–0,35 mm, II. — Ortoperm

Velikost skutečné (geometrické) vzduchové mezery l'_v u transformátorových plechů tvaru EI, E/B a u jader C je

$$l'_v = \frac{l_v}{2} \quad (78)$$

Rovnici pro výpočet indukčnosti (70) lze zjednodušit, zavede-li se do výpočtu indukčnostní konstanta

$$\left(\frac{A_L}{\mu} \right) = 0,4 \pi \cdot \frac{S \cdot 10^{-8}}{l_z} \quad (79)$$

která je konstantní pro určitý typ a velikost jádra.

Výpočet indukčnosti vinutí transformátoru se zavedením indukčnostní konstanty podle (79) zjednoduší na tvar

$$L = \left(\frac{A_L}{\mu} \right) \mu_{\text{ef}} \cdot N^2 \quad [\text{H}] \quad (80)$$

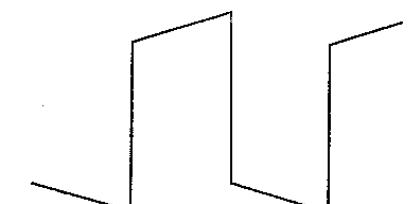
Hodnoty indukčnostních konstant $\left(\frac{A_L}{\mu} \right)$ jsou uvedeny pro jednotlivé typy a rozměry jader v tab. 22. až 25.

6. Přenos impulsů transformátorem

Má-li transformátor přenášet signál impulsního průběhu, musíme si uvědomit, že se tento signál skládá z nekonečného, nebo v nejlepším případě z hodně velkého, množství sinusových průběhů vyšších harmonických kmitočtů, které musí být přeneseny transformátorem pokud možno bez kmitočtového a fázového zkreslení. Oba druhy uvedeného zkreslení při vyšších harmonických kmitočtech zmenšují strmost při náběhu (narůstání) impulsu, jak je znázorněno



Obr. 25. Zkreslený tvar obdélníkových impulsů způsobený lineárním zkreslením v oblasti horních kmitočtů (velké L_u)



Obr. 26. Zkreslený tvar obdélníkových impulsů způsobený lineárním zkreslením v oblasti dolních kmitočtů (malé L_d)

na obr. 25. Vzniká-li naproti tomu kmitočtové a fázové zkreslení základního kmitočtu, vznikne u přenášeného impulsu tvarové zkreslení, projevující se skloněním v horní části průběhu, obr. 26.

Impulsní přenos výstupním transformátorem je složitý a zde nebude podrobně probíráno. Čtenář najde potřebný podrobnější rozbor v literatuře [1].

Součinitel tvarového zkreslení výstupního transformátoru při přenosu nízkých kmitočtů k_{2t} je dán vztahem

$$k_{2t} = \frac{U_T}{U_0} = e^{-\frac{R}{L_1} \cdot T}$$

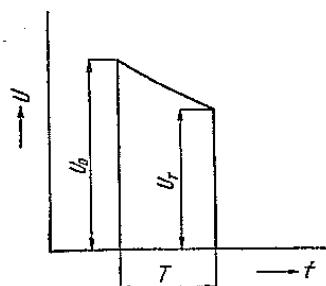
$$\text{kde } R = \frac{R_1 \cdot R'_2}{R_1 + R'_2},$$

$T = \frac{\pi}{\omega}$ je časový interval impulsu, obr. 27,

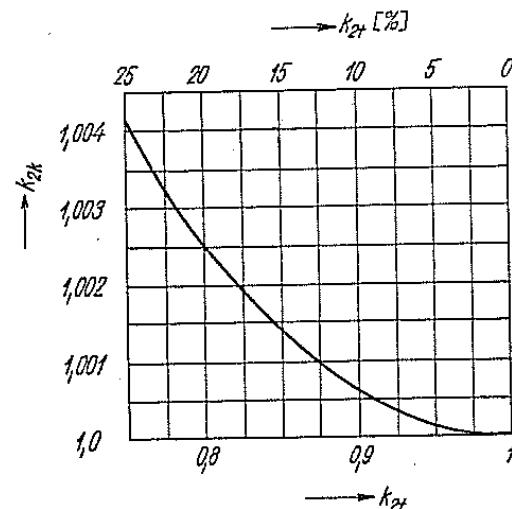
U_T, U_0 amplitudy napětí podle obrázku.

Pro určení velikosti indukčnosti L_1 , potřebné k dosažení předepsaného součinitele tvarového zkreslení k_{2t} na dolních kmitočtech, platí

$$L_1 = \frac{R \cdot T}{\ln \frac{1}{k_{2t}}}$$



Obr. 27. Určení velikosti tvarového zkreslení impuluši při horních kmitočtech



Obr. 28. Graf pro usnadnění přepočtu součinitele kmitočtového zkreslení na koeficient tvarového zkreslení v oblasti dolních kmitočtů při přenosu impulsů

Pro stanovení součinitele kmitočtového zkreslení při nízkých kmitočtech k_{2k} lze použít vztahu

$$k_{2k} = \sqrt{1 + \left(\frac{\ln \frac{1}{k_{2t}}}{\pi} \right)^2}$$

K zjednodušenému přepočtu součinitele tvarového zkreslení na kmitočtové zkreslení a naopak slouží graf na obr. 28.

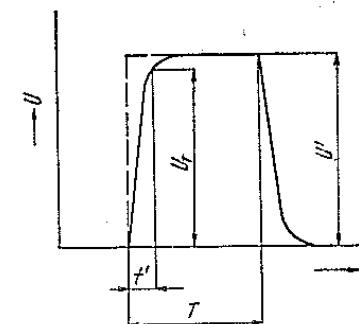
Při vysokých kmitočtech platí pro určení součinitele tvarového zkreslení k_{3t} vztah

$$k_{3t} = \frac{U_T}{U'}$$

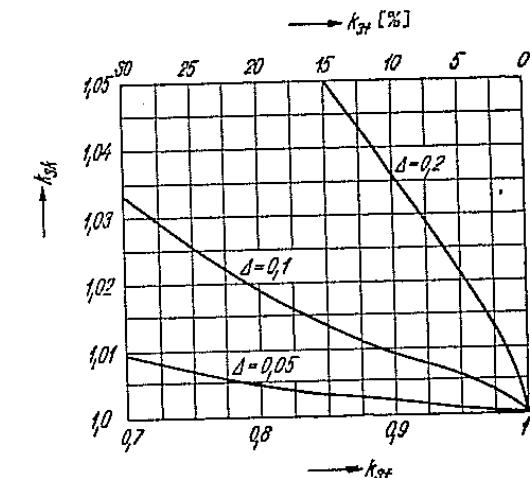
kde U_T, U' jsou amplitudy napětí podle obr. 29.

Čas, ve kterém dostoupí napětí hodnoty U_T , je označen jako t' . Poměr tohoto času k celkové délce času trvání impulsu T je

$$\Delta = \frac{t'}{T}$$



Obr. 29. Určení velikosti tvarového zkreslení impuluši při horních kmitočtech



Obr. 30. Graf pro usnadnění přepočtu součinitele kmitočtového zkreslení na koeficient tvarového zkreslení v oblasti horních kmitočtů při přenosu impulsů

Potom velikost rozptylové indukčnosti L_s , která zaručuje přenos vysokých kmitočtů s povoleným součinitelem tvarového zkreslení k_{2t} , lze vyjádřit výrazem

$$L_s = \frac{\Delta \cdot T(R_1 + R_{ss1} + R'_{ss2} + R'_2)}{\ln \frac{1}{1 - k_{3t}}}$$

Součinitele kmitočtového zkreslení při vysokých kmitočtech k_{3k} určuje vztah

$$k_{3k} = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi \Delta}{\ln \frac{1}{1 - k_{3t}}} \right)^2}$$

Také zde pro usnadnění přepočtu k_{3t} na k_{3k} lze použít grafu na obr. 30.

7. Přizpůsobení na 100V rozvod

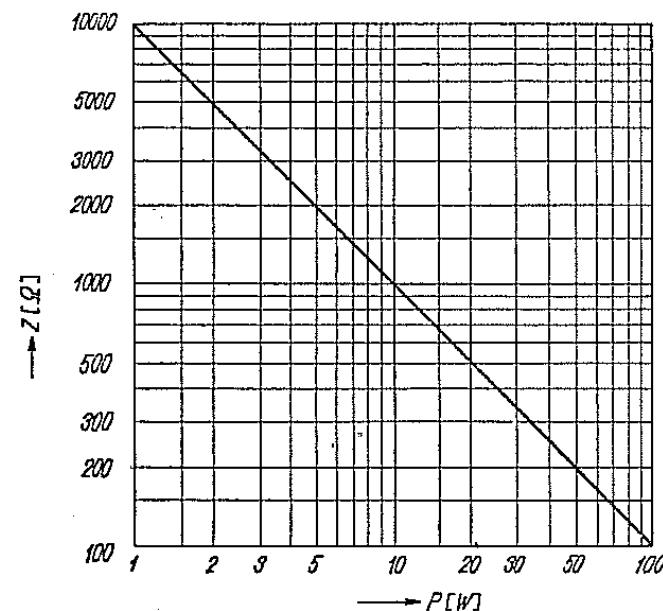
Někdy potřebujeme připojit k zesilovači celou řadu reproduktorů. Jsou-li reproduktory hodně vzdálené od vlastního zesilovače, je vhodné provést výstup zesilovače jako 100V linku. Pro tuto linku je nutné přizpůsobit i výstupní transformátor.

Výstupní impedance zesilovače a tedy i impedance linky je různá pro různé velikosti výstupního výkonu; je dána vztahem

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{10^4}{P} \quad (81)$$

kde R je výstupní impedance zesilovače (linky) [Ω],

P výstupní výkon [W].



Obr. 31. Graf pro rychlé určení impedance linky 100V rozvodu při určitém výkonu

K 100 V lince (rozvodu) lze připojovat paralelně reproduktory různých příkonů, ovšem jen tolik, aby součet příkonů reproduktorů nepřekročil jmenovitý výkon zesilovače. Reproduktory musí být připojovány k lince přes převodní transformátory, které přizpůsobují impedance kmitacích cívek reproduktorů impedance linky. Převod transformátorů určuje vztah

$$p = \sqrt{\frac{R}{R_r}} \quad (82)$$

kde R je impedance 100 V linky [Ω],

R_r impedance kmitací cívek reproduktoru [Ω].

Zesilovač pro 100 V rozvod musí být řešen tak, aby při jmenovité zátěži dával svoje jmenovité napětí. Při odpojení zátěže (při chodu naprázdno) může činit vzestup napětí až 30 % jmenovitého napětí. Proto nutno vnitřní odporník zesilovače upravit vhodně volenou zápornou zpětnou vazbou.

Na obr. 31 je graficky vyjádřena závislost mezi výstupním výkonem zesilovače a výstupní impedance linky.

Velikost napětí na lince o určité impedance R při daném výkonu P určuje vztah

$$U = \sqrt{P \cdot R} \quad [\text{V}; \text{W}, \Omega] \quad (83)$$

8. Výstupní transformátor s kompenzací brumového signálu

U nf zesilovačů nastává někdy potíž s odstraněním nežádoucí brumové složky, vznikající nedokonalou filtrací stejnosměrného napětí apod. Tento brum lze zmenšit mimo jiné známé způsoby i kompenzací, a to zvláštním vinutím na výstupním transformátoru. Místo samostatného zvláštního vinutí lze použít i stávajícího primárního vinutí s vhodně zvolenou odběrkou.

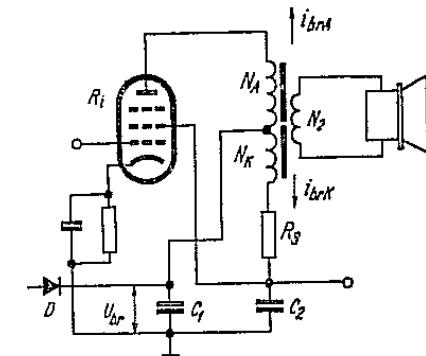
Na obr. 32 je zapojení pro kompenzaci brumu výstupním transformátorem. Na filtračním kondenzátoru C_1 je brumové napětí U_{br} , jež dává vznik průchodem primárního vinutí transformátoru N_A brumovému proudu i_{brA} . Kompenzační vinutí N_K může být samostatné, nebo vytvořené z části primárního vinutí. Vinutí N_K a odporem R_s , zapojeným v sérii, protéká brumový proud i_{brK} , příslušející elektronkám v předcházejících zesilovacích stupních a stínici mřížce koncové elektronky. Označíme se vnitřní odpor elektronky R_i , potom platí pro jednotlivé brumové proudy vztahy

$$i_{brA} = \frac{U_{br}}{R_i}$$

$$i_{brK} = \frac{U_{br}}{R_s}$$

Oba brumové proudy indukují odpovídající střídavé napětí v sekundárním vinutí N_2 , takže při vhodné volbě odběrkového vývodu X platí

$$i_{brA} \cdot N_A = i_{brK} \cdot N_K$$



Obr. 32. Zapojení koncového stupně při brumové kompenzaci výstupním transformátorem

Dosazením za i_{brA} a i_{brK} dostaneme

$$\frac{U_{\text{br}}}{R_l} \cdot N_A = \frac{U_{\text{br}}}{R_s} \cdot N_K$$

$$\frac{N_A}{R_l} = \frac{N_K}{R_s}$$

Potom poměr pro počet závitů lze určit z výrazu

$$\frac{N_A}{N_K} = \frac{R_l}{R_s} \quad (84)$$

a z něho sériový odpor R_s

$$R_s = \frac{R_l \cdot N_K}{N_A} \quad (85)$$

V praxi se volivá počet závitů kompenzačního vinutí N_K mezi dvěma až pěti procenty počtu závitů primárního vinutí N_A . Vinutí N_K bývá z vodiče o průměru asi 0,2 mm, takže ho lze snadno přivinout na cívku výstupního transformátoru. Odpor R_s bývá 1 až 2 kΩ. Tento odpor není nutno pro poměrně malý odběr proudů dimenzovat na velké výkony.

III. Požadavky na výstupní transformátory

Od výstupních transformátorů se požaduje, aby vykazovaly určité kvalitativní vlastnosti. Požadavků není málo a často bývají tak náročné, že je lze velmi těžko splnit. Tyto požadavky se postupně časem utvářely, byly různě obměňovány a doplňovány, mnohé z nich byly začleněny do různých norem.

Zásadně lze požadavky na výstupní transformátory rozdělit do tří skupin:

1. požadavky na elektrické vlastnosti,
2. požadavky na mechanické vlastnosti,
3. požadavky zvláštní.

Některé skupiny spolu úzce souvisí, mnohé se vzájemně prolínají, takže nelze mezi nimi vytvořit přesné hranice.

9. Požadavky na elektrické vlastnosti

Sem patří požadavky na přenášený výkon, na druh zapojení (provozní třídu) výkonového zesilovače, na zkreslení, na ztráty a účinnost, na impedanční přizpůsobení a na elektrickou izolační pevnost.

Přenášený výkon

Jedním ze základních požadavků bývá velikost střídavého výkonu, který musí výstupní transformátor přenášet. Tuto velikost určuje skutečná potřeba akustického výkonu, který má vlastní reprodukční zařízení dodávat.

Podle potřebného akustického výkonu lze stanovit, jakého množství a jakých typů reproduktorů bude nutné použít. Tím je vlastně určena i velikost elektrického výkonu, který musí reproduktorem dodat zesilovač, a tedy výkon, který bude výstupní transformátor přenášet.

Velikost přenášeného výkonu se obvykle zaokrouhuje na některou hodnotu z normalizované řady elektrických nízkofrekvenčních výkonů. Tato řada obsahuje jedenáct členů:

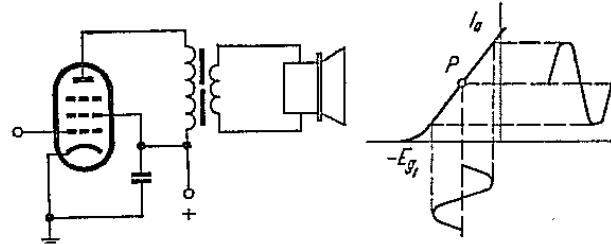
0,1—0,35—0,7—1,5—3,0—6,0—10—15—25—50—100 W.

Z požadované velikosti přenášeného výkonu lze informativně odhadnout budoucí rozměry výstupního transformátoru.

Druh zapojení

Podle potřebného výkonu se určuje se zítelem na velikost přípustného zkreslení typ výkonových koncových elektronek nebo tranzistorů a druh jejich provozních zapojení. Provozním zapojením se rozumí třída provozu, ve které bude konečný stupeň zesilovače pracovat. Provozní třídy se rozdělují podle doby, po kterou protéká elektronkami (tranzistory) proud:

Provozní třída A. V tomto zapojení prochází výstupním transformátorem trvale anodový proud po celou dobu periody zesilovaného střídavého napětí. Složka stejnosměrného anodového proudu je poměrně velká. Využívá se zde



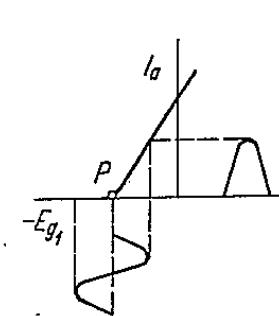
Obr. 33. Jednočinné zapojení koncového stupně v provozní třídě A a poloha pracovního bodu

rovné části převodové charakteristiky, a proto nemůže toto zapojení vyvinout velké výkony. Účinnost takového zapojení je asi jen 20 až 30 %. Je-li volen pracovní bod elektronky správně, tj. uprostřed rovné části charakteristiky, je nelineární zkreslení, pokud není elektronka přetížena, velmi malé. Tohoto zapojení se používá v nesouměrném zapojení zesilovače, tedy u zesilovače, který má v koncovém stupni jedinou elektronku. Pro jednoduchost se v praxi velmi často tohoto zapojení používá u zesilovačů s menším výkonem, např. v rozhlasových přijímačích atd. Na obr. 33 je charakteristické zapojení takového zesilovače a na grafu je znázorněno umístění pracovního bodu na převodové charakteristice elektronky.

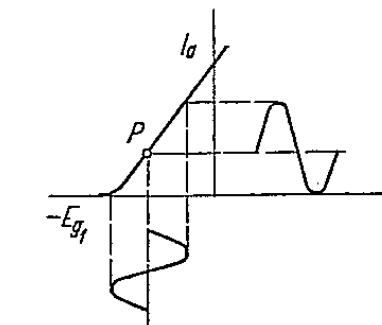
Provozní třída B. V tomto zapojení při vhodném umístění pracovního bodu elektronky na převodové charakteristice elektronky prochází proud výstupním transformátorem jen po dobu jedné poloviny periody střídavého napětí které je zesilováno. Pracovní bod je zvolen na začátku převodové charakteristiky elektronky, takže při záporné půlvlně střídavého napětí, které se přivede na mřížku elektronky, je anodový proud téměř nulový. Tím se dá zvětšit účinnost zesilovacího stupně asi na 70 %. Na obr. 34 je v grafu vyznačena poloha pracovního bodu elektronky na převodové charakteristice pro zapojení v provozní třídě B. Z obrázku je patrné, že na anodě vzniká velké zkreslení, rádově až desítky procent. Tohoto zapojení se nepoužívá pro nesouměrné ze-

silovače, ale skoro výlučně jen pro dvojčinná zapojení, hlavně však tam, kde je potřeba dosáhnout co největší účinnosti, jako tomu je u tranzistorových zesilovačů nebo u zesilovačů největších výkonů. Tam, kde se vyžaduje malé nelineární zkreslení, není toto zapojení vhodné.

Provozní třída AB. Tato třída je středním řešením mezi třídou A a třídou B. Pracovní bod elektronky je v tomto případě volen v dolním ohybu převodové charakteristiky elektronky, takže anodový proud protéká výstupním transformátorem po celou dobu kladné poloviny periody zesilovaného napětí



Obr. 34. Umístění pracovního bodu při provozní třídě B



Obr. 35. Umístění pracovního bodu při provozní třídě AB

a z velké části i po dobu záporné poloviny periody střídavého napětí. Také zde, obdobně jako při provozu B, nastává zesílením poměrně velké zkreslení, takže se v jednočinném zapojení téměř nepoužívá; bývá jen v zapojení dvojčinném. Účinnost zesilovače zde dosahuje až 50 %.

V provozní třídě AB je někdy pracovní bod umístěn tak, že elektronkou protéká mřížkový proud. Takový provoz se potom označuje AB2. Je-li pracovní bod volen tak, aby nemohl téci mřížkový proud, označuje se provoz AB1.

Na obr. 35 je v grafu znázorněna poloha pracovního bodu elektronky při provozu v třídě AB1.

V praxi se nejčastěji vyskytuje zapojení:

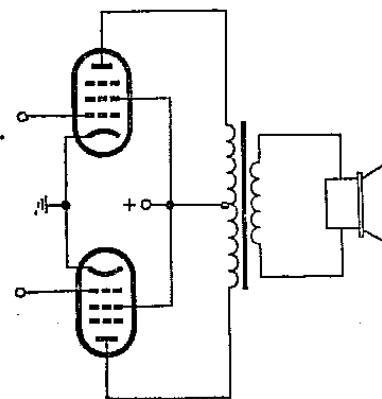
v jednočinném zapojení provozní třídy A,
ve dvojčinném zapojení provozní třídy AB1 a B.

Většina jakostních zesilovačů dnes používá nesouměrného (dvojčinného) zapojení. Takové zapojení skýtá mnoho výhod, a to i pro vlastní funkci transformátoru. Odstraňuje např. stejnosměrnou předmagnetizaci jádra transformátoru. To je veliká výhoda, protože výroba transformátoru se zjednoduší o pracné nastavování vzduchové mezery. Dále odpadá nebezpečí přesycení jádra stejnosměrnou magnetizací, což zmenšuje nebezpečí vzniku tvarového zkreslení. Stejnosměrné anodové proudy obou koncových elektronek protékají proti sobě

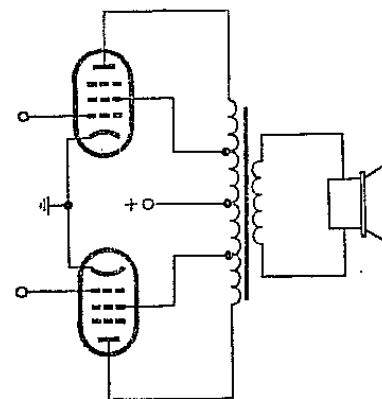
od středu vinutí výstupního transformátoru, takže, jsou-li elektronky stejné a mají-li správně nastavený pracovní bod, nastává vzájemné zrušení proti sobě působících magnetických polí. Charakteristické zapojení dvojčinného koncového stupně je na obr. 36.

Ultralineární zapojení

Při ultralineárním zapojení není stínící mřížka koncové elektronky připojena ani k pevnému stejnosměrnému napětí, ani k anodě koncové elektronky, nýbrž na odbočku primárního vinutí výstupního transformátoru. Znamená to tedy,



Obr. 36. Dvojčinné zapojení koncového stupně



Obr. 37. Ultralineární zapojení koncového stupně

že zapojení nevykazuje charakteristické vlastnosti pentodového ani triodového zapojení. Připojuje-li se stínící mřížka koncové elektronky postupně na jednotlivé odbočky primárního vinutí výstupního transformátoru, lze najít takovou vhodnou odbočku, kdy jsou vlastnosti zapojeného koncového stupně lepší než při zapojení pentodovém či triodovém.

Protože stínící mřížka v tomto případě není blokována, kolísá na ní stejnosměrné napětí v souladu s budícím napětím na řídící mřížce, avšak v opačné fázi. Znamená to tedy, že zapojení plní funkci záporné zpětné vazby. Měřením bylo zjištěno, že nejlepší podmínky jsou při připojení odbočky pro stínící mřížku na 43 % závitů primárního vinutí od vývodu pro napájení anodovým napětím.

Ultralineární zapojení předává výkon jako zapojení s pentodou, při tvarovém zkreslení malém jako při triodovém zapojení. Ultralineární zapojení se nejčastěji vyskytuje v dvojčinném zapojení, jak je znázorněno na obr. 37.

Zkreslení. Jak již bylo řečeno v kap. 5, rozeznávají se u výstupního transformátoru tři druhy zkreslení:

Zkreslení kmitočtové

Je známé, že šířka přenášeného kmitočtového pásmá je určena poklesem v zesílení na okrajových kmitočtech. Protože lidské sluchové ústrojí rozeznává jako plynulý tón kmitočet asi od 15 Hz výše, je tím vlastně určena spodní hranice přenášených kmitočtů, potřebná pro dokonalý přednes. Horní slyšitelná hranice je u různých lidí různá, a to od 14 000 Hz až asi do 17 000 Hz. Pokusy dokázaly, že člověk reaguje na kmitočet až asi do 30 000 Hz, zde se však uplatňuje reakce nervové soustavy těla a nikoliv sluchového ústrojí.

Pro informaci jsou v tab. 2 uvedeny některé kmitočtové rozsahy hudebních nástrojů a lidského hlasu.

Tab. 2. Kmitočtový rozsah některých hudebních nástrojů a lidských hlasů

Hudební nástroj	Spodní kmitočet Hz	Horní kmitočet Hz
Varhany	16	9000
Piano	27	3710
Harmonium	32	692
Harfa	36	2069
Citera	40	2323
Housle	218	2069
Pozoun B	54	345
Kontrabas	40	218
<hr/>		
Lidský hlas		
Bas	86	290
Baryton	109	345
Tenor	129	435
Alt	194	581
Mezzosoprán	218	602
Soprán	259	870

Tab. 2 uvádí pouze základní kmitočty. Ve skutečnosti však každý hudební nástroj nebo lidský hlas má určité zabarvení (zkreslení), které způsobují vyšší harmonické kmitočty. Tyto kmitočty dosahují zhruba až 20 000 Hz.

Z uvedeného vyplývá, že má-li být dosaženo skutečně věrné reprodukce, měl by výstupní transformátor přenášet kmitočtové pásmo 15 až 20 000 Hz. V běžné praxi však nejsou požadavky na přenášenou šířku pásmá tak přesné. Modulační signál, který je po zpracování nf zařízením přiveden k výstupnímu transformátoru, je nejrůznější jakosti. V tab. 3 jsou uvedeny mezní kmitočty některých modulačních signálů.

Tab. 3. Kmitočtové rozsahy některých druhů signálů

Druh signálů	Kmitočtový rozsah [Hz]
Telefon	300 až 3200
Přenosné a malé přijímače	200 až 4000
Střední přijímače	100 až 7000
Rozhlas s am	60 až 3500
Velké a luxusní přijímače, gramofonové zesilovače	60 až 10 000
Gramofonová deska standardní	50 až 6000
Hudební skříně	50 až 12 000
Gramofonová deska s úzkou drážkou	40 až 12 000
Rozhlas s fm a televizní zvukový doprovod, zesilovače HI-FI	40 až 15 000
Poloprofesionální zesilovače	30 až 17 000
Profesionální magnetofon	30 až 20 000
Profesionální zesilovače	30 až 20 000

Při volbě dolního mezního kmitočtu je nutné si uvědomit, že čím je tento kmitočet nižší, tím je transformátor dražší.

Zkreslení tvarové (nelineární)

Obyčejně se požaduje, aby nelineární zkreslení způsobené výstupním transformátorem bylo za daných podmínek co nejmenší. Avšak ani zdé není třeba chodit do krajinosti. Pro posouzení jsou v následujícím přehledu uvedeny velikosti tvarového zkreslení, které jsou běžné u některých nf zařízení.

Malé přijímače	větší než 10 %
Střední přijímače	do 10 %
Velké, luxusní přijímače a gramofonové zesilovače	5 až 10 %
Hudební skříně	do 5 %
Hi-fi zesilovače	do 3 %
Poloprofesionální zesilovače	do 2 %
Profesionální zesilovače	do 1 %

Velikost nelineárního zkreslení výstupního transformátoru lze zmenšit vhodným zavedením záporné zpětné vazby ze sekundárního vinutí.

Zkreslení fázové

Protože fázové zkreslení ve většině nízkofrekvenčního přenosů nevadí, nebývají ani požadavky na jeho velikost specifikovány. Rušivě se může fázové zkreslení uplatnit při zavádění zpětné vazby, protože místo záporné zpětné

vazby může fázovým posunem nastat vazba kladná a zesilovač se může samovolně rozmítat. Také při impulsním přenosu je nutné, aby fázové zkreslení bylo co nejmenší.

Ztráty a účinnost

Ztráty, které mají vliv na účinnost výstupního transformátoru byly již probrány v části II. Hlavním činitelem jsou zde ztráty, způsobované činnými odpory vinutí. Někdy je obtížné rozhodnout, zda je výhodnější požadovat od výstupního transformátoru větší účinnost na úkor primární indukčnosti, či naopak. Není-li nutné hledět příliš na účinnost, tj. má-li elektronka rezervu výkonu, potom je lépe zvětšit primární indukčnost výstupního transformátoru (tj. větší počet závitů) i za cenu zvětšení ztrát a dosáhnout tak většího přenášeného kmitočtového pásma směrem k dolním kmitočtům.

Maximální účinnost se vyžaduje hlavně u malých přenosních tranzistorových přijímačů.

Impedanční přizpůsobení

Impedanční přizpůsobení výstupního transformátoru určuje jeho převod, vyjádřený v rovnici (7). Někdy bývá požadováno, aby sekundární vinutí bylo upraveno pro současné připojení různých typů reproduktorů. Kmitací cívky reproduktorů mívají impedance podle normalizované řady: 2 — 4 — 8 — 15 — 25 — 30 — 50 — 100 — 400 a 800 Ω. Sekundární vinutí výstupního transformátoru musí být tedy provedeno buď s odbočkami, nebo se samostatnými vinutími přizpůsobenými pro požadovanou impedanci. Snadno lze získat několik impedancí vhodným rozdělením sekundárního vinutí do sekcí, které zapojováním do série či paralelně vytvoří potřebné impedanční kombinace (např. 4 až 16 Ω).

Také se zde vyskytuje požadavky na impedanční přizpůsobení pro 100V rozvod.

Elektrická izolační pevnost

Tuto pevnost určuje norma ČSN 34 5610; někdy však má být větší než určuje uvedená norma. Jde hlavně o zvětšení izolační pevnosti sekundárního vinutí proti jádru, použije-li se výstupního transformátoru v „univerzálním“ přijímači a jsou-li vývody sekundárního vinutí vyvedeny z přijímače ven, pro připojení dalších reproduktorů.

Někdy se také vyžaduje, aby výstupní transformátor měl odolnost na elektrickou izolační pevnost mezi závity. Takový transformátor musí potom mít spolehlivý provoz i při elektrickém namáhání sousedních závitů zvýšeným napětím. Je to vlastně elektrická zkouška izolace vodiče a prokladů.

10. Požadavky na mechanické vlastnosti

Sem patří požadavky na provedení, rozměry, váhu a požadavky na odolnost proti otřesům a nárazům.

Obyčejně bývá určeno, v jakém zařízení bude transformátor pracovat. To má do jisté míry vliv na jeho konstrukci; ovšem přesto bývá požadováno, jak má být transformátor maximálně velký a těžký, jak bude v zařízení upevněn, zda má být magneticky stíněný, nebo zakrytý krytem proti prachu, jak mají být provedeny elektrické přípojné body, zda pevné či volné, jako drátové vývody. Někdy bývá přímo určeno, že má být použito jáder C, nebo transformátorových plechů určitého tvaru a velikosti. Do těchto požadavek patří také, zda má být cívka s čely nebo bez nich a druh povrchové úpravy (impregnace, nátěry, apod.). Dále bývá požadováno, aby byl transformátor odolný proti mechanickému namáhání (viz kap. 11).

11. Požadavky zvláštní

Sem patří požadavky na odolnost proti klimatickým a mechanickým vlivům a požadavky na nehlubost výstupních transformátorů.

Klimatickými vlivy rozumí se působení okolního prostředí na výstupní transformátory, tj. současné působení teploty, vlhkosti, tlaku vzduchu, slunečního záření, prachu, plísni, slané mlhy a průmyslového ovzduší. Požadavky na odolnost proti mechanickým vlivům určují mechanické namáhání výstupního transformátoru.

Dále jsou to požadavky na odolnost proti suchému a vlhkému teplu (více než 90 % poměrné vlhkosti).

Do požadavek na odolnost proti pádům patří všechny neperiodické otřesy, které se vyskytují při dopravě.

Dalším požadavkem bývá, aby výstupní transformátory odolávaly chvění, tj. periodickým vibracím.

Všechny tyto požadavky se stanovují podle normy ČSN 35 8031, a to tří-místným číslem, v němž první číslice určuje nejnižší teplotu, při které může výstupní transformátor spolehlivě pracovat, druhá číslice určuje nejvyšší teplotu se zřetelem na teplotu okolí a třetí číslice určuje, jak má být výstupní transformátor odolný proti vlhkosti, plísni a slané mlze.

Současně s první číslicí se požaduje mechanická odolnost výstupního transformátoru.

Požadavky na nehlubost bývají kladený u výstupních transformátorů s impulsním provozem, jako jsou třeba transformátory v koncových stupních obrazových rozkladů v televizorech.

IV. Provedení výstupních transformátorů

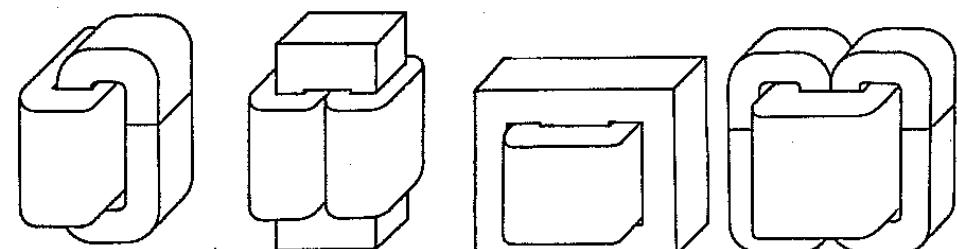
Provedení výstupních transformátorů je velmi rozmanité. Záleží na tom, pro jaké zařízení je výstupní transformátor určen a v jakém prostředí bude toto zařízení pracovat. Na provedení mají také vliv různé zvláštní požadavky a snad vůbec nejvíce konstrukce a možnosti výroby. Lze navrhnut a vyrobít mnoho výstupních transformátorů, které mají stejné elektrické vlastnosti, i když provedením budou velmi odlišné. Zde je nutné uvážit hlavně ekonomická hlediska, protože mají největší vliv na provedení vlastního transformátoru.

Tato rozmanitost provedení byla hlavním důvodem, proč se v ČSSR přikročilo k unifikaci a typizaci výstupních transformátorů. Typizovaným výstupním transformátorům je věnována kapitola IX.

Podle provedení se dělí výstupní transformátory do dvou základních skupin: provedení jádrová, provedení pláštová.

Na obr. 38 jsou dva typické příklady jádrového provedení výstupních transformátorů. Magnetický tok vyvolaný proudem, procházejícím jednou cívou, se uzavírá jádrem, přičemž protíná závity druhé cívky, ve které indukuje elektrické napětí. Toto provedení nachází ve světě čím dál větší obliby, neboť výroba potřebných feromagnetických jader je jednoduchá a velmi hospodárná. Průřez jádra je v tomto případě po celém obvodě konstantní. Cívky se umisťují buď na jeden z delších sloupků jádra, nebo rovnoměrně na sloupky oba.

Na obr. 39 jsou dvě ukázky pláštového provedení výstupních transformátorů.



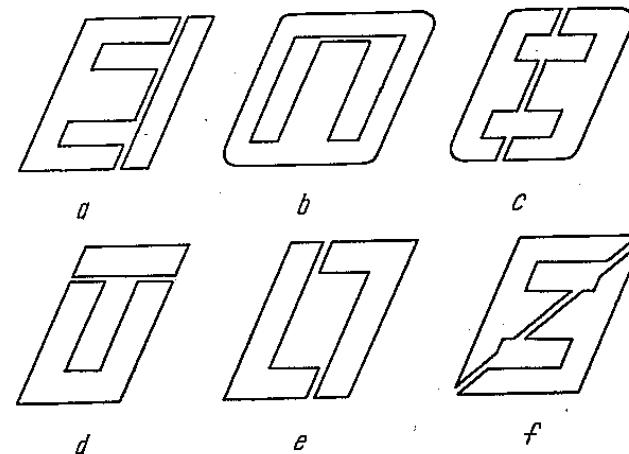
Obr. 38. Jádrové provedení výstupních transformátorů

Obr. 39. Pláštové provedení výstupních transformátorů

Charakteristické pro toto provedení je, že cívky jsou umístěny na středním sloupku feromagnetického jádra a oba krajní sloupky tvoří jakýsi ochranný plášť. Průřez středního sloupku je dvojnásobek průřezu jednotlivých krajních sloupků, tedy součet obou krajních průřezů je shodný s průřezem sloupku středního. Vzniklý magnetický tok prochází celým průřezem středního sloupku, potom se rovnoměrně rozděluje do obou sloupků krajních, kterými obtéká oboustranně cívku a uzavírá se opětným spojením ve středním sloupku. Vinutí zde bývají zpravidla navinuta souose na jedné cívce.

12. Feromagnetická jádra

Feromagnetická jádra, kterých se používá pro výstupní transformátory, se dnes ještě stále ve většině případů skládají z jednotlivých transformátorových plechů. Avšak i zde (více v zahraničí než u nás) se začíná používat vinutých jader C. Vinutá jádra C jsou dosud příliš dražá a mají velké kvalitativní rozptyly, proto se u nás poměrně málo používají.

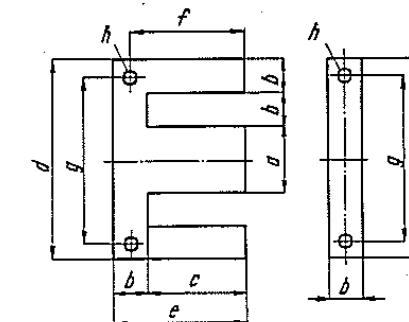


Obr. 40. Tvary nejčastěji používaných transformátorových plechů pro výstupní transformátory

Transformátorové plechy, ze kterých jsou skládaná jádra výstupních transformátorů, mívají různé tvary. Na obr. 40 je několik ukázek nejčastěji používaných transformátorových plechů.

Na prvném místě (označený a) je to transformátorový plech tvaru EI. Říká se mu také „úsporný řez“. V ČSSR i v zahraničí se tohoto tvaru hodně používá. V ČSSR jsou transformátorové plechy tohoto tvaru začleněny do podnikové normy Tesla.

Tab. 4. Transformátorové plechy tvaru EI (Norma Tesla NT-N 001)



Tloušťka plechů 0,35 mm

Typ plechů	Rozměry plechů [mm]								Váha 1 ks [g]	
	a	b	c	d	e	f	g	h	plech E	plech I
EI 10	10	5	15	30	20	—	—	—	1,2	0,4
EI 12	12	6	19	38	25,5	—	—	—	1,7	0,7
EI 16	16	8	24	48	32	—	—	—	3,1	1,0
EI 20	20	10	30	60	40	35	50,0	4,0	4,3	1,6
EI 25	25	12,5	37,5	75	50	43,75	62,5	4,0	6,6	2,4
EI 28	28	14	42	84	56	49	70,0	4,5	9,3	3,0
EI 32	32	16	48	96	64	56	80,0	5,0	10,9	4,2
EI 36*)	36	18								
EI 40	40	20	60	120	80	70	100,0	7,0	16,8	6,1
EI 50	50	25	75	150	100	87,5	125,0	9,0	26,3	9,6
EI 64	64	32	96	192	128	112	160,0	11,0	43,4	15,9

Výška svazků [mm] pro jednotlivé rozměry plechů

EI	10	12	16	20	25	28	32	36*)	40	50	64
	8	10	12,5	16	20	25	25		32	40	50
	10	12,5	16	20	25	28	32		40	50	64
	12,5	16	20	25	32	32	40		50	64	80
	16	20	25	32	40	40	50		64	80	100

*) Tohoto rozměru plechů se nedoporučuje používat.

Tvar plechů EI má několik výhod. Vhodným skládáním plechů lze vytvořit jádro transformátoru téměř bez vzduchové mezery, nebo naopak se vzduchovou mezrou, kterou lze velmi snadno nastavit. Další výhodou je, že při ražení transformátorových plechů vzniká jen velmi malý odpad. Nevýhodou je poměrně malý rozměr okénka pro vinutí, takže v některých případech je nutné volit větší rozměr transformátorových plechů, i když jádra není zdaleka využito. Při návrhu rozměrů těchto transformátorových plechů byl zvolen váhový poměr mezi železem a mědi, a to ve prospěch úspor mědi. I přes uvedené nevýhody jsou transformátorové plechy tvaru EI nejpoužívanější vůbec.

Normalizovaná řada transformátorových plechů EI má značení odvozeno z rozměru středního sloupku. Tímto rozměrem se současně určuje velikost transformátorových plechů.

Normalizovaná řada obsahuje následující velikosti řezů plechů EI: 10 — 12 — 16 — 20 — 25 — (28) — 32 — (36) — 40 — 50 — 64. Podrobné rozměrové údaje jsou v tab. 4.

Dalším, u nás poměrně značně rozšířeným tvarem transformátorového plechu je plech M, obr. 40b. Výhodou tohoto tvaru transformátorového plechu je větší rozměr okénka pro vinutí. Nevýhodou je značný odpad, který vzniká lisováním plechů a kterého nelze nijak využít.

Aby bylo možné založit transformátorové plechy tvaru M do cívky, je nutné střední sloupek plechu přeseknout. Vhodným přerušením (přeseknutím) středního sloupku plechu se upravuje i potřebná velikost vzduchové mezery. Rozměry těchto vzduchových mezer i rozměry výlisků plechů M jsou normalizovány podnikovou normou Tesla. Potřebné rozměry těchto plechů jsou v tab. 5.

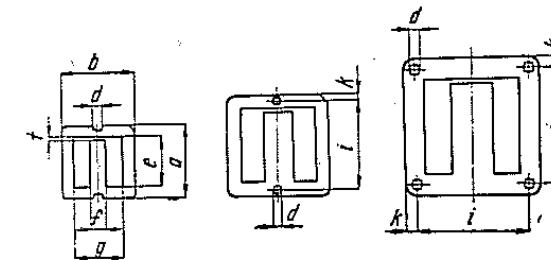
S hojným používáním tranzistorů a se zaváděním miniaturizace do sdělovací techniky vznikla nová řada miniaturních transformátorových plechů, s tvarovým označením E/B. Rozměrová řada těchto transformátorových plechů byla vyvinuta ve Výzkumném ústavu pro sdělovací techniku A. S. Popova v Praze a postupně se začíná zavádět do výroby. Rozměry těchto transformátorových plechů byly zvoleny velmi uvážlivě, takže s nimi lze dosáhnout skutečně optimálních výsledků. Řada E/B plechů obsahuje šest členů, které na sebe dobře navazují. Vhodně je také volena velikost okénka pro vinutí. Nevýhodou je odpad materiálu (i když malý), vzniklý při ražení plechů.

Transformátorové plechy E/B jsou normalizovány v podnikové normě Tesla a potřebné údaje o nich jsou v tab. 6.

Jakost materiálu použitého pro miniaturní plechy E/B je vyznačena pomocí vrubů na okraji vylisovaných plechů. Pro výstupní transformátory se používá vlastně jen dvou druhů materiálů, a to buď normálního transformátorového plechu, s obsahem 3 až 4 % křemíku, tloušťky 0,35 mm, nebo materiálu orientovaného, jako např. Ortoperm apod. U orientovaného materiálu je nutno dodržet při ražení plechů správné natočení výlisků se zřetelem na válcování tabulí plechů, jak je naznačeno v tab. 6.

Na obr. 40d je znázorněn další druh transformátorových plechů, tvaru UI.

Tab. 5. Transformátorové plechy tvaru M (NT-N 021)



+ Tloušťka plechů 0,15 mm
++ Tloušťka plechů 0,35 mm

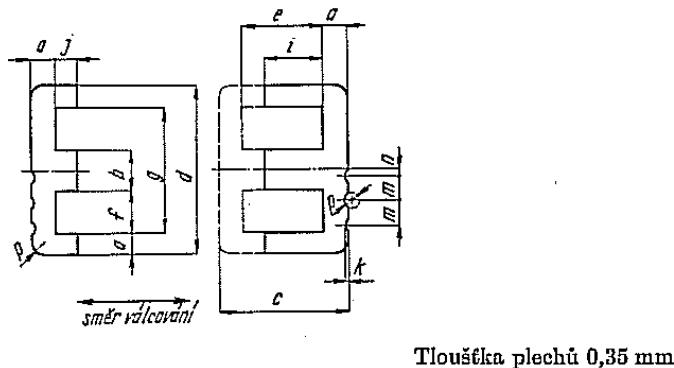
Typ plechů	a	b	d	e	f	g	i	k	Vzduchová mezera t				
									0	0,3	0,5	1	2
M 5 +	20	20	2,8	13	5	13	—	—	—	0,3	—	—	—
M 22 +	22	20	2,8	15	5	15	—	—	—	0,3	—	—	—
M 7 +	30	30	3	20	7	20	—	—	—	0,3	—	—	—
M 30Z +	30	28	3	20	7	20	—	—	—	0,3	—	—	—
M 12 +	42	42	3,5	30	12	30	36	3	0	0,3	0,5	1	—
M 42v ++	42	42	2,6	30	12	30	36	3	0	0,3	0,5	1	—
M 17 ++	55	55	3,5	38	17	38	47	4	0	0,3	0,5	1	—
M 20 ++	65	65	4,5	45	20	45	56	4,5	0	—	0,5	1	—
M 23 ++	74	74	4,5	51	23	51	64	5	0	—	0,5	1	—
M 29 ++	85	85	4,5	56	29	56	75	5	0	—	0,5	1	2
M 34 ++	102	102	5,5	68	34	68	91	5,5	0	—	0,5	1	2

Všechny míry [mm]

Vzduchová mezera 0 značí přeseknutí středního sloupku tak, aby nevznikla mezera, ale aby se plech dal nasunout do cívky.

Tento druh transformátorových plechů není u nás normalizován, v zahraničí se ho však používá běžně, neboť má několik výhod. Při lisování těchto plechů nevzniká téměř žádný odpad. Přiložka tvaru I vzniká vylisováním střední části u plechu tvaru U. Pro tento druh transformátorových plechů je výhodné používat orientovaného materiálu. Aby se dosáhlo rovnoměrné magnetické vodivosti celého jádra při použití orientovaného materiálu, je nutné, aby při lisování řezu U byly delší sloupky ve směru orientace materiálu. Tím má současně správnou orientaci i přiložka tvaru I, kdežto kratší strana řezu U má orientaci příčnou. Aby se vyrovnanly vznikající větší magnetické ztráty, při-

Tab. 6. Transformátorové plechy tvaru E/B (Norma Tesla NT-N 200)



Typ plechu	Rozměry plechů [mm]													
	a	b	c	d	e	f	g	i	j	k	m	n	p	
E/B 2,5	1,25	2,5	8	10	5,5	2,5	7,5	3,5	2	0,12	1,6	0,4	0,6	
E/B 3	1,5	3	10	12	7	3	9	5	2	0,16	2	0,5	1	
E/B 4	2	4	12	16	8	4	12	0,5	2	0,2	2,5	0,6	1,2	
E/B 5	2,5	5	16	20	11	5	15	7	4	0,25	3	0,8	1,6	
E/B 6	3	6	20	25	14	6,5	19	10	4	0,3	4	1	2	
E/B 8	4	8	25	32	17	8	24	12	5	0,4	5	1,2	2,5	

Na plechy E/B se používají transformátorového plechu podle ČSN ESČ 61, tloušťky 0,35 mm. Jakost se označí vruby podle této tabulky:

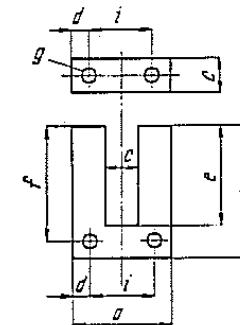
Materiál	Položka vrubů
Křemíkový plech netříděný	— 2 3
Křemíkový plech tříděný	— 2 —

dávají se při montáži transformátoru ke kratšímu sloupku správně orientované plechy tvaru I. V tab. 7 je uveden přehled řady transformátorových plechů tvaru UI, kterých se používá v NSR.

Další tvar transformátorového plechu je na obr. 40e. Jde o tzv. řez L. Na obr. 40f je transformátorový plech tvaru F. Obou uvedených tvarů transformátorových plechů se u nás používá jen zcela výjimečně, takže se jimi nebudeme podrobněji zabývat.

Střídavým nebo souhlasným skládáním transformátorových plechů tvaru EI, E/B, UI, FF do cívky výstupních transformátorů, obr. 41, lze dosáhnout libovolné velikosti vzduchové mezery.

Tab. 7. Transformátorové plechy tvaru UI



Typ plechu	a	b	c	d	e	f	g	i
UI 30	30	40	10	5	30	35	3,5	20
UI 39	39	52	13	6,5	39	45,5	3,5	26
UI 48	48	64	16	8	48	56	4,5	32
UI 60	60	80	20	10	60	70	4,5	40
UI 75	75	100	25	12,5	75	87,5	5,5	50
UI 90	90	120	30	15	90	105	7,8	60
UI 102	102	136	34	17	102	119	7,8	68
UI 114	114	152	38	19	114	133	11	78
UI 132	132	176	44	22	132	154	11	88
UI 150	150	200	50	25	150	175	11	100
UI 168	168	224	56	28	168	196	11	112
UI 180	180	240	60	30	180	210	11	120
UI 210	210	280	70	35	210	245	15	140

Všechny míry [mm]

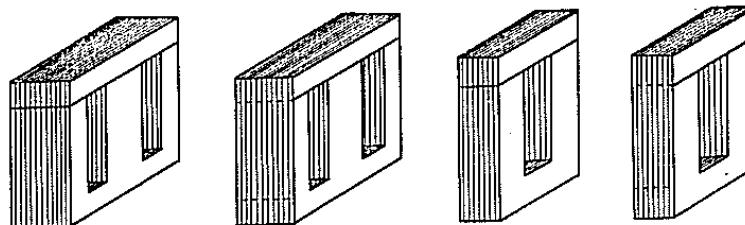
Theoreticky by se mělo dosáhnout nulové mezery, v praxi však, vlivem nerovnosti plechů, se dosáhne mezery asi od 0,002 mm. Výjimku tvoří výlisek transformátorového plechu tvaru M, kde jsou velikosti vzduchové mezery pevně stanoveny. Jemně lze nastavit vzduchovou mezitu u těchto plechů magnetickým bočníkem, který se jako malý železný klínek přikládá paralelně ke vzduchové mezere a podle potřeby se vhodně posunuje, jak je nakresleno na obr. 42.

Na transformátorové plechy, kterých se používá pro výstupní transformátory, lze zvolit dvojí druh materiálu.

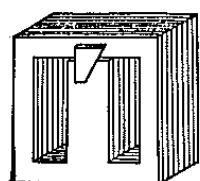
1. Normální transformátorové plechy s obsahem asi 3 až 4 % křemíku, válcované za tepla.

2. Orientovaný materiál, s obsahem 2,5 až 3,5 % křemíku, válcovaný za studena.

Normální transformátorové plechy, válcované za tepla podle normy ČSN-ESČ 61-1950, se jakostně třídí podle ztrátového čísla, neboli měrných ztrát.



Obr. 41. Skládání transformátorových plechů tvaru EI a UI pro dosáhnutí předepsaných vzduchových mezer



Obr. 42. Seřízení vzduchové mezery u transformátorových plechů tvaru M pomocí železného klínku, který má funkci magnetického bočníku

Ztrátové číslo se udává při magnetické indukci 1 T, při sinusovém kmitočtu 50 Hz a označuje se Z_{10} . Jsou to vlastně ztráty ve wattech, vztažené na 1 kg materiálu.

Normální transformátorové plechy, používané pro jádra výstupních transformátorů, mají zpravidla tloušťku 0,35 mm a jakost určenou ztrátovým číslem $Z_{10} = 1,0 \text{ W/kg}$ až $1,6 \text{ W/kg}$. Tab. 8 udává nejdůležitější data křemíkových transformátorových plechů, válcovaných za tepla. Zde je nutno upozornit, že vlastnosti plechů se mohou působením výrobního rozptýlu lišit vzájemně až o $\pm 10\%$. Tato okolnost je velmi nepřijemná hlavně u permeability materiálu, která má přímo vliv na velikost primární indukčnosti transformátoru. Výrobce transformátorových plechů proto vybírá tabule se stejnou permeabilitou a dodává je se zárukou určité permeability. Takové plechy jsou potom dražší. U transformátorových plechů válcovaných za tepla nelze dosáhnout sériově lepšího ztrátového čísla než $Z_{10} = 1 \text{ W/kg}$.

Jakost transformátorových plechů, jak uvádí tab. 8, se značí nejčastěji jednostranným barevným nitrolakovým nástříkem, a to na celých tabulkách plechů ještě před ražením. Tloušťka lakové vrstvy bývá až $30 \mu\text{m}$. Lakový nátěr tvoří současně izolační vrstvu, která je nezbytná pro zmenšení magnetických ztrát, způsobovaných vřívnými proudy.

V poslední době se upouští od lakování transformátorových plechů a začíná

Tab. 8. Fyzikální vlastnosti transformátorového plechu a Ortopermu

	a						b
	Transformátorový plech						Orientovaný materiál Ortoperm
Informativní obsah křemíku [%]							2,5
Tloušťka plechu [mm]							0,13
Permeabilita μ_{20}	4						850
Měrní kmitočet [kHz]	0,35						50 až 60
f_n	700 až 800						
Měrný odpor $[\Omega \text{mm}^2/\text{cm}]$	6 až 7						
Měrná váha $[\text{kg}/\text{m}^3]$							400
Měrné ztráty Z_{10}							7700
W/kg	550						
Z_{15}	7600						
Barevné označení	1,0	1,1	1,2	1,3	1,45	1,6	0,6
	2,3	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	1,5
	B	Ž	O	M	R	TF	zelený bod

B — bílá, Ž — žlutá, O — oranžová, M — modrá, R — růžová, TF — tmavě fialová

se používat plechů s přirozenou vrstvičkou oxydu. Je dokázáno, že přechodový odpor oxydační vrstvičky je mnohonásobně větší, než je měrný odpor materiálu, takže taková izolace je dostatečná. Používáním transformátorových plechů s oxydační vrstvičkou se zlepšuje činitel plnění plechů při skládání jádra transformátoru až o 5 %. Někdy je nutné obnovit u transformátorových plechů oxydační vrstvu. Děje se tak prostým vyžíváním. Tímto dodatečným tepelným zpracováním se zlepší i magnetické vlastnosti materiálu, např. ztráty se sníží až o 10 %. Touto úpravou se také podaří odstranit u vylisovaných plechů ostří.

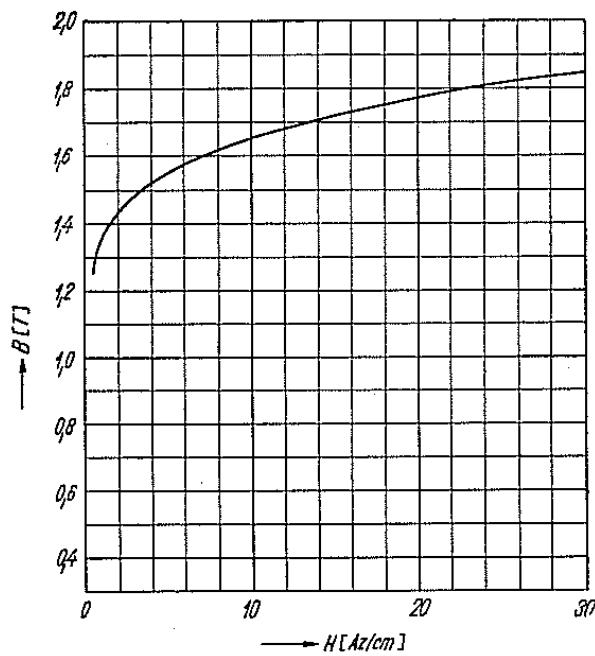
Výrobce transformátorových plechů udává pro svoje výrobky příslušné grafy, v nichž jsou zakresleny různé důležité magnetické vlastnosti materiálů.

Na obr. 43 až 47 jsou takové závislosti pro křemíkový transformátorový plech, válcovaný za tepla, tloušťky 0,35 mm, jakostního označení $Z_{10} = 1,3 \text{ W/kg}$.

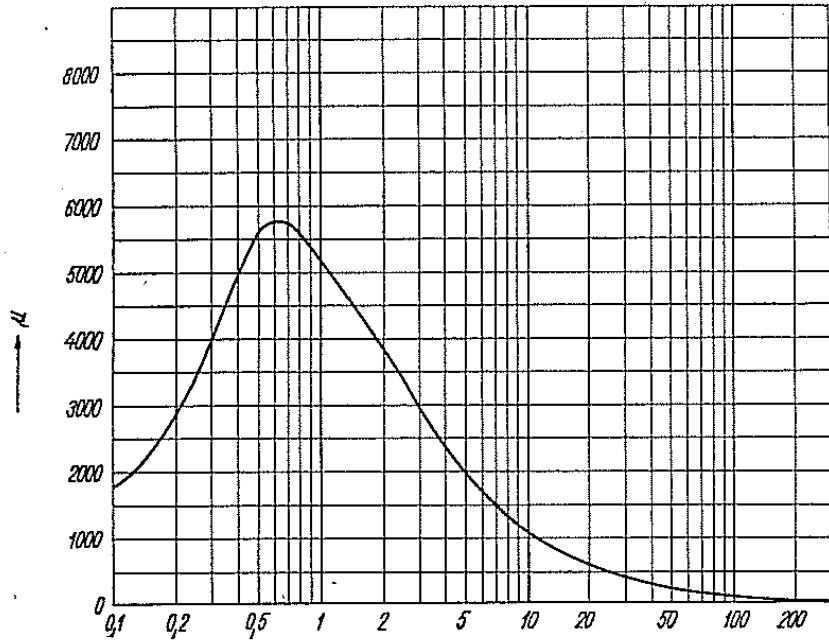
Obr. 43 představuje statickou (stejnosměrnou) magnetizační křivku, v níž $B = f(H)$.

Další obr. 44 udává průběh statické permeability materiálu, kde $\mu = f(H)$.

Na obr. 45 je závislost měrných ztrát materiálu při různé velikosti magnetické indukce, kde $Z = f(B)$.

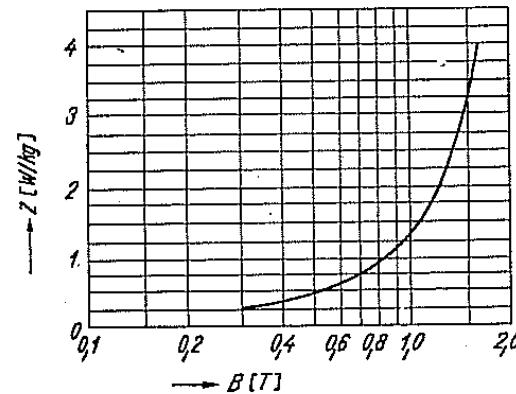


Obr. 43. Statická magnetizační křivka transformátorového plechu TN 1,3-0,35 mm

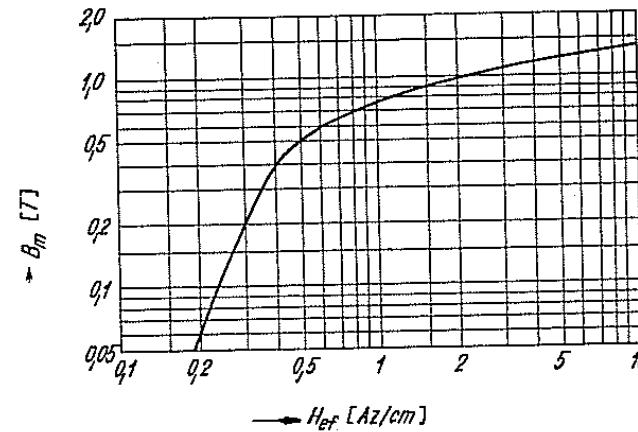


Obr. 44. Statická permeabilita transformátorového plechu TN 1,3-0,35 mm

Pro střídavou magnetizaci jsou důležité oblasti, v nichž je velikost střídavé složky malá. Proto následující grafy jsou zaměřeny na tuto počáteční oblast. Na obr. 46 je zakreslena dynamická (střídavá) magnetizační křivka, kde $B_m = f(H_{ef})$ při kmitočtu $f = 50$ Hz.



Obr. 45. Měrné ztráty transformátorového plechu TN 1,3-0,35 mm, v závislosti na magnetické indukci

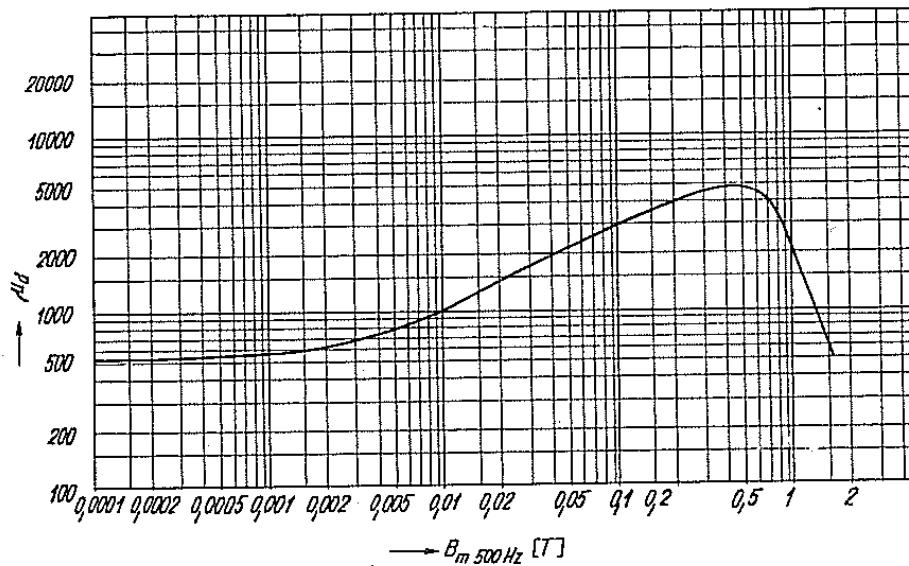


Obr. 46. Dynamická magnetizační křivka transformátorového plechu TN 1,3-0,35 mm

A konečně na obr. 47 je zakreslen průběh dynamické permeability materiálu, kde $\mu_d = f(B_m)$.

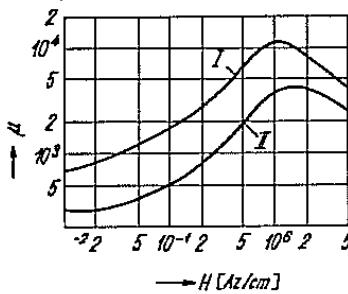
Magnetizační křivky jiných materiálů, s blízkými měrnými ztrátami, se příliš od uvedených grafů neliší.

Ocel, které se používá na výrobu transformátorových plechů, má krystalickou krychlovou strukturu. Tyto krystaly se magnetizují nejsnáze ve směru hrany



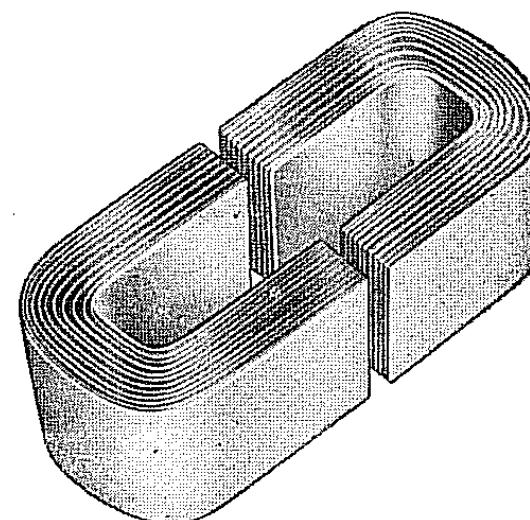
Obr. 47. Dynamická permeabilita transformátorového plechu TN 1,3—0,35 mm

krychle, nejhůře ve směru tělesné uhlopříčky. U křemíkových plechů válcovaných za tepla se jednotlivé krystaly uspořádávají náhodně, avšak i přesto se zde objevuje jakási slabá orientace ve směru válcování. Měřením je dokázáno, že čím je tato orientace větší, tím má materiál větší permeabilitu.



Obr. 48. Vliv směru magnetizace na permeabilitu materiálu;

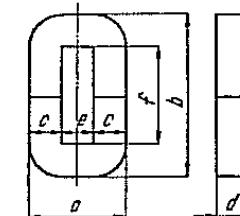
křivka I platí pro magnetizování ve směru válcování, křivka II pro magnetizování napříč válcováním



Obr. 49. Jádro C z orientovaného materiálu

Válcují-li se transformátorové plechy za studena, poskládá (orientuje) se většina krychlových krystalů v materiálu ve směru svých podélných hran. Takovému materiálu se říká orientovaný materiál.

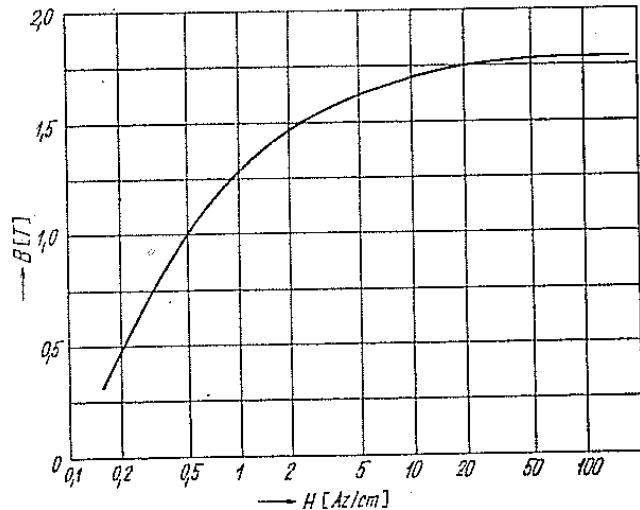
Tab. 9. Vinutá jádra



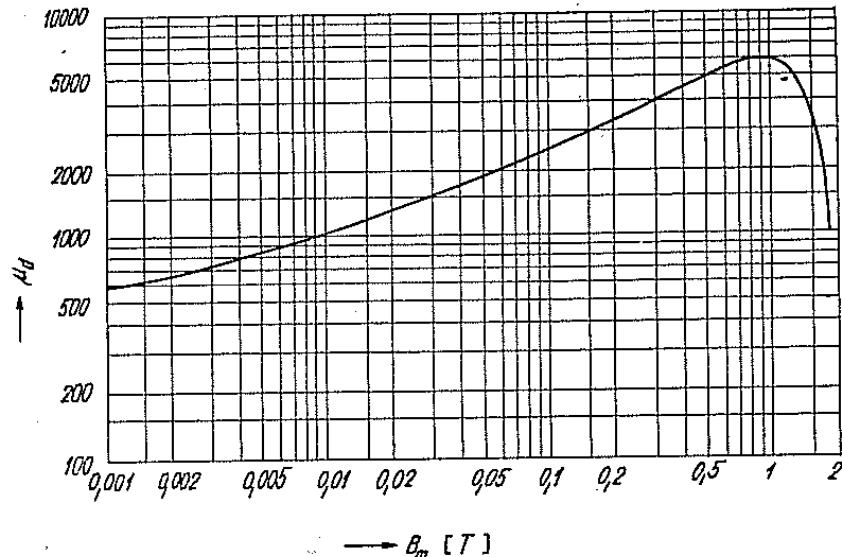
Typ jádra	c	f	d	c	a	b	Váha kg/kg
08001 +	8	24	10	5	18	34	0,03
08002 +	8	24	10	8	24	40	0,05
08003 +	8	24	10	10	28	44	0,07
10001 +	10	30	10	10	30	50	0,08
10002 +	10	30	15	8	26	46	0,09
10003 +	10	30	15	10	30	50	0,12
10004 +	10	30	15	15	40	60	0,21
12003 +	12	37	20	10	32	57	0,2
12004 +	12	37	20	15	42	67	0,3
12005 +	12	37	20	20	52	77	0,5
16003 +	16	48	20	10	36	68	0,23
16004 +	16	48	20	15	46	78	0,4
16005 +	16	48	20	20	56	88	0,55
20001 +	20	60	20	10	40	80	0,3
20002 +	20	60	20	15	50	90	0,45
20003 +	20	60	20	20	60	100	0,65
20004 +	20	60	30	15	50	90	0,7
20005 +	20	60	30	20	60	100	1
20006 +	20	60	30	30	80	120	1,7
26001 +	26	76	30	15	56	106	0,85
26002 +	26	76	30	20	66	116	1,2
26003 +	26	76	30	30	86	136	2
26004 +	26	76	40	20	66	116	1,6
26005 +	26	76	40	30	86	136	2,6
26006 +	26	76	40	40	106	156	3,9

+ Používat přednostně. Všechny míry [mm]

Magnetické vlastnosti orientovaného materiálu jsou výborné, je-li magnetizování ve směru válcování. Ve všech ostatních směrech jsou vlastnosti podstatně horší. Na obr. 48 je znázorněn průběh permeability materiálu ve směru jeho válcování (křivka I) a ve směru napříč, tj. ve směru otočeném o 90° (křivka II).



Obr. 50. Statická magnetizační křivka orientovaného materiálu

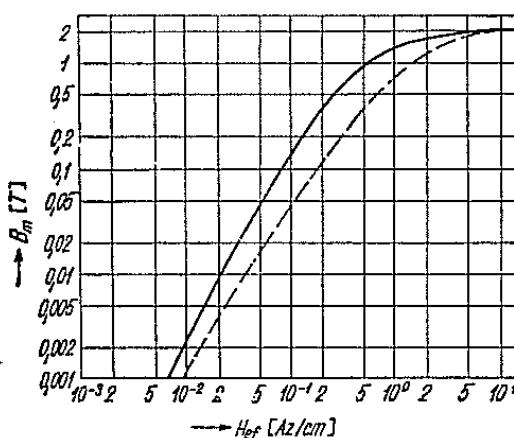


Obr. 51. Dynamická permeabilita orientovaného materiálu

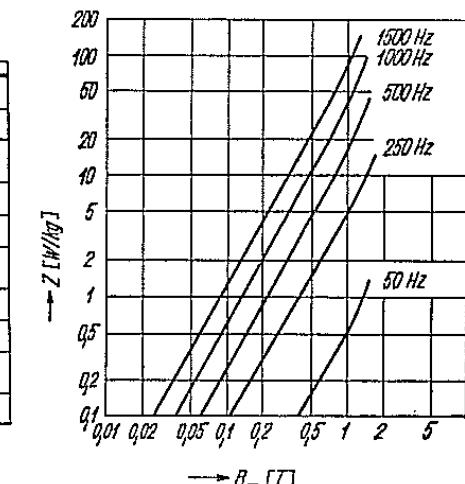
Při porovnání orientovaných plechů s transformátorovými plechy válcovanými za tepla jsou u orientovaných plechů menší magnetické ztráty, větší permeabilita a větší možnost magnetické indukce.

U nás se vyrábí orientovaný materiál pod obchodním názvem Ortoperm o tloušťce 0,35 nebo 0,13 mm. Z orientovaného materiálu se buď razí přímo transformátorové plechy (výlisky různých tvarů a velikostí), nebo se z něho navíje na zvláštní trny jádra C, obr. 49.

Jádra C nacházejí v celém světě stále větší oblibu; vznikají navíjením z pásů plechů orientovaného materiálu na trny různých tvarů a velikostí. Po slepení jednotlivých navinutých vrstev a rozříznutí vznikne po zabroušení styčných ploch hotové jádro.



Obr. 52. Střídavá magnetizační křivka orientovaného materiálu, křivky omezují minimální a maximální hodnoty



Obr. 53. Graf závislosti měrných ztrát v orientovaném materiálu, sycením při různých kmitočtech

U nás se pomalu začíná používat jader C, zatím však jen v ojedinělých případech u výstupních transformátorů. Zaviňuje to jednak cena jádra C a potom velký rozdíl v jakosti mezi jednotlivými jádry. Obě tyto skutečnosti zmenšují výhody, které jinak používáním jader C vznikají. Rozptyl v jakosti způsobuje převážně jakost provedení styčných ploch obou polovin jader C. Měřením lze zjistit, že počáteční permeabilita u stejněho typu jádra je v rozmezí 450 až 800 a maximální hodnota permeability dosahuje 4600 až 12 000. To způsobuje, že primární indukčnost výstupního transformátoru má velké výkyvy, kterým je nutno předcházet, hlavně při sériové výrobě, tím, že se dimenzuje vinutí na nejhorší jakost jádra C. Potom je většina transformátorů pře-dimenzovaná a nemohou tedy vyniknout předpokládané úspory.

Rozměry vinutých jader C jsou normalizovány v podnikové normě Tesla.

V tab. 9 je uveden rozměrový přehled jader C a v tab. 8 jejich základní fyzikální vlastnosti.

Obr. 50 znázorňuje statickou magnetizační křivku jader C, kde $B = f(H)$.

Na obr. 51 je nakreslen průběh dynamické permeability $\mu_d = f(H_{ef})$.

Obr. 52 určuje průběh dynamické magnetizační křivky, kde $B_m = f(H_{ef})$.

Obr. 53 představuje průběh měrných ztrát materiálu pro různé kmitočty, v závislosti na magnetické indukci, $Z = f(B_m)$.

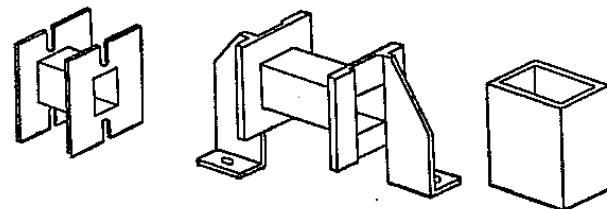
13. Cívková tělíska

Cívková tělíska, kterých se používá pro vinutí cívek výstupních transformátorů, jsou velmi různorodá. Lze je rozdělit podle technologie výroby do tří základních skupin:

- a) tělíska lisovaná,
- b) tělíska lepená,
- c) tělíska skládaná.

Každá z těchto skupin může být potom v provedení s čely nebo bez čel.

Tělíska lisovaná. Těchto tělisek se používá hlavně při hromadné výrobě, když se vyplatí dělat pro lisování nákladnou formu. Jako lisovacího materiálu se používá různých termoplastů nebo termosetů. Pro nižší provozní teploty, asi do 80 °C, lze použít např. polystyrenu apod., pro vyšší provozní teploty, asi 100 °C vyhovuje bakelit. Výhodou je velká elektrická a mechanická pevnost lisovaných tělisek a značná trvanlivost. Mechanickou pevnost lze zvětšit vhodným využitím kritických profilů.

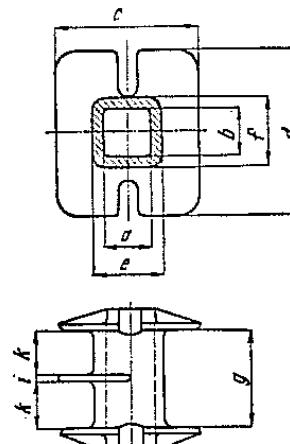


Obr. 54. Lisovaná tělíska pro cívky výstupních transformátorů

Na obr. 54 je několik lisovaných tělisek. Lisovaná tělíska jsou normalizována v podnikové normě Tesla, pro plechy EI, M a E/B. Rozměry lisovaných tělisek pro plechy EI a M jsou shodné s tělisky lepenými, uvedenými v tab. 11. Rozměry lisovaných tělisek pro miniaturní E/B plechy jsou uvedeny v tab. 10.

Tělíska lepená patří při výrobě výstupních transformátorů mezi nejpoužívanější. Jako materiálu se používá lesklé lepenky (ČSN 50 3175), kartónu, nebo sulfátového papíru (ČSN 50 2741). Jednotlivé vrstvy se po navinutí na

Tab. 10. Lisovaná tělíska pro plechy E/B (NT-N 201)



Typ plechů	a	b	c	d	e	f	g	i	k
EB 2,5	2,5 4	2,5 3	7,4 8,8	8 10	3,4 4,2	3,4 4,2	5,4 6,2	—	—
EB 3	3,2 5	4 6	8,8 11,8	12 13	4,2 5,2	4,2 5,2	6,8 7,8	—	—
EB 4	4,2 5	4 6	11,8 14,8	13 16	5,2 6,4	5,2 6,4	7,8 10,8	—	—
EB 5	5,2 8	5 8	14,8 18,7	19 20	6,4 7,5	6,4 7,5	10,8 13,7	—	—
EB 6	6,3 10	6 10	18,7 23,7	24 25	7,5 9,7	7,5 9,7	13,7 16,7	0,5 0,8	6,51 8,05
EB 8	8,3 12	8 12	23,7 29	25 29	9,7 13,7	9,7 13,7	16,7 20,0	—	—

Všechny míry [mm]. Rozměry i, k jsou u provedení s přepážkou.

trn spojí vlnodnými lepidly a vysuší se. U sulfátového papíru se používá k lepení nánosu pryskyřice, která se za tepla vytvrdí. Tím vznikne jakostní, pevné tělisko, které se svými vlastnostmi podobá tělisku z pertinaxu.

Lepená tělíska bývají buď s čely, nebo bez nich. Základem obou provedení je trubka předepsaných rozměrů, která se nařeže na potřebné délky. Nařezaných trubek se používá při navíjení cívek bez čel. Má-li mít tělíska čela, musí se na nařezané trubky nalepit. Tato práce je zdlouhavá a drahá a pevnost čel není dostatečná; při navíjení vodiče se čela odkládají do boků.

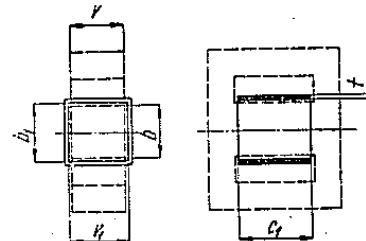
Lepená tělíska bez čel i s čely pro transformátorové plechy EI a M obsahují podniková norma Tesla. V tab. 11 jsou uvedeny nejdůležitější rozměry lepených

Tab. II. Cívková těleska bez čel pro plechy EI a M

Pokračování tab. 11

Rozměry platí pro těleska lisovaná i pro těleska lepená

Rozměrový náčrt těleska



Rozměry tělesek pro transformátorové plechy tvaru EI

Typ plechu	b	v	b_1	v_1	c_1	t
EI 10	10	8	10,5	8,5	14,5	0,9
		10		10,5		
		12,5		13,1		
		16		16,8		
EI 12	12	10	12,5	10,5	18,5	0,9
		12,5		13,1		
		16		16,8		
		20		21		
EI 16	16	12,5	16,5	13,1	23,5	0,9
		16		16,8		
		20		21		
		25		26,5		
EI 20	20	16	20,5	16,8	29,5	1
		20		21		
		25		26,5		
		32		33,5		
EI 25	25	20	25,5	21	37	1,2
		25		26,5		
		32		33,5		
		40		42		
EI 28	28	25	28,5	26,5	41,5	1,2
		28		29,5		
		32		33,5		
		36		37,5		

Typ plechu	b	v	b_1	v_1	c_1	t
EI 32	32	25	32,5	26,5	47,5	1,6
		32		33,5		
		40		42		
		50		52,5		
EI 36	36	36	36,5	37,5	53,5	1,6
		40		41		
		48		52,5		
		64		67		
EI 40	40	40	41	33,5	59,5	2
		48		42		
		50		52,5		
		64		67		
EI 50	50	40	51	42	74,5	2
		50		52,5		
		64		67		
		80		84		
EI 64	64	50	65	52,5	95,5	2
		64		67		
		80		84		
		100		105		

Rozměry tělesek pro transformátorové plechy tvaru M

Typ plechu	b	v	b_1	v_1	c_1	t
M 12	12	12	12,5	12,5	29,5	1
		16		16,8		
		20		21		
M 17	17	16	17,5	16,8	37,5	1
		20		21		
		25		26,5		
M 20	20	20	20,5	21	44,5	1
		25		26,5		
		28		29,5		
		32		33,5		
M 23	23	25	23,5	26,5	50,5	1
		32		33,5		
		40		42		

Pokračování tab. 11

Typ plechu	<i>b</i>	<i>v</i>	<i>b</i> ₁	<i>v</i> ₁	<i>c</i> ₁	<i>t</i>
M 20	20	32	29,5	33,5	55,5	1
		40		42		
		50		52,5		
M 34	34	32	34,5	33,5	67,5	2
		36		38		
		40		42		
		50		52,5		

Všechny míry [mm]

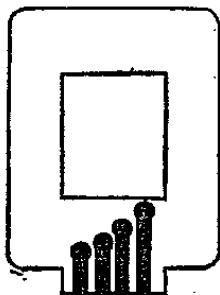
tělísek bez čel, pro transformátorové plechy EI a M. V tab. 12 jsou rozměry lepených tělísek s čely pro plechy EI a M. V tab. 13 jsou rozměry lepených tělísek bez čel pro jádra C.

Čela lepených tělísek je nutno před navíjením upravit, a to děrováním otvorů pro vývody vodičů i otvorů pro upevnění různých elektrických připojních bodů (pájecí oka, trubkové nýty apod.). Lepená tělíska z lesklé lepenky či kartónu se musí chránit proti navlhnutí, dělá se to při vlastní impregnaci hotového transformátoru, nebo ještě před vinutím (např. lakováním samotných tělísek).

Skládaná tělíska jsou dalším nejpoužívanějším druhem tělísek. Skládají se z několika dílů, vylišovaných z tvrzeného papíru (ČSN 64 4211). Výhodou těchto tělísek je, že jsou levná a při tom pevná i trvanlivá. Snadno se skladují a jsou do jisté míry univerzální.

Podniková norma Tesla obsahuje skládaná tělíska pro transformátorové plechy EI a M. V tab. 14 jsou uvedeny rozměry skládaných tělísek pro plechy EI a M a pro jádra C.

Čela skládaných tělísek jsou podle potřeby různě děrována. Někdy bývají čela ražena ze sklotextitového laminátu s jednostranně plátovanou měděnou fólií. Na těchto čelech potom bývají vyleptány spoje, do kterých se připojují vývody cívek. Na obr. 55 je vidět takové čelo, používané u výstupních transformátorů, které jsou přímo zapojeny do desky s plošnými spoji. Materiál vyrábí n.p., Kablo v Bratislavě, pod obchodním názvem Cuprexitit, o tloušťkách 1, 1,5, 2 mm. Tloušťka měděné fólie je 55 µm.

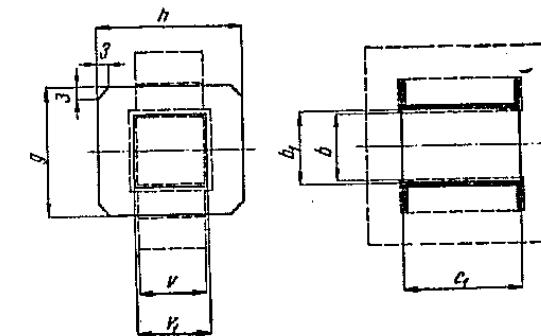


Obr. 55. Čelo skládaného tělíska s plošnými spoji pro připájení vývodů cívek

Tab. 12. Cívková tělíska s čely pro plechy EI a M

Rozměry platí pro tělíska lisovaná i tělíska lepená

Rozměrový náčrt tělíska



Rozměry tělíska pro transformátorové plechy tvaru EI

Typ plechu	<i>b</i>	<i>v</i>	<i>b</i> ₁	<i>v</i> ₁	<i>c</i> ₁	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>t</i>
EI 10	10	8	10,5	8,5	14,5	19,5	18	1
		10		10,5			20	
		12,5		13,1			23	
		16		16,8			26	
EI 12	12	10	12,5	10,5	18,5	23,5	24	1
		12,5		13,1			27	
		16		16,8			30	
		20		21			34	
EI 16	16	12,5	16,5	13,1	23,5	31,5	30	1
		16		16,8			34	
		20		21			38	
		25		26,5			43	
EI 20	20	16	20,5	16,8	29,5	39,5	37	1
		20		21			42	
		25		26,5			48	
		32		33,5			55	
EI 25	25	20	25,5	21	37	49,5	47	1
		25		26,5			53	
		32		33,5			60	
		40		42			68	
EI 28	28	25	28,5	26,5	41,5	55,5	58	1
		28		29,5			64	
		32		33,5			66	
		36		37,5			72	

Pokračování tab. 12

Pokračování tab. 12

Typ plechu	<i>b</i>	<i>v</i>	<i>b</i> ₁	<i>v</i> ₁	<i>c</i> ₁	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>t</i>
EI 32	32	25	32,5	26,5	47,5	63,5	50	1
		32		33,5			66	
		40		42			75	
		50		52,5			85	
EI 36	36	36	36,5	37,5	53,5	71,5	80	2
EI 40	40	32	41	33,5	59,5	79,5	74	2
		40		42			84	
		50		52,5			95	
		64		67			108	
EI 50	50	40	51	42	74,5	99,5	93	2
		50		52,5			104	
		64		67			118	
		80		84			135	
EI 64	64	50	65	52,5	95,5	127,5	118	3
		64		67			132	
		80		84			150	
		100		105			170	

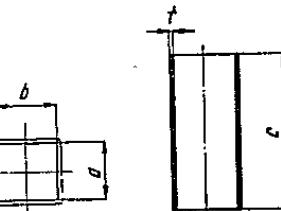
Rozměry tělisek pro transformátorové plechy tvaru M

Typ plechu	<i>b</i>	<i>v</i>	<i>b</i> ₁	<i>v</i> ₁	<i>c</i> ₁	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>t</i>
M 12	12	12	12,5	12,6	29,5	23,5	24	1
		16		16,8			28	
		20		21			32	
M 17	17	16	17,5	16,8	37,5	33,5	33	1
		20		21			37	
		25		26,5			42	
M 20	20	20	20,5	21	44,5	39,5	40	1
		25		26,5			45	
		28		29,5			48	
		32		33,5			52	
M 23	23	25	23,5	26,5	50,5	45,5	48	1
		32		33,5			55	
		40		42			63	

Všechny měry [mm].

Typ plechu	<i>b</i>	<i>v</i>	<i>b</i> ₁	<i>v</i> ₁	<i>c</i> ₁	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>t</i>
M 29	29	32	29,5	33,5	55,5	57,5	61	1
		40		42			69	
		50		52,5			79	
M 34	34	32	34,5	33,5	67,5	67,5	66	2
		36		38			70	
		40		42			74	
		50		52,5			84	

Tab. 13. Čívková těleska bez čel pro jádra C



Rozměry pro těleska lisovaná i lepená

Rozměrový náčrt těleska

Typ jádra	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>t</i>
08001	7	11,5	20	0,7
08003	7	11,5	20	0,7
10001	12	11,5	26	1
10003	12	16,5	26	1
12003	12	21,7	32	1
12004	17	21,7	32	1
16003	12	21,7	43	1,2
16004	17	21,7	43	1,2
16005	22	21,7	43	1,2
20002	17,7	22,3	54	1,2
20004	17,7	32,5	54	1,5
20005	22,7	32,5	54	1,5
26001	18	32,5	70	1,5
26002	23	32,5	70	1,5

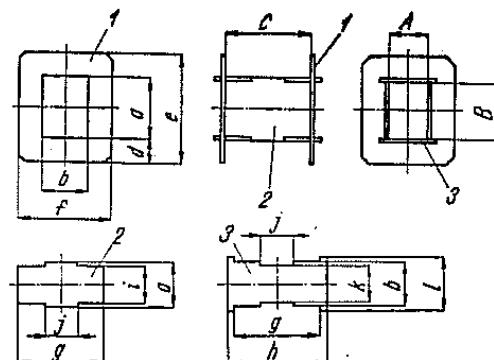
Typ jádra	a	b	c	t
26004	23	42,5	70	1,7
26005	33	42,5	70	1,7
26006	43	42,5	88	1,7
31001	23	42,5	88	1,7
31002	33	42,5	88	1,7
31003	43	42,5	88	1,7
31006	53	52,5	88	1,7

Všechny míry [mm]

Tab. 14. Skládaná těleska (NT-N 003)

Materiál: tvrzený papír ČSN 64 4211

Všechny míry [mm]



Rozměry složeného těleska pro plechy EI

Typ plechů	Výška svazku	A	B	C
EI 20	20		21	
	25	20,5	26	27,5
	32		33	
EI 25	25		26	
	32	25,5	33	34
	40		41	
EI 32	32		33	
	40	32,5	41	44
	50		51	

Typ plechů	Výška svazku	A	B	C
EI 40	40		41	
	50	40,5	51	56
	64		65	
EI 50	50		51	
	64	51	65	70
	80		81	
EI 64	64		65	
	80	65	81	91
	100		101	

Poznámka: V dílu 1 bývají otvory pro využití vývodů a pro pájecí oka podle normy Tesla NT-N 003. V této tabulce nejsou uvedeny.

Rozměry složeného těleska pro plechy M

Typ plechu	Výška svazku	A	B	C
M 12	12		13	13
	16		17	16
	20		21	20
M 17	16		18	17,5
	20			21,5
	25			26,5
M 20	20		21	21,5
	25			20,5
	28			29,5
M 23	32			33,5
	25		24	26,5
	32			33,5
M 29	40			41,5
	32		30	33,5
	40			41,5
M 34	50			51,5
	32		35	33,5
	36			37,5
	40			41,5
	50			51,5

Všechny míry [mm]

Rozměry složeného těleska pro jádra C

Pokračování tab. 14

Typ jádra C	A	B	C	Typ jádra C	A	B	C
08001	7	11	20	20003	22	22	50
08002	10	11	20	20004	17	32	52
08003	12	11	20	20005	22	32	50
				20006	32	32	50
10001	12	11	24				
10002	10	11	26	26001	17	32	65
10003	12	16	24	26002	22	32	65
10004	17	16	24	26003	32	32	65
				26004	22	42	65
12003	12	29,2	30	26005	32	42	65
12004	17	21,2	30	26006	42	42	65
12005	22	21,2	30				
				31001	22	42	83
16003	12	21,2	40	31002	32	42	83
16004	17	21,2	40	31003	42	42	83
16005	22	21,2	40	31004	27	52	83
				31005	42	52	83
20001	12	21,2	52	31006	52	52	83
20002	17	21,2	52				

Rozměry jednotlivých dílů skládaného těleska pro plechy EI

Typ těleska	b	a	e	f	g	h	i	j	k	l	t
E 20×20	22,5	23	58	39	29,5	35,5	21	15	20,5	26	1
×25		28	64			26					
×32		35	70			33					
E 25×25	28,5	29	70	49	37	45	26	20	25,5	34	1,5
×32		36	77			33					
×40		44	85			41					
E 32×32	35,5	36	84	62	47	55	33	25	32,5	42	1,5
×40		44	92			41					
×50		54	102			51					
E 40×40	43,5	44	98	78	59	68	41	30	40,5	50	1,5
×50		54	108			51					
×64		68	122			65					
E 50×50	55	55	121	98	74	82	51	36	51	62	2
×64		69	135			63					
×80		85	151			81					
E 64×64	69	69	147	125	95	103	63	48	65	77	2
×80		85	163			81					
×100		105	183			101					

Všechny míry [mm]

Rozměry jednotlivých dílů skládaného těleska pro plechy M

Typ těleska	b	a	e	f	g	h	i	j	k	l	t
M 12×12	15	15	36	29	28		13	10	13		1
×16		19	40				17				
×20		23	44				21				
M 17×16	20	19,5	44	37	35,5	39,5	17,5	10	18	24	1
×20		23,5	48				21,5				
×25		28,5	53				26,5				
M 20×20	23	23,5	52	44	42	47	21,5	10	21	27	1
×25		28,5	57				26,5				
×28		31,5	60				29,5				
×32		35,5	64				33,5				
M 23×25	26	28,5	61	50	48	53	26,5	12	24	30	1
×32		35,5	68				33,5				
×40		43,5	76				41,5				
M 29×32	32	35,5	70	54,6	52	58	33,5	16	30	36	1
×40		43,5	78				41,5				
×50		53,5	88				51,5				
M 34×32	38	36,5	74	65	64	71	33,5	19	35	42	1,5
×36		40,5	78				37,5				
×40		44,5	82				41,5				
×50		54,5	92				51,5				

Všechny míry [mm]

Rozměry jednotlivých dílů skládaného těleska pro jádra C

Typ jádra	a	b	d		e		f		g	h	i	j	k	l	t
			(*)	(**)	(*)	(**)	(*)	(**)							
08001	13	9	5	3,5	28	—	10	—	22	26	11	7	7	13	1
08002		12					22						10	16	
08003		14					24						12	18	
10001	13	14	7	3,5	32	26	28	21	26	30	11	10	12	18	1
10002	18	12			37	30	26	29	28	32	11		10	16	
10003		14					28	21	26	30	16		12	18	
10004		19					33	26	26		16		17	23	
12003	23,2	14	9	4,5	46	38	32	23	32	37	21,2	12	12	19	1
12004		19					37	28				17	24		
12005		24					42	33				22	22	29	

Pokračování tab. 14

Typ jádra	a	b	d		e		f		g	h	i	j	k	l	t
			*)	**)	*)	**)	*)	**)							
16003	23,2	14	13	6,5	54	41	40	43	43	48	21,2	16	12	19	1
16004		19				45						17	24		
16005		24				50						22	29		
20001	23,2	14	—	8,5	—	44	—	31	55	60	21,2	20	12	19	1
20002		19				36	55	60	21,2			17	24		
20003	24	24	—	8,5	—	44	—	41	53	58	22	20	22	20	
20004	35	20	—	8	—	54	—	36	55	60	32	20	17	25	1,5
20005		25						41	53	58			22	30	
20006		35						51	53	58			32	40	
26001	35	20	—	11	—	60	—	42	69	74	32	35	17	25	1,5
26002		25						47					22	30	
26003		35						57					32	40	
26004	45	25	—	11	—	70	—	47	69	74	42	35	22	30	1,5
26005		35						57					32	40	
26006		45						67					42	50	
31001	45	25	—	13,5	—	75	—	52	87	93	42	45	22	31	1,5
31002		35						62					32	41	
31003		45						72					42	51	
31004	55	30	—	13,5	—	85	—	57	87	93	52	45	27	36	1,5
31005		45						72					42	51	
31006		55						82					52	61	

Všechny měry [mm]

*) Jednosloupkové jádro

**) Dvousloupkové jádro

14. Navíjecí vodiče a proklady

K navíjení cívek výstupních transformátorů se ve většině případů používá měděných lakovaných vodičů podle ČSN 34 7325. Měď použitá na vodiče je měkká, elektrolytická. Izolaci vodičů tvoří vrstva izolačního laku, a to buď polyamidového laku (značí se Pl), nebo epoxidového laku (E), nebo laku formalového (F). Izolační vrstva je poměrně tenká, protože napětí, která se vyskytuje mezi sousedními závity vinutí, bývají malá.

V tab. 15 je uveden přehled měděných lakovaných vodičů s nejdůležitějšími údaji pro konstrukci.

V poslední době se provádějí zkoušky s hliníkovými vodiči (ČSN 34 7350),

Tab. 15. Měděné lakované vodiče

Jmenovitý průměr vodiče mm	Maximální vnější průměr vodiče mm	Činný odpor vodiče Ω/km	Váha vodiče kg/km	Počet závitů na 1 cm	Počet závitů na 1 cm²	Proudové zatížení při prourové hustotě 2,5 A/mm² mA
0,03	0,048	24 819,0	0,006	200	39 000	9,7
0,04	0,058	13 961,0	0,013	195	27 000	3
0,5	0,068	8 935,0	0,020	140	19 000	5
0,056	0,077	7 123,0	0,025	125	15 000	6
0,063	0,084	5 628,0	0,031	115	12 500	8
0,071	0,092	4 431,3	0,039	105	10 500	10
0,08	0,101	3 490,2	0,049	95	9 000	13
0,00	0,111	2 757,6	0,061	85	7 000	16
0,10	0,121	2 233,8	0,075	78	6 000	20
0,112	0,141	1 780,8	0,095	67	5 000	25
0,125	0,154	1 429,6	0,118	61	3 800	30
0,132	0,161	1 281,9	0,131	58	3 500	34
0,140	0,168	1 139,7	0,147	55	3 200	38
0,150	0,179	992,7	0,169	52	2 800	44
0,160	0,189	872,54	0,192	49	2 500	50
0,170	0,200	772,92	0,216	46	2 250	56
0,180	0,210	689,41	0,240	44	2 000	63
0,190	0,220	618,75	0,267	42	1 800	71
0,200	0,230	558,42	0,293	40	1 650	78
0,212	0,247	497,00	0,331	38	1 500	88
0,224	0,259	445,15	0,365	36	1 350	98
0,236	0,271	401,15	0,405	34	1 250	110
0,250	0,285	357,41	0,455	32	1 100	123
0,265	0,303	318,02	0,510	30	975	137
0,280	0,318	284,92	0,570	29	870	154
0,300	0,338	248,19	0,650	27	770	177
0,325	0,360	225,12	0,720	25	690	194
0,335	0,380	199,04	0,810	24	625	220
0,355	0,400	177,24	0,910	23	560	248
0,375	0,420	158,84	1,01	22	510	275
0,400	0,445	139,61	1,15	21	450	314
0,425	0,477	123,66	1,31	20	400	355
0,450	0,502	110,31	1,46	19	360	400
0,475	0,527	99,004	1,62	18	325	442
0,500	0,552	89,350	1,80	17	300	490
0,530	0,590	79,519	2,06	16	265	550

Pokračování tab. 15

Jmenovitý průměr vodiče mm	Maximální vnější průměr vodiče mm	Činný odpor vodiče Ω/km	Váha vodiče kg/km	Počet závitů na 1 cm	Počet závitů na 1 cm ²	Proudové zatížení při proudové hustotě 2,5 A/mm ² mA
0,560	0,620	71,230	2,28	15	240	616
0,600	0,660	62,049	2,62	14	210	705
0,630	0,690	56,279	2,87	13	190	785
0,670	0,735	49,760	3,24	13	170	880
0,710	0,775	44,311	3,63	12	155	990
0,750	0,825	39,710	4,18	11	140	1100
0,800	0,875	34,953	4,70	10	120	1250
0,850	0,925	30,016	5,25	10	110	1420
0,900	0,975	27,576	5,84	9	100	1590
0,950	1,025	24,751	6,47	9	90	1770
1,000	1,075	22,332	7,15	9	83	1965
1,060	1,155	19,880	8,25	8	74	2200
1,120	1,215	17,807	8,15	8	65	2460
1,180	1,275	16,042	10,15	7	56	2740
1,250	1,345	14,206	11,25	7	50	3030
1,320	1,415	12,820	12,40	6	44	3420
1,400	1,495	11,307	13,95	6	40	3750
1,500	1,595	9,9278	15,95	5	33	4500
1,600	1,695	8,7256	18,10	5	28	5000

jež mají nahradit měděné vodiče od průměru 0,6 mm výše. V tab. 16 je přehled hliníkových lakovaných vodičů s nejdůležitějšími údaji pro konstrukci. Zavádění hliníkových vodičů místo měděných činí mnohé potíže; jednou z nich je pájení hliníkových vodičů a prostor v okénku pro vinutí, protože elektrická vodivost hliníkového vodiče je asi trojnásobně větší než vodivost mědi.

Zcela výjimečně se používá při vinutí cívek měděného vodiče s izolací, která se za tepla sama slepí. Tyto vodiče se vyrábějí pod různými obchodními názvy, jako např. „Thermolit“, „Thermofix S a D“, nebo „Self bonding“ apod. Jsou to v podstatě normální lakované vodiče, na které je nanesen další lakový námos na bázi termoplastu, který se při zahřátí pevně slepí se sousedními závity vinutí. Cívky se zahřívají buď v sušárně při teplotě 180 až 200 °C, nebo přímým připojením vinutí na zdroj napětí, přičemž se průchodem proudu vinutí zahřeje a pevně slepí. Tyto vodiče jsou drahé, a proto se pro vinutí cívek transformátorů používají jen velmi málo. Použitím teplem slepených vodičů i vhodných tělesek a prokladů odpadá potřeba dodatečné impregnace celých transformátorů.

Všechny uvedené vodiče mají jednu společnou nevýhodu, neboť z nich musíme

Tab. 16. Hliníkové lakované vodiče

Jmenovitý průměr vodiče mm	Maximální vnější průměr vodiče mm	Činný odpor vodiče Ω/km	Váha vodiče kg/km	Počet zdvihů na 1 cm	Počet závitů na 1 cm ²	Proudové zatížení při proudové hustotě 2,5 A/mm ² mA
0,670	0,735	83,41	1,02	13	170	880
0,710	0,775	74,29	1,14	12	155	900
0,750	0,825	66,57	1,32	11	140	1100
0,800	0,875	58,58	1,48	10	120	1250
0,850	0,925	51,82	1,66	10	110	1420
0,900	0,975	46,23	1,84	9	100	1590
0,950	1,025	41,41	2,04	9	90	1770
1,000	1,075	37,45	2,25	9	83	1965
1,080	1,155	33,33	2,60	8	74	2200
1,120	1,215	29,85	2,88	8	65	2460
1,180	1,275	26,89	3,20	7	56	2740
1,250	1,345	23,97	3,55	7	50	3030
1,320	1,415	21,49	3,91	6	44	3420
1,400	1,495	19,10	4,40	6	40	3750
1,500	1,595	16,64	5,03	5	33	4500
1,600	1,695	14,63	5,70	5	28	5000

odstranit na vývodech vrstvičku izolačního laku, který je mechanicky velmi odolná, aby se mohlo provést pájení nebo jiné vodičové spojení. Vývody se čistí smirkovým plátnem nebo škrabkou, u tenkých vodičů kyselinou mravenčí apod. Všechny tyto způsoby jsou zdlouhavé a při neopatrném zacházení se zbytečně zeslabuje průřez vodiče nebo se vodič i přetrhne.

Určitý druh vodiče, jehož použití je velmi rozšířené v zahrazení, má tu vlastnost, že ho lze cínovat bez mechanického odstranění izolace. Jsou to měděné vodiče izolované laky na bázi vinylových polymerů, které se působením tepla (např. teplé pájky) samy čistí a dokonale ocíňují. Obchodní názvy takových vodičů jsou: „Standofix“, „Duraflex“, „Wiedox“ apod.

U vinutí s vodiči malých průměrů je nutné zesilovat vývody z cívky tlustšími vodiči. Toto zesilování se provádí holým měděným nebo i pocívaným vodičem o průměru 0,4 až 0,6 mm.

K pájení měděných vodičů (vývodů z cívek apod.) se všeobecně používá běžné měkké cínové pájky 30 až 60 % a kalafuny, někdy i rozpuštěné v líhu.

Pájení hliníkových vodičů je obtížnější, protože nejprve musíme odstranit z povrchu slabou vrstvičku oxydu, aby se mohlo pájet obvyklým způsobem. O tom však pojednává kap. VII.

Mezi jednotlivé vrstvy vinutí a mezi vinutí samotná se vkládají izolační

proklady; používá se různých papírových, skleněných, textilních nebo syntetických materiálů.

Nejběžnější materiály jsou:

Kondenzátorový papír (ČSN 50 2612)

tloušťka: 8 — 10 — 12 — 14 — 17 — 20 — 22 — 30 — 35 µm,
šířky prokladů: 14 — 18 — 23 — 26 — 27,5 — 29 — 34 — 37 — 41 — 44 —
— 47 — 49 — 56 — 59 — 62 — 70 — 76 — 80 — 91 — 97 mm,
elektrická pevnost až 40 kV/mm,
impregnace kondenzátorového papíru je z parafínu, vyhovuje teplotám —70 až
+100 °C.

Prokladový papír P 30 (ČSN 50 2616)

tloušťka: 0,03 mm,
šířky prokladů: podle potřeby,
elektrická pevnost: 13 kV/mm,
prokladový papír P 30 se dodává bez impregnace.

Papír pro sdělovací kabely Sl (ČSN 50 2621)

tloušťka: 0,065 mm,
šířky prokladů: podle potřeby,
elektrická pevnost suchého papíru až 10 kV/mm, po impregnaci až 50 kV/mm,
papír pro sdělovací kabely se dodává bez impregnace.

Drážková lepenka (ČSN 50 3178)

tloušťka: 0,1 — 0,15 — 0,2 — 0,25 — 0,3 — 0,4 — 0,5 — 0,6 mm,
vyrábí se v arších: 630 × 950 mm,
elektrická pevnost do 12 kV/mm.

Lesklá lepenka (ČSN 50 3177)

tloušťka: 0,5 — 0,6 — 0,8 — 1,0 — 1,2 — 1,5 — 2,0 — 2,5 mm,
vyrábí se v arších 700 × 1000 mm,
elektrická pevnost do 7 kV/mm.

Lakováný papír (ČSN 34 6561)

Tloušťka: 0,03 — 0,04 — 0,05 — 0,06 — 0,08 — 0,1; 0,12 — 0,15 — 0,20 mm,
šířky prokladů: 9 — 12,5 — 16 — 21 — 23 — 26 — 27 — 30 — 32 — 33 — 34 —
35 — 36 — 37 — 38 — 39 — 40 — 41 — 42 — 43 — 44 — 45 — 47 — 48 —
49 — 50 — 51 — 52 — 53 — 54 — 55 — 56 — 57 — 60 — 62 — 65 — 68 —
— 70 — 89 — 145 — 175 mm,
elektrická pevnost 30 kV/mm.

Lakováné plátno (ČSN 34 6562.1)

Tloušťka: 0,1 — 0,12 — 0,15 — 0,20 — 0,25 mm,
šířky prokladů: 20 — 27,5 — 29 — 34 — 37 — 44 — 47 — 56 — 70 — 91 mm,
elektrická pevnost 15 kV/mm.

Lakováné hedvábí (ČSN 34 6562,3)

tloušťky: 0,08 — 0,10 — 0,12 — 0,15 mm,
šířka svitku 1000 mm,
elektrická pevnost 45 kV/mm.

Ochranná páska lepicí (ČSN ESČ 276)

tloušťka: 0,25 mm
šířky pásky: 10 — 16 — 21 — 27 — 34 — 39 — 45 — 49 — 55 — 70 — 89 mm,
barvy: černá, hnědá, rudá, oranžová, žlutá, zelená, modrá, fialová, šedá, bílá.

Acetobutyryátová fólie (Umafol E)

tloušťka 0,07 mm,
pevnost v tahu 4,95 kp/15 mm,
elektrická pevnost 70 kV/mm,
tepelná třída E.

Polyethylentereftálová fólie (PET)

tloušťka 0,04 mm,
elektrická pevnost asi 120 až 170 kV/mm,
průtažnost 70 až 120 %.

Lakováné skleněné tkaniny (ČSN 34 6563)

vyrábějí se dvojí, podle směru lepených vláken, viz tab. 17.

Tab. 17. Lakované skleněné tkaniny (ČSN 34 6563)

	Směr vláken v tkanině	
	paralelní ČSN 34 6563.11	diagonální ČSN 44 6563.12
Tloušťky [mm]	0,10 — 0,12 — 0,15 — 0,20	0,10 — 0,12 — 0,15 — 0,20
Šířka svitku	1000 mm	1000 mm
Elektrická pevnost	25 kV/mm	25 kV/mm

Uvedené údaje platí pro teplotní třídu E.

Tyto tkaniny jsou vyráběny i pro teplotní třídu B v diagonálním provedení (ČSN 34 6563.22) o tloušťce 0,15 mm.

15. Pomocné materiály

Při výrobě cívek výstupních transformátorů se používá různých pomocných materiálů; jsou to: izolační trubičky, pájecí oka, různé tkanice, motouzy, lepidla, ředidla, barvy apod.

Vývody vodičů jednotlivých vinutí se využívají z cívky ve většině případů izolované různými izolačními trubičkami. Izolační trubičky bývají z PVC, z lakovaného textilu, ze silikonového kaučuku nebo sklotextilové.

Izolační trubičky PVC (ČSN 34 6551)

Vhodné pro teploty od -20 do $+60$ °C.

Vyrábějí se v barevném provedení: černá, hnědá, rudá, žlutá, zelená, modrá, šedá, bílá.

Vnitřní průměr: 0,5 — 1,0 — 2,0 — 3,0 — 4,0 — 5,0 mm

Tloušťka stěny: 0,25 — 0,5 mm

Izolační trubičky lakované (ČSN 34 6550)

Vhodné pro teploty od -40 do $+105$ °C (třída tepelné odolnosti A).

Odolávají impregnaci lakem S 1901.

Vyrábějí se ve dvojím základním provedení:

tenkostenné (T) — tloušťka stěny 0,3 mm,

zkušební napětí 2000 V,

barevný výběr: žlutá, černá,

vnitřní rozměry: 0,5 — 0,8 — 1,0 — 2,0 — 2,5 — 3,0 — 3,5 — 4,0 — 4,5 mm;

tlustostenné (S) — tloušťka stěny 0,7 mm,

zkušební napětí 2500 V,

barevný výběr: žlutá, černá, šedá, rudá, hnědá, bílá, modrá, zelená,

vnitřní rozměry: 0,5 — 0,8 — 1,0 — 1,3 — 1,5 — 2,0 — 2,5 — 3,0 — 3,5 —

4,0 mm.

Izolační trubičky ze silikonového kaučuku

vyrábí Kablo, n. p., Vrchlabí pod označením B 960.

Tepelná odolnost od -50 do $+180$ °C (třída tepelné odolnosti H).

Průtažnost minimálně 180 %.

Izolační odpor po 24 h uložení v prostředí s 95 % relativní vlhkostí a při teplotě 180 °C je $5 \cdot 10^3$ MΩ/mm.

Odolává impregnačním lakovem S 1901 a S 1914.

Vyrábějí se v provedeních podle tab. 18.

Mezi pomocné materiály, používané při výrobě cívek, patří také technická náplast, a to k zajištování vodičů na začátku, na konci nebo při odbočce vinutí, někdy i k zajištování (k lepení) prokladů. Technická náplast je z tkaniny s jednostranným nánosem lepivého filmu. Dodává se v bílé nebo v šedé barvě. Pevnost v tuhu asi 7 kp. Lepicí technická náplast bývá šířky 10 mm.

K zajištování vývodů se dále používá bavlněná tkanice (ČSN 80 3671) šířky 15 mm o tloušťce 0,2 mm a různých lněných nití a motouzů.

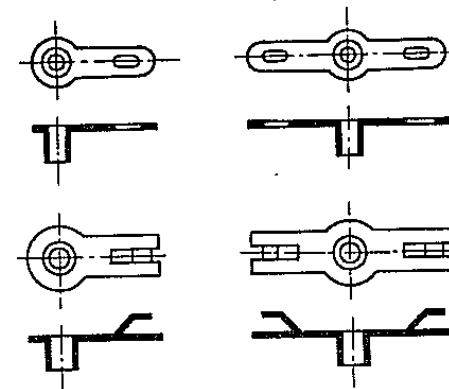
Pro zajištování prokladů a různých izolačních vložek se používá acetónových a trolitulových lepidel nebo lepicího kompaundu.

Tab. 18. Izolační trubičky ze silikonového kaučuku

Vnitřní průměr trubičky mm	Tloušťka stěny mm	Zkušební střídavé napětí kV
0,15	0,25	3
1,0	0,25	3
1,5	0,3	3
2,0	0,3	3
2,5	0,4	3
3,0	0,5	3
4,0	0,5	3
5,0	0,6	5

Barevné provedení trubiček: černá, rudá, žlutá, bílá, zelená, modrá, šedá.

Vývody jednotlivých vinutí jsou zakončovány v různých pájecích okách, nýtkách, či jiných zvláštních prvcích. Na obr. 56 je znázorněno několik druhů pájecích ok, kterých se nejčastěji používá.



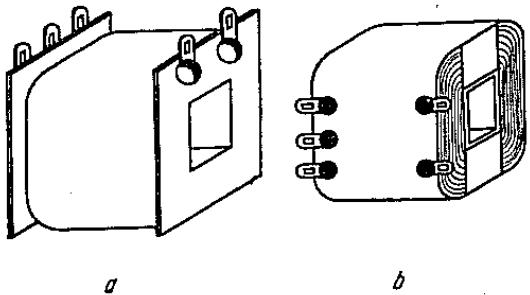
Obr. 56. Různé druhy pájecích ok, kterých se používají při výrobě výstupních transformátorů

16. Provedení cívek

Cívky výstupních transformátorů se provádějí dvojím způsobem, viz obr. 57, a to s čely (a), nebo bez čel (b). Pro jednotlivý způsob provedení je nutno zvolit správný druh cívkového těleska.

Při vinutí s čely se upevňují vývody na čela cívky do různých pájecích ok, dutých nýtků apod. Viz obr. 57.

Někdy se ponechávají vývody volně vyvedené z cívky, izolované ohebnými trubičkami, jak je vidět na obr. 58, nebo jsou zapojeny na zvláštní svorkovnici, upevněné na držácích transformátoru.

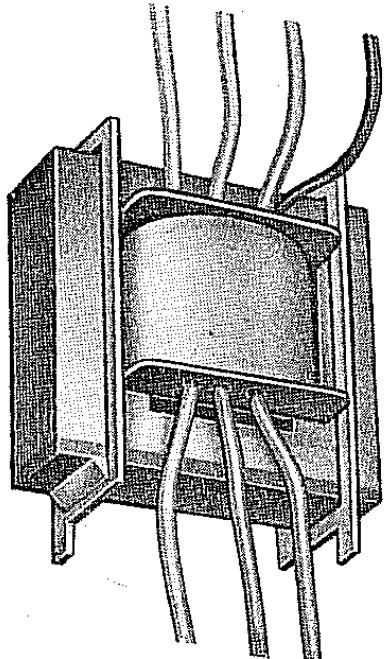


Obr. 57. Cívka výstupních transformátorů:
a) s čely, b) bez čel

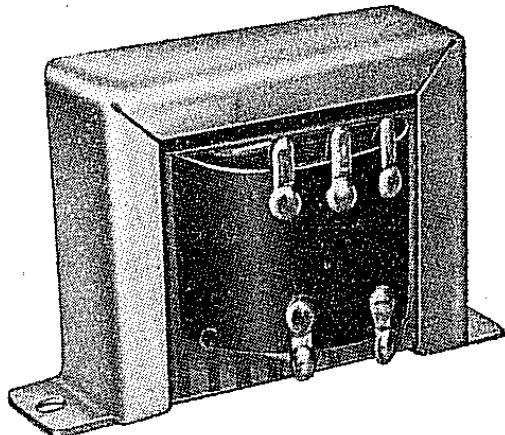
Při vinutí na cívky bez čel se vydávají vývody do pájecích ok nebo nýtků, upevněných na ochranné pásky, obr. 59 a 60.

Vlastní vinutí cívek pro výstupní transformátory se vše valcovým způsobem, tj. při navíjení se ukládá vodič do sousedních vrstev, závit vedle závitu.

Vinutí bývají dělena do několika sekcí, podle požadavků na velikost rozptylové indukčnosti nebo kapacity vinutí. Na obr. 61 je znázorněno několik tako-

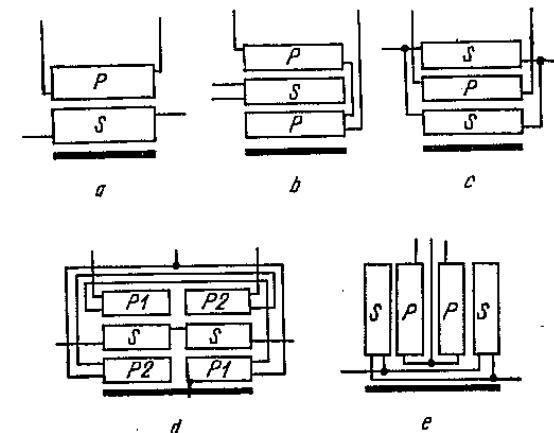


Obr. 58. Volné vyvádění vývodů z transformátoru



Obr. 59. Stahování výstupních transformátorů do držáků podle tab. 20

vých způsobů; provedení a je nejběžnější. Vzájemná poloha primárního vinutí (označeno P) a sekundárního vinutí (S) bývá samozřejmě i opačná. Provedení b a c bývá také velmi často používáno. I zde mohou být nejrůznější obměny vzájemného přehození a zapojení primárního či sekundárního vinutí. Na vzájemné rozdělení vinutí má zpravidla

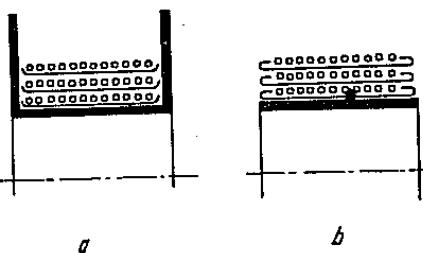


Obr. 60. Využití vývodů při vinutí cívek bez čísel do pájecích ok, upevněných na ochranné pásky

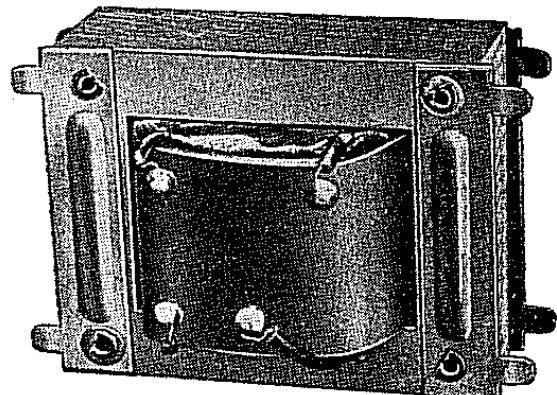
Obr. 61. Dělení vinutí do sekcí pro zmenšení rozptylové indukčnosti a kapacit

vliv vhodnější plnění okénka vinutím. Někdy je totiž výhodnější udělat např. sekundární vinutí vodičem tenčího průřezu a vinout dvě stejná vinutí zapojená paralelně podle c, než použít tlustšího vodiče a zapojit obě cívky s polovičním počtem závitů do série, a to právě se zřetelem na lepší využití okénka transformátorového plechu.

Provedení d a e je pro dvojčinná zapojení. Také zde lze libovolně zaměňovat sekce primárního a sekundárního vinutí.



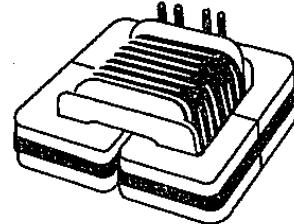
Obr. 62. a) Ukládání třepeného prokladu do tělisku s čely, b) Ukládání lemovaného prokladu na tělisko bez čel



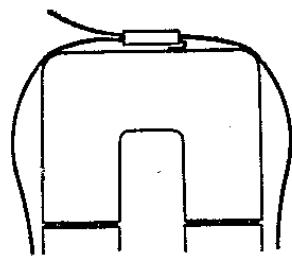
Obr. 63. Stahování transformátorů dutými, stáčenými nýty. Vývody jsou provedeny do „pecek“

Některá cívková tělíska, např. tělíska skládaná, mají v rozích zmenšenou elektrickou pevnost vůči jádru, což je způsobeno spárami mezi skládanými díly tělíska. Proto je nutné před navíjením zpevnit izolaci, a to ovinutím tělíska vhodným izolačním prokladem.

Mezi jednotlivé vrstvy vinutí se vkládají proklady, nejčastěji jsou to rovně řezané pásy, jejichž šířku určuje rozměr tělíska. Při vinutí cívek s čely se někdy používá širších prokladů, než je vnitřní šířka tělíska; okraje prokladů se obou-



Obr. 64. Jádra C stažená tenkými ohebnými páskami, které obepínají obě poloviny jádra



Obr. 65. Princip stahování pásků u jader C

stranně třepí, tzn. proklad se po obou stranách drobně nastríhá. Třepení zabráňuje propadávání krajních závitů při navíjení, protože vytvoří v tělísce jakési korýtko, obr. 62a.

U vinutí bez čel se někdy používá prokladů oboustranně lemovaných, které mají zabránit vypadávání navinutého vodiče z cívky (obr. 62b).

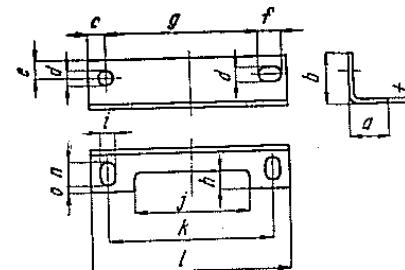
Povrch cívky bývá chráněn ochrannou páskou, nejčastěji samolepící (obr. 59), nebo lakovaným plátnem či papírem. Někdy se dává na poslední závit cívky průhledná elektroizolační fólie, pod níž se vloží štítek s potřebným textem.

17. Stahování výstupních transformátorů

Do navinuté cívky se vloží příslušné feromagnetické jádro, tj. buď transformátorové plechy, nebo jádra C. Je-li předepsaná vzduchová mezera určité velikosti, musí se vytvořit vhodnou papírovou vložkou. Teprve potom lze transformátor stáhnout.

Stahování výstupních transformátorů má mnoho obměn. Známé je provedení, znázorněné na obr. 104; tímto způsobem jsou staženy typizované výstupní transformátory na plechách velikosti EI 25. V tab. 19 jsou uvedeny potřebné rozměry použitých stahovacích úhelníků a v tab. 20 rozměry stahovacích pásků. Vlastní stáhnutí transformátorů je provedeno závrtnými šrouby podle normy ČSN 02 1174, nebo zvláštními stáčenými dutými nýty, jak je vidět na obr. 63. U výstupních transformátorů pro větší přenášené výkony je nutné izolovat

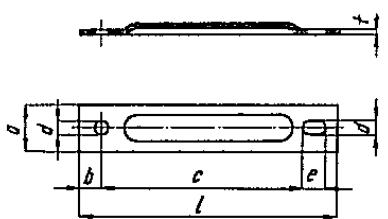
Tab. 19. Stahovací úhelník pro plechy EI (NT-N 214)



Velikost plechu	EI 20	EI 25	EI 28	EI 32	EI 36	EI 40	EI 50	EI 64
a	12	12	14	15	16	18	20	20
b	12	15	16	18	20	22	28	33
c	3,8	4,8	5	6	6,5	8	10	14
d	3,6	3,6	4,8	4,8	5,8	5,8	5,8	5,8
e	4	5	6	6	7	8	10	12
f	5,1	5,1	6,8	6,8	8,3	8,3	8,3	8,3
g	38,2	48,2	53,6	61,6	67,85	75,85	95,85	123,85
h	6	6	7	8	9	11	12	12
i	4,8	4,8	4,8	4,8	5,8	5,8	5,8	5,8
j	27	35	40	46	52	58	73	94
k	40	50	56	64	72	80	100	128
l	49	61	68	78	88	98	123	158
n	6,8	6,8	7,3	7,3	8,3	8,3	9,8	9,8
o	4,5	4,5	5,5	6,5	6,5	7,5	7	7
t	1,3	1,3	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5

Všechny míry [mm].

Tab. 20. Stahovací pásek pro plechy EI (NT-N 213)

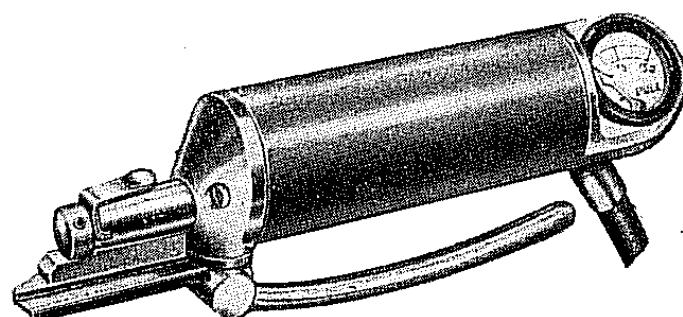


Velikost plechu	EI 20	EI 25	EI 28	EI 32	EI 36	EI 40	EI 50	EI 64
a	9	11	12	14	16	18	23	30
b	3,8	4,8	5	6	6,5	8	10	14
c	38,2	48,2	53,6	61,6	67,85	75,85	95,85	123,85
d	3,6	3,6	4,8	4,8	5,8	5,8	5,8	5,8
e	5,1	5,1	6,8	6,8	8,3	8,3	8,3	8,3
l	49	61	68	78	88	98	123	158
t	0,8	0,8	1,3	1,3	1,3	1,5	1,5	1,8

Všechny míry [mm]

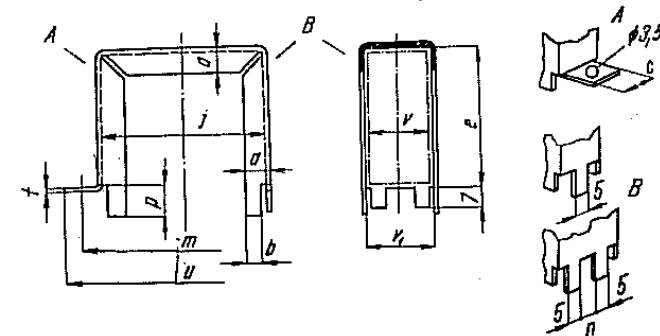
šrouby či nýty, stahující transformátor, proti dotyku s transformátorovými plechy. Izolaci tvoří různé izolační trubičky, nebo pouhé omotání stahovacího prvku prokladovým papírem.

Transformátory menších rozměrů bývají stahovány podle obr. 58, nebo podle obr. 59; těchto způsobů se používá nejčastěji. Rozměry držáků jsou uvedeny v tab. 21; držáky musí být před vložením transformátorových plechů vyloženy izolační vložkou, nejčastěji z drážkové lepenky, obr. 103.



Obr. 66. Kleště pro stahování a zajišťování pásků při montáži transformátorů s jádry C

Tab. 21. Stahovací držák pro plechy EI (NT-N 008)



Velikost plechu	v	v ₁	a	b	c	e	j	m	n	p	t	u
EI 10	8	9	4	3	8	27	32	41	—	4	0,6	48
	10	11			10				—	5		
	12,5	13,5			12				—	6		
	16	17			16				5	8		
EI 12	10	11	6	5	10	34	40	50	—	5	0,8	57
	12,5	13,5			12				—	6		
	16	17			16				5	8		
	20	21			20				9	10		
EI 16	12,5	13,5	7	6	12	42	50	60	—	6	0,8	67
	16	17			16				5	8		
	20	21			20				9	10		
	25	26			25				14	12		
EI 20	16	17	9	7	16	52	62	72	5	8	1	79
	20	21			20				9	10		
	25	26			25				14	12		
	32	33			32				20	15		

Všechny míry [mm]

Výstupní transformátory s jádry C mívají samostatně stahováno vlastní jádro C, obyčejně tenkým ohebným páskem z kovu, který obepíná obě poloviny jádra, obr. 64 a 65. Pásy se pevně dotahují zvláštními kleštěmi, znázorněnými na obr. 66. Dotažený pásek zajistí proti uvolnění spona, obdobná jako při stahování kartónů páskou „Cyklo“. Stahovací páska zpravidla také připevňuje výstupní transformátor k držáku transformátoru.

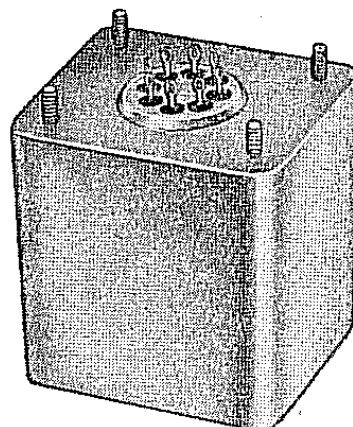
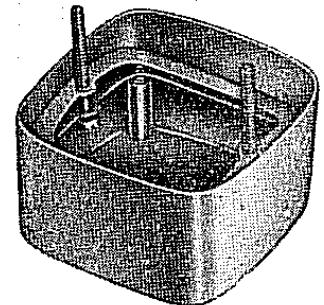
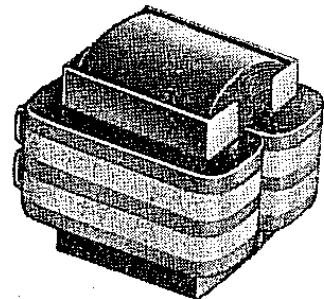
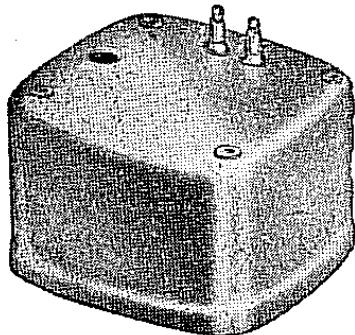
Miniaturní výstupní transformátory, jakých se používá v tranzistorové technice, mívají zpravidla vývody uzpůsobené pro přímé pájení do plošných

spoju. Svorkovnice s vývody se připevňují na stažený transformátor buď dolů (při použití pro plošné spoje), nebo nahoru (při použití pro drátové spuje).

Všechny smontované výstupní transformátory se impregnují, a to pro mechanické zpevnění vinutí, pro zlepšení elektroizolačních vlastností a pro zvětšení odolnosti proti vnějšímu vlivům. Impregnace se dělá různými vosky, asfalty nebo laky.

Má-li transformátor vykazovat odolnost proti prachu, vkládá se do různých krytů, viz obr. 67. Jsou-li požadavky ještě přísnější (vlhko, otresy, nehlubost apod.), potom se zalévá do různých pryskyřic apod. (obr. 68). Vývody z takto upravených transformátorů se dělají zvláštními průchodkami.

Výstupních transformátorů je mnohem více druhů, než bylo možno uvést, bylo upozorněno jen na ty nejběžnější.



Obr. 67. Výstupní transformátor v krytu proti prašnému prostředí

Obr. 68. Výstupní transformátor zalítý v Dentaacrylu

V. Určení konstrukčních parametrů výstupního transformátoru

Pro návrh výstupního transformátoru musí být známy následující údaje:

1. Druh zapojení koncového stupně (třída, ve které bude zesilovač pracovat).
2. Druh použitých výkonových elektronek či tranzistorů.
3. Velikost pracovního (zatěžovacího) odporu elektronek (tranzistorů).
4. Velikost stejnosměrného proudu, který bude procházet primárním vinutím transformátoru.
5. Velikost přenášeného střídavého výkonu.
6. Vnitřní odpor elektronky.
7. Sekundární zatěžovací impedance.
8. Dolní mezní přenášený kmitočet.
9. Horní mezní přenášený kmitočet.
10. Největší povolené kmitočtové a tvarové zkreslení.
11. Požadovaná účinnost transformátoru.
12. Zvláštní požadavky na elektroizolační pevnost.
13. Požadavky na odolnost proti vnějším vlivům.
14. Zvláštní požadavky na mechanické provedení (velikost, váha, výrobní cena apod.).
15. Zvláštní požadavky ostatní.

Tyto údaje dostává konstruktér jako požadavky, nebo si je stanoví sám podle hledisek uvedených v kap. III. Používá při tom katalogů elektronek či tranzistorů a reproduktorů.

Bude správné zmínit se aspoň v krátkosti o stanovení zatěžovacího (pracovního) odporu elektronky či tranzistoru koncového stupně v různém zapojení. Podrobnější rozbory nalezeňte čtenář v literatuře, která se zabývá nízkofrekvenčními zesilovači.

Jednočinné zapojení (třída A)

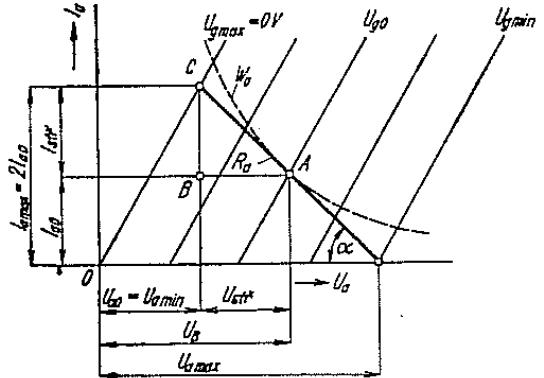
Stručný popis a charakteristické vlastnosti tohoto zapojení jsou uvedeny v kap. III.

Pracovní odpor elektronky R_a se určí podle anodových charakteristik příslušné elektronky. Na obr. 69 jsou znázorněny poměry v koncovém stupni,

který je buzen střídavým napětím. Pro pracovní bod A je při plném vybuzení klidový anodový proud I_{a0} dán vztahem

$$I_{a0} = \frac{W_{a\max}}{U_B}$$

kde $W_{a\max}$ je maximální přípustná anodová ztráta, U_B napájecí napětí (napětí zdroje).



Obr. 69. Zjednodušení charakteristik elektronek pro určení zatěžovacího odporu R_a

Při plném vybuzení je amplituda střídavého proudu

$$I_{stf} = I_{a0}$$

Má-li elektronka nulové předpětí ($U_g = 0$), protéká jí maximální anodový proud $I_{a\max} = 2I_{a0}$.

Napájecí napětí U_B se mění při plném vybuzení v rozmezí $U_{a\min}$ až $U_{a\max}$. Největší amplituda střídavého napětí

$$U_{stf} = U_B - U_{a0}$$

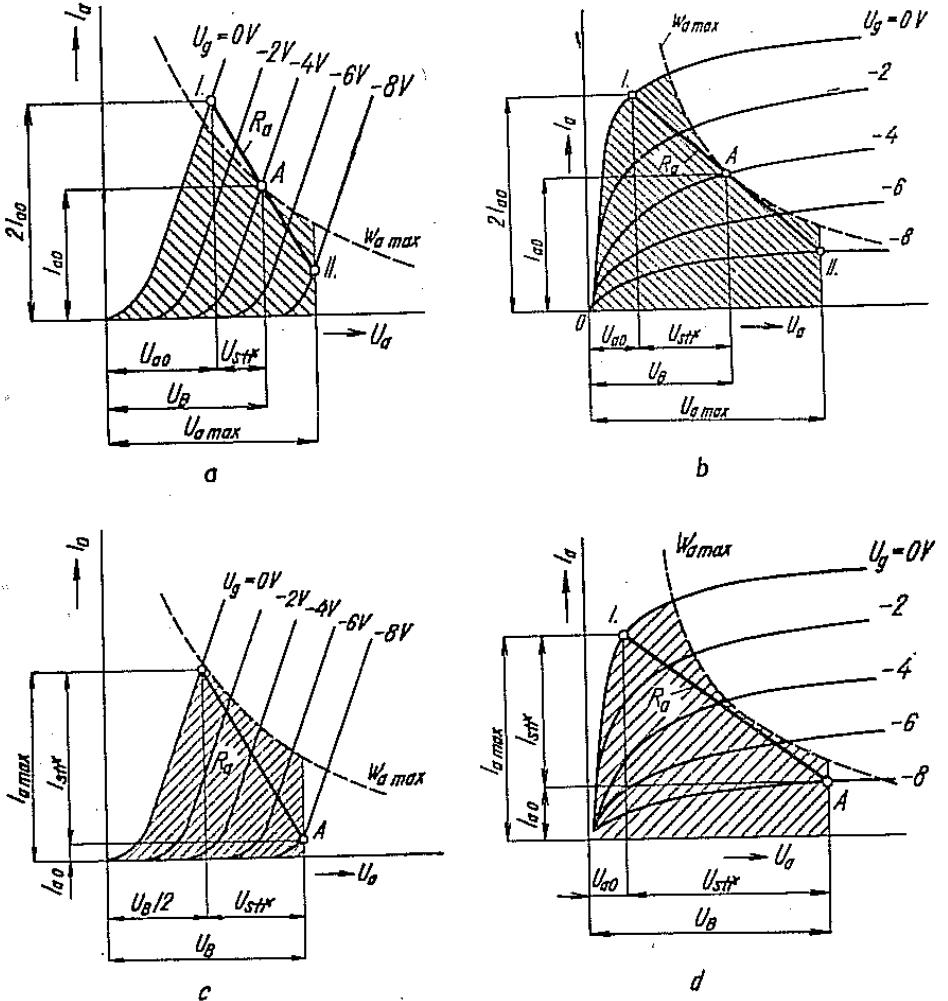
Velikost pracovního odporu elektronky R_a je dána vztahem

$$R_a = \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_B - U_{a0}}{I_{a0}} = \frac{U_{stf}}{I_{a0}}$$

Pro vnitřní odpor elektronky R_i platí

$$R_i = \frac{U_{a0}}{I_{a\max}}$$

Úpravou zjednodušených všeobecných poměrů v obr. 69 pro triodu dostaneme obr. 70a. Přímka znázorňující pracovní odpor R_a prochází pracovním bodem A , který leží pro zvolené mřížkové předpětí na příslušné anodové charakteristikce.



Obr. 70. Určení zatěžovacího odporu koncové elektronky

Pracovní bod A může být volen pouze v oblasti vyznačené šrafováním, kterou omezuje křivka W_a (největší přípustná anodová ztráta), charakteristika pro $U_g = 0$ V a maximální anodové napětí $U_{a\max}$. Zvolenému pracovnímu bodu A odpovídá klidový proud velikosti I_{a0} .

Obdobné podmínky platí i u pentody, obr. 70b. Také zde představuje přímka

R_a zatěžovací odpor elektronky a A — pracovní bod, který i zde může být volen jen v oblasti šrafováním označené.

U tranzistorů platí stejné podmínky jako pro pentodu.

Vypočítané hodnoty R_a přísluší pro jednočinná zapojení. Je-li zapojení dvojčinné, potom platí pro zatěžovací odpor R_{aa} , připojený mezi anodami elektronek (tranzistorů), vztah

$$R_{aa} = 2 R_a$$

Zapojení v třídě B

Přednosti zesilovače třídy B byly popsány v kap. III.

Optimální pracovní odpor R_a pro jednočinné zapojení v třídě B se určí podle anodových charakteristik. U triody, obr. 70c se postupuje tak, že napájecí napětí U_B se rozpůl a z takto získaného bodu se vztýčí kolmice, která v bodě I protne charakteristiku pro předpíti $U_g = 0$ V. Bod I určuje velikost maximálního anodového proudu $I_{a\max}$. Pracovní bod A je určen velikostí napětí U_B , které protne zvolenou anodovou charakteristiku (při určitém U_g). Pracovnímu bodu A přísluší klidový anodový proud I_{a0} . Spojnica mezi body A a I je přímka pracovního odporu triody R_{at} , kterou určuje vztah

$$R_{at} = \frac{U_B}{2 \cdot (I_{a\max} - I_{a0})} = \frac{U_{stř}}{I_{stř}}$$

U pentody zapojené v třídě B se postupuje obdobně, obr. 70d. Ze zvoleného pracovního bodu A (bod A se volí obdobně jako u triody v části vyznačené šrafováním) se vede přímka (odporová přímka R_a) do ohýbu charakteristiky pro $U_g = 0$ V. Pro optimální pracovní odpor pentody platí

$$R_{ap} = \frac{U_B - U_{a0}}{U_{a\max} - I_{a0}} = \frac{U_{stř}}{I_{stř}}$$

Vypočítané hodnoty pracovních odporů platí pro jednočinné zapojení. Při dvojčinném zapojení platí pro zatěžovací odpor mezi anodami elektronek (tranzistorů) R_{aa} vztah

$$R_{aa} = 4 R_a$$

Všechno co bylo řečeno o pentodách platí i pro tranzistory.

Ze zadaných údajů pro konstrukci výstupního transformátoru musí konstruktér postupně stanovit následující parametry:

1. Velikost střídavého napětí na primárním vinutí transformátoru.
2. Velikost, tvar a jakost jádra, počet transformátorových plechů a váha jádra.
3. Přípustnou velikost maximální střídavé magnetické indukce jádra.
4. Velikost primární indukčnosti.
5. Velikost rozptylové indukčnosti.

6. Počet závitů primárního vinutí.

7. Provést kontrolu magnetické indukce jádra a primární indukčnosti.

8. Průměr vodiče primárního vinutí a jeho váhu.

9. Stejnosměrný odpor primárního vinutí.

10. Největší přípustné stejnosměrné odpory vinutí se zřetelem na účinnost transformátoru.

11. Převod transformátoru.

12. Počet závitů sekundárního vinutí.

13. Průměr vodiče sekundárního vinutí a jeho váhu.

14. Stejnosměrný odpor sekundárního vinutí.

15. Rozložení vinutí a kontrola proveditelnosti vinutí.

16. Velikost vzduchové mezery.

17. Konstrukční výpočet rozptylové indukčnosti.

18. Způsob vinutí.

19. Způsob stažení transformátoru.

20. Způsob impregnace.

Pro urychlení a usnadnění výpočtu těchto parametrů se používá pomocných vzorců, tabulek a diagramů.

1. Velikost střídavého napětí na primárním vinutí

K výpočtu se používá známého vztahu

$$U_1 = \sqrt{P_1 \cdot R_a} \quad (86)$$

kde U_1 je střídavé efektivní napětí na primárním vinutí [V],

P_1 přenášený jmenovitý střídavý výkon [W],

R_a zatěžovací odpor výkonové elektronky (tranzistoru), tj. primární impedance výstupního transformátoru [Ω].

2. Velikost, tvar a jakost jádra, počet transformátorových plechů a váha jádra

Velikost jádra výstupního transformátoru se určí podle pomocného vzorce

$$S = 20 \sqrt{\frac{P_1}{f_d}} \quad (87)$$

kde S je průřez jádra [cm^2],

P_1 jmenovitý přenášený střídavý výkon [W],

f_d dolní mezní kmitočet, který transformátor má přenášet [Hz].

Průřezem jádra S rozumí se efektivní průřez železa, tedy

$$S = b \cdot a \cdot k \cdot 10^{-2} \quad (88)$$

kde S je efektivní průřez jádra [cm^2],

b výška svazku [mm],

a šířka středního sloupku plechu [mm],

k součinitel plnění jádra (0,9).

Tab. 22. Konstrukční údaje transformátorových plechů tvaru EI

Typ plechu	Výška svazku mm	Počet plechů tloušťky 0,35 mm	Efektivní průřez jádra cm ²	Střední délka magnetické silové čáry om	Indukční konstanta $(\frac{AL}{\mu}) \cdot 10^{-9}$	Odporová konstanta $AR \cdot 10^{-6}$	Střední délka závitu cm	Plocha pro vinutí om ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
EI 10	8	22	0,72	5,2	1,7	62	5,3	0,3
	10	28	0,90		2,2	67	5,7	
	12,5	35	1,13		2,7	72	6,2	
	16	45	1,44		3,5	81	6,9	
EI 12	10	25	1,08	7,1	1,9	41	6,9	0,56
	12,5	35	1,35		2,4	48	7,1	
	16	45	1,75		3,1	53	7,8	
	20	55	2,16		3,8	59	8,7	
EI 16	12,5	35	1,80	8,9	2,5	26,5	8,3	1,1
	16	45	2,30		3,2	28,5	9,0	
	20	55	2,88		4,1	31,5	9,9	
	25	69	3,60		5,1	35,0	11,0	
EI 20	16	45	2,88	11,1	3,2	20	10,5	1,8
	20	55	3,60		4,1	22	11,3	
	25	69	4,55		5,1	24	12,4	
	32	89	5,75		6,5	27	13,8	
EI 25	20	55	4,55	13,0	4,1	16,5	13,1	2,74
	25	69	5,75		5,1	18	14,2	
	32	89	7,20		6,5	20	15,6	
	40	111	9,00		8,1	22	17,3	
EI 32	25	69	7,20	17,8	5,1	11,5	16,8	5,1
	32	89	9,00		6,5	12,5	18,2	
	40	111	11,5		8,1	13,5	19,9	
	50	139	14,5		10,1	15,0	22,0	
EI 40	32	89	11,5	22,3	6,5	9,25	21,1	8,0
	40	111	14,5		8,1	10,0	22,8	
	50	139	18,0		10,1	11,0	24,9	
	64	178	23,0		13,0	12,0	27,8	
EI 50	40	111	18,0	27,8	8,1	6,9	26,4	13,3
	50	139	23,0		10,1	7,5	28,5	
	64	178	28,7		13,0	8,3	31,4	
	80	224	26,0		18,2	9,2	34,8	
EI 64	50	139	28,7	35,6	10,1	5,5	33,5	21,1
	64	178	36,0		13,0	6,0	36,4	
	80	224	46,0		16,2	6,6	39,8	
	100	278	57,2		20,3	7,3	44,0	

Podle vypočteného efektivního průřezu jádra lze určit velikost potřebných transformátorových plechů a výšku svazku, která odpovídá některé z normalizovaných řad plechů.

Tab. 23. Konstrukční údaje transformátorových plechů tvaru M

Typ plechu	Výška svazku mm	Počet plechů tloušťky 0,35 mm	Efektivní průřez jádra cm ²	Střední délka magnetické silové čáry cm	Indukční konstanta $(\frac{AL}{\mu}) \cdot 10^{-9}$	Odporová konstanta $AR \cdot 10^{-6}$	Střední délka závitu cm	Plocha pro vinutí em ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M 5	4,5	12	0,2	5,2	0,45	41	3,5	0,3
M 7	6,5	17	0,39	6,6	0,80	31	5,0	0,56
M 7	10,0	27	0,6	6,6	1,25	36	5,7	0,56
M 12	14,5	40	1,58	10,2	2	22	8,8	1,38
M 12	19,5	54	3,02	13,0	3	18	11,5	2,21
M 20	26,5	73	4,82	15,4	4	15,5	13,8	3,06
M 23	31,5	87	6,58	17,2	5	13,5	16,2	4,25
M 29	32,6	89	8,45	19,7	5,5	13,5	17	4,44
M 34	35	97	10,75	23,8	6	10	19,8	6,84
M 34	52	144	16,05	23,8	8,5	12	23,3	6,84

Lze použít tab. 22 až 25, sloupec 4, kde jsou uvedeny efektivní průřezы železa pro normalizované rozměry plechů. Volí se vždy stejný, nebo nejbližší vyšší uvedený průřez, než byl vypočten rovnicí (87).

Z výšky svazku b lze vypočítat počet plechů n , z nichž je jádro složeno

$$n = \frac{b \cdot k}{t} \cdot 10^{-2} \quad (89)$$

kde n je počet plechů,

t tloušťka plechu [mm],

b výška svazku [mm],

k konstanta plnění (0,95).

Počty transformátorových plechů n jsou uvedeny v tab. 22 až 25, sloupec 3.

Podle velikosti zvoleného transformátorového plechu lze stanovit střední délku magnetické silové čáry l_z

$$l_z = [2 \cdot (a + b) + 2\pi r] \cdot 10^{-1} \quad (90)$$

kde l_z je střední délka magnetické silové čáry [cm],

a, b, r rozměry [mm], podle obr. 71 ($r = \frac{b}{2}$).

Tab. 24. Konstrukční údaje transformátorových plechů tvaru E/B

Typ plechu	Výška svazku jádra mm	Počet plechů tloušťky 0,35 mm	Efektivní průřez jádra cm^2	Střední délka magnetické silové čáry cm	Indukční konstanta $\left(\frac{AL}{\mu}\right) \cdot 10^{-9}$	Střední délka závitu cm		Plocha pro vinutí cm^2
						Spodní vinutí	Vrchní vinutí	
1	2	3	4	5	6	8	9	
E/B 2,5	2,5	6	0,0503	1,90	0,353	1,66	2,25	0,0836
	4	10	0,0900	1,90	0,6	1,96	2,55	0,0836
E/B 3	3	8	0,081	2,47	0,412	2,02	2,71	0,126
	5	13	0,135	2,47	0,683	2,42	3,11	0,126
E/B 4	4	10	0,144	3,02	0,595	2,58	3,6	0,205
	6	15	0,216	3,02	0,562	2,98	3,99	0,205
E/B 5	6	13	0,225	3,98	0,707	3,2	4,49	0,377
	8	21	0,36	3,98	1,135	3,8	5,09	0,377
E/B 6	6	15	0,324	5,04	0,812	3,86	5,59	0,665
	10	26	0,54	5,04	1,342	4,66	6,39	0,665
E/B 8	8	21	0,576	6,25	1,156	4,96	7,13	1,028
	12	31	0,864	6,25	1,735	5,76	7,93	1,028
E/B 6	6	15	0,324	5,04	0,812	3,86	5,59	0,6375
E/B 8	8	21	0,576	6,25	1,155	4,96	7,13	0,9806

Střední délky magnetických silových čar [cm] jsou uvedeny v tab. 22 až 25, ve sloupci 5.

Pro zjištění váhy jádra výstupního transformátoru se používá vztahu

$$Q_z = V_z \cdot \gamma_z \quad (91)$$

kde Q_z je váha jádra [g],

V_z objem jádra [cm^3],

γ_z měrná váha plechů podle tab. 8.

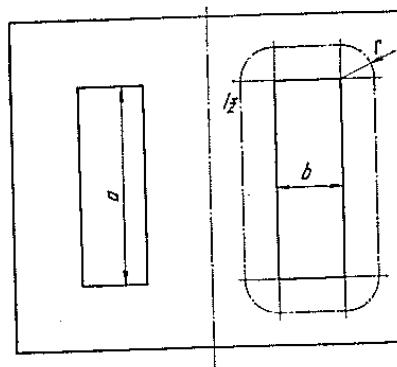
Objem jádra

$$V_z = 1,8(a + b)c \cdot d - 1,8 \cdot b \cdot c \cdot e \quad (92)$$

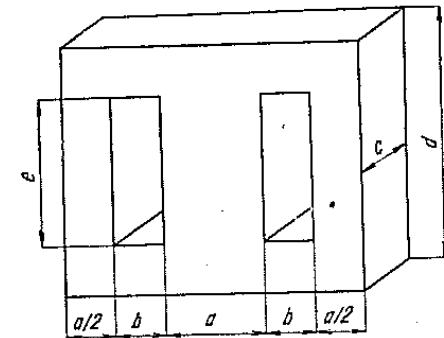
a, b, c, d, e jsou míry jádra podle obr. 72 [cm].

3. Přípustná velikost největší magnetické indukce jádra

Aby nebylo jádro výstupního transformátoru přesyceno, nesmí se překročit jeho maximální magnetická indukce B_{\max} , která je u transformátorových plechů TN 1,3–0,35 mm asi 1,2 T, u orientovaného materiálu Ortoperm asi 1,5 až 1,7 T.



Obr. 71. Určení střední délky magnetické silové čáry transformátorových plechů



Obr. 72. Určení objemu jádra transformátoru

Při dvojčinném zapojení, při němž je jádro transformátoru syceno pouze střídavě, lze volit velikost $B_{\text{stř}} = 0,5$ až 0,7 T u plechů TN 1,3–0,35 mm a $B_{\text{stř}} = 0,8$ až 1 T u Ortopermu. Je vhodné volit takovou velikost $B_{\text{stř}}$, při které je $\mu_{\text{největší}}$, protože tím je současně i indukčnost transformátoru největší.

Při zapojení jednočinném, kdy je jádro transformátoru syceno současně střídavě i stejnosměrně, může být volena velikost střídavé složky taková, aby součet obou složek nepřekročil B_{\max} ; tedy

$$B_{\max} \geq B_{\text{stř}} + B_{ss}$$

Proto se volí $B_{\text{stř}} = 0,2$ až 0,4 T pro plechy TN 1,3–0,35 mm a $B_{\text{stř}} = 0,4$ až 0,6 T pro Ortopermu. Čím volíme větší $B_{\text{stř}}$, tím větší je nebezpečí, že nastane tvarové (nelineární) zkreslení transformátoru.

Pro kontrolu velikosti magnetické indukce jádra střídavým napětím se používá známého vztahu

$$B_{\text{stř}} = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f_d \cdot S \cdot N_1} \quad (93)$$

kde $B_{\text{stř}}$ je střídavá magnetická indukce jádra [T],

U_1 střídavé efektivní napětí, které je na vinutí N_1 při plném buzení [V],

f_d dolní mezní přenášený kmitočet [Hz],

S průřez jádra [cm^2],

N_1 počet závitů.

Tab. 25. Konstrukční údaje transformátorových vinutých jáder tvarem C

Typ jádra	Efektivní průřez jádra cm ²		Střední délka magnetické silové čáry cm	Induktivní konstanta $(\frac{A_L}{\mu}) \cdot 10^{-8}$	Odporová konstanta $A_n \cdot 10^{-5}$	Síře jádra závitu cm	Plocha pro vlnutí cm ²
	Jádrové provedení	Nášlakové provedení				Jádrové provedení	Ploškové provedení
1	4	5	6	7	8	9	0
08 001	—	0,8	8,0	—	—	—	—
08 002	—	1,6	9,0	—	0,125	3,9	0,86
08 003	0,8	1,0	11,2	0,09	0,18	5,8	—
10 001	0,98	1,06	10,5	0,12	0,178	5,5	8,2
10 002	1,05	2,4	11,2	0,13	0,214	5,4	9,0
10 003	1,2	3,6	12,8	0,18	0,26	5,7	10,5
10 004	1,78	—	—	0,36	0,37	7,8	12,5
12 003	1,6	3,2	13,0	0,16	0,32	1,9	—
12 004	2,4	4,8	14,5	0,51	0,49	3,1	1,54
12 005	3,2	6,4	10,0	0,35	0,50	2,3	—
16 003	1,0	3,2	16,0	0,12	0,24	1,2	2,6
16 004	2,4	4,8	17,0	0,16	0,36	1,3	4,0
16 005	3,2	6,4	19,0	0,21	0,42	1,6	—
20 001	1,6	3,2	19,2	0,11	0,28	0,83	—
20 002	2,4	4,8	21,0	0,14	0,38	1,0	8,9
20 003	3,2	6,4	22,2	0,10	0,33	1,1	—
20 004	3,6	7,2	21,0	0,21	0,42	1,1	10,0
20 005	4,8	9,6	22,2	0,28	0,56	1,2	11,5
20 006	7,2	14,4	23,5	0,35	0,7	1,35	12,5
24 001	3,56	7,12	—	—	—	0,83	13,5
24 002	4,8	9,6	22,2	0,28	0,56	1,2	14,0
24 003	5,6	12,8	23,5	0,35	0,7	1,35	15,5
24 004	7,2	14,4	23,5	0,35	0,7	1,35	17,0
28 001	3,56	7,12	25,2	0,18	0,36	0,7	—
28 002	4,8	9,6	26,3	0,23	0,46	0,75	—
28 003	5,6	12,8	30,0	0,3	0,6	0,85	—
28 004	7,2	14,4	30,0	0,4	0,8	1,3	—
28 005	6,4	12,8	30,0	0,4	0,8	1,5	—
28 006	9,6	19,2	30,0	0,49	0,08	1,1	—
31 001	8,0	16,0	33,0	0,31	0,02	0,67	—
31 002	12,8	25,6	37,5	0,44	0,88	0,78	22
31 003	10,0	20,0	33,0	0,38	0,76	0,75	29,0
31 004	16,0	32,0	37,5	0,53	1,06	0,85	35,0
31 005	20,0	41,0	41,0	0,62	1,24	0,93	41,0

Pro kontrolu velikosti stejnosměrné magnetické indukce jádra lze použít rovnice (64)

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

kde Φ podle (65) je

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m}$$

Pro F_m platí rovnice (66).

Magnetický odpor jádra R_m je složen ze dvou složek, a to z magnetického odporu železa R_z a z magnetického odporu vzduchu (vzduchové mezery) R_v , tedy

$$R_m = R_z + R_v$$

kde pro R_z platí vztah (67) a pro R_v

$$R_v = \frac{l_v}{1,256 \cdot S}$$

Dosazením do rovnice (64) a úpravou vznikne vztah pro kontrolu velikosti stejnosměrné magnetické indukce jádra se vzduchovou mezerou

$$B_{ss} = \frac{1,256 \cdot N_1 \cdot I}{l_v + \frac{l_z}{\mu} \cdot 10^4} \quad (94)$$

kde B_{ss} je stejnosměrná magnetická indukce jádra [T],

N_1 počet závitů primárního vinutí,

I stejnosměrný proud, který protéká primárním vinutím transformátoru [A],

l_v vzduchová mezera [cm],

l_z střední délka magnetické silové čáry [cm],

μ poměrná permeabilita železného jádra při $F_m = I \cdot N_1$.

4. Velikost primární indukčnosti

Velikost primární indukčnosti výstupního transformátoru určuje dolní mezní kmitočet f_d , který má transformátor přenášet s určitým zesílením.

Pro výpočet velikosti primární indukčnosti se používá rovnici (39) nebo (40), podle toho, zda se zesílení (útlum) udává v decibelech nebo neperech.

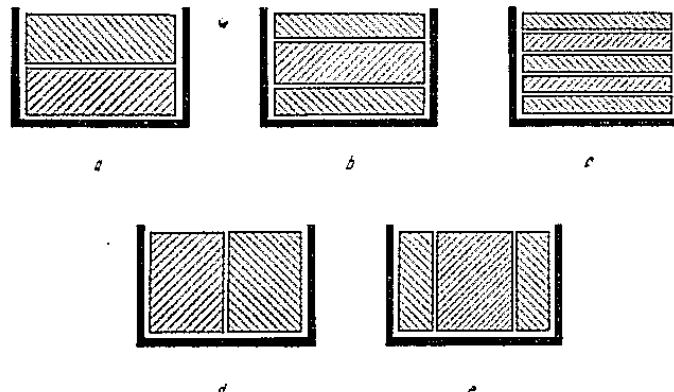
Je-li povolen pokles v zesílení na dolním mezním kmitočtu 3 dB (0,35 Np), což běžně bývá, lze použít pro výpočet primární indukčnosti transformátoru z jednodušeného vzorce (37).

V rovnících se vyskytuje výraz R_i , vnitřní odpor elektronky, který někdy nebývá v požadavcích uváděn. Hodnotu R_i lze však snadno vyhledat v běžných katalogích elektronek.

5. Velikost rozptylové indukčnosti

Velikost rozptylové indukčnosti má vliv, jak již bylo řečeno, na přenos vysokých kmitočtů transformátorem. Pro stanovení přípustné velikosti rozptylové indukčnosti L_s se používají rovnice (47) nebo (48).

Vhodnou konstrukční úpravou lze měnit velikost rozptylové indukčnosti. Na obr. 73 jsou znázorneny nejpoužívanější způsoby dělení vinutí a v tab. 26 je uvedeno, jak se zároveň mění velikost rozptylové indukčnosti.



Obr. 73. Způsoby dělení vinutí pro změnu L_s .

Rozptylovou indukčnost lze zjistit výpočtem již při konstrukci výstupního transformátoru; pro její výpočet platí vztah

$$L_s = 4\pi \cdot N_1^2 \cdot \frac{l_s}{n^2 \cdot b} \left(\sum t + \frac{\Sigma h}{n+1} \right) \cdot 10^{-9} \quad (95)$$

kde L_s je rozptylová indukčnost transformátoru [H],

N_1 počet závitů primárního vinutí,

l_s střední délka jednoho závitu [cm],

n počet rozdelených sekcí vinutí, zmenšený o jednu (např. u cívky s jedním primárním a jedním sekundárním vinutím je $n = 1$),

b šířka vinutí (viz obr. v tab. 26) [cm],

Σt součet všech izolačních prokladů mezi jednotlivými sekczemi vinutí [cm],

Σh součet všech výšek jednotlivých sekcí vinutí primárního i sekundárního (viz obr. v tab. 26) [cm].

Z tab. 26 je patrné, že lze snáze zmenšit rozptylovou indukčnost při rozdělení vinutí do souosých sekcí než při rozdělení do sekcí komorových. Protože rozdíl b , který je ve jmenovateli, je u transformátorů výhodnější (větší) při sou-

osém dělení a rozměry h , které jsou v činiteli, jsou zase při souosém dělení vinutí menší než při dělení komorovém.

Tab. 26. Konstrukční výpočet rozptylové indukčnosti výstupního transformátoru při dělení vinutí do sekci

 $n=1$	$L_s = 4\pi \cdot N_1^2 \cdot \frac{l_s}{b} \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \cdot 10^{-9}$
 $n=2$	$L_s = 4\pi \cdot N_1^2 \cdot \frac{l_s}{4b} \left[(t_1 + t_2) + \left(\frac{h_1 + h_2 + h_3}{3} \right) \right] \cdot 10^{-9}$
 $n=3$	$L_s = 4\pi \cdot N_1^2 \cdot \frac{l_s}{9b} \left[(t_1 + t_2 + t_3) + \left(\frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4} \right) \right] \cdot 10^{-9}$

[H; cm].

6. Počet závitů primárního vinutí

Pro výpočet množství závitů primárního vinutí výstupního transformátoru se stejnosměrnou předmagnetizací je nutné znát součin $L_1 \cdot I_0^2$, kde L_1 je primární indukčnost [H]; I_0 je anodový stejnosměrný proud koncové elektronky [A].

Podle obr. 21 lze zjistit pro součin $L_1 I_0^2$ předběžnou hodnotu μ_{ef} . Pro počet závitů primárního vinutí potom platí podle (74)

$$N_1 = 8,92 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{L_1 \cdot l_2}{\mu_{ef} \cdot S}} \quad [\text{H}, \text{em}, \text{cm}^2] \quad (96)$$

U výstupních transformátorů, které nemají stejnosměrnou předmagnetizaci, používá se pro výpočet N_1 upravené rovnice (93)

$$N_1 = \frac{U_1 \cdot 10^8}{4,44 \cdot f_d \cdot S \cdot B_{\text{stř}}} \quad (97)$$

Při stejnosměrné předmagnetizaci je nutné zjistit pro N_1 intenzitu magnetického pole H_0 podle rovnice (75)

$$H_0 = \frac{I_0 \cdot N_1}{l_z} \quad [\text{Az/cm}]$$

Podle obr. 23 lze poopravit hodnotu μ_{ef} vzhledem k H_0 a tedy i počet závitů N_1 podle rovnice (96).

7. Kontrola velikosti střídavé magnetické indukce a primární indukčnosti

Střídavá magnetická indukce se kontroluje podle rovnice (93) a její velikost nesmí překročit povolenou hodnotu $B_{\text{stř}}$ podle bodu 3, jinak nastává nebezpečí tvarového zkreslení.

Indukčnost se kontroluje podle (80) a její hodnota nesmí být menší než vyčítaná v odst. 4.

8. Průměr vodiče primárního vinutí a jeho váha

Průměr vodiče primárního vinutí lze určit, předpokládá-li se, že primární vinutí zabere při navíjení v okénku polovinu možného prostoru pro vinutí, tedy

$$S_1 = \frac{S_0}{2} \quad (98)$$

kde S_1 je plocha, kterou má k dispozici primární vinutí [cm^2],

S_0 plocha pro vinutí v okénku podle tab. 22 až 25, ve sloupci 9, [cm^2].

Nyní je nutné zjistit, kolik závitů primárního vinutí připadá na 1 cm^2 plochy S_1

$$n_1 = \frac{N_1}{S_1} \quad (99)$$

Podle tab. 5 pro navíjecí vodiče lze zjistit, jaký průměr vodiče musíme zvolit, aby vinutí „veslo“ do okénka. Současně lze zjistit přípustné proudové zatížení vodiče při proudové hustotě $2,5 \text{ A/mm}^2$.

Pro výpočet váhy vinutí se musí nejdříve zjistit z tab. 15 nebo 16 u příslušných průměrů vodičů váha vodiče na 1 km délky. Násobí-li se tato hodnota délkom vinutí (v km), vyjde váha vinutí

$$Q_v = l_s \cdot N \cdot q \cdot 10^{-4} \quad (100)$$

kde Q_v je váha vinutí [g],

l_s střední délka závitu podle (102) nebo (103) [cm],

N počet závitů,

q váha vodiče podle tab. 15 nebo 16 [g/km].

9. Stejnosměrný odpor primárního vinutí

Z celkové délky vodiče potřebného pro primární vinutí N_1 lze vypočítat stejnosměrný odpor primárního vinutí podle vztahu

$$R_{ss1} = N_1 \cdot l_s \cdot r \cdot 10^{-5} \quad (101)$$

kde R_{ss1} je stejnosměrný odpor vinutí [Ω],

N_1 počet závitů primárního vinutí,

l_s střední délka závitu podle (102) nebo (103) [cm],

r odpor vodiče podle tab. 15 nebo 16 [Ω/km].

Střední délka závitu l_s je určena velikostí transformátorového plechu a výškou svazku. Pro stanovení její délky platí

$$l_s = \left[2 \cdot (a + b) + \frac{\pi \cdot l}{2} \right] \cdot 10^{-1} \quad (102)$$

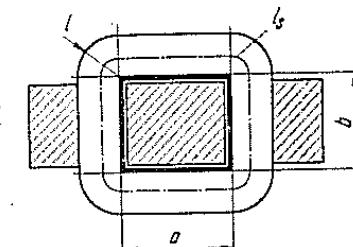
kde l_s je střední délka závitu spodního vinutí [cm],

a, b, l rozměry podle obr. 74 [mm].

Rovnice (102) platí pro spodní vinutí.

Pro horní vinutí platí

$$l_s = \left[2 \cdot (a + b) + \frac{3 \cdot \pi \cdot l}{2} \right] \cdot 10^{-1} \quad (103)$$



Obr. 74. Určení
střední délky závitu

Střední délky závitů l_s pro typizované rozměry jader jsou uvedeny v tab. 22 až 25, sloupec 8. Pro přesnější výpočty je však nutno používat vzorců (102) nebo (103).

V tab. 22, 23, 25, ve sloupci 7, je uvedena tzv. odporová konstanta A_R , která umožňuje velmi zhruba vypočítat stejnosměrný odpor vinutí při 100% plnění cívky ze vztahu

$$R_{ss} = A_R \cdot N^2 \quad [\Omega] \quad (104)$$

Vypočítaná hodnota odporu je pouze informativní, protože je závislá na průměru použitého vodiče. Konstanta A_R platí pro vodič o průměru 0,5 mm. Jde-li o vodič jiného průměru, je nutné konstantu upravit. Má-li vodič průměr 0,1 mm, potom platí

$$R_{ss} = A_R \cdot N^2 \cdot 1,2 \quad [\Omega] \quad (105)$$

při průměru vodiče 1,5 mm platí

$$R_{ss} = A_R \cdot N^2 \cdot 0,9 \quad [\Omega] \quad (106)$$

10. Největší přípustné velikosti stejnosměrných odporů vinutí

Jak již bylo řečeno, lze považovat stejnosměrné odpory vinutí za hlavní činitele, kteří mají vliv na účinnost transformátoru. Je-li stanoven na středních kmitočtech určitý vložný útlum, který může výstupní transformátor mít, lze pro něj vypočítat z rovnice (34) nebo (35) příslušný největší stejnosměrný odpor vinutí, který je součtem odporů R_{ss1} a $R_{ss2} \cdot p^2$.

11. Převod transformátoru

Převod transformátoru určuje rovnice (7). Ve skutečnosti však musíme uvažovat i ztráty, které působí na účinnost výstupního transformátoru. Proto se upravuje vztah pro výpočet převodu (7) na tvar

$$p = \sqrt{\frac{R_n \cdot \eta}{R_2}} \quad (107)$$

kde η je účinnost transformátoru podle (33).

Má-li výstupní transformátor přizpůsobovat primární impedanci k několika sekundárním impedancím, je nutné počítat převod pro každé přizpůsobení samostatně.

12. Počet závitů sekundárního vinutí

Počet závitů sekundárního vinutí se určuje ze vztahu

$$N_2 = \frac{N_1}{p} \quad (108)$$

kde N_2 je počet závitů sekundárního vinutí,

N_1 počet závitů primárního vinutí,

p převod transformátoru podle (102).

Je-li sekundárních vinutí více, musí se určovat počty závitů pro každé vinutí samostatně.

13. Průměr vodiče sekundárního vinutí a jeho váha

Průměr vodiče sekundárního vinutí se počítá obdobně jako u primárního vinutí. Znovu se předpokládá, že sekundární vinutí zabírá polovinu prostoru v okénku pro vinutí, a tedy platí, že $S_1 = S_2$, kde S_1 je plocha pro vinutí podle (98) [cm^2].

Na 1 cm^2 plochy S_2 případne následující počet závitů n_2 sekundárního vinutí

$$n_2 = \frac{N_2}{S_2} \quad (109)$$

Z tab. 15 a 16 lze zjistit průměr vodiče, který vyhovuje výpočtu podle vztahu (109).

Váha mědi sekundárního vinutí se vypočítá obdobně jako u vinutí primárního, viz rovnici (100) v bodě 8.

14. Rozložení vinutí a kontrola proveditelnosti vinutí

Podle požadavků na velikost přenášeného horního mezního kmitočtu se vinutí rozděluje do sekcí, a to pro snížení rozptylových indukčností.

Dělení vinutí a rozložení na cívkovém tělisku se provádí různě. Na obr. 61 je nakresleno několik používaných způsobů.

Kontrola proveditelnosti vinutí:

Z tab. 27 lze zjistit pro určitou velikost jádra největší možnou délku vrstvy vinutí. Na tu délku lze navinout n_v závitů

$$n_v = n_{\text{cm}} \cdot a \cdot 10^{-1} \quad (110)$$

kde n_v je hledané množství závitů na vrstvu,

n_{cm} počet závitů pro určitý průměr vodiče na 1 cm délky vinutí, podle tab. 15,

a největší možná délka pro vinutí, podle tab. 27 [mm].

Pro zjištění počtu vrstev T slouží vztah

$$T = \frac{N}{n_v} \quad (111)$$

kde T je počet vrstev (zde se musí brát vždy nejbližší vyšší celé číslo),

N počet závitů kontrolovaného vinutí,

n_v počet závitů na 1 cm délky vinutí podle (110).

Výška vinutí se vypočítá podle vztahu

$$v = (T \cdot d \cdot k) + (T_p \cdot t) \quad (112)$$

kde v je výška vinutí [mm],

T počet vrstev podle (111),

d největší vnější průměr vodiče podle tab. 15 či 16 [mm],

k konstanta se záležet na plnění cívky při navíjení, která závisí na průměru vodiče:

u vodičů do průměru 0,4 $k = 1,05$,

u vodičů průměru 0,4 až 0,8 $k = 1,1$,

u vodičů průměru 0,8 až 1,15 $k = 1,15$,

u vodičů průměru 1,15 až větších $k = 1,2$,

T_p počet prokladů ve vinutí,

t tloušťka prokladů [mm].

Tab. 27. Maximální rozměry vinutí cívek

Pokračování tab. 27

Cívky na plechách EI

Typ plechu	Max. délka vinutí mm	Max. výška vinutí mm	Plocha pro vinutí cm ²
EI 10	10	3	0,3
EI 12	14	4	0,56
EI 16	20	5,5	1,1
EI 20	24	7,5	1,8
EI 25	30,5	9	2,74
EI 32	40,5	12,5	5,1
EI 40	50	16	8,0
EI 50	65,5	20,5	13,3
EI 64	85	26	21,2

Cívky na plechách tvaru M

Typ plechu	Max. délka vinutí mm	Max. výška vinutí mm	Plocha pro vinutí cm ²
M 5	12	2,5	0,3
M 7	16	3,5	0,56
M 12	23	6	1,38
M 17	29,5	7,5	2,21
M 20	34	9	3,08
M 23	39,5	10,75	4,25
M 29	45,5	9,75	4,44
M 34	57	12	6,84

Cívky na plechách tvaru E/B

Typ plechu	Max. délka vinutí mm	Max. výška vinutí mm	Plocha pro vinutí cm ²
E/B 2,5	4,4	1,9	0,0836
E/B 3	5,6	2,2	0,126
E/B 4	6,4	3,2	0,205
E/B 5	9,2	4,1	0,377
E/B 6	12,1	5,5	0,665
E/B 8	14,9	6,9	1,028
E/B 6*)	2×5,8	5,5	0,6375
E/B 8*)	2×7,15	6,9	0,9866

*) s přepážkou

Cívky na jádřech C

Typ jádra	Max. délka vinutí mm	Maximální výška vinutí mm		Plocha pro vinutí cm ²
		jádrové provedení	plášťové provedení	
08001	17	—	5	0,85
08002				
08003				
10001	22	3,5	7	1,54
10002				
10003				
10004				
12003	28	4,5	9	1,5
12004				
12005				
16003	38	6,5	13	4,9
16004				
16005				
20001	49	8	17	8,3
20002				
20003				
20004				
20005				
20006				
26001	63	11	22	14,0
26002				
26003				
26004				
26005				
26006				
31000	81	13,5	27	22,0
31003				
31004				
31005				
31006				

Pro výpočet výšky celého vinutí u navinuté cívky, tj. u cívky s několika vinutími platí

$$v_c = (v_1 + v_2 + \dots) + [(T_{p1} \cdot t_{p1}) + (T_{p2} \cdot t_{p2}) + \dots] + t_{op} \quad (113)$$

kde v_c je celková výška navinuté cívky [mm],

v_1, v_2 výšky jednotlivých vinutí podle (113) [mm],

T_{p1}, T_{p2} počet izolačních prokladů mezi jednotlivými vinutími,

t_{p1}, t_{p2} tloušťky prokladů mezi jednotlivými vinutími [mm],

t_{op} tloušťka ochranného prokladu [mm].

Celková výška navinuté cívky v_c nesmí být větší než dovolená výška pro vinutí podle tab. 27 pro příslušnou velikost transformátorového plechu.

15. Velikost vzduchové mezery

Velikost optimální vzduchové mezery l_v pro navržený výstupní transformátor se určuje podle obr. 24, na němž se pro vypočtenou H_0 , podle bodu 6, najde optimální velikost $1/\alpha$, kde

$$\alpha = \frac{l_z}{l_v}$$

Křivka I platí pro transformátorový plech TN 1,3–0,35 mm a křivka II pro Orthoperm.

Velikost l_v se určí podle vztahu

$$l_v = \frac{l_z}{\alpha} \cdot 10^{-1} \quad (114)$$

kde l_v je velikost vzduchové mezery [mm],

l_z střední délka magnetické silové čáry [cm],

α poměr l_z/l_v .

Vysvětlivky k tab. 22 až 25:

Sloupce v uvedených tabulkách jsou označeny arabskými čísly. Jejich význam je následující:

Sloupec 1. Typ transformátorového plechu (velikost) nebo typ jádra C.

2. Výška svazku plechů [mm].

3. Počet plechů, z nichž je složen svazek. Tloušťka plechů je uvažována 0,35 mm.

4. Efektivní průřez jádra [cm^2]. Je to čistá plocha železa, označovaná S.

5. Střední délka magnetické silové čáry [cm], tj. střední délka magnetické dráhy v železe, označovaná l_z .

6. Indukční konstanta $\left(\frac{A_L}{\mu}\right)$, z které lze snadno vypočítat indukčnost cívky (80), známe-li počet závitů a μ_{ef} materiálu.

7. Odporová konstanta A_R , která umožňuje rychlý informativní výpočet stejnosměrného odporu cívky při 100% plnění podle (104).

8. Střední délka závitu cívky při 100% plnění [cm]. Značí se l_s .

9. Užitečná plocha okna pro vinutí [cm^2]. Značí se S_0 .

VI. Výpočet a návrh výstupního transformátoru

V této kapitole uvádíme několik výpočtů a návrhů výstupních transformátorů.

18. Výpočet výstupního transformátoru se stejnosměrnou předmagnetizací na plechách EI

Zadání

1. Výstupní transformátor bude pracovat v jednočinném zapojení, v provozní třídě A.
2. Koncová elektronka typu ECL 82.
3. Zatěžovací anodový odpor $R_a = 5600 \Omega$.
4. Anodový stejnosměrný proud $I_a = 35 \text{ mA}$.
5. Přenášený výkon $P_1 = 3 \text{ W}$.
6. Vnitřní odpor elektronky $R_i = 20 \text{ k}\Omega$.
7. Sekundární zatěžovací impedance $R_s = 4 \Omega$.
8. Dolní mezní kmitočet $f_d = 100 \text{ Hz}$, při povoleném kmitočtovém zkreslení $b_2 = 3 \text{ dB}$.
9. Horní mezní kmitočet $f_h = 10 000 \text{ Hz}$, při povoleném lineárním zkreslení $b_3 = 3 \text{ dB}$.
10. Návrh provést na transformátorových plechách tvaru EI.
11. Na výstupním transformátoru bude brumové kompenzační vinutí, kterým bude protékat stejnosměrný proud $I = 30 \text{ mA}$.

Výpočet

Velikost střídavého efektivního napětí na primárním vinutí podle (86)

$$U_1 = \sqrt{P_1 \cdot R_a} = \sqrt{3 \cdot 5600} = 130 \text{ V}$$

Velikost jádra transformátoru podle (87)

$$S = 20 \sqrt{\frac{P_1}{f_d}} = 20 \sqrt{\frac{3}{100}} = 3,5 \text{ cm}^2$$

Protože má být transformátor proveden na plechách tvaru EI, vyhledá se v tab. 22 sloupec 4 nejbližší efektivní průřez jádra. V tomto případě to je velikost plechů EI 20 a výška svazku 20 mm. Průřez $S = 3,6 \text{ cm}^2$.

Nebo výpočtem podle (88)

$$S = b \cdot a \cdot k \cdot 10^{-2} = 20 \cdot 20 \cdot 0,9 \cdot 10^{-2} = 3,6 \text{ cm}^2$$

Počet plechů tloušťky 0,35 mm podle tab. 22, sloupec 3 je 55 kusů. Nebo výpočtem podle (89)

$$n = \frac{b \cdot k}{t} \cdot 10^{-2} = \frac{20 \cdot 0,9}{0,35} \cdot 10^{-2} = 52 \text{ kusů}$$

(Rozdíl v počtu plechů mezi výpočtem a tabulkou je zaviněn tím, že tabulka udává největší možný počet plechů o minimální tloušťce a při plném naplnění těleska, které je větší než 20 mm.)

Střední délka magnetické silové čáry podle tab. 22 sloupec 3 je pro plechy velikosti EI 20, $l_z = 11,1 \text{ cm}$, nebo výpočtem podle (90)

$$l_z = [2 \cdot (a + b) + 2r \cdot \pi] \cdot 10^{-1} = [2 \cdot (30 + 10) + 2 \cdot 3,14 \cdot 5] \cdot 10^{-1} = 11,15 \text{ cm}$$

Váha jádra podle (91)

$$Q_z = V_z \cdot \gamma_z = 32,4 \cdot 7,6 = 227 \text{ g}$$

$$V_z = 1,8 \cdot (a + b) \cdot c \cdot d - 1,8 \cdot b \cdot c \cdot e = 1,8 \cdot (2 + 1) \cdot 2 \cdot 4 - 1,8 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 = 32,4 \text{ cm}^3$$

Největší střídavá magnetická indukce jádra je zvolena $B_{stf} = 0,4 \text{ T}$, protože na výstupní transformátor nejsou kladeny zvláštní nároky na velikost nelineárního zkreslení.

Velikost primární indukčnosti, která je nutná pro přenos dolního mezního kmitočtu s povoleným poklesem v zesílení $b_2 = 3 \text{ dB}$, je dána vztahem (37).

$$L_1 = \frac{1}{\omega_d} \cdot \frac{R_1 \cdot R'_2}{R_1 + R'_2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100} = \frac{20000 \cdot 5600}{20000 + 5600} = 7 \text{ H}$$

Rozptylová indukčnost, kterou může výstupní transformátor mít, aby zesílení na horním mezním kmitočtu bylo $b_3 = 3 \text{ dB}$, je podle (51)

$$L_s = \frac{R_1 + R'_2}{\omega_h} = \frac{20000 + 5600}{2 \cdot 3,14 \cdot 10000} = 0,04 \text{ H}$$

Výpočet součinu $L_1 \cdot I_0^2$

$$L_1 \cdot I_0^2 = 7 \cdot 0,035^2 = 8,5 \cdot 10^{-3} \text{ HA}$$

Podle obr. 21 lze zjistit, že pro $L_1 \cdot I_0^2 = 8,5 \cdot 10^{-3}$ je $\mu_{ef} = 220$.

Počet závitů primárního vinutí podle (96)

$$N_1 = 8,92 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{L_1 \cdot l_z}{\mu_{ef} \cdot S}} = 8,92 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{7 \cdot 11,1}{220 \cdot 3,6}} = 2770 \text{ závitů}$$

Podle (98) lze vypočítat velikost H_0

$$H_0 = \frac{I_0 \cdot N_1}{l_z} = \frac{0,035 \cdot 2770}{11,1} = 8,73 \text{ Az/cm}$$

Z obr. 23 lze najít pro vypočítanou H_0 opravnou hodnotu μ_{ef} , která je $\mu_{ef} = 210$

Opravený počet závitů N_1 podle (96)

$$N_1 = 8,92 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{L_1 \cdot l_z}{\mu_{ef} \cdot S}} = 8,92 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{7 \cdot 11,1}{210 \cdot 3,6}} = 2860 \text{ závitů}$$

Kontrola velikosti střídavé magnetické indukce jádra podle (93)

$$B_{stf} = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f_d \cdot S \cdot N_1} = \frac{130 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 100 \cdot 3,6 \cdot 2860} = 0,2850 \text{ T}$$

což vyhovuje.

Kontrola stejnosměrné magnetické indukce jádra podle (94)

$$B_{ss} = \frac{1,256 \cdot N_1 \cdot I}{\left(l_v + \frac{l_z}{\mu} \right) \cdot 10^4} = \frac{1,256 \cdot 2860 \cdot 0,035}{\left(0,13 + \frac{11,1}{3000} \right) \cdot 10^4} = 0,735 \text{ T}$$

Kontrola celkové magnetické indukce jádra transformátoru $B_{ss} = B_{stf} + B_{ss} = 0,285 + 0,735 = 1,02 \text{ T}$, což v tomto případě vyhovuje, protože na navrhovaný transformátor nejsou kladeny zvláštní jakostní požadavky.

Velikost vzduchové mezery l_v , která je dosazována do (94), je počítána podle bodu 16, když pro $H_0 = 8,73 \text{ Az/cm}$ je podle obr. 24 křivky I

$$\frac{1}{\alpha} = 1,25 \cdot 10^{-2}$$

a podle (114)

$$l_v = l_z \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot 10^{-1} = 11,1 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} = 0,13 \text{ mm}$$

Skutečná velikost vzduchové mezery je podle (78)

$$l'_v = \frac{l_v}{2} = \frac{0,13}{2} = 0,065 \text{ mm}$$

Kontrola primární indukčnosti podle (80)

$$L_1 = \left(\frac{A_L}{\mu} \right) \cdot \mu_{ef} \cdot N_1^2 = 4,1 \cdot 210 \cdot 2860^2 \cdot 10^{-9} = 7,02 H$$

Průměr vodiče primárního vinutí

Plocha pro vinutí u transformátorových plechů velikosti EI 20 je podle tab. 22, sloupec 9.

$$S_0 = 1,8 \text{ cm}^2$$

Z tohoto plocha pro primární vinutí podle (98)

$$S_1 = \frac{S_0}{2} = \frac{1,8}{2} = 0,9 \text{ cm}^2$$

Na 1 cm² této plochy musí být navinuto podle (99)

$$n_1 = \frac{N_1}{S_1} = \frac{2860}{0,9} = 3180 \text{ závitů/cm}^2$$

Podle tab. 15 lze zjistit, že pro 3180 závitů/cm² přísluší průměr vodiče 0,140 mm, který při proudovém zatížení 38 mA má hustotu proudu 2,5 A/mm².

Váha vodiče primárního vinutí podle (100)

$$Q_{v1} = l_s \cdot N_1 \cdot q \cdot 10^{-4} = 11,3 \cdot 2860 \cdot 0,147 \cdot 10^{-4} = 47,2 \text{ g}$$

Stejnosměrný odpor primárního vinutí podle (101)

$$R_{ss1} = N_1 \cdot l_s \cdot r \cdot 10^{-5} = 2860 \cdot 11,3 \cdot 1139,7 \cdot 10^{-5} = 368 \Omega$$

Pro přesnější určení váhy vodiče a stejnosměrného odporu primárního vinutí musíme dosazovat za střední délku závitu l_s délku vypočtenou podle (102) nebo (103).

Převod transformátoru podle (7)

$$p = \sqrt{\frac{R_a}{R_s}} = \sqrt{\frac{5600}{4}} = 37,4$$

Počet závitů sekundárního vinutí podle (108)

$$N_2 = \frac{N_1}{p} = \frac{2860}{37,4} = 77$$

Průměr vodiče sekundárního vinutí se počítá obdobně jako u primárního vinutí. Plocha v okénku pro sekundární vinutí

$$S_2 = S_1 = 0,9 \text{ cm}^2$$

Na 1 cm² této plochy připadá podle (109)

$$n_2 = \frac{N_2}{S_2} = \frac{77}{0,9} = 86 \text{ závitů/cm}^2$$

Tomu odpovídá podle tab. 15 průměr vodiče 0,950 mm. Zvolen je však průměr vodiče 0,800 mm, a to jednak proto, že cívka má kompenzační vinutí a v okénku by mohl být nedostatek místa, a potom proto, že se okénko lépe plní vodičem menšího průměru.

Výpočet váhy mědi sekundárního vinutí podle (100)

$$Q_{v2} = l_s \cdot N_2 \cdot q \cdot 10^{-4} = 11,3 \cdot 77 \cdot 4,70 \cdot 10^{-4} = 40,7 \text{ g}$$

Stejnosměrný odpor vinutí podle (101)

$$R_{ss2} = N_2 \cdot l_s \cdot r \cdot 10^{-5} = 77 \cdot 11,3 \cdot 34,953 \cdot 10^{-5} = 0,3 \Omega$$

Převedením na primární stranu transformátoru

$$R'_{ss2} = R_{ss2} \cdot p^2 = 0,3 \cdot 37,4^2 = 420 \Omega$$

Celkový stejnosměrný odpor obou vinutí, převedený na primární stranu

$$R_{ss1} + R'_{ss2} = 368 + 420 = 788 \Omega$$

Účinnost transformátoru podle (33)

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_{ss1} + R'_{ss2}}{R_a}} = \frac{1}{1 + \frac{788}{5600}} = 0,885 = 88,5 \%$$

Počet závitů sekundárního vinutí, upravený vzhledem k účinnosti transformátoru

$$N_2 = \frac{N_1}{p \cdot \eta} = \frac{2860}{37,4 \cdot 0,885} = 90 \text{ závitů}$$

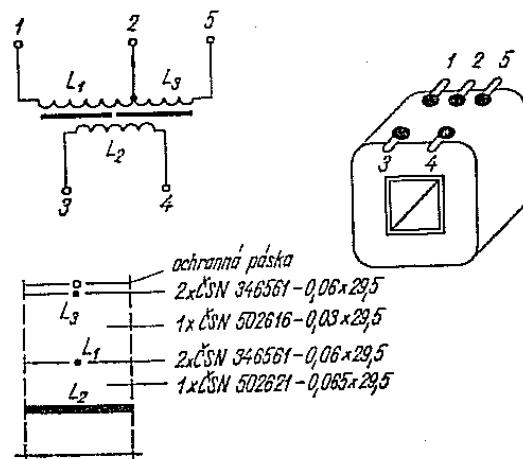
Výpočet brumového kompenzačního vinutí

Zvolená hodnota odporu $R_s = 1,5 \text{ k}\Omega$, potom úpravou podle rovnice (84) platí pro počet závitů kompenzačního vinutí

$$N_K = \frac{R_s \cdot N_1}{R_i} = \frac{1500 \cdot 2860}{20000} = 213 \text{ závitů}$$

Protože stejnosměrný proud, který bude procházet kompenzačním vinutím, je $I = 30 \text{ mA}$, stačil by podle tab. 15, při povolené hustotě proudu $2,5 \text{ A/mm}^2$, průměr vodiče 0,125 mm.

Aby však bylo navíjení cívky zjednodušeno a se zřetelem na rezervu, která byla brána při volbě průměru sekundárního vinutí, se volí průměr kompenzačního vinutí stejný jako u primárního vinutí, tedy 0,140 mm.



Obr. 75. Návrh cívky transformátoru podle výpočtu v kap. 18

Návrh uspořádání vinutí je na obr. 75.

Kontrola proveditelnosti vinutí, při uspořádání vinutí a prokladů podle obr. 75:

Délka (šířka) pro navíjení vinutí na tělisku transformátorového plechu EI 20, je podle tab. 27 $a = 24$ mm.

U primárního vinutí, které má průměr vodiče 0,140 mm, připadá na 1 cm délky 55 závitů. Na jednu vrstvu lze navinout podle (110)

$$n_{v1} = n_{cm} \cdot a \cdot 10^{-1} = 55 \cdot 24 \cdot 10^{-1} = 132 \text{ závitů/l vrstvu}$$

Celé vinutí $N_1 + N_K$ o počtu $2860 + 213 = 3073$ závitů, lze navinout do T_1 vrstev podle (111)

$$T_1 = \frac{N'_1}{n_{v1}} = \frac{3073}{132} = 24 \text{ vrstev}$$

Proklad bude za každou druhou vrstvou vinutí, tzn., že bude použito 11 prokladů ČSN 50 2616, tloušťky 0,03 mm.

Výška primárního vinutí podle (112)

$$v_1 = (T_1 \cdot d \cdot k) + (T_p \cdot t) = (24 \cdot 0,169 \cdot 1,1) + (11 \cdot 0,03) = 4,79 \text{ mm}$$

U sekundárního vinutí s průměrem vodiče 0,800 mm připadá na 1 cm délky 10 závitů a podle (110)

$$n_{v2} = n_{cm} \cdot a \cdot 10^{-1} = 10 \cdot 24 \cdot 10^{-1} = 24 \text{ závitů/l vrstvu}$$

Počet vrstev (111)

$$T_2 = \frac{N_2}{n_{v2}} = \frac{90}{24} = 4 \text{ vrstvy}$$

Za každou vrstvou bude proklad (1 × ČSN 50 2621, tloušťky 0,065 mm), tj. celkem tři proklady.

Výška sekundárního vinutí podle (112)

$$v_2 = (T_2 \cdot d \cdot k) + (T_p \cdot t) = (4 \cdot 0,875 \cdot 1,05) + (3 \cdot 0,065) = 3,895 \text{ mm}$$

Isolační proklady mezi jednotlivými vinutími jsou podle obr. 75:

4 × ČSN 34 6561, tloušťky 0,1 = 0,4 mm a

1 × ochranná páska NZT 016, tloušťky 0,25 mm.

Celková výška cívky je podle (113)

$$v_c = (v_1 + v_2) + (T_{p1} \cdot t_{p1}) + t_{op} = (4,79 + 3,895) + (4 \cdot 0,1) + 0,25 = \\ = 9,335 \text{ mm}$$

Podle tab. 27 je přípustná výška vinutí 8,5 mm, takže cívka není proveditelná. Proto musíme udělat nový výpočet transformátoru. Protože je nutné zachovat šířku přenášeného kmitočtového pásma, jsou tři možnosti úpravy transformátoru:

1. ponechat původní jádro i počet závitů a zmenšit pouze průměry vodičů. Touto úpravou se zhorší účinnost transformátoru;

2. zvětšit jádro transformátoru a tím současně zmenšit počet závitů. Touto úpravou vzroste rozměr, váha a cena transformátoru;

3. změnit materiál jádra na Ortoperm, tím lze zmenšit počet závitů. Touto úpravou vzroste cena transformátoru. Protože zadaný výstupní transformátor není určen pro jakostní zesilovač (viz zadání), lze zvolit úpravu podle bodu 1, tj. ponechat jádro a zhoršit účinnost transformátoru zmenšením průměrů vodičů.

Opravný výpočet

Průměr vodiče primárního vinutí:

Místo původního průměru vodiče 0,140 mm je zvolen odhadem průměr 0,125 mm, který má při proudu 36 mA hustotu 3 A/mm², což lze připustit.

Stejnosměrný odpor primárního vinutí (101)

$$R_{ss1} = l_s \cdot N_1 \cdot r \cdot 10^{-5} = 11,3 \cdot 2860 \cdot 1429,6 \cdot 10^{-5} = 460 \Omega$$

Průměr sekundárního vinutí je zvolen 0,710 mm.

Stejnosměrný odpor sekundárního vinutí (101)

$$R_{ss2} = N_2 \cdot l_s \cdot r \cdot 10^{-6} = 90 \cdot 11,3 \cdot 44,311 \cdot 10^{-6} = 0,450 \Omega$$

$$R'_{ss2} = R_{ss2} \cdot p^2 = 0,450 \cdot 31,8^2 = 455 \Omega$$

$$R_{ss1} + R'_{ss2} = 460 + 455 = 915 \Omega$$

Účinnost transformátoru (33)

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{R_{ss1} + R'_{ss2}}{R_a}} = \frac{1}{1 + \frac{915}{5600}} = 0,85 = 85\%$$

Kontrola proveditelnosti (110)

Primární vinutí

$$n_{v1} = n_{cm} \cdot a \cdot 10^{-1} = 61 \cdot 24 \cdot 10^{-1} = 146 \text{ závitů/1 vrstvu}$$

Celé vinutí $N_1 + N_K = 2860 + 213 = 3070$ závitů

$$T_1 = \frac{N'_1}{N_{v1}} = \frac{3073}{146} = 21 \text{ vrstev}$$

Při prokládání po dvou vrstvách = 10 prokladů tloušťky 0,03 mm

$$v_1 = (T_1 \cdot d \cdot k) + (T_p \cdot t) = (21 \cdot 0,154 \cdot 1,1) + (10 \cdot 0,03) = 3,85 \text{ mm}$$

Sekundární vinutí

$$n_{v2} = n_{cm} \cdot a \cdot 10^{-1} = 12 \cdot 24 \cdot 10^{-1} = 29 \text{ závitů/1 vrstvu} \quad (110)$$

$$T_2 = \frac{N_2}{n_{v2}} = \frac{90}{29} = 4 \text{ vrstvy} \quad (111)$$

Každá vrstva je prokládaná $1 \times 0,065$ mm, tj. celkem 3 proklady.

$$v_2 = (T_2 \cdot d \cdot k) + (T_p \cdot t) = (4 \cdot 0,775 \cdot 1,05 + (3 \cdot 0,065) = 3,445 \text{ mm} \quad (112)$$

Proklady mezi vinutími zůstávají jako původní:

$$4 \times 0,06 = 0,24 \text{ mm}$$

ochranná páška $1 \times 0,25$ mm

Celková výška cívky (54)

$$v_c = (v_1 + v_2) + (T_p \cdot t_p) + t_{op} = (3,85 + 3,445) + (4 \cdot 0,1) + 0,25 = 7,945 \text{ mm}$$

Cívka je tedy proveditelná.

Velikost rozptylové indukčnosti L_s lze pro navrženou cívku vypočítat podle tab. 26, když $n = 1$, tedy

$$L_s = 4 \pi \cdot N_1^2 \cdot \frac{l_s}{b} \cdot \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \cdot 10^{-9} = \\ = 4 \cdot 3,14 \cdot 2860^2 \cdot \frac{11,1}{2,4} \cdot \left(0,04 + \frac{0,381 + 0,344}{2} \right) \cdot 10^{-9} = 0,016 \text{ H}$$

což vyhovuje.

Výpočet váhy mědi (108)

$$Q_{v1} = l_s \cdot N_1 \cdot q \cdot 10^{-4} = 11,3 \cdot 3073 \cdot 0,118 \cdot 10^{-4} = 41 \text{ g}$$

$$Q_{v2} = l_s \cdot N_2 \cdot q \cdot 10^{-4} = 11,3 \cdot 90 \cdot 3,63 \cdot 10^{-4} = 37 \text{ g}$$

Celková váha mědi

$$Q_c = Q_{v1} + Q_{v2} = 41 + 37 = 78,0 \text{ g}$$

Návrh skutečného vinutí je na obr. 75, k tomuto obrázku přísluší tab. 28. Celý transformátor lze sestavit podle obr. 59.

Tab. 28. Navijecí list pro výstupní transformátor podle výpočtu v kap. 18

(Vinutí podle obr. 75)

Impedance mezi vývody

Tělíska: Velikost EI 20 × 20 mm lisované podle tab. 11

$1-2$ $3-4$ $2-5$	5600Ω 4Ω kompenzační vinutí
-------------------------	---

Navijecí předpis

Vinutí	Počet závitů	Průměr vodiče mm	Druh vodiče	Šířka vinutí mm	Počet vrstev
L_1	2860	0,125	PL	24	21
L_3	213	0,125	PL	24	4
L_2	90	0,710	PL	24	

Ochranná páška provedena podle obr. 81.

Vývody vyvést izolovaně izolační trubičkou lakovanou (ČSN 34 6550) a připájet do nýtku příslušných pájecích ok. Vinutí L_1 a L_3 vinout v celku s odbočkou — vývod 2.

19. Výpočet výstupního transformátoru pro dvojčinné zapojení třídy AB na jádře C

Zadání

1. Dvojčinné zapojení (třída AB).
2. Elektronky $2 \times \text{EL 84}$.
3. Anodový zatěžovací odpor $R_{aa} = 8000 \Omega$.
4. Přenášený střídavý výkon $P_1 = 10 \text{ W}$.
5. Vnitřní odpor elektronek $R_i = 30 \text{ k}\Omega$.
6. Zatěžovací odpor sekundárního vinutí $R_2 = 15 \Omega$.
7. Dolní mezní kmitočet $f_d = 50 \text{ Hz}$.
8. Horní mezní kmitočet $f_h = 12 \text{ kHz}$.
9. Lineární zkreslení $b_2 = b_3 = 3 \text{ dB}$.
10. Návrh provést na jádře C.

Výpočet

Velikost střídavého efektivního napětí na primárním vinutí podle (86)

$$U_1 = \sqrt{P_1 R_{aa}} = \sqrt{10 \cdot 8000} = 283 \text{ V}$$

Velikost jádra

Odhadem je zvolen typ jádra 16 005 v jádrovém provedení, tj. podle tab. 25, sloupec 4, s efektivním průřezem jádra $S = 3,2 \text{ cm}^2$.

Největší přípustná střídavá magnetická indukce jádra

Zvoleno $B_{stf} = 0,5 \text{ T}$

Počet závitů primárního vinutí

Pro předběžný návrh lze použít upravené rovnice (93)

$$N_1 = \frac{U_1 10^4}{4,44 f_d S B_{stf}} = \frac{283 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 3,2 \cdot 0,5} = 7950 \text{ závitů}$$

Potřebná velikost primární indukčnosti byla určena podle (37)

$$L_1 = \frac{1}{\omega_d} \frac{2R_i R_{aa}}{2R_i + R_{aa}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \frac{2 \cdot 30000 \cdot 8000}{2 \cdot 30000 + 8000} = 22,5 \text{ H}$$

Přípustná velikost rozptylové indukčnosti byla určena podle (51)

$$L_s = \frac{2R_i - R_{aa}}{\omega_h} = \frac{2 \cdot 30000 - 8000}{2 \cdot 3,14 \cdot 12000} = 0,9 \text{ H}$$

Primární indukčnost se kontroluje podle (80)

$$L_1 = \left(\frac{A_L}{\mu} \right) N_1^2 \mu_{ef} = 0,21 \cdot 7950^2 \cdot 5000 \cdot 10^{-8} = 66 \text{ H}$$

Indukční konstanta $\left(\frac{A_L}{\mu} \right)$ dosazena z tab. 25, sloupec 6.

Efektivní permeabilita μ_{ef} při dvojčinném zapojení je nahrazena hodnotou μ_d podle obr. 51, kde pro $B_{stf} = 0,5 \text{ T}$ je $\mu_d = 5000$.

Vypočítaná hodnota $L_1 = 66 \text{ H}$ je zbytěně velká. I když bude nedokonalelosti stýčných ploch jádra C primární indukčnost menší, lze zmenšit počet závitů primárního vinutí na $N_1 = 6000$ závitů.

Kontrola střídavé magnetické indukce s upraveným počtem závitů
Podle upraveného počtu závitů N_1 je podle (93)

$$B_{stf} = \frac{U_1 10^4}{4,44 f_d S N_1} = \frac{283 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 3,2 \cdot 6000} = 0,67 \text{ T}$$

což je u Ortopermu přípustné.

Podle obr. 51 je při $B_{stf} = 0,67 \text{ T}$ dynamická permeabilita $\mu_d = 4250$.
Primární indukčnost s upravenými závity N_1 se kontroluje podle (80)

$$L_1 = \left(\frac{A_L}{\mu} \right) N_1^2 \mu_{ef} = 0,21 \cdot 6000^2 \cdot 4250 \cdot 10^{-8} = 32 \text{ H}$$

Převod transformátoru podle (7)

$$p = \sqrt{\frac{R_{aa}}{R_2}} = \sqrt{\frac{8000}{15}} = 23,1$$

Počet závitů sekundárního vinutí podle (96)

$$N_2 = \frac{N_1}{p} = \frac{6000}{23,1} = 260 \text{ závitů}$$

Průměr vodiče primárního vinutí a jeho stejnosměrný činný odpor:

Plocha pro vinutí podle tab. 25 je $S_0 = 4,9 \text{ cm}^2$, úpravou (98) pro primární vinutí je

$$S_1 = \frac{S_0}{2} = \frac{4,9}{2} = 2,45 \text{ cm}^2$$

Na 1 cm^2 plochy S_1 připadá podle (99)

$$n_1 = \frac{N_1}{S_1} = \frac{6000}{2,45} = 2450 \text{ závitů/cm}^2$$

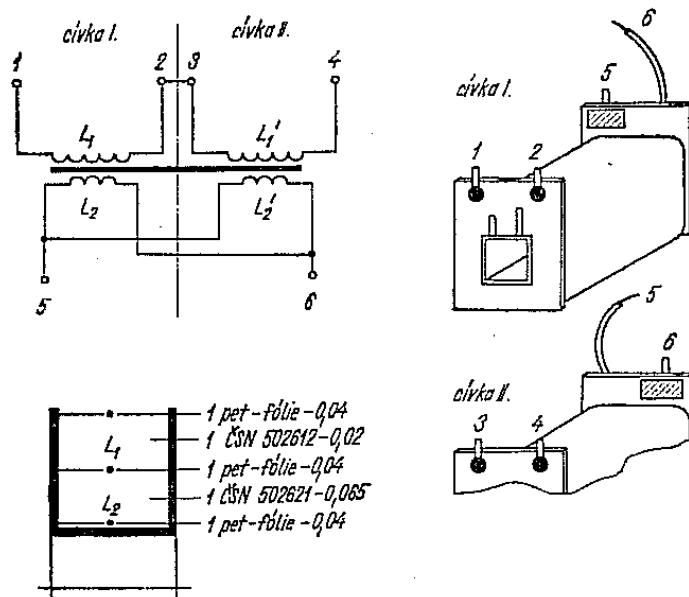
V tab. 15 lze zjistit použitelný vodič o průměru 0,150 mm, do kterého se vejde 2800 závitů/1 cm^2 .

Stejnosměrný odpor vinutí podle (101)

$$R_{ss1} = N_1 l_s r \cdot 10^{-6} = 6000 \cdot 11 \cdot 992,7 \cdot 10^{-6} = 655 \Omega$$

Průměr vodiče sekundárního vinutí

Protože sekundární vinutí bude rozděleno do dvou částí, které budou zapojeny paralelně (obr. 76), počítáme pro jedno sekundární vinutí s poloviční plochou S_2^* .



Obr. 76. Návrh cívky transformátoru podle výpočtu v kap. 19

Plocha pro celé sekundární vinutí $S_2 = S_1 = 2,45 \text{ cm}^2$, plocha pro jedno sekundární vinutí bude

$$S_2^* = \frac{2,45}{2} = 1,225 \text{ cm}^2$$

Na 1 cm² plochy S_2^* připadá podle (99)

$$n_2 = \frac{N_2}{S_2^*} = \frac{260}{1,225} = 212 \text{ závitů/cm}^2$$

Podle tab. 15 je zvolen průměr vodiče 0,530 mm.

Stejnosměrný odpor jednoho sekundárního vinutí podle (101)

$$R_{ss2}^* = N_2 l_s r \cdot 10^{-5} = 260 \cdot 11 \cdot 79,519 \cdot 10^{-5} = 2,48 \Omega$$

Stejnosměrný odpor obou sekundárních vinutí, zapojených paralelně

$$R_{ss2} = \frac{R_{ss2}^*}{2} = 1,24 \Omega$$

Celkový stejnosměrný odpor všech vinutí výstupního transformátoru, pře-počítaný na primární stranu

$$R_{ss1} + R_{ss2} \cdot p^2 = 655 + 1,24 \cdot 23,1^2 = 1245 \Omega$$

Účinnost transformátoru podle (33)

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_{ss1} + R'_{ss2}}{R_{na}}} = \frac{1}{1 + \frac{1245}{8000}} = 0,87 = 87\%$$

Počet závitů sekundárního vinutí musíme upravit se zřetelem na účinnost transformátoru

$$N_2 = \frac{N_1}{p\eta} = \frac{6000}{23,1 \cdot 0,87} = 299 \text{ závitů}$$

Kontrola proveditelnosti vinutí

Podle tab. 27 je šířka vinutí u jádra 16 005 $a = 38 \text{ mm}$.

Primární vinutí je rozděleno do dvou částí, obr. 76,

$$N'_1 = \frac{N_1}{2} = \frac{6000}{2} = 3000 \text{ závitů}$$

Počet závitů na vrstvu podle (110)

$$n_{v1} = n_{em} a \cdot 10^{-1} = 52 \cdot 38 \cdot 10^{-1} = 198 \text{ závitů/1 vrstvu}$$

(n_{em} je z tab. 15).

Počet vrstev podle (111)

$$T_1 = \frac{N'_1}{n_{v1}} = \frac{3000}{198} = 16 \text{ vrstev}$$

Primární vinutí bude prokládáno po 2 vrstvách kondenzátorovým papírem ČSN 50 2612, tloušťky 0,02 mm, tedy celkem 7 prokladů.

Výška primárního vinutí podle (112)

$$v_1 = (T_1 dk) + (T_{p1} t) = (16 \cdot 0,179 \cdot 1,05) + (7 \cdot 0,02) = 3,0 \text{ mm}$$

Sekundární vinutí

Také toto vinutí je rozděleno do dvou částí, každá část má však plný počet závitů N_2 .

Počet závitů na vrstvu podle (110)

$$n_{v2} = n_{em} a \cdot 10^{-1} = 16 \cdot 38 \cdot 10^{-1} = 61 \text{ závitů/1 vrstvu}$$

Počet vrstev podle (111)

$$T_2 = \frac{N_2}{n_{v2}} = \frac{299}{61} = 5 \text{ vrstev}$$

Proklady mezi každou vrstvou budou z kabelového papíru SI, tloušťky 0,065 mm, tedy celkem 4 proklady.

Výška vinutí podle (112)

$$v_2 = (T_2 dk) + (T_{pe} t) = (5 \cdot 0,59 \cdot 1,05) + (4 \cdot 0,065) = 3,36 \text{ mm}$$

Izolační proklady mezi vinutími jsou podle obr. 76.

Celková výška navinuté cívky je podle (113)

$$v_c = (v_1 + v_2) + (T_{pi} t_{pi}) + t_{op} = (3,0 + 3,36) + (2 \cdot 0,04) + 0,04 = 6,48 \text{ mm}$$

Vinutí je tedy proveditelné.

Velikost rozptylové indukčnosti se v tomto případě kontroluje pouze pro jednu cívku, a protože jsou obě cívky stejné, lze získat výslednou hodnotu rozptylové indukčnosti pro celý transformátor vynásobením hodnoty pro jednu cívku. Podle tab. 26 při $n = 1$ je

$$L_s' = 4\pi N_1' \cdot \frac{l_s}{b} \left(t + \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \cdot 10^{-9} = \\ 4 \cdot 3,14 \cdot 3000^2 \frac{11}{3,8} \left(0,004 + \frac{0,3 + 0,336}{2} \right) 10^{-9} = 0,001 \text{ H}$$

Celková hodnota rozptylové indukčnosti transformátoru je $L_s = 2 \cdot L_s' = 2 \cdot 0,001 = 0,002 \text{ H}$, což vyhovuje. (Je vidět, že u transformátorů na jádrech C vychází rozptylová indukčnost malá.)

Váha vinutí a jádra transformátoru

Váha vinutí transformátoru (100)

Primární vinutí

$$Q_{v1} = l_s N_1 q \cdot 10^{-4} = 11 \cdot 6000 \cdot 0,169 \cdot 10^{-4} = 112 \text{ g}$$

Sekundární vinutí

$$Q_{v2} = l_s N_2 q \cdot 10^{-4} = 11 \cdot 299 \cdot 2,06 \cdot 10^{-4} = 67,7 \text{ g}$$

Celková váha mědi

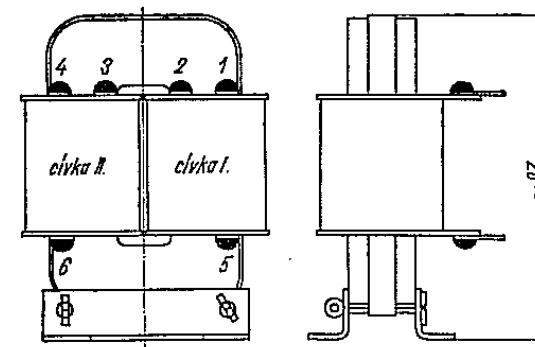
$$Q_c = Q_{v1} + Q_{v2} = 112 + 67,7 = 179,7 \text{ g}$$

Váha jádra podle tab. 9

$$Q_z = 0,55 \text{ kg}$$

K obr. 76 přísluší tab. 29, na které je uveden navíjecí předpis pro vinutí.

Celkové provedení výstupního transformátoru je na obr. 77. Stažení jádra, připevnění transformátoru k držákům obstarává tenký ocelový pásek, který je vypínán otáčením závlaček, jež jsou uchyceny v držácích. Proti uvolnění



Obr. 77. Sestava transformátoru podle výpočtu v kap. 19

lze závlačky zajistit vhodným zásekem a potom impregnací elektroizolačním lakem. Držáky jsou voleny podle tab. 19.

Volné vývody z cívek musíme podle označení správně připojit k příslušným pájecím okùm sousední cívky. Body 2 a 3 jsou propojeny.

Tab. 29. Navíjecí list pro výstupní transformátor podle výpočtu v kap. 19

(Vinutí provedeno podle obr. 76)

Impedance mezi vývody

Tělesko: skládané podle tab. 14
pro jádro C velikosti 16005.

1-2	4000 Ω
3-4	4000 Ω
5-6	15 Ω

Navíjecí předpis

Vinutí	Počet závitů	Průměr vodiče mm	Druh izolace	Šířka vinutí mm	Počet vrstev
$L_1 = L'_1$	3000	0,150	PL	38	16
$L_2 = L'_2$	299	0,530	PL	38	5

20. Výpočet výstupního transformátoru pro ultralineární zapojení na plechách tvaru M

Zadání

1. Výstupní transformátor pro ultralineární zapojení.
2. Koncové elektronky $2 \times \text{EL } 84$.
3. Zatěžovací anodový odpor $R_{\text{aa}} = 8000 \Omega$.
4. Přenášený výkon $P_1 = 10 \text{ W}$.
5. Vnitřní odpor elektronky $R_i = 30 \text{ k}\Omega$.
6. Stejnosměrný anodový proud $I_a = 43 \text{ mA}$.
7. Sekundární impedance přizpůsobena pro 100 V rozvod.
8. Dolní mezní kmitočet $f_d = 30 \text{ Hz}$; $b_d = 0,17 \text{ Np}$.
9. Horní mezní kmitočet $f_h = 15 \text{ kHz}$; $b_h = 0,17 \text{ Np}$.
10. Návrh provést na plechách tvaru M.

Transformátor bude upevněn ke kostře zesilovače „naležato“, takže nepotřebuje zvláštní držáky.

Výpočet

Velikost střídavého efektivního napětí na primárním vinutí podle (86).

$$U_1 = \sqrt{P_1 R_{\text{aa}}} = \sqrt{10 \cdot 8000} = 283 \text{ V}$$

Velikost jádra podle (6)

$$S = 20 \sqrt{\frac{P_1}{f_d}} = 20 \sqrt{\frac{10}{20}} = 14 \text{ cm}^2$$

Počet plechů podle tab. 23, sloupec 3, $n = 144$ plechů.

Střední délka magnetické silové čáry podle tab. 23, sloupec 5, $l_z = 23,8 \text{ cm}$.

Přípustná velikost střídavé magnetické indukce jádra $B_{\text{stř}} = 0,7 \text{ T}$

Velikost primární indukčnosti podle (40)

$$L_1 = \frac{1}{\omega_d \sqrt{e^{2d-1}}} \cdot \frac{2R_1 \cdot R_{\text{aa}}}{2R_1 + R_{\text{aa}}} = \\ = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 20 \sqrt{e^{2 \cdot 0,17-1}}} \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 10^3}{(2 \cdot 3 \cdot 10^4) + (8 \cdot 10^3)} = 88 \text{ H}$$

Počet závitů primárního vinutí podle (93)

$$N_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f_d \cdot S B_{\text{stř}}} = \frac{283 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 20 \cdot 16,05 \cdot 0,7} = 2800 \text{ závitů}$$

Průměr vodiče primárního vinutí

Plocha pro vinutí podle tab. 23, sloupec 9, je $S_0 = 6,84 \text{ cm}^2$. Na primární vinutí připadá polovina. Podle (98)

$$S_1 = \frac{S_0}{2} = \frac{6,84}{2} = 3,42 \text{ cm}^2$$

Na 1 cm² této plochy připadá (99)

$$n_1 = \frac{N_1}{S_1} = \frac{2800}{3,42} = 820 \text{ závitů/1 cm}^2$$

Podle tab. 15 je zvolen vodič o průměru 0,224 mm.

Stejnosměrný odpor primárního vinutí podle (101)

$$R_{\text{ss1}} = N_1 \cdot l_s r \cdot 10^{-5} = 2800 \cdot 23,3 \cdot 445,15 \cdot 10^{-5} = 300 \Omega$$

Impedance 100V linky, kterou bude výstupní transformátor přizpůsobová k elektronkám, lze zjistit z obr. 31. $R_2 = 1000 \Omega$.

Převod transformátoru podle (7)

$$p = \sqrt{\frac{R_{\text{aa}}}{R_2}} = \sqrt{\frac{8000}{1000}} = 2,83$$

Počet závitů sekundárního vinutí

$$N_2 = \frac{N_1}{p} = \frac{2800}{2,83} = 999 \text{ závitů}$$

Průměr vodiče sekundárního vinutí

Plocha pro sekundární vinutí $S_2 = S_1 = 3,42 \text{ cm}^2$.

Na 1 cm² této plochy připadá (99)

$$n_2 = \frac{N_2}{S_2} = \frac{999}{3,42} = 290 \text{ závitů/1 cm}^2$$

Je zvolen průměr vodiče (z tab. 15) 0,450 mm.

Stejnosměrný odpor sekundárního vinutí (101)

$$R_{\text{ss2}} = N_2 \cdot l_s r \cdot 10^{-5} = 999 \cdot 23,3 \cdot 110,31 \cdot 10^{-5} = 25,4 \Omega$$

$$R'_{\text{ss2}} = R_{\text{ss2}} p^2 = 25,4 \cdot 2,83^2 + 204 \Omega$$

Součet stejnosměrných odporů přenesených do primárního vinutí

$$R_{\text{ss1}} + R'_{\text{ss2}} = 300 + 204 = 504 \Omega$$

Účinnost transformátoru

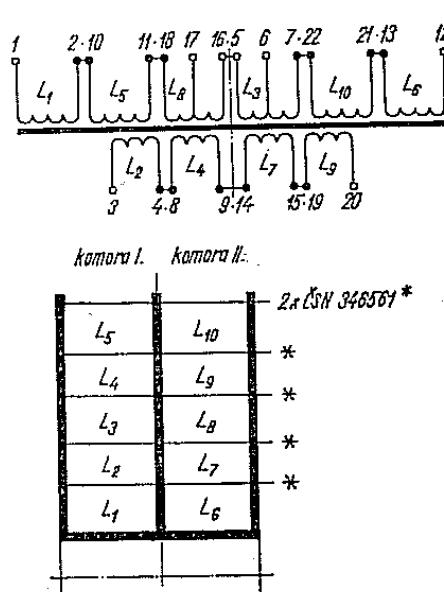
$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_{ss1} + R'_{ss2}}{R_{an}}} = \frac{1}{1 + \frac{504}{8000}} = 0,94 = 94\%$$

Vzhledem k účinnosti transformátoru je upraven počet závitů sekundárního vinutí

$$N_2 = \frac{N_1}{p\eta} = \frac{2800}{2,83 \cdot 0,94} = 1040 \text{ závitů}$$

Výpočet největší povolené velikosti rozptylové indukčnosti podle (48)

$$L_s = \frac{R_{an} + 2R_1}{\omega_h} \cdot \sqrt{e^{2b} - 1} = \frac{8000 + 2 \cdot 30000}{2 \cdot 3,14 \cdot 15000} \sqrt{e^{3 \cdot 0,17} - 1} = 0,3 \text{ H}$$



Obr. 78. Návrh cívky transformátoru podle výpočtu v kap. 20

Počet vrstev pro polovinu vinutí N_1 je podle (111)

$$T_1 = \frac{N_1}{2n_{v1}} = \frac{2800}{2 \cdot 94} = 15 \text{ vrstev}$$

Bude prokládána každá třetí vrstva, tedy celkem budou čtyři proklady, tloušťky 0,065 mm.

Výška vinutí je podle (112)

$$v_1 = (T_1 \cdot d \cdot k) + (T_p \cdot t) = (15 \cdot 0,259 \cdot 1,1) + (4 \cdot 0,065) = 5,2 \text{ mm}$$

Sekundární vinutí

Na jednu vrstvu přijde podle (110)

$$n_{v2} = n_{cm} \cdot a \cdot 10^{-1} = 19 \cdot 26 \cdot 10^{-1} = 49 \text{ závitů/1 vrstvu}$$

Počet vrstev pro polovinu vinutí N_2 je podle (111)

$$T_2 = \frac{N_2}{2n_{v2}} = \frac{92}{2 \cdot 49} = 10 \text{ vrstev}$$

Bude prokládána každá vrstva, tedy celkem bude devět prokladů tloušťky 0,065 mm.

Výška vinutí je podle (112)

$$v_2 = (T_2 \cdot dk) + (T_p \cdot t) = (10 \cdot 0,502 \cdot 1,05) + (9 \cdot 0,065) = 5,6 \text{ mm}$$

Proklady mezi jednotlivými vinutími, podle obr. 78: 10 prokladů tloušťky 0,1 mm.

Celková výška cívky (113)

$$v_c = (v_1 + v_2) + (T_p \cdot t) = (5,2 + 5,6) + (10 \cdot 0,1) = 11,8 \text{ mm}$$

Cívka je proveditelná (lze vinout do 12 mm).

Kontrola rozptylové indukčnosti úpravou rovnice (95)

$$L_s = \frac{\pi \cdot N_1^2 \cdot l_s \cdot \left(4n_1 + \frac{v_c}{5} \right)}{a} = \frac{3,14 \cdot 1400^2 \cdot 23,3 \left(4 \cdot 0,002 + \frac{11,8}{5} \right)}{26} = 0,13 \text{ H}$$

Vypočtená hodnota je pro jednu komoru. Pro dvě komory, zapojené do série, je výsledná hodnota rozptylové indukčnosti dvojnásobná

$$2L_s = 2 \cdot 0,13 = 0,26 \text{ H}$$

což vyhovuje.

Váha mědi a železa se vypočítá známým způsobem (nebude se zde uvádět).

Odbočky pro připojení stínících mřížek koncových elektronek jsou ve 20 % závitů od středu primárního vinutí na obě strany, tedy vždy na 280. závitu.

V tab. 30a je uveden navíjecí předpis, platný pro transformátor podle obr. 78.

Tab. 30a. Navíjecí list pro výstupní transformátor podle výpočtu v kap. 20

(Vinutí provedeno podle obr. 78)

Impedance mezi vývody

1-16	4000 Ω
5-12	4000 Ω
4-14	1000 Ω

Navíjecí předpis

Vinutí	Počet závitů	Mezi vývody komory I	Mezi vývody komory II	Průměr vodiče mm	Izolace	Šířka vinutí mm	Počet vrstev
$L_1 = L_6$	560	1-2	12-13	0,224	PL	26	5
$L_2 = L_7$	260	3-4	14-15	0,450	PL	26	5
$L_3 = L_8$	280	5-6	16-17	0,224	PL	26	5
$L_4 = L_9$	280	6-7	17-18	0,224	PL	26	5
	260	8-9	19-20	0,450	PL	26	5

21. Výpočet výstupního transformátoru pro dvojčinné zapojení třídy B (s tranzistory) na E/B plechách

Zadání

- Dvojčinné zapojení v třídě B.
- Tranzistory 2×OC 72.
- Kolektorový zatěžovací odpor $R_a = 144 \Omega$ (I_{KA})
- Maximální přenášený výkon $P_1 = 200 \text{ mW}$.
- Sekundární zatěžovací odpor $R_2 = 4 \Omega$.
- Dolní mezní kmitočet $f_d = 200 \text{ Hz}$ ($b_2 = 3 \text{ dB}$).
- Návrh provést na E/B plechách, s vývody přizpůsobenými pro plošné spoje.

Výpočet

Velikost střidavého efektivního napětí na primárním vinutí (86)

$$U_1 = \sqrt{P_1 R_a} = \sqrt{0,2 \cdot 144} = 5,4 \text{ V}$$

Velikost jádra výstupního transformátoru (87)

$$S = 20 \sqrt{\frac{P_1}{f_d}} = 20 \sqrt{\frac{0,2}{200}} = 0,6 \text{ cm}^2$$

Podle tab. 24, sloupec 3 je zvoleno jádro velikosti E/B 8×8 , s efektivním průřezem $0,576 \text{ cm}^2$.

Počet plechů podle tab. 24, sloupec 3, $n = 15$ kusů.

Jakost plechů TN 1,3—0,35 mm.

Největší velikost střidavé magnetické indukce jádra je zvolena $B_{stř} = 0,6 \text{ T}$.

Primární indukčnost výstupního transformátoru podle zjednodušené rovnice (37) je

$$L_1 = \frac{R_a}{\omega_d} = \frac{144}{2 \cdot 3,14 \cdot 200} = 0,15 \text{ H}$$

Počet závitů primárního vinutí se vypočítá úpravou rovnice (93)

$$N_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f_d \cdot S \cdot B_{stř}} = \frac{5,4 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 200 \cdot 0,324 \cdot 6000} = 310 \text{ závitů}$$

Kontrola primární indukčnosti (80)

$$L_1 = \left(\frac{A_L}{\mu} \right) \cdot \mu_{ef} \cdot N_1^2 = 0,81 \cdot 4500 \cdot 310^2 \cdot 10^{-9} = 0,35 \text{ H}$$

Počet závitů primárního vinutí lze zaokrouhlit na $N_1 = 300$ závitů. Tento počet je nutno rozdělit na dvě poloviny po $N_{1/2} = 150$ závitech.

Průměr vodiče primárního vinutí

Plocha pro celé vinutí transformátoru podle tab. 24, sloupec 9 je $S_0 = 0,665 \text{ cm}^2$. Připadne-li na primární vinutí polovina této plochy, je jeho plocha

$$S_1 = \frac{S_0}{2} = \frac{0,665}{2} = 0,332 \text{ cm}^2$$

Na 1 cm^2 plochy S_1 připadá

$$n_1 = \frac{N_1}{S_1} = \frac{300}{0,332} = 905 \text{ závitů}$$

Podle tab. 15 je zjištěn vhodný průměr vodiče 0,265 mm, ($= 975 \text{ závitů/cm}^2$) s proudovým zatížením 137 mA při 2,5 A/mm².

Stejnosměrný odpor primárního vinutí (101)

$$R_{ss1} = N_1 \cdot l_{s1} \cdot r \cdot 10^{-5} = 300 \cdot 5,59 \cdot 318,02 \cdot 10^{-5} = 5,33 \Omega$$

kde l_{s1} podle tab. 24, sloupec 8 je pro vrchní vinutí $l_{s1} = 5,59 \text{ cm}$.

Převod transformátoru (7)

$$p = \sqrt{\frac{R_n}{R_a}} = \sqrt{\frac{144}{4}} = 6$$

Počet závitů sekundárního vinutí (108)

$$N_2 = \frac{N_1}{p} = \frac{300}{6} = 50 \text{ závitů}$$

Průměr vodiče sekundárního vinutí

Pro sekundární vinutí je určena plocha $S_2 = S_1 = 0,455 \text{ cm}^2$

$$n_2 = \frac{N_1}{S_2} = \frac{50}{0,332} = 151 \text{ závitů/cm}^2 \text{ plochy } S_2$$

Z tab. 15 je zvolen vodič o průměru 0,600 mm (210 závitů/1 cm²).

Stejnosměrný odpor sekundárního vinutí (101)

$$R_{ss2} = N_2 \cdot l_{ss2} \cdot r \cdot 10^6 = 50 \cdot 3,86 \cdot 62,049 \cdot 10^{-6} = 0,12 \Omega$$

R_{ss2} převedený do primárního vinutí

$$R'_{ss2} = R_{ss2} \cdot p^2 = 0,12 \cdot 6^2 = 4,3 \Omega$$

$$R_{ss1} + R'_{ss2} = 5,33 + 4,3 = 9,63 \Omega$$

Účinnost výstupního transformátoru (33)

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_{ss1} + R'_{ss2}}{R_n}} = \frac{1}{1 + \frac{9,63}{144}} = 0,94 = 94 \%$$

Rozložení vinutí podle obr. 79.

Kontrola proveditelnosti

Primární vinutí

Podle tab. 27 lze vinout u plechů velikosti E/B 6 vinutí na délku 12,1 mm.

Na tuto délku přijde (110)

$$n_{v1} = n_{em} \cdot a \cdot 10^{-1} = 30 \cdot 12,1 \cdot 10^{-1} = 37 \text{ závitů/1 vrstvu}$$

Primární vinutí lze navinout do T_1 vrstev (111)

$$T_1 = \frac{N_1}{n_{v1}} = \frac{300}{37} = 8 \text{ vrstev}$$

Výška vinutí v_1 při navíjení bez prokladů (112)

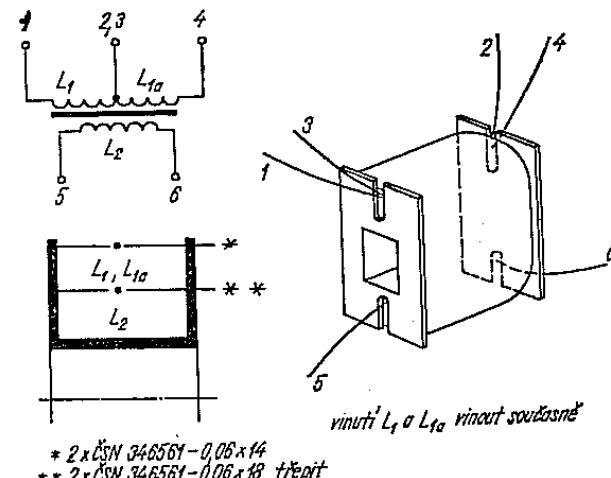
$$v_1 = T_1 \cdot d \cdot k = 8 \cdot 0,303 \cdot 1,05 = 2,54 \text{ mm}$$

Sekundární vinutí

Na délku vinutí 12,1 mm podle rovnice (110) přijde

$$n_{v2} = n_{em} \cdot a \cdot 10^{-1} = 14 \cdot 12,1 \cdot 10^{-1} = 17 \text{ závitů/1 vrstvu}$$

$$T_2 = \frac{N_2}{n_{v2}} = \frac{50}{17} = 3 \text{ vrstvy}$$



Obr. 79. Návrh cívky transformátoru podle výpočtu v kap. 21

Výška vinutí v_2 , při vinutí bez prokladů podle rovnice (112)

$$v_2 = T_2 \cdot d \cdot k = 3 \cdot 0,660 \cdot 1,05 = 2,08 \text{ mm}$$

Mezi vinutími je umístěn proklad podle obr. 79

2x ČSN 34 6561 0,06 mm.

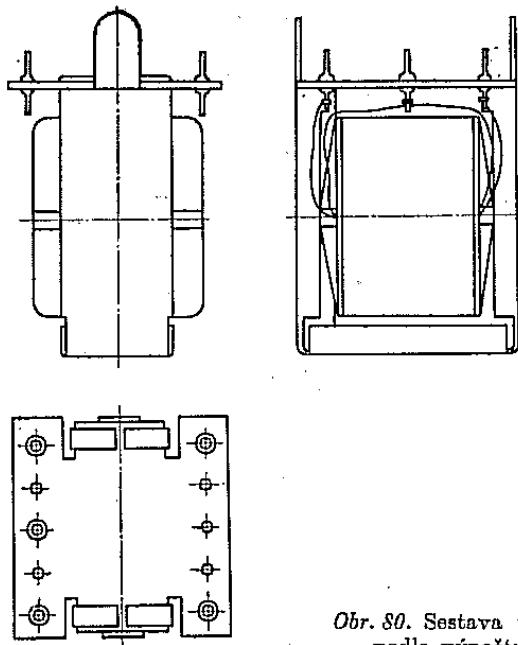
Jako ochranný obal cívky je použito

2x ČSN 34 6561 0,06 mm.

Celková výška navinuté cívky v_c je podle (113)

$$v_c = (v_1 + v_2) + (T_{p1} \cdot t_{p1}) + t_{op} = (2,54 + 2,08) + (2 \cdot 0,06) + 0,12 = 4,86 \text{ mm}$$

Transformátor stáhneme stahovacím držákem (rámečkem), jak je znázorněno na obr. 80.



Obr. 80. Sestava transformátoru podle výpočtu v kap. 21

Tab. 30b. Navíjecí list pro výstupní transformátor podle výpočtu v kap. 21
(Vinutí provedeno podle obr. 79)

Impedance mezi vývody

1-2	72 Ω
3-4	72 Ω
5-6	4 Ω

Navíjecí předpis

Vinutí	Počet závitů	Průměr vodiče mm	Izolace vodiče	Šířka vinutí mm	Počet vrstev
L_1	150	0,265	PL	12,1	8
L_{1a}	150	0,265	PL	12,1	3
L_4	50	0,000	PL		

Vinutí L_1 , L_{1a} vinutí současně

Použijeme transformátorového plechu podle tab. 6, (NTN 200) velikosti

E 8 A2/0,35 L } po 15 kusech,
B 8 A2/0,35 L } skladat střídavě.

Vývody z cívky musíme zakončit na svorkovnici (viz obr. 80).

Pro úplnost chybí zjistit váhu mědi a železa; postup pro výpočet byl již uveden u jiných typů.

Navíjecí list tohoto výstupního transformátoru je v tab. 30b.

VII. Technologie výroby

Celou technologii výroby výstupních transformátorů lze rozdělit do několika částí:

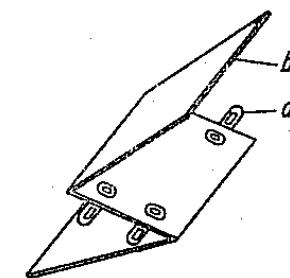
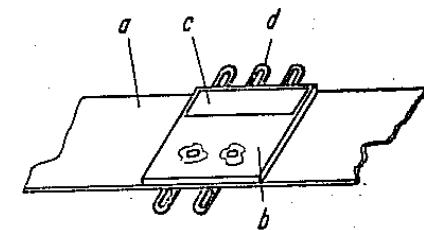
1. Příprava materiálů a navíjecího stroje.
2. Navíjení a úprava cívek.
3. Montáž a impregnace transformátorů.

22. Příprava materiálu a navíjecího stroje

Než se začne s vlastní výrobou výstupních transformátorů, je nutné připravit a upravit všechn potřebný materiál.

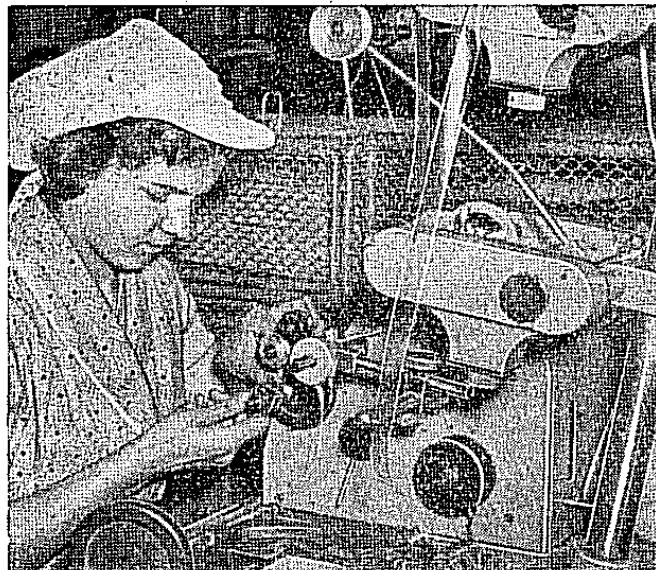
Začíná se cívkovými tělesky. Některá těleska se nemusí upravovat; jsou to všechna lisovaná těleska a lepená těleska bez čel. Všechna ostatní vyžadují úpravy. Lepená těleska s čely se musí na čelech děrovat pro vyvádění vývodů a pro připevnění pájecích oka apod. Skládaná těleska se musí složit z příslušných dílů a musí se u nich obrousit ostré hranы a otřepy, které by mohly poškodit vodič při navíjení. Na čele se potom připevní (přinýtují) pájecí oka, nýtky, apod., které se někdy z vnitřní strany těleska podlepují technickou náplastí.

Dále je nutné připravit navíjecí vodiče, tj. překontrolovat jejich správné průměry (někdy i měřit vodivost a celistvost lakované vrstvy).



Obr. 81. Příprava pomocných izolačních desek a vložek pro uchytení vývodů u cívek bez čel;
a) ochranná páska cívky, b) izolační deska,
c) technická náplast d) pájecí oka,

Proklady se připravují z kotoučů příslušného materiálu nařezaných na míru. Z kotoučů se stříhají potřebné délky, a to tak, aby se při navíjení již nemusely upravovat. Připravují se různé délky pro jedno nebo vícenásobné ovinutí cívky. Proklady se také třepí nebo lemuji (když je to požadováno), a to na zvláštních strojích a vždy na celém kotouči. Proklady tlustší, jako drážková lepenka apod., které jsou dodávány v arších, se upravují stříháním (na velkých nůžkách). Sem patří také úprava různých izolačních podložek a vložek. Některé vložky se děrují, aby se na ně dala přichytit různá pájecí oka apod. (obr. 81).



Obr. 82. Příprava navíječního stroje. Upnutí cívkového těleska do upínacího trnu

Potom se připraví potřebné délky izolačních trubiček. Také holé vodiče, kterými se zesilují vývody, se stříhají na potřebné délky.

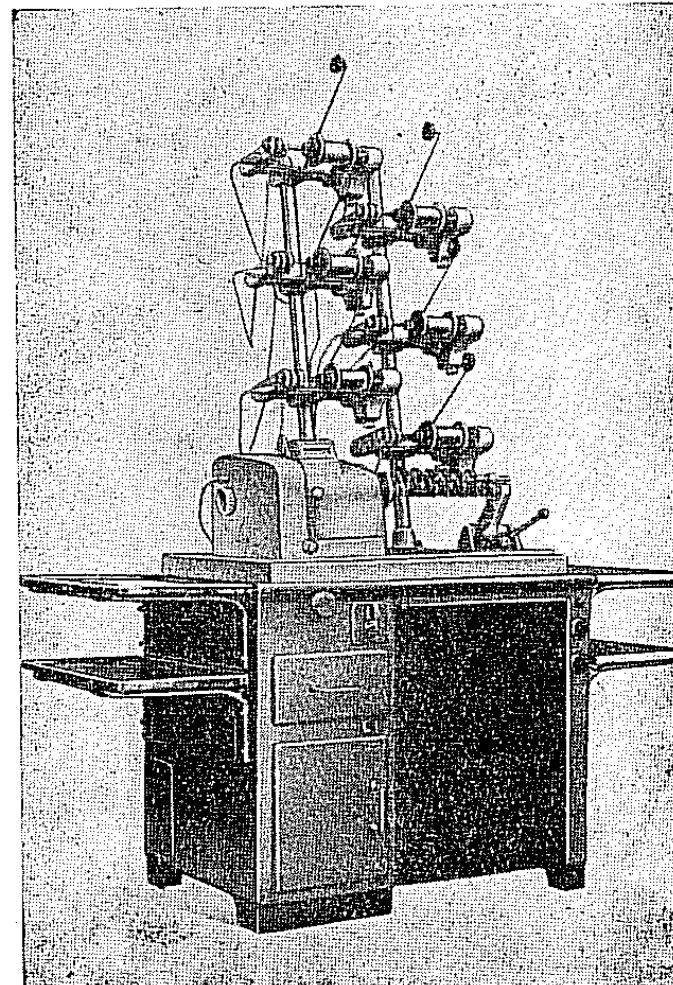
Musíme připravit i lepidla, kterými se lepí jednotlivé proklady, a potřebné délky tkanice, nití apod., pro zajištování vývodů. Rovněž je nutné připravit pájecí prostředky, tj. cín a kalafunu rozpuštěnou v lihu.

Příprava navíječního stroje: nejprve se upne cívkové tělesko do upínacího trnu, obr. 82. Potom se podle průměru navíjeného vodiče a podle délky těleska upraví správný posuv a tah drátu i rychlosť navíjení. Navijí se u různých navíječních strojů různě, ke strojům bývají přikládány návody a tabulky.

23. Navíjení a úprava cívek

Cívky výstupních transformátorů se navíjejí na navíjecích strojích válcovým způsobem. Na obr. 83 je navíječka „Adast“ NV 100, přizpůsobená pro současné šestinásobné navíjení.

Vývody vinutí je nutno zesilit, má-li vodič menší průměr než 0,4 mm. Obvykle se zesiluje vodič o průměru 0,1 až 0,35 mm holým (nebo pocínovaným) měděným drátem o průměru 0,4 až 0,6 mm, a to tak, že se očištěný vývod navíjeného vodiče několikrát ovine kolem zesilovacího drátu a připájí se.

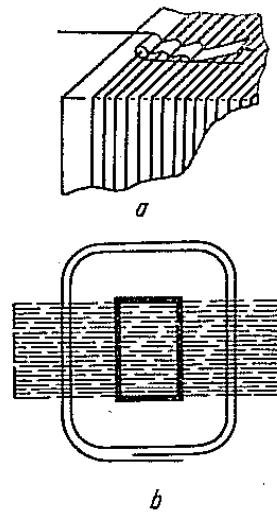


Obr. 83. Navíječní stroj „Adast“ NV 100, přizpůsobený pro současné šestinásobné navíjení

Vodiče od průměru 0,35 mm se vyvádějí přímo. Proti poškození chrání vývody ohebné izolační trubičky, které se navléknou na vodiče. Někdy se vývody nastavují ohebným lankem, a to v tom případě, když zůstávají volně vyvedené.

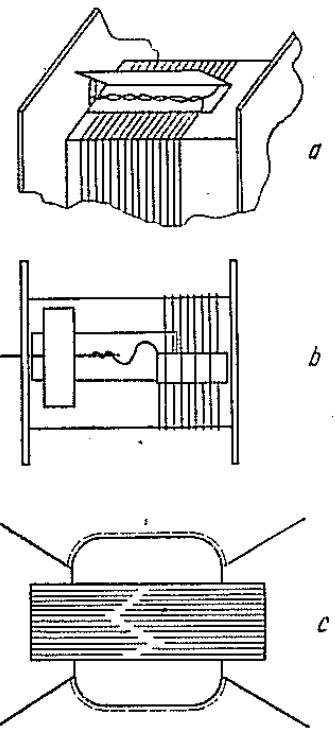
Vývody vinutí musí být zajištěny proti samovolnému uvolnění; to platí hlavně pro vinutí bez čel. Zajišťování vývodů je několikeré; dělá se buď nití, nebo motouzem ovinutým kolem těleska, ke kterému se přiváže vodič i s izolační trubičkou. Vývody vodičů větších průměrů se zachycují tkanicí, obr. 84.

Mezi jednotlivé navíjené vrstvy se vkládají proklady. Aby proklad rádně



Obr. 84. a) zajišťování vývodů tlustých vodičů tkanicí při navíjení „bez čel“. b) správné založení prokladů mezi vrstvou. Proklad se musí vzájemně překrývat, a to na té straně těleska, která bude při montáži mimo okénko jádra

plnil svou funkci, musí být proveden podle obr. 84b. Překrytí musí být na těch stranách cívky, jež nejsou při montáži v okénku plechů. Zpravidla se prokládá každá navinutá vrstva, někdy však stačí prokládat každou druhou či třetí vrstvu. Při navíjení cívek s čely lze při menších nározech udělat celé vývody s vodičem malého průměru bez prokladů.



Obr. 85. a) vyvádění odboček vinutí z cívky; b) aby se zabránilo přetržení vodiče při namáhání vývodu, dělá se vývody ve tvaru S; c) vývody nelze vyvádět po celém obvodu cívky, nýbrž jen v čárkovane označené oblasti

Tloušťky prokladů se řídí průměrem navíjeného vodiče. Při průměru vodiče do 0,1 mm se používá kondenzátorového nebo prokladového papíru do 30 μm . U vodiče průměru 0,1 až 0,2 mm se používá kabelového papíru S1 (0,065 mm) nebo lesklé lepenky tloušťky 0,1 mm. U tlustších vodičů se používá lesklé lepenky 0,2 mm.

Proklady se mezi jednotlivé vrstvy vinutí vkládají ručně při zastavení navíjení. Tato okolnost je nepřijemná, protože prodlužuje navíjecí časy. Např. firma Micasil vyrábí proto pro své navíječky příslušné zařízení, které samočinně uřezává z prokladového kotouče potřebné délky prokladů a potom je za chodu samo zakládá.

Odbočky z vinutí se dělají do průměru vodiče 0,8 mm bez přerušení vodiče, a to jako zkroucená smyčka, která se vyvede ven z cívky. Potřebujeme-li odbočku zesíleného drátu, omotá se kolem drátu očištěná smyčka z navíjeného vodiče a připájí se. Odbočky se izolují uložením mezi upravenou vložku z lesklé lepenky (obr. 85a). Obdobně se vyvádějí konec vinutí, jsou-li zakončeny na opačné straně, než je vývod z cívky. Konec vinutí se upevňuje podobným způsobem jako začátek vinutí.

Šířku vinutí určuje velikost provozního napětí; ponechává se vzdálenost od okrajů čela 2 mm, u vinutí bez čel asi 3 mm. Při vinutí bez čel musíme dbát, aby navíjený vodič byl rádně uložen, aby nevznikaly zbytečné nerovnosti, které mohou zavinit padání závitů. Při vinutí sekundárního vinutí musíme zvolit u poslední vrstvy vhodné stoupání, aby zaplnila celou šířku vinutí.

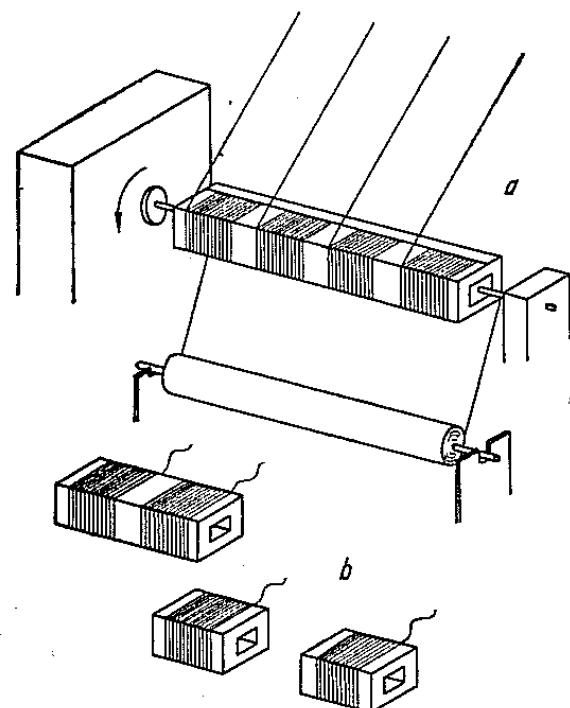
Vývody zesílovaných vodičů je vhodné udělat ve tvaru S, aby namáháním nenastalo nedovolené prnutí, při němž by se vodič mohl přetrhnout (obr. 85b).

Všechny vývody z cívky se dělají na těch stranách, na nichž je cívka po složení transformátoru volná, obr. 85c.

Při hromadné výrobě výstupních transformátorů se někdy používá více-násobného navíjení cívek. Toto navíjení se dělá tak, že se na unášecí trn upne několik samostatných tělesek, které se současně navíjejí, nebo se použije způsobu znázorněného na obr. 86. Navíjí se současně na dlouhé společné trubkové tělesko několik cívek vedle sebe. Proklad se dává jeden společný pro všechny cívky. Pro navinutí všech cívek současně se celek rozřeže na jednotlivé díly cívky, jak je znázorněno. Začátky vinutí se zavinou volně mezi proklady ještě před vlastním uvázáním vodiče. Po rozříznutí se tahem odvinou z cívky až po zajištění vodiče.

Navinuté cívky upravíme do konečného stavu již mimo navíjecí stroj. Úprava spočívá v přelepení cívky ochrannou páskou a v připájení vývodu do různých pájecích ok a nýtků. Pájení měděných vývodů je snadné, horší je pájení hliníkových vodičů. Jak známo, vytváří se na hliníku téměř okamžitě po zpracování tenká, pevná vrstvička oxydu. Tato vrstvička musí být odstraněna, má-li na hliník přilnout pájka. Je několik způsobů pájení hliníku; podmínkám pájení cívek transformátorů snad nejlépe vyhovuje metoda vývinutá ve Výzkumném ústavu pro sdělovací techniku A. S. Popova, při níž se vodič

očištěný od laku pokryje nejprve vrstvou redukčně vyloučeného niklu a současně se rozpustí oxydační vrstvička. Na vyloučený nikl lze potom normálně pájet cínovou pájkou.



Obr. 86. Princips vícenásobného navijení bez čel na společnou trubku;
a) vlastní navijení a vkládání společného prokladu; b) rozřezávání hotových cívek

Složení redukční lázně:

chlorid nikelnatý	400 g/l,
kyselina fluorovodíková	20 g/l,
kyselina boritá	40 g/l.

Do této lázně se ponoří očištěný vodič asi na půl minuty, na hliníku se vyloučí vrstva niklu, asi 2 až 3 μm . Před vlastním pájením je dobré ponořit hliníkový vodič do roztoku 1,5 % anilinhydrochloridu v ethylalkoholu a 20 až 30 % kyseliny fosforečné, který usnadní pájení.

Někdy jsou vývody výstupních transformátorů místo pájení (cínovou pájkou) přivařovány, a to odporově, elektricky, nebo elektrickým obloukem. Při odporovém svařování se vodič namotá na pájecí oko a sevře se společně s pájecím

okem zvláštními ručními svařovacími kleštěmi. Nožním pedálem, spojeným se spínačem, se ovládá zapínání a vypínání transformovaného proudu, který se přivádí do klesti. Velikost svařovacího proudu lze řídit přepínáním různých odboček na svařovacím transformátoru. Doba sváření bývá řízena automaticky. V poslední době však převládá svařování obloukem, jež je rychlejší. Mechanická pevnost takových svarů je výborná. Elektrický oblouk se vytváří mezi uhlíkovou elektrodou a kovem svařované součásti, která tvoří druhou elektrodu. Svařovat se může jak stejnosměrným, tak i střídavým proudem.

24. Montáž a impregnace transformátorů

Hotové cívky výstupních transformátorů naplníme předepsanými plechy určeným způsobem, tj. bud' plechy vkládáme střídavě, nebo souhlasně s vytvořením určité vzduchové mezery. Cívky se plechují ručně. Vzduchovou mezitu tvoří papírová vložka, vsunutá mezi styčné plochy plechů. U cívek bez čel se přikládá z boku cívky izolační vložka z lakovaného papíru, kde přichází do styku s plechy.

Plechy se stahují různými držáky, šrouby a nýty, jak o nich byla zmínka v kap. IV.

Po smontování výstupních transformátorů se vzduchovou mezitu se nastaví předepsaná primární indukčnost vhodným sklepáním a srovnáním jednotlivých transformátorových plechů jádra.

Potom následuje impregnace.

Téměř všechny druhy výstupních transformátorů se impregnují. Důvodů je několik. Předně se zvětší elektrická izolační pevnost, dále se zvětší odolnost proti vnějším vlivům, sníží se hlučnost a mechanicky se zpevní transformátor a jeho vzhled.

Impregnační látka vyplní při impregnaci všechny mezery, skuliny mezi vodiči, proklady a jednotlivými mechanickými částmi, z kterých je transformátor složen. Dále vnikne do všech pórů materiálu, který ještě nebyl impregnován, např. různé papírové proklady, tkanice apod. Vysušená nebo vytvrzená impregnační hmota spojí všechny součásti výstupního transformátoru (vinutí, cívky, transformátorové plechy, držáky apod.) v jeden pevný celek. Tím se uzavře přístup vlnkosti, která by jinak mohla vniknout dovnitř vinutí.

K impregnaci výstupních transformátorů se používá různých materiálů, které se dají rozdělit do dvou základních skupin:

- a) izolační laky,
- b) izolační hmoty.

Izolační laky mají tu vlastnost, že po vysušení rozpouštědla vytvoří pevnou blánu s velmi dobrými dielektrickými vlastnostmi. Izolační laki (přesněji jeho ředitlo) nesmí rozpouštět lak vodičů, použitych pro vinutí.

Používají se např. různé přírodní pryskyřice, šelak, kalafuna, kopál, nebo laky syntetické S 1901, S 1902, S 1904, GAM 60, různé impregnační laky olejové jako O 1901, O 1905 apod.

Impregnace lakem se dělá ve vakuu: Nejprve se transformátory vysuší, a to čtyři až pět hodin při teplotě 90 až 100 °C za normálního tlaku, nebo při 60 až 70 °C ve vakuu. Části transformátoru, které se mají po impregnaci očistit, potíráme před impregnací roztaveným ceresinem.

Ještě horké vysušené transformátory se přenesou do kotle s podtlakem 10 mm rtuťového sloupce. Po 10 min se do kotle nasaje impregnační laky, zahřátý na 50 °C. Transformátory se ponoří do laku a vakuu se udržuje asi 30 až 40 min. Potom se dokončuje impregnace při normálním tlaku. Za tři minuty se nechá laky odtéci a jeho přebytek se nechá odkapat. Transformátor se suší ve vakuu, vloží se do kotle, v němž je teplota 60 °C, a z kotle se vyčerpá vzduch. Potom se teplota zvýší na 105 až 110 °C. Transformátory se tak suší 10 až 24 h.

Základem izolačních látek, jichž se používá pro impregnaci výstupních transformátorů, bývají různé vosky a asfalty. Izolační látky jsou při normální teplotě v tuhém stavu. Zahřeje-li se však látka na teplotu asi 100 až 120 °C, začne se tavit. Za tohoto stavu lze impregnovat. Po opětném vychladnutí se vraci izolační látka do původního tuhého stavu, v němž má tvarovou stálost až do stanovené teploty, při které nastává měknutí. V tuhém stavu má dobrou odolnost proti vlhkosti i korozii a vykazuje dobré elektrické vlastnosti.

Do skupiny voskových izolačních látek patří např. včelí vosk, ceresin, parafín a nejpoužívanější je T 100 (složená z oxydované kalafuny a ceresinu). Tato látka měkne asi při 80 °C. Asfaltové látky jsou přírodní, oxydační produkty zemních olejů, nebo syntetické asfalty, zvané bitumeny. Asfaltové látky vykazují lepší tepelnou odolnost než voskové. Bod měknutí je 130 až 140 °C u bitumenů a až 170 °C u asfaltů.

Výstupní transformátory se zalévají jen výjimečně, když se zřetelem na teplotu či jiné vnější vlivy (chemicky agresivní nebo prašné prostředí), nebo se zřetelem na požadovanou mechanickou odolnost nelze použít jiného druhu impregnace.

Zalévání je v celku jednoduchá operace, zvlášt vhodná pro kusovou a malosériovou výrobu. Formy, v nichž se zalévá nejsou pracné a mohou být z nejrůznějších materiálů. Někdy je nutné vytvořit na stěnách formy tenkou vrstvu vosku nebo jiného podobného separátoru.

K zalévání se používá různých druhů pryskyřic na bázi termosetů, např. Epoxy, Veropal, nebo na bázi termoplastů, např. Dentacryl, nebo různých past PVC.

Zalévací pryskyřice jsou při určité teplotě tekuté a velmi dobře zatékají. Tyto pryskyřice bývají jednosložkové nebo vícesložkové. Jednosložkové pryskyřice se zpravidla po odlítí vytvrzují za tepla. To je určitá nevýhoda, na níž se musí pamatovat při řešení odlévací formy. Jednosložkové pryskyřice však mají naopak tu výhodu, že je lze zpracovávat neomezeně dlouho. Pryskyřice dvousložkové a vícesložkové můžeme tvrdit jak za tepla, tak i při normální teplotě

okolí. Smíchání jednotlivých složek musíme věnovat mimořádnou pozornost, hlavně vzájemným váhovým poměrům. Jedna složka bývá zpravidla základní látkou a druhá tvrdidlem, která způsobuje polymerizaci. Dalšími přídavnými složkami bývají různé katalyzátory, urychlující vlastní vytvrzování.

Do formy lze odlévat bez tlaku, pod tlakem nebo vstřikováním. U zalévaného transformátoru se musí vytvořit na cívce tenká vrstvička mastnoty, která má zabránit přímému styku zalévací látky s vinutím. Toto opatření je důležité, protože při smršťování zalévací látky by se mohly vodiče přetrhnout.

Mezi jednodložkové zalévací látky patří např. lacy pryskyřice fenolresolová „Umalon“ (bez plnidel). Trvalá odolnost odlitku je do +70 °C. Měrný povrchový i vnitřní izolační odpor je $10^{11} \Omega$. Elektrické průrazné napětí je 15 kV/mm, měrná hmota 1,3 g/cm³, nasákovost 0,5 až 1,5 %.

Další jednosložková látka je fenolformaldehydová pryskyřice plněná azbesitem „Faolit.“ Trvalá tepelná odolnost je +150 až +180 °C, měrný izolační odpor $10^{10} \Omega$, elektrické průrazné napětí 5 až 10 kV/mm, měrná hmota, 1,4 až 1,8 g/cm³, nasákovost 1,5 %. Nejčastěji používané vícesložkové zalévací látky jsou uvedeny v tab. 31.

Tab. 31. Vlastnosti zalévacích látek pro výstupní transformátory

	Trvalá tepelná odolnost °C	Měrný izolační povrchový odpor Ω	Měrný izolační vnitřní odpor Ω	Elek- trická pevnost kV/mm	Měrná hmota g/cm ³	Nasáka- vost %
Epoxy 2000	120	10^{13}	10^{16}	25	1,25	0,15
Epoxy 2100	65	10^{13}	10^{12}	30	1,1 až 1,18	0,28
Epoxy 2200	70	10^{13}	10^{13}	30	1,1	0,26
Epoxy 2400	100	10^{14}	10^{16}	20	1,15	0,15
Veropal 001	80	10^{15}	10^{15}	14	1,25	0,08–0,1
Dentacryl	70	10^6	10^8	15	1,25	0,4

Nevýhodou všech zalévacích látek je jejich poměrně značná cena.

VIII. Zkoušení a měření výstupních transformátorů

Hotový výstupní transformátor musíme vyzkoušet a proměřit, zda odpovídá požadovaným a předpokládaným vlastnostem, podle kterých byl navrhován.

V následující části budou probrány nejdůležitější zkoušební a měřicí metody, které jsou nezbytné k ověření kvalit výstupního transformátoru. Budou zde popsány metody jako pro měření kusové (laboratorní), tak i pro měření hromadné (dílenské), potřebné při sériové výrobě.

25. Zkušební metody

Zkoušení zkratů mezi závity u navinuté cívky

Každé navinuté vinutí se musí zkoušet na zkrat mezi závity, jenž vznikne při porušení lakové izolační vrstvy sousedních vodičů ve vinutí. Zkrat může být na jednom, nebo i více závitech, ovšem i zkrat jediného závitu znehodnotí celou cívku. Proto se dělá zkouška zkratů po každém navinutí nového vinutí na cívku. Předchází se tak dalším zbytečným ztrátám, které by jinak mohly vzniknout.

Zkraty mezi závity se objevují častěji u vinutí z tenčích vodičů než u vinutí z vodičů tlustších.

Zkraty mezi závity se zkoušeji různými zkratoměry. Nejpoužívanější je zkratoměr Tesla BM 295, pracující na mostovém principu. Vlastní zkoušení je velmi jednoduché. Zkratoměr se vyváží se zasunutým trnem, který musí být prázdný. Potom se na trn nasune zkoušená cívka. Má-li cívka zkrat mezi závity, poruší se rovnováha mostu, což způsobí výchylku indikačního přístroje. Zkratoměr je řešen tak, že vylučuje vliv vlastní kapacity zkoušeného vinutí. Zkratoměr indikuje zkrat jediného závitu o průměru 0,05 mm ve smyčce o průměru 25 mm. Nejmenší průměr zkoušené cívky je 10,5 mm, největší délka cívky 80 mm.

Zkoušky elektrické izolační pevnosti

Elektrická izolační pevnost se zkouší jak u cívek, tak i u hotových smontovaných transformátorů.

U cívek se vysokým napětím zkouší izolace mezi sousedními vinutími. Při této zkoušce se používá menšího zkoušebního napětí, asi 500 až 1000 V.

U smontovaných transformátorů se zkouší elektrická izolační pevnost jednotlivých vinutí proti jádru (kostře) transformátoru a vinutí proti vinutí. Velikost zkoušebního napětí a způsob zkoušení určuje norma ČSN 36 7010. Zkouší se po dobu jedné minuty zkoušebním napětím $2 U + 1500$ V, nejméně však 2000 V, je-li provozní napětí vinutí větší než 34 V (vrcholová hodnota) nebo zkoušebním napětí 500 V, je-li provozní napětí vinutí menší než 34 V (vrcholová hodnota). Zkoušební napětí se plynule zvyšuje od 250 V na největší zkoušební hodnotu a po jedné minutě zkoušky se opět plynule snižuje až na 250 V.

Zkoušky elektrické izolační pevnosti se dělají podle bezpečnostních předpisů buď za bezpečnostními kryty, nebo ve zvláštních zkoušebních kabinách či klecích. Vlastní zdroje vysokého napětí mají být řešeny tak, aby zkratový proud neprekročil hodnotu životu nebezpečnou. Takovým zkoušebním zdrojem je např. typ 12 XY 002, výrobek n. p. Tesla Strašnice. Na zdroji lze volit následující zkoušební napětí: 2000 — 1500 — 1000, — 500 V, kmitočet 50 Hz. Vývody napětí mají zkoušební hrotu ve tvaru pistole. Průraz se indikuje bzučákem a vestavenou kontrolní žárovkou.

Zkoušky odolnosti proti vnějším vlivům

Zkoušky odolnosti proti mechanickým a vnějším vlivům se dělají podle normy ČSN 34 5681, a to v rozsahu požadavků kladených na jednotlivé typy výstupních transformátorů.

26. Měřicí metody

Měření stejnosměrného (činného) odporu vinutí

Činné odpory vinutí se měří buď přístroji s různými mostovými zapojeními, jako je známý a dostatečně přesný odporový můstek Omega I, vyráběný v n. p. Metra Blansko (rozsah přístroje je od 0,05 do 50 000 Ω , s přesností -1%), nebo přístroji přímoukazujícími napěťovou metodou.

Zásada při měření: zvolené měřicí zařízení má být o třídu přesnější, než je povolená tolerance u měřeného odporu.

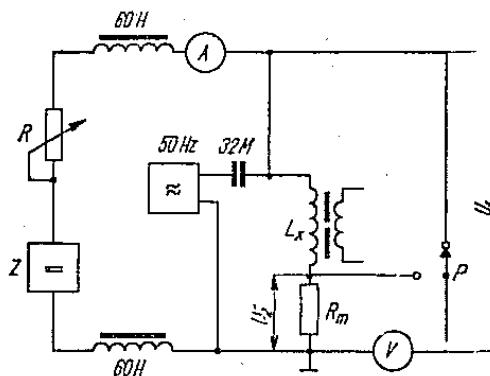
Měření primární indukčnosti

Primární indukčnost výstupních transformátorů se měří dvojím způsobem, a) bez stejnosměrné předmagnetizace, tj. u transformátorů, které budou pracovat ve dvojčinném zapojení;

b) se stejnosměrnou předmagnetizací, tj. u transformátorů pro jednočinná zapojení.

Dobrých výsledků lze dosáhnout měřením na soupravě měřicích přístrojů

n. p. Tesla Pardubice. Tato souprava se skládá ze zdroje pevných kmitočtů TM 512, ze spojovacího panelu TM 602, z indikátoru nuly TM 622 (lze nahradit i nf milivoltmetrem Tesla BM 210) a mostem velkých indukčností TM 383. Touto soupravou lze měřit indukčnosti bez stejnosměrné předmagnetizace v rozsahu 1 až 1100 H, s přesností do 2 %. Měření lze provádět při pevně nastavených kmitočtech 25 — 100 — 400 — 1000 — 10 000 Hz. Je-li potřeba měřit indukčnost transformátorů se stejnosměrnou předmagnetizací, musí být uvedena souprava doplněna zdrojem stejnosměrného napětí, např. TM 583.



Obr. 87. Zapojení pro měření indukčnosti výstupních transformátorů se stejnosměrnou předmagnetizací

připojen k měřené indukčnosti přes oddělovací kondenzátor $32 \mu\text{F}$. V sérii s L_x je zapojen bezindukční odpor R_m o přesné velikosti 10Ω . Přepínačem P lze přepínat střídavý voltmetr V (s velkým vstupním odporem) tak, aby měřil napětí U_1 nebo U_2 .

Pro měřenou indukčnost platí

$$L_x = \frac{10}{2\pi f} \cdot \frac{U_1 - U_2}{U_2} \quad [\text{H; Hz, V}]$$

Pro přesné měření primární indukčnosti lze také použít přesného mostu RLC Tesla BM 401, který měří indukčnosti do 1000 H s přesností 0,5 %. Stejnosměrný proud potřebný pro předmagnetizaci se musí přivést ze zvláštního zdroje. Stejnosměrný proud nesmí překročit 50 mA.

Primární indukčnost se měří na výstupním transformátoru při nezatiženém sekundárním vinutí.

Měření rozptylové indukčnosti

Rozptylová indukčnost výstupního transformátoru se dá měřit přístroji s mostovými zapojeními, např. můstkem RLC Tesla TM 393, přesným mostem RLC Tesla BM 401, nebo soupravou měřicích přístrojů n. p. Tesla Pardubice

(ve stejné sestavě jako při měření primární indukčnosti), doplněné mostem malých indukčností TM 382. K měření lze také použít měřicích přístrojů s rezonančním principem, jako je měřič indukčnosti a kapacit Tesla BM 366, nebo BM 213.

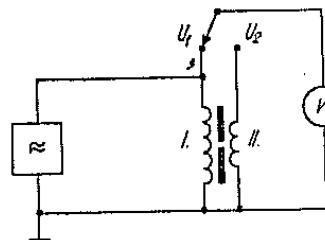
Měří se na primárním vinutí výstupního transformátoru při zkratovaných vývodech sekundárního vinutí.

Měření převodu transformátoru

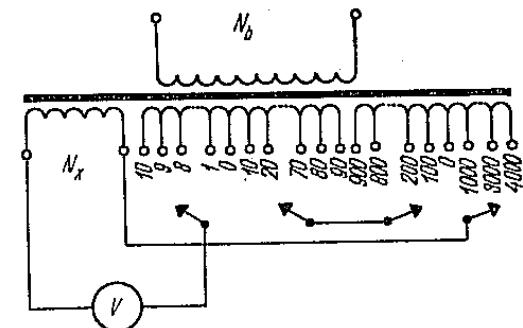
Převod výstupního transformátoru se měří nejčastěji podle zapojení na obr. 88. Primární vinutí I výstupního transformátoru je připojeno k nf generátoru trvale a elektronkový voltmetr V je střídavě přepínán buď k primárnímu vinutí, nebo k sekundárnímu vinutí II.

Převod transformátoru je potom dán poměrem obou napětí

$$p = \frac{U_1}{U_2}$$



Obr. 88. Zapojení pro měření převodu transformátoru



Obr. 89. Zapojení pro měření počtu závitů neznámého vinutí

Tento převod však představuje převod transformátoru naprázdno. Je vhodné měřit převod výstupního transformátoru při různých kmitočtech, např. při 1000 Hz a při obou hraničních kmitočtech f_d a f_h .

Pro správné měření převodu výstupního transformátoru se používá měřiče převodu 12 XO 001, který vyrábí n. p. Tesla Strašnice. Měřicí rozsah je od 1 : 1 až 1 : 121, s přesností $\pm 0,5 \%$. K měření převodu je nutno použít vhodného generátoru, např. typu 12 XG 014 nebo 12 XJ 009 a indikátoru.

Měření počtu závitů cívky

V některých případech je potřebné zjistit na navinuté cívce počet závitů, a to zvláštním přístrojem, počítacem závitů; jeho základní schéma je na obr. 89. Tímto přístrojem lze měřit 1 až 5000 závitů.

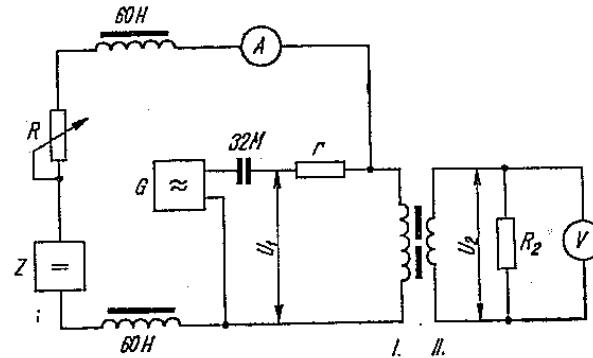
Na uzavřeném feromagnetickém jádře je nasunuta budící cívka N_b , která je napájena ze stabilizovaného střídavého zdroje. Na jádro je také nasunuta měřicí cívka s řadou odboček po tisíci, stu, deseti a jednom závitu. Libovolný

počet závitů lze v rozmezí 1 až 5000 závitů volit čtyřmi přepínači. Budicí cívka a velikost budicího napětí musí být taková, aby na 5000 závitech měřící cívky bylo napětí 250 V. Jako indikátoru je použito nf milivoltmetru V s velkým vstupním odporem, např. Tesla BM 210. Měřená cívka N_x se nasune rovněž na feromagnetické jádro, avšak zapojí se proti smyslu vinutí měřící cívky.

Na začátku měření je nastaven na voltmetru V maximální měřicí rozsah a všechny přepínače se přepnou na nulu. Nemá-li měřená cívka více než 5000 závitů, není indikované napětí větší než 250 V. Potom postupným přepínáním přepínačů měřící cívky od největšího počtu závitů k menším se postupně zmenšuje i indikované napětí, a to tak dlouho, až se dosáhne nejmenší výchylky indikátoru. Z polohy přepínačů potom lze určit počet závitů, které měřená cívka má.

Měření lineárního (útlumového) zkreslení

Zapojení pro měření lineárního zkreslení výstupního transformátoru je na obr. 90. Generátor G vyrábí sinusové napětí, které lze kmitočtově měnit v po-



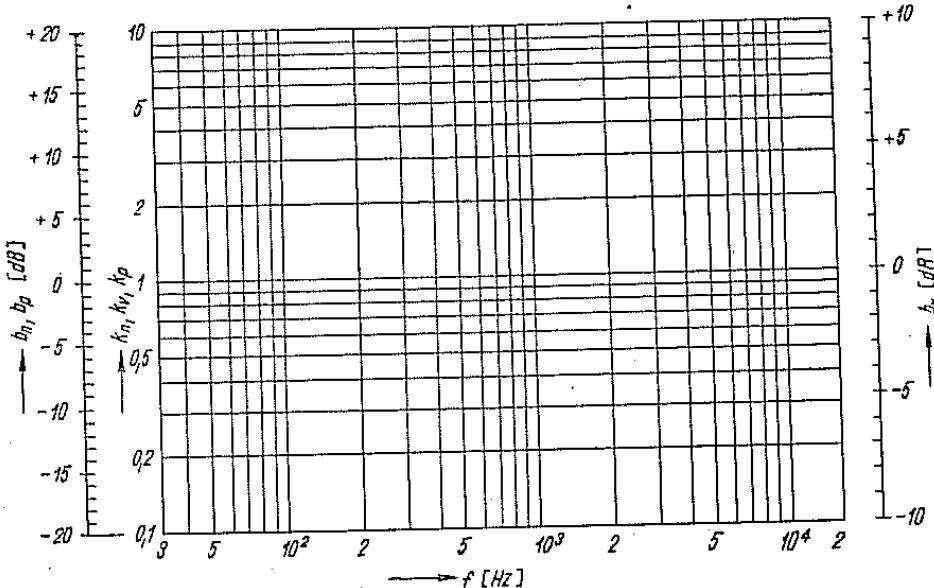
Obr. 90. Zapojení pro měření lineárního a nelineárního zkreslení výstupního transformátoru

třebném rozsahu. Zdroj stejnosměrného napětí Z je připojen k primárnímu vinutí transformátoru I přes tlumivky 60 H; regulačním odporem R se nastavuje velikost předmagnetizačního proudu a miliampermétem A se tento proud kontroluje. Generátor G napájí střídavým napětím primární vinutí transformátoru přes oddělovací kondenzátor 32 μ F a odpor r, jenž spolu s výstupním odporem generátoru nahrazuje vnitřní odpor koncové elektronky, pro kterou je výstupní transformátor určen. Sekundární vinutí II je zatiženo jmenovitým, ryze činným odporem R_2 . Paralelně k němu je připojen elektronkový voltmetr V₂ s velkým vstupním odporem, který měří napětí U_2 .

Vlastní lineární zkreslení se měří tak, že se při všech měřených kmitočtech udržuje konstantní úroveň napětí U_1 , měřeného voltmetrem V₁, a čte se vý-

stupní napětí U_2 . Z naměřených výsledků lze sestrojit diagram lineárního zkreslení výstupního transformátoru; výstupní napětí je funkcí kmitočtu. Za základ výpočtu se bere velikost napětí U_2 při referenčním kmitočtu (1000 Hz). Tomuto diagramu se také říká kmitočtová charakteristika výstupního transformátoru.

Lineární zkreslení se zpravidla udává jako útlum v decibelech. Pro usnadnění přeponcitávání součinitele útlumu na vlastní útlum, vyjádřený v decibelech, a pro zjednodušené zakreslování útlumu do grafu lze použít způsobu znázorněného na obr. 91. Na vodorovné ose je v logaritmickém měřítku vnesen kmi-



Obr. 91. Pomocná síť pro zakreslování lineárního zkreslení

točet, na svislé osy, rovněž v logaritmickém měřítku, na levé straně hodnoty součinitelů útlumu napětí nebo proudu, tedy

$$k_u = \frac{U_{2f}}{U_{2f0}} \text{ nebo } k_p = \frac{I_{2f}}{I_{2f0}}$$

a hodnoty součinitelů útlumu výkonu

$$k_v = \frac{P_{2f}}{P_{2f0}}$$

(kde U_{2f0} , I_{2f0} , P_{2f0} jsou efektivní hodnoty napětí, proudu, výkonu na zátěži sekundárního vinutí při referenčním kmitočtu f_0 a U_{2f} , I_{2f} , P_{2f} jsou hodnoty

střídavého napětí, proudu, výkonu při měřeném kmitočtu f). Potom prostým lineárním rozdelením logaritmického měřítka na svislých osách se dostanou hodnoty útlumu přímo v decibelech. Za základ se volí útlum při kmitočtu 1 kHz. Logaritmická stupnice se rozdělí, jak je znázorněno, tedy vždy jedna dekáda logaritmické stupnice na 20 stejných dílků pro útlum napětí či proudu a na 10 stejných dílků pro útlum výkonu.

Měření tvarového (nelineárního) zkreslení

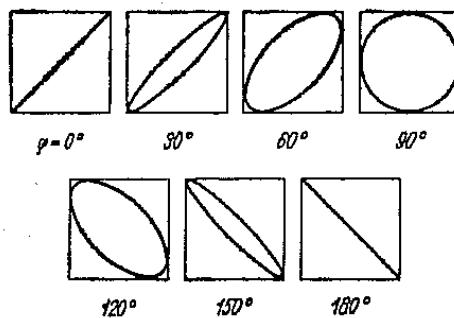
Tvarové zkreslení se měří při stejném zapojení jako kmitočtové (lineární) zkreslení, viz obr. 90, jen s tím rozdílem, že k voltmetu V_2 je připojen měřicí tvarové zkreslení, např. Tesla BM 224. Zkreslení se měří při jmenovitém výkonu při různých kmitočtech. Přitom musí být vlastní tvarové zkreslení generátoru zanedbatelně malé.

Měření nízko/frekvenčního výkonu

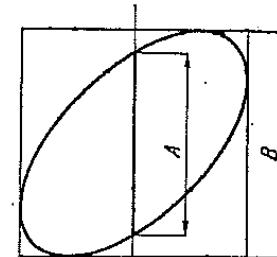
Výstupní výkon na sekundárním vinutí výstupního transformátoru se obyčejně měří nepřímo, tj. měřením napětí na zatěžovacím (bezindukčním) odporu. Pro výkon potom platí vztah

$$P = \frac{U_2^2}{R}$$

Zatěžovací odpor R musí být upraven tak, aby neměl vlastní indukčnost a voltmetr, který je k němu připojen paralelně, musí mít velký vnitřní odpor.



Obr. 92. Lissajousovy obrazce, které vzniknou na stínítku osciloskopu při měření fázového posuvu

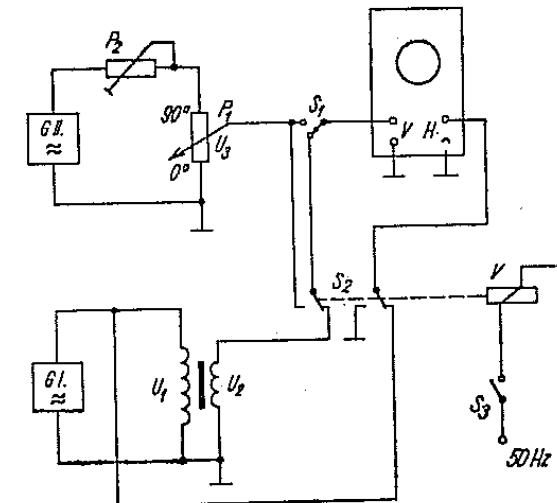


Obr. 93. Určení velikosti fázového zkreslení

Měření fázového zkreslení

Nejjednodušší metoda měření fázového zkreslení výstupního transformátoru je optická metoda, pomocí osciloskopu. Měření je založeno na principu Lissajousových obrazců, které vznikají na stínítku obrazovky, tím že se přivede

jedno (měřené) napětí na vertikální a druhé (základní) napětí na horizontální zesilovač osciloskopu. Vhodným zesílením jednotlivých napětí se na stínítku objeví obrazce, obr. 92, úměrné svými tvary fázovému posuvu mezi oběma napětími.



Obr. 94. Zapojení pro rychlé měření fázového zkreslení

Fázový úhel lze přesně změřit z rozměrů elipsy. Nastaví-li se zisk vertikálního zesilovače osciloskopu vhodně tak, aby měřené napětí vytvořilo na stínítku amplitudu B (obr. 93), lze vypočítat fázový úhel φ ze vztahu

$$\varphi = \arcsin \frac{A}{B}$$

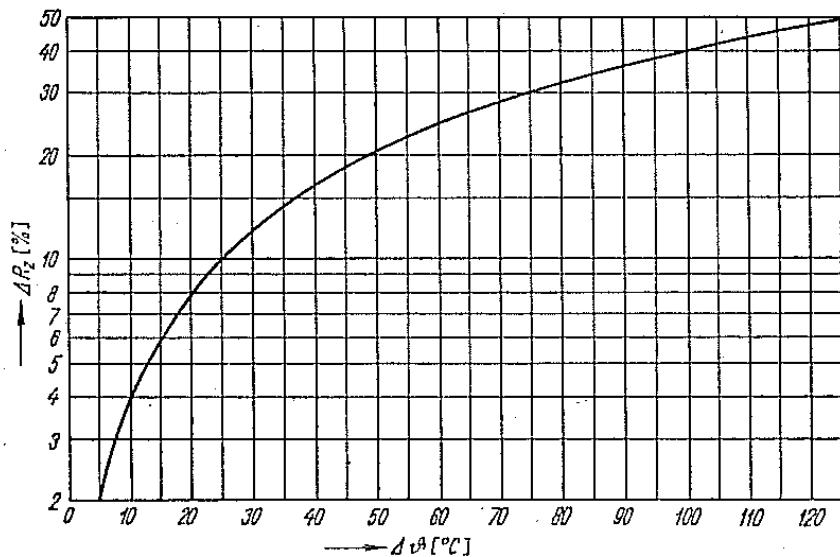
Fázový úhel lze rychle měřit metodou podle obr. 94. Měřený výstupní transformátor je připojen primárním vinutím k nf generátoru GI. Sekundární vinutí je připojeno přes přepínač S_2 a S_1 na vertikální zesilovač osciloskopu. Přepínač S_3 je spojen s vibrátorem V, který je napájen střídavým napětím 50 Hz; přepínačem S_3 je přepínačem přepojen s sekundárním vinutím U_2 nebo napětím U_3 , z pomocného nf generátoru G II. Druhý kontakt přepínače přepojuje střídavé základní napětí U_1 na primární vinutí a na zem. Na stínítku vznikne podobný obrazec, jako je nakreslen na obr. 93. Úsečka A svítí jasně a její velikost je úměrná napětí U_3 . Měřicí potenciometr P_1 má průběh úhlově rozdělen od 0 do 90°.

Cejchování se provádí tak, že při odpojeném S_3 se nastaví základní zesílení vertikálního zesilovače pro napětí U_2 (úsečka B), např. výchylka 5 cm. Potom se přepínačem S_1 připojí napětí U_3 , odebírané z potenciometru P_1 , nastaveného

do polohy 90°. Nyní se potenciometrem P_2 upraví napětí U_3 , U_4 , tj. na stejnou výchylku úsečky B . Po zapnutí vypínače S_3 lze měřit. Otáčením potenciometru P_1 se nastaví výchylka A tak velká, aby se právě dotýkala obrysů elipsy. Fázový úhel se čte přímo ve stupních potenciometru P_1 .

Měření oteplení vinutí

Při měření oteplení výstupních transformátorů se používá známé metody, měří se změny činného odporu vinutí v závislosti na teplotě. Je vhodné měřit v normálním prostředí (není však podmínkou).



Obr. 95. Diagram pro usnadnění výpočtu oteplení transformátoru

Před vlastní zkouškou se změří činný odpor vyšetřovaného vinutí R_1 (spolu s teplotou okolí t_1). Potom se na výstupní transformátor připojí jmenovité střídavé napětí, odpovídající jmenovitému výkonu, a stanovený předmagnetizační proud. Těchto provozních podmínek se dosáhne nejsnáze přímým zapojením výstupního transformátoru do konecového stupně zesilovače. Sekundární vinutí se zatíží jmenovitou zátěží. S tímto výkonem musí výstupní transformátor pracovat asi šest hodin. Okamžitě po ukončení zkoušky se změří znova činný odpor R_2 téhož vinutí, které bylo měřeno na začátku zkoušky. Současně se změří teplota okolí t_2 , zda se během zkoušky nezměnila.

Pro výpočet oteplení měděného vinutí platí

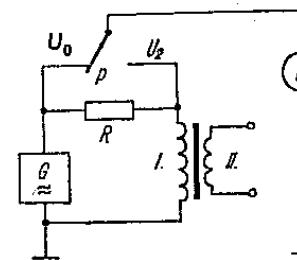
$$\Delta T = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (234,5 + t_1) + t_1 - t_2 \quad [\text{°C}, \Omega]$$

Pro oteplení hliníkového vinutí platí

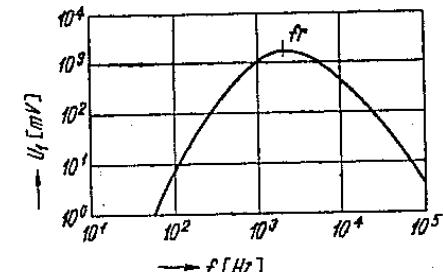
$$\Delta T = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (230 + t_1) + t_1 - t_2 \quad [\text{°C}, \Omega]$$

Velmi jednoduše lze určit oteplení měděného vinutí podle diagramu na obr. 95. Na svíslé ose je v procentech vynesén přírůstek činného odporu vinutí, na vodorovné ose lze potom přímo číst oteplení vinutí [°C]. Závislost platí pro měření při konstantní teplotě okolí.

Oteplení výstupních transformátorů se však obvykle neměří.



Obr. 96. Zapojení pro měření kapacity vinutí výstupního transformátoru (místo U_2 má být U_1)



Obr. 97. Rezonanční křivka cívky transformátoru

Měření kapacity vinutí

Kapacita vinutí se měří podle zapojení na obr. 96. Primární vinutí I výstupního transformátoru je připojeno k nf generátoru G přes odpor $R = 1 \text{ M}\Omega$. Elektronkovým voltmetrem V lze měřit napětí U_0 nebo U_1 , podle polohy přepínače p. Sekundární vinutí II není při měření zatíženo.

Při měření se nastaví napětí generátoru U_0 na 1 až 10 V a udržuje se konstantní po celou dobu měření. Nyní se mění kmitočet generátoru a čtou se napětí U_1 , která se vynáší do grafu, v němž je U_1 funkcí kmitočtu (obr. 97). Z grafu je patrné, že při určitém kmitočtu (f_r) dosahuje napětí U_1 maximální hodnoty. Při tomto kmitočtu nastává rezonance primárního vinutí, při které se uplatňuje primární indukčnost L_1 a kapacita vinutí. Pro rezonanční kmitočet platí Thomsonův vzorec

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \cdot C}}$$

kde L_1 je primární indukčnost výstupního transformátoru,
 C vlastní kapacita vinutí.

Z předchozí rovnice lze vypočítat neznámou hodnotu C

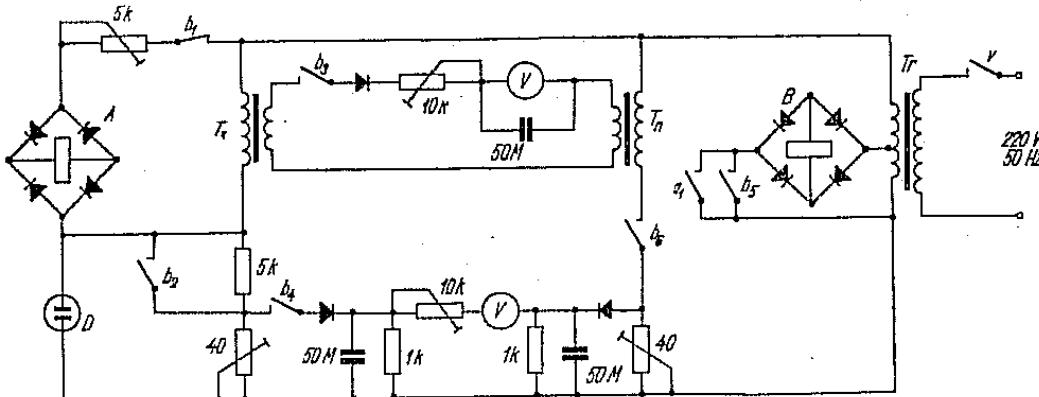
$$C = \frac{1}{4\pi^2 L_1}$$

Kapacitu vinutí lze také snadno vypočítat z napětí U_0 a U_1 , a kmitočtu f

$$C = \frac{U_0}{U_1 \cdot 2 \pi f \cdot R}$$

27. Měření výstupních transformátorů při sériové výrobě

Při sériové kontrole výstupních transformátorů se neměří všechny elektrické parametry, nýbrž jen ty, které jsou pro správnou funkci transformátoru nezbytné. Aby bylo měření rychlé, používá se různých jednoúčelových kontrolních zařízení, na kterých se měří porovnávacími metodami. U výstup-

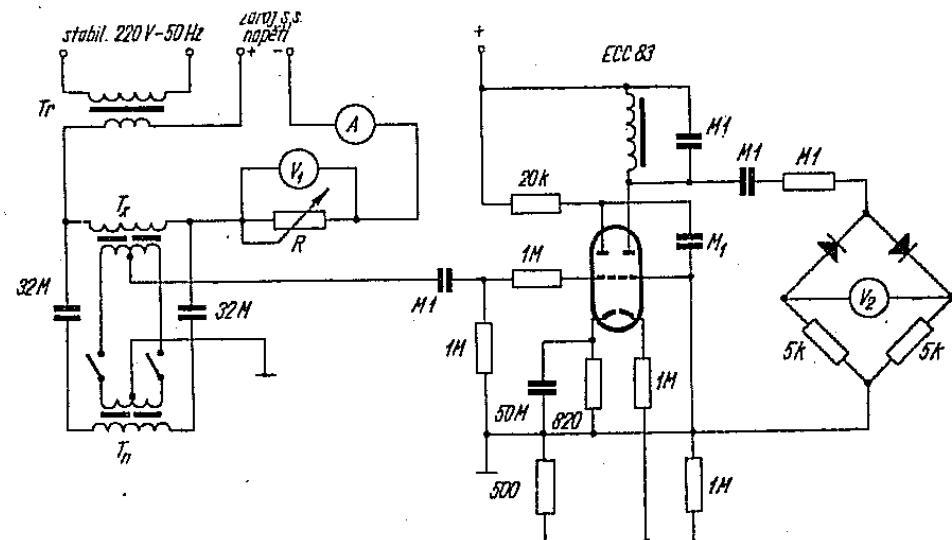


Obr. 98. Zapojení pro hromadné zkoušení výstupních transformátorů

ních transformátorů se kusově zkouší jen elektrická izolační pevnost, měří se převod a primární indukčnost.

Na obr. 98 je zapojení pro sériové zkoušení výstupních transformátorů srovnávací metodou s transformátorem — normálem. Zařízením lze kontrolovat správnost zapojení vývodů vinutí, tj. přehození vývodů primárních a sekundárních, dále převod transformátoru, smysl vinutí cívek, jakož i impedanci primárního vinutí při 50 Hz. Síťové napětí připojené přes vypínač v a transformované transformátorem Tr je přivedeno na elektrické připojné body pro primární vinutí zkoušeného transformátoru Tx, s paralelně připojenou větví, ve které je relé A a doutnavka D. Jsou-li správně připojeny vývody primárního vinutí Tx, je impedance tohoto vinutí poměrně velká, takže výstupním transformátorem poteče menší proud než obvodem přes relé A, které se spne. Budou-li přehozené primární vinutí Tx se sekundárním vinutím, poteče menší impedance sekundárního vinutí větší proud než přes relé A, takže toto nespne. Tento indikuje doutnavku D. Přitažením relé A se spne kontakt a, který připojí

na okruh relé B napětí, relé B přitáhne, čímž se sepnou kontakty : b₅ (drží nadále relé B pod proudem), b₆ (připojí měrné napětí k transformátoru — normálu Tn), b₂ (zkratuje ochranný odpor), b₃ (měří převod a smysl vinutí transformátoru), b₄ (měří srovnáváním impedanci primárního vinutí) a rozpojí kontakt b₁ (který odpojí relé A). Měridla M₁ (převod) a M₂ (impedance) mají vyznačená povolená toleranční pole výhylky. Po přerušení napájení vypínačem v lze vyměnit Tx a pokračovat v měření. Toto měření je rychlé a pro běžnou



Obr. 99. Zdokonalené zapojení pro hromadné zkoušení výstupních transformátorů

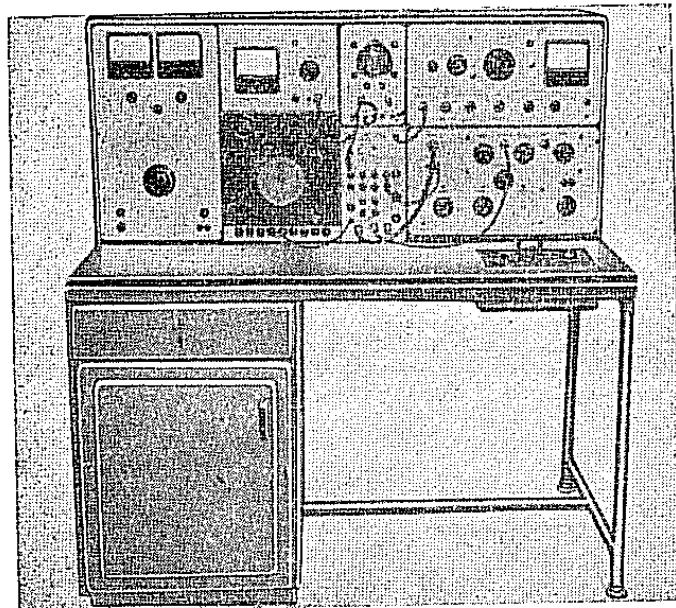
praxi dostatečně přesné. Normál výstupního transformátoru Tn musí mít střední hodnoty měřených veličin. Zařízení se cejchuje a nastavuje se dvěma stejnými transformátory jakosti Tn. Tohoto zařízení lze použít pro transformátory, u kterých není předepsána stejnosměrná předmagnetizace.

Obdobné, avšak dokonalejší, zkoušební zařízení pro sériovou kontrolu výstupních transformátorů i se stejnosměrnou předmagnetizací znázorňuje obr. 99. Měřený výstupní transformátor Tx je zapojen do série s transformátorem Tr, který má funkci zdroje střídavého napětí, dále se stejnosměrným regulovatelným zdrojem s malým vnitřním odporem, a s ampérmetrem A, který měří stejnosměrný předmagnetizační proud a nakonec s měrným odporem R, s paralelně připojeným elektronkovým voltmetrem V_i. Transformátor Tr je napájen ze stabilizované sítě 50 Hz a dodává do obvodu potřebné střídavé napětí, které vytváří na odporu R určité napětí, jež závisí na velikosti impedance primárního vinutí Tx.

Nastavení pro měření indukčnosti se provádí s transformátorem — nor-

málem, zapojeným na místo L_x , který má minimální povolenou indukčnost. Celý obvod se napájí střídavým napětím z Tr a stejnosměrným napětím takové velikosti, aby obvodem protékal stejnosměrný proud předepsané hodnoty. Tento proud se kontroluje ampérmetrem A. Odpor R se nastaví na vhodnou velikost, aby výchylka V_1 měla určitou zaokrouhlenou hodnotu, která při vlastním měření bude maximální povolenou výchylkou. Změnou odporu R

Pro komplexní měření parametrů výstupních transformátorů je výhodné jednoúčelové měřicí zařízení, na kterém je možno provádět všechna potřebná měření. Na obr. 100 je takový měřicí stůl, používaný pro ověřovací měření v ADAST, n. p., v Dubnici n. V. Na tomto stole lze vhodným propojením vestavěných měřicích přístrojů měřit činné odpory vinutí, indukčnosti a kapacity vinutí, lineární, nelineární a fázové zkreslení, převod, oteplení vinutí apod.



Obr. 100. Jednoúčelový měřicí stůl pro měření výstupních transformátorů

se změní i předmagnetizace, a proto ji musíme upravit a znova kontrolovat výchylku na V_1 . Při měření transformátoru Lx nesmí být výchylka V_1 větší, než byla při nastavení s transformátorem — normálem.

Dalším měřením, které se zde dělá současně, je měření převodu a smyslu vinutí. Paralelně k transformátoru Tx je připojen i transformátor, normál Tn , přes kondenzátory, které oddělí stejnosměrnou složku. Sekundární vinutí obou transformátorů jsou spojena přes vypínače, kterými lze spojit jedno nebo druhé sekundární vinutí. Středy obou těchto vinutí jsou připojeny k elektronkovému voltmetru V_2 , který pracuje jako indikátor. Protože jsou oba transformátory zapojeny proti sobě, neukazuje indikátor V_2 žádnou výchylku, jsou-li vinutí obou transformátorů souhlasná. Různí-li se počet závitů některého vinutí, nebo je-li některé vinutí zapojeno obráceně, indikuje voltmetr V_2 výchylkou, že transformátor Tx je vadný.

IX. Typizované výstupní transformátory

n. p. ADAST Dubnica

Účelem zavedení řady typizovaných výstupních transformátorů bylo zmenšit jejich široký sortiment, který v ČSSR existoval. Výstupní transformátory používané v nízkofrekvenčních zesilovačích rozhlasových a v televizních přijímačích se totiž vyráběly individuálně v podnicích, které taková elektronická zařízení vyráběly. Každý závod měl svou vlastní, proto jiným závodům odlišnou, konstrukci i výrobní technologii. Výsledek toho byl, že existovaly celé řady výstupních transformátorů, které měly stejné elektrické parametry nebo které se vzájemně jen nepatrně lišily. Rozdílná bývala hlavně technologie, ať už způsob vinutí cívek, impregnace, nebo jiné provedení vnějších přípojných míst elektrických či mechanických. Přitom mnohé konstrukce byly neekonomické, zastaralé a mnohé ani nevykazovaly takové vlastnosti, jaké měly mít.

Tento stav trval mnoho let. Výrobní závody si byly vědomy, že vlastní výroba transformátorů není ekonomická; vždyť musely často pořizovat drahé lisovací nástroje, které nebyly plně využity. Závody musely mít dále různé zvláštní strojní vybavení, které nebyvalo vždy nejmodernější ani plně využité, takže produktivita nebyla vysoká.

Tak vznikl požadavek, aby byly výstupní transformátory a transformátory vůbec vyráběny mimo závod v kooperaci. Tak vznikla specializovaná výroba transformátorů v n. p. Adamovské strojírny v Dubnici n. Váhom. Sem se podle plánu měla postupně přenášet a v celostátním měřítku soustředovat výroba transformátorů pro sdělovací techniku. Byly zde vytvořeny předpoklady pro hromadnou výrobu transformátorů s využitím nejhospodárnější technologie.

Protože však jednotlivé závody, které zadávaly výrobu svých transformátorů do tohoto podniku, trvaly na dodržení „své technologie“, nestalo se nic, co by podstatně změnilo stávající situaci; snad jen to, že výroba transformátorů byla soustředěna pod jednu střechu. Za tohoto stavu nebylo možné zavést ekonomickou a moderní výrobu transformátorů.

Tento nepříznivý stav začala řešit vývojová skupina při Adamovských strojírnách v Dubnici n. V. Nejprve se předpokládalo, že bude možné sjednotit stávající typy výstupních transformátorů, avšak nepodařilo se to. Bylo vidět, že musí být vytvořeno cosi nového, univerzálního, dobrého a hlavně levného,

co by vyhovovalo požadavkům dnes i v budoucnu. Byl proto proveden průzkum u hlavních odběratelů, aby se zjistily všechny požadavky na množství i jakost, na konstrukci i technologii apod., a to i se zřetelem na nové, preferované typy elektronek a reproduktorů.

Po průzkumu bylo jasné, že musí vzniknout nová řada typizovaných výstupních transformátorů. Z této řady si bude moci konstruktér různých nf zařízení vybrat podle katalogu potřebný vhodný typ. Bylo nutné dát konstruktérům potřebnou dokumentaci a katalogy, obdobně jako je tomu i u jiných typizovaných součástek ve sdělovací technice. Výstupní transformátor se tak stane běžnou typizovanou součástkou slaboproudé elektrotechniky. Vývoj byl usměřen tak, aby vystihoval světovou úroveň a současně aby při výrobě vznikly úspory na materiálu i pracnosti.

Celý návrh řady výstupních transformátorů byl podrobně projednán připořímkovým řízením v koordinační komisi, ve které byly zástupci všech zainteresovaných výrobních závodů, včetně obchodu a EZÚ.

Hlediska, kterými se řídil návrh typizovaných výstupních transformátorů, byla následující:

a) Připravovaná řada výstupních transformátorů je určena převážně pro rozhlasové a televizní přijímače a obdobná nf zařízení, do maximálního výkonu 10 W, osazená moderními, preferovanými typy elektronek a reproduktorů.

b) Sekundární impedance výstupních transformátorů se musí přizpůsobit, podle vyjádření výrobce reproduktorů (r. 1960), vyráběným typům reproduktorů, pro impedance kmitacích cívek 4 a 5 Ω. Impedance kmitacích cívek 5 Ω se časem přestane vyrábět, takže do budoucna lze uvažovat s používáním impedance 4 Ω.

c) Preferované výkonné elektronky, kterých se bude používat v koncových stupních nf zařízení jsou:

EL 84 — ECL 82 — PCL 82 — UCL 82 — PL 82 — PL 84.

d) Velikost přenášeného výkonu je určena se zřetelem na normu IEC, a to: 3 — 5 — 10 W.

Využití střídavého výkonu, který mohou poskytnout vybrané elektronky podle bodu c), při dodržení přípustného nelineárního zkreslení:

Při jednočinném zapojení v třídě A

elektronka EL 84 pro jakostní přednes	maximálně 3 W
elektronka EL 84 pro méně jakostní přednes	maximálně 5 W
elektronka ECL 82	maximálně 3 W
elektronka PCL 82	maximálně 3 W
elektronka UCL 82	maximálně 3 W
elektronka PL 82	maximálně 3 W
elektronka PL 84	maximálně 3 W

e) Hodnoty primárních impedancí výstupních transformátorů jsou voleny po dohodě s výrobcem elektronek.

Pro jednočinné zapojení v třídě A

elektronka EL 84	4500 Ω (a 5600 Ω)
elektronka ECL 82	5600 Ω
elektronka PCL 82	5600 Ω
elektronka UCL 82	5600 Ω
elektronka PL 82	4000 Ω
elektronka PL 84	2400 Ω

Pro dvojčinné zapojení v třídě AB

elektronky 2 × EL 84 2 × 4000 Ω

f) Šířka přenášeného kmitočtového pásma má mít tři obměny:

1. Pro jakostní přednes s kmitočtovým rozsahem 40 až 16 000 Hz.
2. Pro dobrý přednes s kmitočtovým rozsahem 60 až 15 000 Hz.
3. Pro méně jakostní přednes s kmitočtovým rozsahem 100 až 10 000 Hz.

Na dolním i horním mezním kmitočtu je povolen útlum — 3 dB.

Bylo rozhodnuto, aby pro elektronky EL 84, ECL 82, PCL 82, UCL 82 a PL 82 obsahovala řada všechny jakostní třídy. Pro elektronku PL 84, které se používá hlavně v nf zesilovačích televizorů, se nebude dělat transformátor jakosti podle bodu 3. Pro dvojčinné zapojení elektronek EL 84 se má uvažovat jen jakostní provedení podle bodu 1, protože těchto výstupních transformátorů se bude používat hlavně v jakostních nf zařízeních.

g) Potřebná primární indukčnost jednotlivých výstupních transformátorů, nutná pro přenos dolního mezního kmitočtu podle f) při dané impedanci podle e) je následující:

Elektronka	Impedance [Ω]	Dolní mezní kmitočet [Hz]	Potřebná primární indukčnost [H]
PL 84	2400	60	6
		40	8,6
PL 82	4000	100	5,5
		60	9,5
		40	13,5
EL 84	4500	100	6,5
		60	10,5
		40	15,5
ECL 82	5600	100	7
PCL 82		60	11,5
UCL 82		40	17,5
2 × EL 84	2 × 4000	40	40

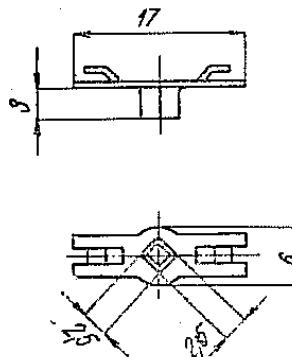
h) Použité transformátorové plechy na jádra výstupních transformátorů mají být tvaru EI, podle normy Tesla NT-N 001, se ztrátovým číslem 1,6 W/kg, tloušťky 0,35 mm, lakované.

i) Při návrhu transformátorů se má počítat v okénku pro vinutí s místem pro další přídavná vinutí, jako kompenzační, zpětnovazební apod., která bude zákazník podle potřeby požadovat.

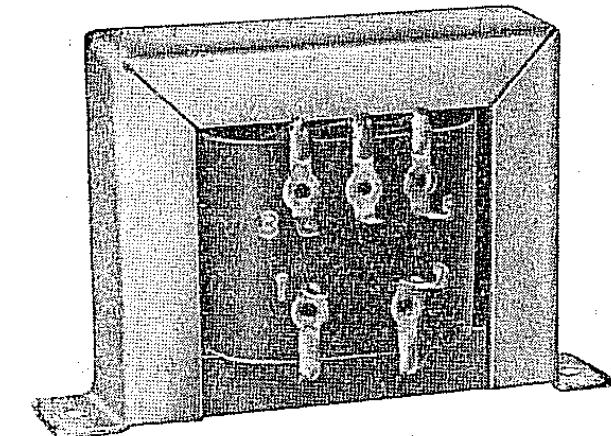
Výstupní transformátory jsou konstruovány podle nejnovějších poznatků, s přihlédnutím k maximálně možné úspoře materiálů a mezdl.

Cívky výstupních transformátorů jsou vinuty na těleska bakelizovaného papíru (pakotextu) měděným lakovaným vodičem, bez čel. Způsob vinutí bez čel je zvolen, mimo jiné přednosti, také pro možnost poměrně snadného zavedení vícenásobného vinutí cívek. Navinuté cívky jsou chráněny z otevřených stran, tj. v místech, kde přicházejí do styku s plechy, izolačními vložkami z lakovaného papíru, tloušťky 0,1 mm.

Vývody mají textilní izolační trubičky s barevným odlišením primárního a sekundárního vinutí. Vyvedené a očištěné vodiče jsou připájeny do oboustranných pájecích ok, upevněných na ochranné krycí pásce. Do budoucna se uvázuje, že vývody budou k pájecím okům přivařovány. Pájecí oka jsou na obr. 101.



Obr. 101. Pájecí oko podle normy Tesla NTN 013-E



Obr. 102. Provedení typizovaných výstupních transformátorů při velikosti transformátorových plechů EI 20

Izolace mezi vinutím a jednotlivými vrstvami

Mezi jednotlivými vrstvami primárního vinutí, se zřetelem na malé průměry vodičů, je použito prokladového papíru P 30, podle ČSN 50 2616, o tloušťce 0,03 mm. Prokládá se vždy po dvou vrstvách, asi uprostřed vrstvy.

Všechny vrstvy sekundárního vinutí jsou prokládány jedním závitem elek-

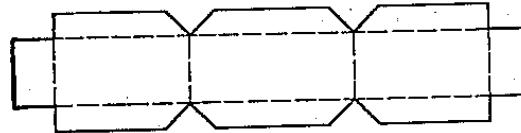
troizolační fólie Umafol E, tloušťky 0,07 mm, nebo leskou lepenkou podle ČSN 50 3178, tloušťky 0,1 mm.

Izolaci mezi primárním a sekundárním, popř. i jiným vinutím tvoří dvě vrstvy elektrické izolační fólie Umafol E, tloušťky 0,07 mm, popř. dvě vrstvy lakovaného papíru podle ČSN 34 6561, tloušťky 0,1 mm.

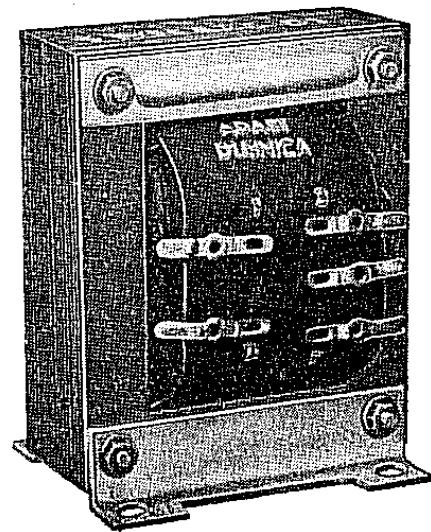
Na poslední vrstvu vinutí jsou navinuty dvě vrstvy elektrické izolační fólie (viz výše) a jedna vrstva lesklé lepenky 0,1 mm či lakovaného papíru 0,1 mm. Není-li elektrická izolační fólie, lze použít tři vrstvy lakovaného papíru tloušťky 0,1 mm.

Bližší údaje o prokladech ve vinutí jsou v navíjecích předpisech pro typizované výstupní transformátory, které jsou uvedeny dále.

Stahování typizovaných výstupních transformátorů je dvojí. U transformátorů malých, do velikosti plechů EI 20 včetně, je



Obr. 103. Vložka do držáku NT-N 008 z drážkové lepenky ČSN 50 3178



Obr. 104. Provedení typizovaných výstupních transformátorů od velikosti transformátorových plechů EI 25

použito stahovacích držáků podle normy Tesla NT-N 008, provedení A nebo B. Obr. 102 představuje typizovaný výstupní transformátor podle provedení A. Stahovací držák je vyložen vložkou z drážkové lepenky, obr. 103.

U výstupních transformátorů větších, tj. od velikosti plechů EI 25 výše, je použito typizovaných stahovacích prvků, a to stejných jako u typizovaných transformátorů napájecích, obr. 104.

K šasi se transformátor přichytí šrouby nebo nýty, nebo při provedení NT-N 008 prostým zatočením praporků, provlečených příslušnými otvory v šasi.

Řezné hrany transformátorových plechů u smontovaných transformátorů se natírají modrým nitrolakem.

Vzduchové mezery tvoří vložka z lakovaného papíru, vkládaná mezi styčné plochy plechů EI.

Smontované výstupní transformátory jsou impregnovány ve vakuum, běžnou impregnační látkou T 100.

Tab. 32. Přehled technických parametrů typizovaných výstupních transformátorů

Typ transformátoru	9 WN 676 01	9 WN 676 02	9 WN 676 03	9 WN 676 04	9 WN 676 05	9 WN 676 06
Primární impedance Sekundární impedance Vhodný pro elektroniku	4500 Ω 4 a 5 Ω EL 84	4500 Ω 4 a 5 Ω EL 84	5600 Ω 4 a 5 Ω EL 84	5600 Ω 4 a 5 Ω EL 84	4000 Ω 4 a 5 Ω PL 82	4000 Ω 4 a 5 Ω PL 82
Převod Primární induktance Stojnosměrný proud Šířka kmitačového pásma	33,5—30 15,5 H 60 mA 100 Hz až 16 000 Hz 3 W ~ 870 g	33,5—30 6,5 H 60 mA 100 Hz až 10 000 Hz 5 W ~ 465 g	38,4—33,4 18 H 35 mA 40 Hz až 16 000 Hz 3 W ~ 890 g	38,4—33,4 7 H 35 mA 100 Hz až 10 000 Hz 3 W ~ 445 g	31,6—28,3 13,5 H 45 mA 40 Hz až 16 000 Hz 3 W ~ 885 g	31,6—28,3 6,5 H 45 mA 100 Hz až 10 000 Hz 3 W ~ 465 g
Typ transformátoru	9 WN 676 07	9 WN 676 08	9 WN 676 11	9 WN 676 13	9 WN 676 15	9 WN 676 18
Primární impedance Sekundární impedance Vhodný pro elektroniku	2 × 4000 Ω 4 a 5 Ω 2 × EL 84	2400 Ω 4 Ω PL 84	4500 Ω 4 a 5 Ω EL 84	5600 Ω 4 a 5 Ω EL 84	4000 Ω 4 a 5 Ω PL 82	4000 Ω 4 a 5 Ω PL 84
Převod Primární induktance Stojnosměrný proud Šířka kmitačového pásma	44,6—40 40 H — 40 Hz až 16 000 Hz 10 W ~ 1020 g	24,5 8,6 H 70 mA 40 Hz až 16 000 Hz 3 W ~ 580 g	33,5—30 10,5 H 50 mA 60 Hz až 15 000 Hz 3 W ~ 575 g	38,4—33,4 11,5 H 35 mA 60 Hz až 15 000 Hz 3 W ~ 570 g	31,6—28,3 9,5 H 45 mA 60 Hz až 15 000 Hz 3 W ~ 570 g	24,5—22 6 H 70 mA 60 Hz až 15 000 Hz 3 W ~ 565 g

* Aby se rozlišilo provádění typizovaných výstupních transformátorů v držáku podle NT-N 008, bylo stanoveno, že u transformátorů s držákem v provedení A (pro příkrovní až nepríkrovní zdroje) zdroj září září zdrojem: 0 WN 676 05, — 04, — 03, — 11, — 13, — 18 a s držákem v provedení B (s praporky pro příkrovní zdroje) zdroj září zdrojem: 0 WN 676 02, — 04, — 03, — 11, — 13, — 15, — 16, — 18. Tímto technickými parametry značí se v obou typových označení skutečně.

Zvláštní způsob stažení má výstupní transformátor s typovým označením 9 WN 676 08, který je stažen prodlouženými držáky, které slouží jak k uchycení transformátoru k šasi, tak i k uchycení montážní destičky. Tento typ transformátoru je určen pro televizory s plošnými spoji, např. Lotos, Kamelie apod. Vývody nejsou vyvedeny do pájecích ok, nýbrž do „pájecích pecek“.

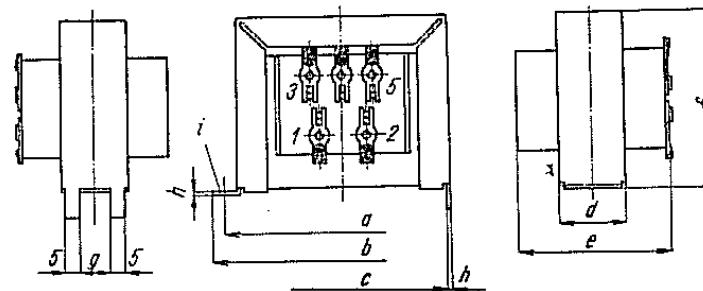
Typizované výstupní transformátory jsou konstruovány tak, aby vyhověly zkouškám odolnosti proti klimatickým vlivům kategorie 666, podle ČSN 35 8031.

Prostředí, ve kterém budou transformátory pracovat, má být bez chemických vlivů a umístění transformátorů má být takové, aby v těsné blízkosti nebylo nic, co by nepřípustně transformátory ohřívalo.

U typizovaných výstupních transformátorů je zaručovaná elektrická izolační pevnost:

1. Primární vinutí proti sekundárnímu vinutí a primární vinutí proti kostře 2000 V, 50 Hz.
2. Sekundární vinutí proti kostře 500 V, 50 Hz.

Tab. 33. Základní rozměry typizovaných výstupních transformátorů s transformátorovými plechy velikosti EI 20



Typové označení výstupního transformátoru	a	b	c	d	e	f	g	h	i
9 WN 676 11									
9 WN 676 13	72	70	62	28	~52	~55	14	1	Ø3,5
9 WN 676 15									
9 WN 676 18									
9 WN 676 02	72	70	62	23	~45	~55	9	1	Ø3,5
9 WN 676 04									
9 WN 676 06									

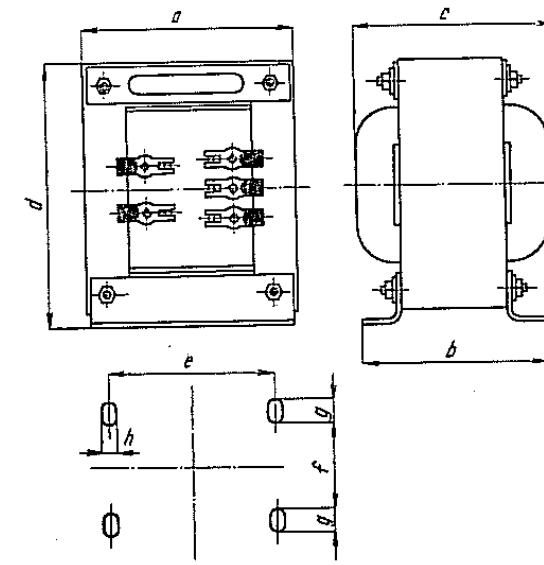
Všechny míry [mm]

Každý typizovaný transformátor má číselný znak, označení výrobce, kódované datum výroby podle NT-K 021 a očíslované vývody (pájecí oka), podle platné dokumentace.

Všechny uvedené návrhy byly podrobně projednány a schváleny již zmíněnou koordinační komisi, a to ve formě, která zde byla zhruba uvedena.

Řada typizovaných výstupních transformátorů má technické parametry uvedené v tab. 32.

Tab. 34. Základní rozměry typizovaných výstupních transformátorů s transformátorovými plechy velikosti EI 25
(Provedení A)



Typové označení výstupního transformátoru	a	b	c	d	e	f	g	h
9 WN 676 01	62,5							
9 WN 676 03		~49		~58		~79	50	~34,2
9 WN 676 05							6,8	4,8
9 WN 676 07	62,5	~56	~65	~79	50	~41,2	6,8	4,8

Všechny míry [mm]

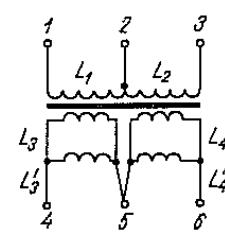
Nejdůležitější rozměry řady typizovaných výstupních transformátorů jsou uvedeny v tab. 33 a 34.

V dalších tab. 35 až 37 jsou uvedeny nejdůležitější údaje z navíjecích předpisů typizovaných výstupních transformátorů.

Po výrobních ověřovacích zkouškách bylo provedeno měření a zhodnocení navrhnuté typizované řady výstupních transformátorů. V tab. 38 jsou uvedeny naměřené výsledky a na obr. 105 je kmitočtové zkreslení jednotlivých typů

Tab. 35. Navíjecí list pro typizovaný výstupní transformátor 9 WN 676 07

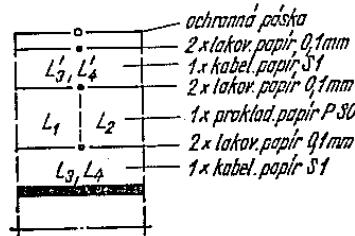
Schéma zapojení



Impedance mezi vývody

Typ transformátoru	1-2	2-3	4-5	4-6
9 WN 676 07	4000 Ω	4000 Ω	4 Ω	5 Ω

Umístění a izolace vinutí



Navíjecí předpis

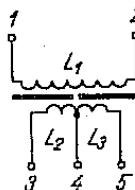
Typ transformátoru	Vinutí $L_1 = L_3$		Vinutí $L_3 = L'_3$		Vinutí $L_4 = L'_4$		Vnitřní rozměr těleska mm
	Počet závitů	\varnothing vodiče mm	Počet závitů	\varnothing vodiče mm	Počet závitů	\varnothing vodiče mm	
9 WN 676 07	2950	0,18	88	0,67	11	0,67	25×32

Poznámka: Vinutí L_1 a L_3 vinout současně, tj. vždy na jeden proklad dvě vrstvy vedle sebe. Při konečném zapojování spojit konec vinutí L_1 se začátkem vinutí L_2 .

transformátorů. Z uvedených údajů vyplývá, že řada splňuje určené požadavky a že návrh i výpočet byly správné.

Tab. 36. Navíjecí list pro typizované výstupní transformátory: 9 WN 676 02, 9 WN 676 04, 9 WN 676 06

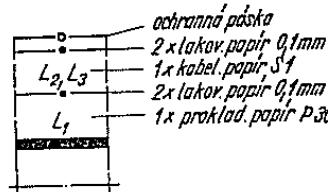
Schéma zapojení



Impedance mezi vývody

Typ transformátoru	1-2	3-4	3-5
9 WN 676 02	4500 Ω	4 Ω	5 Ω
9 WN 676 04	5600 Ω	4 Ω	5 Ω
9 WN 676 06	4000 Ω	4 Ω	5 Ω

Umístění a izolace vinutí



Navíjecí předpis

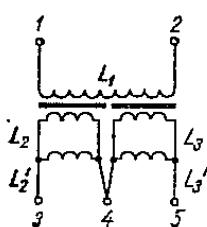
Typ transformátoru	Vinutí L_1		Vinutí L_3		Vinutí L_4		Vnitřní rozměr těleska mm
	Počet závitů	\varnothing vodiče mm	Počet závitů	\varnothing vodiče mm	Počet závitů	\varnothing vodiče mm	
9 WN 676 02	2350	0,15	71	0,75	8	0,75	20×20
9 WN 676 04	2320	0,14	62	0,75	8	0,75	20×20
9 WN 676 06	1960	0,16	62	0,75	8	0,75	20×20

Bylo dále potvrzeno, že vinutí bez čel se hodí pro sériovou výrobu transformátorů, že je levné (paketexová těleska jsou velmi levná), že se snadno dělají odbočky a vývody. Také impregnační látka dokonale vnikne do vinutí, mezi závity. Elektrická izolační fólie, použitá jako proklady, je velmi výhodná, hlavně svými elektrickými vlastnostmi a nakonec i vzhledem. Ještě výhodnější je použití fólie polyethylentereftalátové, která je mechanicky i elektricky mnohem odolnější než fólie Umapol E, i když její tloušťka je pouhých 0,04 mm.

Tab. 37. Navijecí list pro typizované výstupní transformátory:

9 WN 676 01; 9 WN 676 03, 9 WN 676 05,
9 WN 676 11, 9 WN 676 13, 9 WN 676 15, 9 WN 676 18

Schéma zapojení



Impedance mezi vývody

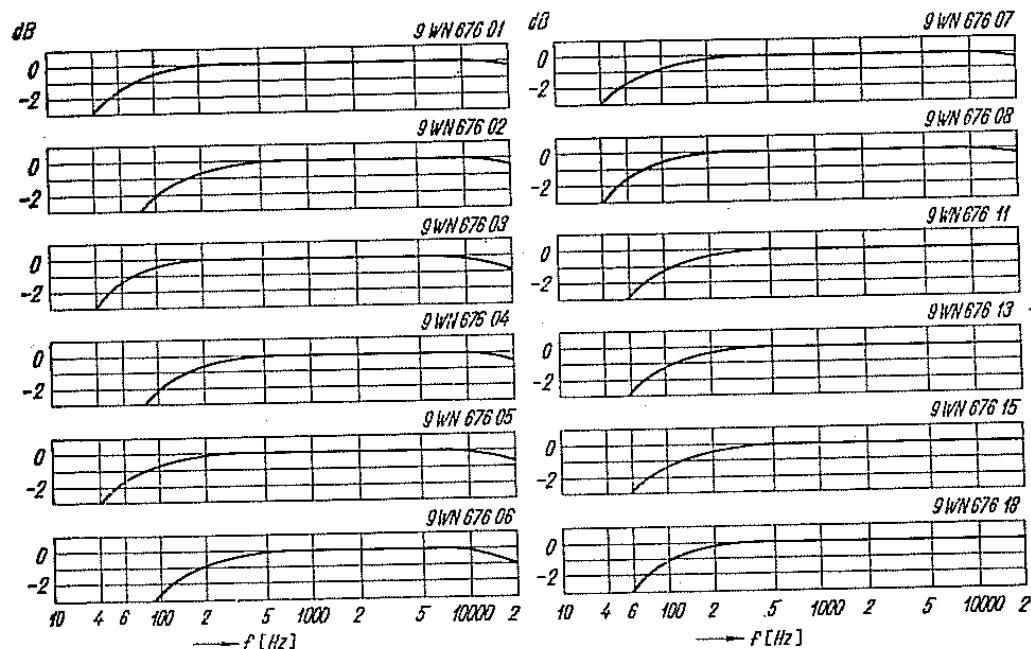
Typ transformátoru	1-2	3-4	3-5
9 WN 676 01	4500 Ω	4 Ω	5 Ω
9 WN 676 03	5600 Ω	4 Ω	5 Ω
9 WN 676 05	4000 Ω	4 Ω	5 Ω
9 WN 676 11	4500 Ω	4 Ω	5 Ω
9 WN 676 13	5000 Ω	4 Ω	5 Ω
9 WN 676 15	4000 Ω	4 Ω	5 Ω
9 WN 676 18	2400 Ω	4 Ω	5 Ω

Umístění a izolace vinutí

ochranná páška
2x lakov. papír 0,1mm
1x kabel. papír S-1
2x lakov. papír 0,1mm
1x proklad. papír P-SO
2x lakov. papír 0,1mm
1x kabel. papír S-1

Navijecí předpis

Typ transformátoru	Vinutí L_1		Vinutí $L_2 = L'_2$		Vinutí $L_3 = L'_3$		Vnitřní rozměry těleska mm
	Počet závitů	Ø vodiče mm	Počet závitů	Ø vodiče mm	Počet závitů	Ø vodiče mm	
9 WN 676 01	2950	0,18	88	0,67	11	0,67	25×25
9 WN 676 03	3380	0,15	88	0,67	14	0,67	25×25
9 WN 676 05	2780	0,19	88	0,67	10	0,67	25×25
9 WN 676 11	2450	0,16	74	0,56	7	0,56	20×25
9 WN 676 13	2700	0,14	70	0,56	11	0,56	20×25
9 WN 676 15	2300	0,16	73	0,56	8	0,56	20×25
9 WN 676 18	1800	0,18	74	0,56	8	0,56	20×25



Obr. 105. Kmitočtové charakteristiky typizovaných výstupních transformátorů

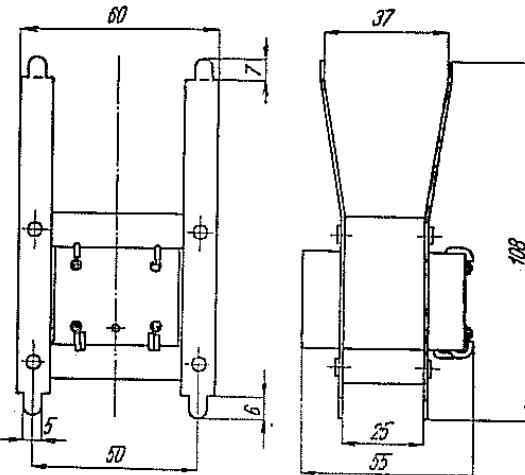
Tab. 38. Některé výsledky měření typizovaných výstupních transformátorů

Typizovaný výstupní transformátor	Činné odpory vinutí [Ω]				Primární indukčnost H	Převody	
	L_1	$L_2 (+L'_2)$	$L_3 + L'_3$	$L_4 + L'_4$		4 Ω	5 Ω
9 WN 676 01	295	0,3	0,03	—	15,5	33,5	30
9 WN 676 02	240	0,34	0,04	—	8,5	33,5	30
9 WN 676 03	440	0,29	0,05	—	18,4	38,5	33,5
9 WN 676 04	268	0,2	0,03	—	8	38,5	33,5
9 WN 676 05	220	0,3	0,04	—	12,9	31,5	28,4
9 WN 676 06	190	0,28	0,04	—	7,3	31,5	28,4
9 WN 676 07	245	0,245	0,25	0,03	61	44,5	40
9 WN 676 08	360	0,65	—	—	8,5	24,5	—
9 WN 676 11	270	0,32	0,04	—	9,8	33,5	30
9 WN 676 13	385	0,32	0,04	—	12,1	38,5	33,5
9 WN 676 15	260	0,32	0,03	—	8,9	31,5	28,4
9 WN 676 18	158	0,32	0,03	—	5,8	24,5	22

Stažení transformátorových plechů stahovacími držáky podle NT-N 008 je v porovnání se všemi ostatními způsoby nejlevnější. Transformátorové plechy od EI 25 je výhodnější stahovat nýty, ať už ocelovými nebo hliníkovými, než šrouby.

Tab. 39. Typizovaný výstupní transformátor 9 WN 676 08

Rozměrový náčrt



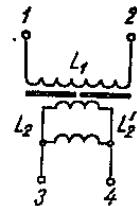
Impedance mezi vývody

1-2	3-4
2400 Ω	4 Ω

Umístění a izolace vinutí

ochranná páská
2x lakov. papír 0,1 mm
L ₂ ' 1x kabel. papír S-1
2x lakov. papír 0,1 mm
L ₁ 1x proklad. papír P-30
2x lakov. papír 0,1 mm
L ₂ 1x kabel. papír S-1

Schéma zapojení



Navíjecí předpis

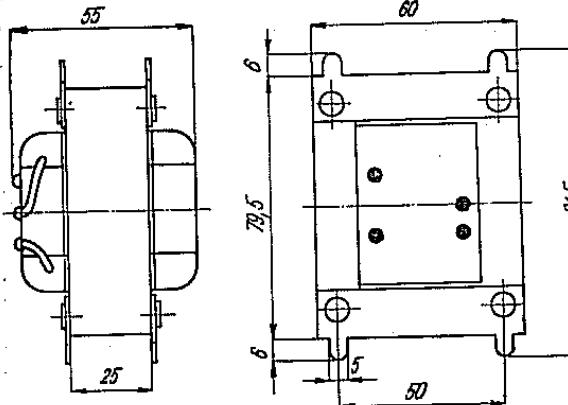
Vinutí L ₁		Vinutí L ₂ = L ₂ '		Vnitřní rozměr těleska mm
Počet závitů	\varnothing vodiče mm	Počet závitů	\varnothing vodiče mm	
2600	0,14	106	0,425	20 × 25

Rozměry a technické údaje o typizovaném výstupním transformátoru 9 WN 676 08 jsou uvedeny v tab. 39.

Uvedená řada typizovaných výstupních transformátorů, určených pro přenos tónových kmitočtů, byla doplněna typem 9 WN 676 10, určeným pro konecový stupeň vertikálního vychylování v televizorech, osazený elektronkou PCL 82 a pro vychylovací cívky obrazovky s vychylovacím úhlem 110°. Rozměry a potřebné technické údaje jsou uvedeny v tab. 40.

Tab. 40. Typizovaný výstupní transformátor 9 WN 676 10

Rozměrový náčrt



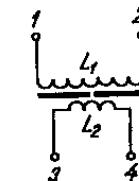
Impedance mezi vývody

1-2	3-4
4000 Ω	48 Ω

Umístění a izolace vinutí

ochranná páská
3x elektroizol. fólie pet.
1x proklad. papír P-30
3x elektroizol. fólie pet.
1x elektroizol. fólie pet.
1x lakov. plátno 0,1 mm ze všech čtyř stran

Schéma zapojení



Navíjecí předpis

Vinutí L ₁		Vinutí L ₂		Vnitřní rozměr těleska mm
Počet závitů	\varnothing vodiče mm	Počet závitů	\varnothing vodiče mm	
4000	0,15	440	0,475	25 × 25

X. Závěr

Úkolem knihy bylo seznámit čtenáře s problematikou výstupních transformátorů a usnadnit konstrukční návrh. Z knihy budou čerpat ponejvíce radioamatéři, pro které bývá výstupní transformátor při práci nepostradatelný. Mnohdy nebývá jeho návrh a provedení správné, a to pro neznalost základních teoretických vztahů. Takový transformátor plní svoji funkci jen částečně a lze ho použít jen pro méně náročná zařízení. Protože však požadavky na jakost reprodukce stále stoupají a v radioamatérských vyrůstají nové technické kádry, je nutné, aby se seznámili s výstupními transformátory natolik, aby je dokázali navrhovat levné, dobré a účelné, jak to dnešní stav techniky vyžaduje.

V knize je probrána teorie jen do té míry, pokud je pro návrh výstupního transformátoru nezbytná. Znalost lze prohloubit z literatury (uvedené na konci knihy). Pro běžné navrhování výstupních transformátorů však stačí rozsah znalostí uvedený v knize. V praxi bývá nutné navrhnutý transformátor dokonale vyzkoušet měřením a podle výsledků popř. upravit. Ani při dokonalých teoretických znalostech nelze obvykle dosáhnout hned napoprvé požadovaných vlastností výstupního transformátoru.

Transformátor pro hromadnou výrobu se navrhuje se zřetelem na rozptyly, které vznikají používáním materiálu rozdílné jakosti, a na výrobní tolerance při hromadné výrobě.

Vývoj v transformátořích se ubírá ve světě směrem k používání orientovaného materiálu, ať již jako výlisků transformátorových plechů, nebo materiálu vinutého do jader C. Používáním velmi jakostních magnetických materiálů lze vyhovět požadavkům na miniaturizaci. Používání prokladů (elektroizolačních fólií), různých nových druhů vodičů a impregnace prodělává v současné době podstatné změny. Také navíjecí technika se zdokonaluje a stává se produktivnější, a to zaváděním vícenásobného navíjení apod.

I když mají výstupní transformátory nevýhody, bude se jich používat dále, ačkoliv existují zapojení koncových stupňů bez výstupních transformátorů.

Literatura

- [1] ЦИКИН, Г., С.: Трансформаторы низкой частоты. (Transformátory nízkých kmitočtů). Moskva: Gosudarstvennoe izdatelstvo literatury po voprosam svjazi i radio 1950.
- [2] Šipovskij, A. N.: Jakostní nízkofrekvenční zesilovače. Praha: SNTL 1954.
- [3] Pitsch, H.: Hilfsbuch für die Funktechnik. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft GEEST & PORTIG. K. G. 1957.
- [4] Domsch, G. H.: Der Übertrager der Nachrichtentechnik. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft GEEST & PORTIG. K. G. 1953.
- [5] Dobrský, J.: Navíjení cívek elektrických přístrojů. Praha: SNTL 1960.
- [6] Hassedenteufel, J.: Izolanty. Praha: SNTL 1962.
- [7] Pacák, M.: Fyzikální základy radiotechniky. Praha: Orbis (jako příloha časopisu Radioamatér) 1939—1940.
- [8] Feldkeller, R.: Theorie der Spulen und Übertrager. Stuttgart: Hirzel 1958.
- [9] Feldkeller, R.: Tabellen und Kurven zur Berechnung von Spulen und Übertragern. Vyd. 3. Stuttgart: Hirzel 1958.
- [10] Makarius, J.: Impregnace elektrických strojů a přístrojů. Praha: SNTL 1960.
- [11] Karen, O.: Radiotechnika pro každého. Praha: SNTL 1960.
- [12] Faktor, Z. a Hroudňák, L. a Starý, I. a Fischer, Z.: Magneticky měkké materiály ve sdělovací technice. Praha: SNTL 1961.
- [13] Hlávka, J.: Síťidlové proudy. Praha: SNTL 1958.
- [14] Trnka, Z.: Theoretická elektrotechnika I. Praha: SNTL 1956.
- [15] Stříž, V.: Katalog elektronek. Praha: SNTL, SVTL 1960.
- [16] Lukeš, J.: Věrný zvuk. Praha: SNTL, SVTL 1962.
- [17] Rejmánek, M.: Řada miniaturních nízkofrekvenčních transformátorů. Sdělovací technika (1959), čís. 12.
- [18] Vlastnosti jader C v podmínkách stojnosměrné předmagnetizace. Sdělovací technika (1961), čís. 10, str. 368.
- [19] K výpočtu nízkofrekvenčních sdělovacích transformátorů. Sdělovací technika (1960), čís. 7, str. 252.
- [20] Konečný, L.: Výpočet sdělovacích transformátorů. Amatérské rádio. (1961) čís. 9, 10, 11.
- [21] Kabeš, K.: Výpočet tlumivek s normalizovanými plechy řezu EI a M. Sdělovací technika (1956), čís. 12, str. 370.
- [22] Univerzální výstupní transformátor. Radiotehnik (Praha) (1943), čís. 6—7.
- [23] Philip, Z.: Návrh transistorového nf zesilovače pro bateriový přijímač. Sdělovací technika. (1958), čís. 10, str. 367.
- [24] Svozil, M.: Měření indukčnosti předmagnetovaných cívek. Sdělovací technika. (1960), čís. 3, str. 84.
- [25] Faktor, Z.: K návrhům miniaturních sdělovacích transformátorů. Sdělovací technika (1958), čís. 12, str. 446.

- [26] Svozil, M.: Ferromagnetické materiály a nový typ jader pro transformátory a tlumivky. Sdělovací technika (1959), čís. 3, str. 104.
- [27] Pajgrt, M.: Příklad návrhu dvojčinného zesilovače s tranzistory OC30. Sdělovací technika (1961), čís. 8, str. 286.
- [28] Krňák, M.: Návrh výstupního transformátoru. Amatérské rádio (1954), čís. 9, str. 201.
- [29] Jakubík, I.: Transformátor pre ultralineárne zapojenie z Ortopermu. Amatérské rádio (1962), čís. 3, str. 68.
- [30] Huneck, M.: Die Dimensionierung von Eintakt A-Endstufen mit Transistoren. Radio und Fernsehen (1961), čís. 5, str. 156, čís. 6, str. 177.
- [31] Belovický, Z.: Vakuová impregnácia slabopružých transformátorov. Sdělovací technika (1962), čís. 1, str. 13.
- [32] Švarc, K.: Nová technologie pájení hliníku. Sdělovací technika (1960), čís. 6, str. 216.
- [33] Vacuumsschmelze, A. G.: Weichmagnetische Werkstoffe. Hanau 1957.
- [34] Dauter, O.: Die Berechnung von Tonfrequenzübertragern. Funk Technik (1961), čís. 1, str. 15.
- [35] Taeger, W.: Ausgangsübertrager für Endverstärker. Funk Technik (1961), čís. 19—23.

**PRAKTIČKÉ
ELEKTROTECHNICKÉ
PŘÍRUČKY**

Svazek 35

**Luboš Slezák
VÝSTUPNÍ TRANSFORMÁTORY**

DT 621.314.2

Vydalo Státní nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51, Praha 1, v roce 1964 jako svou 5070. publikaci v řadě elektrotechnické literatury — Redakce elektrotechnické literatury — Odpovědný redaktor inž. Vladimír Kotěšovec — Vazbu navrhl inž. Josef Václavíček — Grafická úprava a technická redakce: Vlasta Vítová — Vytiskl TISK, knižní výroba, n. p., Brno, provoz 1 — 180 stran, 105 obrázků, 40 tabulek. — Typové číslo L26-EI-IV-31/5097/X. — Vydání první — Náklad 2600 výtisků — 11,79 AA, 12,58 VA D-16*40318

05-38

Cena váz. výtisku Kčs 14,—
63/III-8-E1

Publikace je určena pro techniky ve výrobních závodech a laboratořích slaboproudého průmyslu i pro vyspělejší radioamatéry

04-535-64	Kčs 14,—
-----------	----------

PRAKTICKÉ
ELEKTROTECHNICKÉ
PŘÍRUČKY

Dosud vyšlé svazky:

Brand, Hrbek: **Montáž, provoz a údržba asynchronních strojů**

Pohanka: **Stavba síťových transformátorů**

Lavante, Sellner: **Opravy televizních přijímačů**

Soukup: **Příručka pro revizi elektrických zařízení**

Macháček: **Rádce instalacního elektromontéra**

Přibyslavský a kol.: **Příručka silnoproudé elektrotechniky**

Milés, Písek: **Rádce elektromontéra venkovních vedení nn**

Tříška: **Montáž malých a středních transformátorů**

Diefenbach: **Příručka pro opravy přijímačů**

Knotek: **Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorů**

Soukup, Hrubec, Zeman, Ručný: **Údržba elektrických zařízení**

Kliká: **Jednoduchá telefonní a signální zařízení**

Makarius: **Impregnace vinutí elektrických strojů a přístrojů**

Drábek: **Opravy tranzistorových přijímačů**

Tříška: **Jistění**

Soukup: **Základní kurs elektrotechniky**

Petr a kol.: **Montáž a údržba elektrických přístrojů pro automatizaci**

Dömhöfer, Hatlar, Weinwurm: **Využití základních materiálů ve sloboapravdém průmyslu**

Cermák: **Měření a zkoušení tranzistorů**

Přibyslavský a kol.: **Rádce elektromontéra kabelů**

Pavláček, Vrchovský: **Opravy elektrické výzbroje motorových vozidel**

Přibyslavský: **Elektrická pohon asynchronními motory**

Vašítek: **Typizované napájecí transformátorky**

Buxbaum: **Svitící trubice**

Eichler: **Demodulační obvody**

Barták, Michel, Philipp: **Mezifrekvenční zesilovače**

Hošek: **Materiály pro techniku velmi krátkých vln**

Milés: **Elektrotechnické měření pro montéry**

Oravský, Svatoň, Vomela: **Televizní obvody**

Hoffner: **Směšovače a oscilytory**

Kvítek, Slezák, Staněk: **Vstupní obvody přijímačů**

04 - 535 - 64

05/38 Kčs 14,-

L. SLEZÁK

Výstupní transformátory

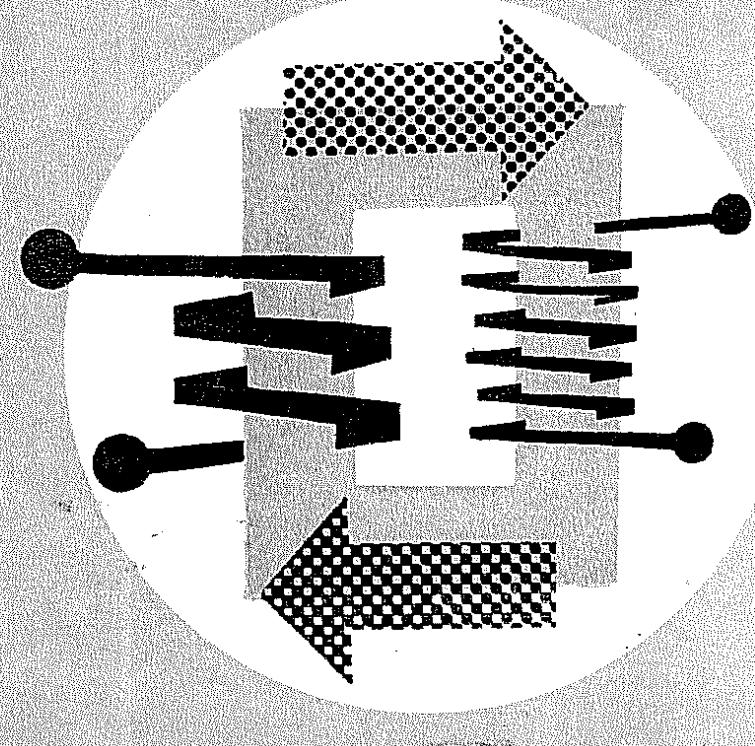
35



Elektrotechnika

VÝSTUPNÍ TRANSFORMÁTOŘE

SNTL



LUBOŠ SLEZÁK

**Výstupní
transformátory**

PRAHA 1964

STÁTNÍ NAKLADATELSTVÍ
TECHNICKÉ LITERATURY