

Jak se dělá transformátor

Ing. Vladimír Burlak,
Mdexx Magnetronic Devices, s. r. o., Trutnov

Transformátory (z latinského *transformare* – přeměňovat, přetvářet) mění střídavý proud o určitém napětí na střídavý proud stejné frekvence a jiného napětí. Jde vlastně o elektrické stroje bez pohyblivých částí. Transformátory pro rozvod elektrické energie jsou označovány jako silové. Silové transformátory se dělí podle výkonu na malé a velké, podle počtu fází na jednofázové a třífázové a podle způsobu chlazení na suché a olejové. Ve sdělovací elektrotechnice se používají oddělovací a vazební transformátory nepatrných výkonů pro změnu napětí nízkých i vysokých frekvencí. Obecně lze transformátory použít k transformaci (změně) napětí, proudu a impedance. Podstatnou výhodou je schopnost bezpečného galvanického oddělení sekundárních obvodů od síťového rozvodu, který je jednoduše uzemněný. Pro tyto vlastnosti má transformátor své pevné místo všude tam, kde je nutné plnit požadavky kladené na napájecí a přizpůsobovací obvody a přístroje. Další text bude vzhledem ke značné šíři problematiky zaměřen pouze na malé jednofázové transformátory, na základní princip jejich činnosti, konstrukci a na způsob výpočtu malého jednofázového transformátoru pro napájení elektronických přístrojů.

Transformátor se v principu skládá ze dvou izolovaných cívek na společném jádru z magnetizovatelného feromagnetického materiálu, např. železa v podobě vzájemně izolovaných transformátorových plechů (obr. 1).

Do vstupního (primárního) vinutí je přiváděn střídavý proud, a tím i elektrická energie. Tato energie je prostřednictvím střídavého magnetického toku v magnetickém jádru předávána dále. Protože magnetický tok periodicky mění svou velikost i směr s frekvencí vstupního proudu, indukuje se ve výstupním (sekundárním) vinutí napětí stejné frekvence.

Výstupní napětí transformátoru má stejnou frekvenci jako vstupní napětí.

Napětí naprázdno

Napětí naprázdno je napětí na nezátěženém sekundárním vinutí. Indukované napětí na sekundárním vinutí lze vypočítat podle indukčního zákona ze vztahu:

$$u_0 = -N \cdot \Delta\Phi / \Delta t \quad (\text{V}; -, \text{Wb}, \text{s}) \quad (1)$$

kde

u_0 je špičková hodnota napětí naprázdno,
 N počet závitů,

$\Delta\Phi/\Delta t$ změna magnetického toku v čase.

Při sinusovém průběhu magnetického toku je špičková hodnota indukovaného napětí:

$$\begin{aligned} u_0 &= \Phi \cdot \omega \cdot N = B \cdot Q_{\text{Fe}} \cdot \omega \cdot N \cdot 10^{-4} = \\ &= 2 \cdot \pi \cdot B \cdot f \cdot N \cdot Q_{\text{Fe}} \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad (\text{V}; \text{T}, \text{Hz}, -, \text{cm}^2) \quad (2)$$

kde

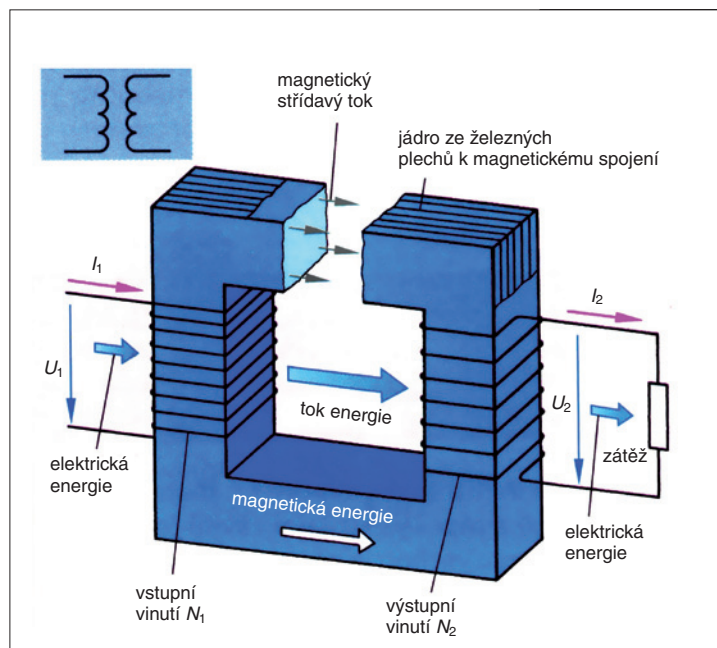
ω je úhlová frekvence,

B špičková hodnota magnetické indukce,
 Q_{Fe} plocha průřezu jádra.

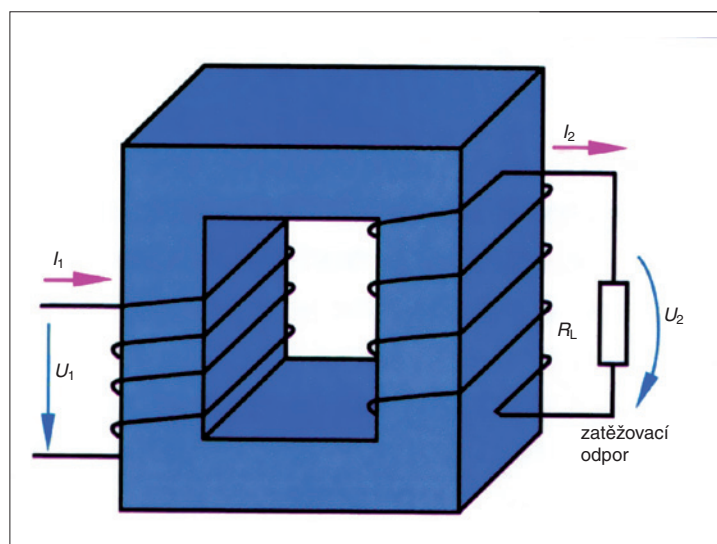
$$\Rightarrow U_0 = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot B \cdot f \cdot N \cdot Q_{\text{Fe}} \cdot 10^{-4} \quad (\text{V}; \text{T}, \text{Hz}, -, \text{cm}^2) \quad (3)$$

Špičková hodnota u_0 napětí naprázdno závisí na špičkové hodnotě B magnetické indukce, na ploše průřezu Q_{Fe} jádra, na úhlové frekvenci ω a na počtu závitů N . Z hlavní rovnice pro transformátor (1) je zřejmé, že napětí naprázdno je lineárně závislé na počtu závitů sekundárního vinutí.

Kvůli izolaci transformátorových plechů je průřez samotného železa menší než průřez jádra včetně izolace. Tato okolnost je při výpočtech zohledňována tzv. činitelem plnění železa f_{Fe} , který podle typu plechů bývá v rozpětí 0,8 až 0,98.



Obr. 1.
Konstrukce transformátoru



Obr. 2.
Napětí a proudy v transformátoru

Převodní poměry napětí, proudů a impedancí

Převod napětí a proudů

Jsou-li na jádro z transformátorových plechů podle obr. 2 navinuta dvě vinutí s poměrem závitů 1 : 2, např. 500 závitů a 1 000 závitů, cívka s 1 000 závitů se připojí na střídavý zdroj 50 V/50 Hz a potom se změří napětí na cívce s 500 závitů, výstupní napětí je o něco menší než polovina vstupního napětí. Tentýž magnetický tok prochází oběma vinutími, obě cívky jsou vzájemně magneticky svázané.

Většinou se používají transformátory s těsnou magnetickou vazbou a s jádrem bez vzduchové mezery. Pro ideální transformátor se 100% magnetickou vazbou bez rozptylového magnetického toku platí:

$$\Phi_1 = \Phi_2 \Rightarrow B_1 \cdot Q = B_2 \cdot Q$$

(Wb; T, cm²)

kde

Φ_1 je magnetický tok buzený primárním vinutím,

Φ_2 magnetický tok procházející sekundárním vinutím,

B_1 magnetická indukce v primárním vinutí,

B_2 magnetická indukce v sekundárním vinutí,

Q průřez jádra.

$$\Rightarrow \frac{U_1}{f \cdot N_1} = \frac{U_2}{f \cdot N_2} \Rightarrow \frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}$$

(V, Hz, –)

kde

U_1 je primární napětí,

f frekvence,

N_1 počet závitů primárního vinutí,

U_2 sekundární napětí,

N_2 počet závitů sekundárního vinutí.

Na nezátíženém transformátoru jsou napětí ve stejném poměru jako příslušné počty závitů na vinutích. Poměr vstupního napětí k výstupnímu se nazývá převod transformátoru.

Jsou-li obě vinutí transformátoru navinuta na jedné cívce, umísťuje se vinutí s menším počtem závitů obvykle jako vnější. U transformátoru s těsnou vazbou je přenos výkonu téměř beze ztrát, platí tedy:

$$P_1 = P_2 \Rightarrow U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

(6)

kde

P_1 je příkon,

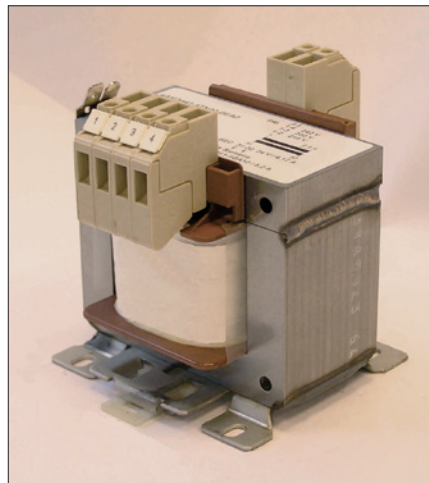
P_2 výstupní výkon.

U zatíženého transformátoru jsou proudy v opačném poměru než počty závitů.

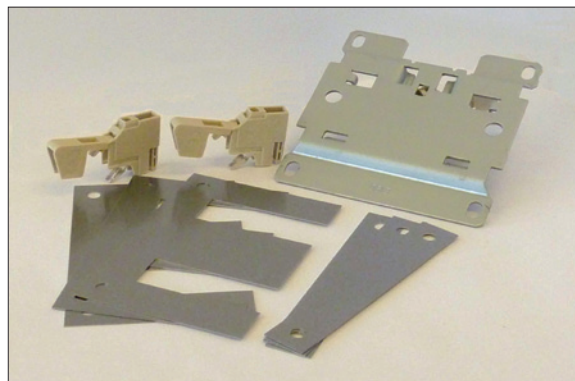
U reálného transformátoru je třeba počítat se ztrátami a výstupní proud je trochu menší než u transformátoru ideálního.

Převod impedancí

Ve sdělovací technice a radiotechnice se transformátor často používá k impedančnímu přizpůsobení (koncového stupně zesilovače k reproduktoru apod.). Ideálního přenosu vý-



Obr. 3. Malý přístrojový transformátor



Obr. 4. Transformátorové plechy EI, svorky a patní úhelník

konu je totiž dosaženo, je-li impedance zdroje přizpůsobena impedanci zátěže (činné složky jsou stejně velké a jalové složky se kompenzují). Jsou-li impedance rozdílné, lze výstupní impedanci budiče (zdroje, zesilovače) přizpůsobit pomocí transformátoru. Pro transformátor platí:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad Z_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2}$$

(Ω; V, A, –)

kde

Z_1 je vstupní impedance,

U_1 primární napětí,

I_1 primární proud,

Z_2 výstupní impedance,

U_2 sekundární napětí,

I_2 sekundární proud,

N_1 počet závitů primárního vinutí,

N_2 počet závitů sekundárního vinutí.

Transformátor převádí impedance s druhou mocninou poměru počtu závitů.

Převod transformátorů

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

(–; V, –, A, Ω)

kde

p je převod transformátoru,

U_1 primární napětí,

U_2 sekundární napětí,

N_1 počet závitů primárního vinutí,

N_2 počet závitů sekundárního vinutí,

I_1 primární proud,

I_2 sekundární proud,

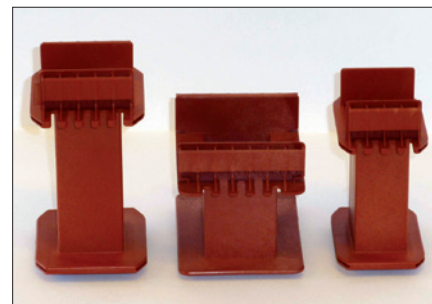
Z_1 vstupní impedance,

Z_2 výstupní impedance.

Malé transformátory

Konstrukce malých transformátorů

Jádra malých transformátorů (obr. 3) se skládají z transformátorových plechů normalizovaných tvarů a velikostí. Podle tvaru se rozeznávají plechy tvaru: EI, M, UI a L (EI plechy na obr. 4). Používají se i jiné tvary, stejně jako jádra vinutá z plechového pásu (C jádra a toroidní prstencová jádra). Při použití transformátorových plechů s orientovanou strukturou docílenou válcováním ve směru indukčních čar jsou hysterezní ztráty velmi malé. Šrouby nebo nýty používané ke spojení musí být od plechů odizolovány. Vnější plochy plechů musí být chráněny izolací a proti korozi např. impregnačním lakem.



Obr. 5. Cívková tělesa (kostry cívek)

Vinutá C jádra jsou navinuta z válcovaného železoniklového pásu, jehož krystalová struktura je orientována ve směru válcování, a tedy i ve směru vinutí jádra. Ztráty přemagnetizací v tomto směru jsou velmi malé. Kolmo ke směru válcování jsou naopak ztráty přemagnetizací značné. Transformátory s vinutými C jádry mají malý rozptyl a velmi malé ztráty v železném jádru. Vinutá C jádra jsou navinuta a slepena, rozříznuta a pak opět složena.

Jednotlivá vinutí malých transformátorů jsou většinou vinuta lakovaným měděným drátem, vinou se na cívková tělesa obvykle vyliisovaná z plastu (obr. 5). Jednotlivé vrstvy vinutí jsou prokládány vrstvou lakovaného papíru nebo plastové fólie. Izolační vrstva není nutná, je-li rozdíl hodnot napětí mezi začátkem a koncem vinutí jedné vrstvy menší než 25 V.

Mezi primárním a sekundárním vinutím je zpravidla izolace, a to podle potřeby několika vrstev. U některých transformátorů připojovaných na síť bývá mezi vinutími ještě navíc jednovrstvé ochranné vinutí s jediným vyvedeným vývodem. Je-li toto ochranné mezi-vinutí spojeno s ochranným vodičem, nemůže při porušení izolace dojít ke zkratu mezi vinutími. Mimoto ochranné vinutí odstiňuje elektrická pole.

Jsou vyráběny také transformátory s vinutím z hliníkového nebo měděného pásku z tenké fólie, podobné fólii pro výrobu kondenzátorů. Protože je u těchto transformátorů tvořena každá vrstva jediným závitem, je napětí mezi vrstvami velmi malé. Takové transformátory jsou velmi odolné proti průrazu napětím mezi vrstvami. Pro velké výkony jsou používány tenké hliníkové nebo měděné plechy.

Přípustná proudová hustota pro měděná vinutí malých transformátorů je v závislosti na velikosti a chlazení mezi 1 až 6 A/mm².

Cívky jsou po navinutí opatřeny svorkami (obr. 7), ke kterým jsou připájeny vývody z vinutí.

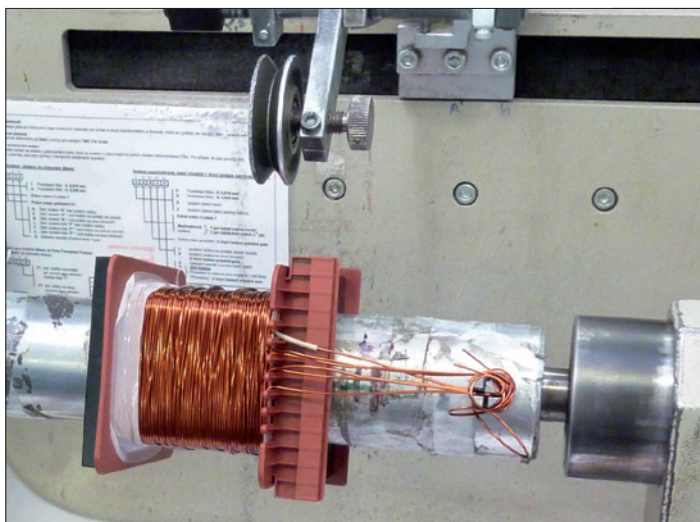
Potom se dovnitř vkládají transformátorové plechy. Plechy jsou zasouvány do dutiny cívky střídavě z jedné a z druhé strany, magnetický obvod se skládá bez vzduchové mezeře. Při jiném způsobu montáže je vložen dovnitř svazek plechů E a proti němu svazek I a oba svazky jsou k sobě na bocích přivařeny (obr. 8). Každý tvar plechů nebo typ jádra vyžaduje při sestavování magnetického obvodu jiný pracovní postup.

Kompaktní transformátor se následně opatří typovým štítkem, impregnuje ponořením do laku a po vysušení a vytvrzení se přezkouší na elektrické hodnoty a izolační vlastnosti (obr. 9). Na konci procesu výroby se transformátory znovu kompletně přezkoušejí.

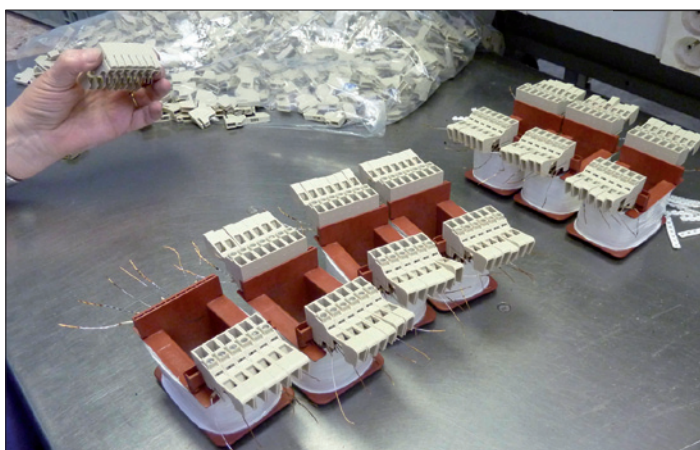
Zjednodušený výpočet parametrů malého transformátoru

Stručný přehled postupu výpočtu:

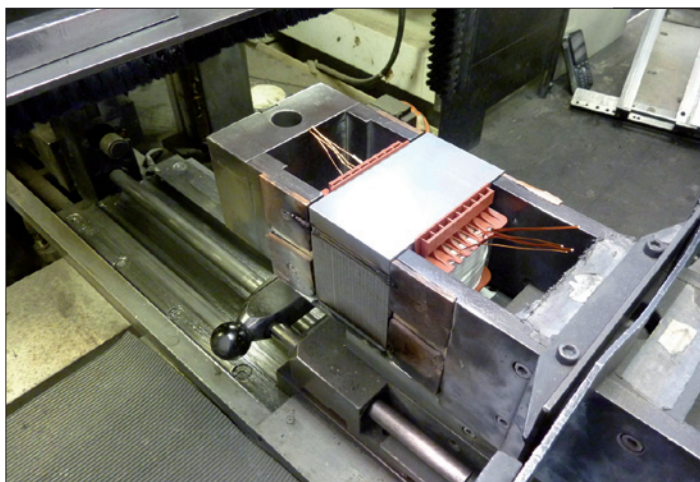
1. Stanoví se výkon P_2 a příkon P_1 transformátoru.
2. Vypočítá se průřez jádra Q transformátoru.
3. Určí se počet závitů na 1 V.
4. Vypočítá se počet závitů jednotlivých vinutí.
5. Vypočítá se primární proud I_1 .
6. Určí se průměry vodičů jednotlivých vinutí.
7. Zkontroluje se, zda se vinutí vejde na cívku.



Obr. 6. Navíjení vinutí



Obr. 7. Nasazování svorek



Obr. 8. Transformátor se svařovaným jádrem EI

Zadání

Máme navrhnout co nejmenší síťový transformátořek pro zdroj 12 V/1 A, primární vinutí na 230 V/50 Hz. Kvůli rezervě napětí pro případné použití stabilizátoru zvýšíme na sekundáru transformátoru napětí o 10 % na 13,5 V.

Postup

1. Stanovíme výkon P_2 a příkon P_1 transformátoru.

Výkon P_2

$$P_2 = U_2 \times I_2 = 13,5 \times 1 = 13,5 \text{ V} \cdot \text{A} \quad (9)$$

Účinnost malých síťových transformátorků je asi 85 %.

Příkon P_1

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{P_2}{0,85} = \frac{13,5}{0,85} = 15,9 \text{ V} \cdot \text{A} \quad (10)$$

kde

P_1 je příkon,
 P_2 výkon,
 η účinnost.

2. Vypočítáme průřez jádra Q transformátoru.

Průřez jádra Q je určen příkonem transformátoru. Teoretické zdůvodnění tohoto faktu není sice příliš složité, není však záměrem tohoto článku, proto se spokojíme s konečným vzorcem:

Průřez jádra Q :

$$Q = 1,2 \cdot \sqrt{P_1} = 1,2 \cdot \sqrt{15,9} = 3,98 \approx 4 \text{ cm}^2 \quad (11)$$

kde

Q je průřez jádra,
 P_1 příkon.

Zvolíme typové jádro transformátoru EI 60/20 s průřezem středního sloupku $2 \times 2 = 4 \text{ cm}^2$.

3. Určíme počet závitů na 1 V.

Úpravou základní transformátorové rovnice získáme napětí při navinutí jednoho závitu při indukci 1,5 T (při té jsou nyní nominálně určovány ztráty v plechovém jádru).

$$\frac{U_0}{N} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot B \cdot f \cdot Q \cdot 10^{-4} = 4,44 \cdot 1,5 \cdot 50 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 0,1332 \text{ V/závit} \quad (12)$$

Jmenovitý počet závitů na 1 V potom je:

$$N_{jm} = \frac{N}{U_0} = \frac{1}{0,1332} = 7,5 \text{ závitů/V} \quad (13)$$

kde

N_{jm} je jmenovitý počet závitů na 1 V.

4. Vypočítáme počet závitů jednotlivých vinutí.

Abychom respektovali alespoň přibližně ztráty vznikající v transformátoru, od počtu primárních závitů asi 5 % odečteme a naopak k počtu sekundárních závitů asi 5 % přičteme. Pro jednotlivá vinutí tedy dostaneme:

$$N_1 \approx (U_1 \times N_{jm}) - 5\% \approx 230 \times 7,51 \times 0,95 = 1\,641 \text{ závitů}$$

$$N_2 \approx (U_2 \times N_{jm}) + 5\% \approx 13,5 \times 7,51 \times 1,05 = 107 \text{ závitů}$$

5. Vypočítáme primární proud I_1

K výpočtu průměru vodiče primárního vinutí musíme nejdříve vypočítat velikost primárního proudu I_1 .

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{15,9}{230} = 0,0691 \text{ A} \quad (14)$$

6. Určíme průměry vodičů jednotlivých vinutí.

Průřez (a z něho stanovený průměr) vodiče primárního vinutí je potom při hustotě proudu 3 A/mm^2 :

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{I_1}{\sigma_1} \Rightarrow d_1 = 0,65 \cdot \sqrt{I_1} \quad (15)$$

Pro naše zadání platí pro průměr holého a izolovaného vodiče

$$d_1 = 0,65 \cdot \sqrt{I_1} = 0,65 \cdot \sqrt{0,0691} = 0,17 \approx 0,2 \text{ mm} \Rightarrow d'_1 = 0,226 \text{ mm} \quad (16)$$

$$d_2 = 0,65 \cdot \sqrt{I_2} = 0,65 \cdot \sqrt{1} = 0,65 \cdot \sqrt{1} = 0,65 \approx 0,71 \text{ mm} \Rightarrow d'_2 = 0,762 \text{ mm} \quad (17)$$

kde

d_1, d_2 je průměr holého vodiče primárního (sekundárního) vinutí,
 d'_1, d'_2 průměr izolovaného vodiče primárního (sekundárního) vinutí.

$$b_2 = \frac{N_2 \cdot d_2'^2}{a} = \frac{107 \cdot 0,762^2}{26,8} = 2,32 \text{ mm} \quad (20)$$

Takto vypočítáme tloušťky jednotlivých vinutí, sečteme je, přičteme tloušťku izolace, která odděluje jednotlivá vinutí, a k celkovému součtu připočítáme 25 % vzhledem k tomu, že vinutí nikdy nenavineme ideálně těsně a až do krajů v každé vrstvě. Výsledek musí být menší, než je povolená maximální výška prostoru pro vinutí. Je-li tomu tak, je to v pořádku a můžeme bez obav vinout, v opačném případě, je nutné zvolit vodič o menším průměru nebo jádro s větším okénkem. Pro uvažovaný transformátor platí:

$$b = 1,25 \cdot (b_1 + b_2 + b_{izol}) = 1,25 \cdot (3,12 + 2,32 + 0,5) = 7,425 \leq 7,7 \text{ mm} \quad (21)$$



Obr. 9. Závěrečné ověření parametrů transformátoru

7. Zkontrolujeme, zda se vinutí vejde na cívkou.

Z katalogu cívkových těles lze přečíst tyto rozměry:

šířka jedné vrstvy $a = 26,8 \text{ mm}$,
výška prostoru pro vinutí $b = 7,7 \text{ mm}$.

Je-li průměr vodiče d' (pozor! zde je to průměr i s izolací), vejde se do jedné vrstvy a/d' závitů. Je-li potřebný počet závitů N , bude počet vrstev ve vinutí:

$$\frac{N}{a} = \frac{N \cdot d'}{a} \quad (18)$$

Každá vrstva má tloušťku odpovídající průměru vodiče d' , celková tloušťka jednoho vinutí tedy je:

$$b_1 = \frac{N_1 \cdot d_1'^2}{a} = \frac{1641 \cdot 0,226^2}{26,8} = 3,12 \text{ mm} \quad (19)$$

Transformátor lze začít navíjet, zkušební výpočet potvrdil, že se všechna vinutí do vymezeného prostoru s rezervou vejdou.

Závěr

V článku jsou velmi zkráceně popsány hlavní principy činnosti a výpočtu malých jednofázových transformátorů. Téměř zcela vynechána byla tematika výpočtu ztrát, grafických značek, popisu štítků, měření, náhradních schémat a mezních stavů, třífázových transformátorů a autotransformátorů. K těm se snad vrátíme někdy příště. Zvláště by mělo být zdůrazněno,

že malé transformátory musí být obzvlášť dobře zabezpečeny proti úrazu elektrickým proudem, jestliže s nimi přicházejí do styku osoby neznalé, bez elektrotechnické kvalifikace. Používají se např. jako zdroje napětí pro elektrického vrátného, domovní zvonky nebo jako bezpečnostní transformátory pro ruční svítilny a hračky. Transformátory pro hračky jsou výslovně předepsány pro hračky napájené ze síťových zdrojů (např. elektrický vláček). Jmenovité výstupní napětí smí být nejvýše 24 V, výkon nesmí přesáhnout 200 V·A a transformátor musí mít ochrannou izolaci (ochranná třída II).

Pro hračky mohou být použity jen bezpečnostní transformátory s osvědčením EZÚ nebo jiné akreditované zkušebny.

Závěrem bych chtěl všem zájemcům o vlastnoručně navržené a postavené transformátory popřát hodně úspěchů při jejich výpočtech i realizaci.

☒