

Elektrotechnické měření (1)

JAN BOCEK, OK2BNG (jan.bocek@vitkovice.cz)
ING. TOMÁŠ KLIMČÍK, SWL (tomas.klimcik@vitkovice.cz)

Následující text představuje jakýsi pokus o první článek malého cyklu volně navazujících článků na předchozí seriál „MĚŘENÍ OD A DO Z“. Měl by být zaměřen na praktická elektrotechnická měření, která mohou být radioamatérově nějakým způsobem užitečná. Z tohoto záměru pak vychází i jeho forma blízká školnímu protokolu. Je zvolena záměrně a zjištěně - autoři jsou přesvědčeni o nezbytnosti disciplíny v oblasti měření, protože jen tak se dá zajistit, že i po čase (a to poměrně krátkém) nám výsledky k něčemu budou, a že si nebudeme muset vzpomínat, na který útržek papíru jsme si jaký údaj poznačili a zda je to vůbec on.

Budeme se snažit dodržovat i standardní klíšé těchto protokolů spočívající z tvrdošijně se opakujících víceméně neměnných částí jako:

- hlavička
- cíl měření
- schéma zapojení
- použité přístroje
- postup měření
- tabulky naměřených a vypočtených hodnot
- vzorce a příklad výpočtu, grafy
- závěr, vyhodnocení měření a diskuse

Od laskavého čtenáře se očekává, že tuto strohou osnovu tvůrčím způsobem obohatí o své režijní poznámky rychleji ho směřující k cíli, a že ve vlastním zájmu (když už to dalo takovou práci) si vyřeší archivaci svých konkrétních protokolů. Budiž nám toto „školometství“ odpuštěno. Na svoji obhajobu můžeme pouze citovat jistého vojevůdce: „Těžko na cvičišti - lehkou na bojišti“.

Na závěr bychom rádi prohlásili, že veškeré uváděné hodnoty byly skutečně naměřeny na reálných elektrických předmětech.

Měření na transformátoru

Měřil: Jan Bocek
Datum: 20.1.2000

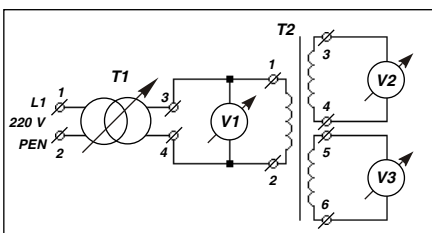
Části:

1. Měření napětí pro výpočet převodu transformátoru
2. Měření naprázdno a výpočet ztrát
3. Měření při zatížení, výpočet výkonu a kontrola oteplení
4. Měření nakrátko a určení impedance transformátoru

Cíl měření:

Zjistit veškeré hodnoty které nám pomohou ověřit použití transformátoru pro konkrétní účel, tj. výstupní napětí, výkon, přípustné proudové zatížení, ztráty, teplotu a impedanci.

1. Měření napětí pro výpočet převodu transformátoru



Obr. 1 - Zapojení transformátoru pro měření převodového čísla.

Použité přístroje:

- T1 regulační trafo 0-250 V, 2,5 A, 950 VA
T2 měřené trafo 100 VA, primár 230 V
1. sekundár 115 V/0,4 A
2. sekundár 24 V/2 A
V1, 2, 3 voltmetry typu MUL do 600V stř.

Postup:

Vycházíme ze schématu zapojení na obr. 1. Postupně zvyšujeme napětí U1 (např. po 25 % jmenovité hodnoty) a odečítáme údaje zbývajících voltmetrů. Pro každé měření vypočteme velikost převodových čísel p1 a p2. Vše zapisujeme do tabulky 1, přičemž si důsledně zvykáme uvádět velikost výchyly α v dílcích, konstantu přístroje pro právě používaný rozsah, a pak teprve velikost naměřené veličiny v příslušných jednotkách.

Výpočty převodů transformátoru (příklad z prvního řádku tabulky):

$$p1 = \frac{U2}{U1} = \frac{5,8}{55} = 0,11$$

$$p2 = \frac{U3}{U1} = \frac{28,5}{55} = 0,52$$

atd.

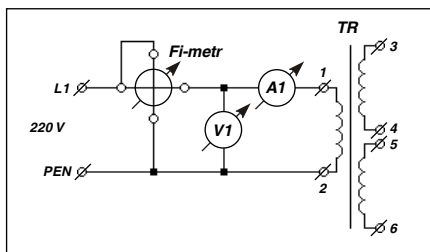
Závěr:

Převodové číslo transformátoru vyjadřuje velikost transformace sekundárního napětí vůči primárnímu a je pro každé vinutí vůči primáru konstantní. Pokud se objeví odchylky, lze je přičíst na vrub nepřesnému odečtu hodnot při měření napětí. V našem případě je odchylka opravdu minimální.

Protože převodové číslo vyjadřuje zároveň i poměr počtu závitů příslušných vinutí, dá se použít např. k ověření velikosti výstupního napětí při změně síťového napětí (např. rozdíl mezi napájením 210V a 235V), pomůže nám při úpravě sekundáru odvinutím nebo přivnutím závitů pro dosažení požadovaného napětí pro stabilizátor nebo při identifikaci neznámého trafo.

Z výše uvedeného též vyplývá, že místo regulačního trafo na jmenovité napětí měřeného transformátoru můžeme použít i zdroj malého střídavého napětí, např. 1-3V.

2. Měření transformátoru naprázdno a výpočet ztrát



Obr. 2 - Zapojení pro měření transformátoru naprázdno

Použité přístroje:

- Fi-metr fázoměr 220 V/5 A
U1 DU10
A1 DU10
TR trafo 100 VA, 220 V/0,45 A; 24 V/4 A ohmtr PU510

Postup:

Vše zapojíme podle obr. 2 - sekundární vinutí zůstává otevřené. Napětí U1 by mělo být co nejlíže jmenovitému napětí trafo. Odpor primárního vinutí R1 je změřen ohmmetrem, cosφ je odečten na fázoměru. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 2.

Výpočty:

Výkon primárního vinutí naprázdno:

$$P1 = U1 \times I1 \times \cos\phi$$
$$P1 = 245 \times 0,085 \times 0,38 = 7,91 \text{ W}$$

Ztráty v mědi primárního vinutí:

$$P_{Cu} = R1 \times I1^2$$
$$P_{Cu} = 20 \times 0,085^2 = 0,14 \text{ W}$$

Ztráty v železe:

$$P_{Fe} = P1 - P_{Cu}$$
$$P_{Fe} = 7,91 - 0,14 = 7,77 \text{ W}$$

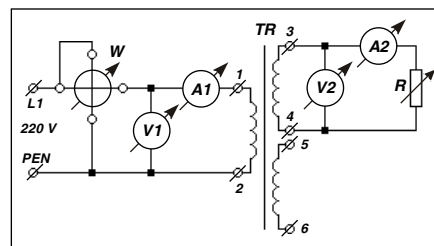
Závěr:

Měřením transformátoru jsme zjistili ztráty naprázdno, které se skládají ze ztrát v primárním vinutí naprázdno a ze ztrát v železe. Z výsledků je patrné, že převažují ztráty v železe. Protože ve stavu naprázdno teče vinutím pouze nepatrný proud, dají se celkové ztráty transformátoru naprázdno s určitou dávkou nepřesnosti pokládat za ztráty v železe.

Výsledky našeho měření by se daly ještě zpřesnit odečtením ztrát v odporech cívek měřících přístrojů (fázoměr a voltmetr).

Měření trafo naprázdno je důležité pro ověření správné funkce magnetického obvodu. U běžných transformátorů bývají ztráty v železe v rozsahu cca 4 - 11 %, u velmi dobrých, např. toroidních, i pouze 1 - 1,5 %. Proto, jsou-li ztráty větší než 20 % jmenovitého příkonu, jedná se o chybu (nejčastěji špatně poskládané plechy, vzduchová mezera v C-jádru či magnetický zkrat).

3. Měření při zatížení, výpočet výkonu a kontrola oteplení



Obr. 3 - Zapojení při měření trafo při zatížení

Použité přístroje:

- V1, A1, A2 DU10
V2 MUL
W MUL
R 44Ω/2,5 A
T 230V/2x24 V/2 A, 100 VA

Postup:

Vycházíme ze schématu na obr. 3. Dříve než začneme, změříme odpor sekundárního vinutí za studena, tj. cca při teplotě 20°C. Pomocí regulačního zatěžovacího odporu R pak v sekundáru skokově zvyšujeme zatížení trafo (tj. proud I2) a odečítáme hodnoty ostatních měřících přístrojů. Trafo záměrně přetížíme o 25 %, necháme ho takto běžet hodinu, a pak opět změříme odpor sekundárního vinutí a porovnáme teplotu trafo, což nám poslouží ke zjištění jeho vnitřní teploty. Údaje jsou v tabulce 3.

Výpočty:

Zdánlivý výkon (příklad výpočtu pro $I_2 = 2\text{ A}$):

$$S = U_1 \times I_1$$

$$S = 245 \times 0,26 = 63,7\text{ VA}$$

Účinnost:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

$$\cos\varphi = \frac{58}{63,7} = 0,91$$

Kontrola vnitřního oteplení transformátoru:

Bylo naměřeno:

- teplota povrchu za studena $t_1 = 20$
- odpor sekundáru za studena $R_{20} = 0,58\Omega$
- teplota povrchu na konci zkoušky $t_2 = 40$
- odpor sekundáru na konci zkoušky (za tepla) $R_{40} = 0,72\Omega$

Z tabulek:

- teplotní součinitel elektrického odporu pro měděné vinutí $\alpha = 3,9 \times 10^{-3} \times K^{-1}$

Vlastní výpočet:

$$t_{nt} = \frac{R_{40} - R_{20}}{R_{20} \times \alpha} + t_1$$

$$t_{nt} = \frac{0,72 - 0,58}{0,58 \times 3,9 \times 10^{-3}} + 20 = 81,8^\circ\text{C}$$

Vnitřní teplota trafo přetíženého o 25 % je okolo 80°C .

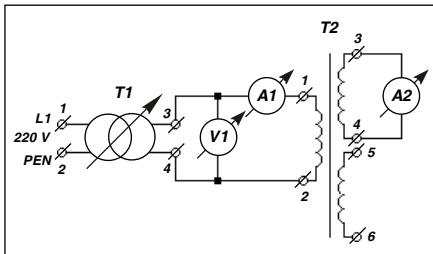
Závěr:

Popisované měření se dá použít k ověření stability trafo při plném zatížení. Pod pojmem stabilita rozumíme dobrou účinnost a dlouhodobou tepelnou odolnost trafo.

Účinnost v % se dá z naměřených hodnot snadno vypočítat jako poměr výkonu ku příkonu násobený 100, přičemž výkon je příkon snížený o ztráty. Protože ztráty se skládají ze ztrát v železe, které jsou při stabilním napájecím napětí konstantní, a ze ztrát v mědi, které jsou závislé na zatížení trafo, bude se se zatížením měnit i účinnost.

Nejjednodušším způsobem kontroly teploty trafo je tzv. „palcová zkouška“ - pokud po hodině provozu udržíme svůj palec pevně přitlačený ke trafo po dobu 1 minuty, je to s teplotou stroje v pořádku. Přesnější je ale ověřit vnitřní teplotu vinutí výpočtem, jak uvádíme výše. Pokud vychází vyšší než 80°C , je třeba snížit jmenovité zatížení.

4. Měření nakrátko a určení impedance transformátoru



Obr. 4 - Schéma zapojení transformátoru při měření nakrátko

Použité přístroje:

- T1 regulační trafo 0-250 V, 2,5 A, 950 VA
 T2 měřené trafo 50 VA, 220 V/0,2 A, 24 V/2 A
 U1, A1, A2 měřicí přístroje typu DU10

Postup:

Transformátor T2 zapojíme podle obr. 4. Regulačním trafem T1 zvyšujeme napětí až do okamžiku, kdy proudy I_1 a I_2 nabudou svých jmenovitých hodnot. Poté odečteme a zaznamenáme velikost napětí U_1 , které se nazývá napětím nakrátko (tabulka 4). Často se používá ve tvaru poměru ke jmenovitému napětí vyjádřeného v procentech a označuje se jako e_k (někdy též u_{1k}).

Výpočty:

Procentní napětí nakrátko:

$$e_k = \frac{U_k}{U_n} \times 100$$

$$e_k = \frac{25,5}{220} \times 100 = 11,6\%$$

Zkratové proudy při jmenovitém napětí:

$$I_{1zkr} = \frac{100 \times I_1}{e_k}$$

$$I_{1zkr} = \frac{100 \times 0,245}{11,6} = 2,11\text{ A}$$

$$I_{2zkr} = \frac{100 \times I_2}{e_k}$$

$$I_{2zkr} = \frac{100 \times 2}{11,6} = 17,25\text{ A}$$

Impedance transformátoru při zkratu:

$$Z_k = \frac{U_1}{I_1}$$

$$Z_k = \frac{25,5}{0,245} = 104\Omega$$

Jmenovitá impedance transformátoru (tj. při jmenovitém napájecím napětí a proudu):

$$Z_n = \frac{100 \times Z_k}{e_k}$$

$$Z_n = \frac{100 \times 104}{11,6} = 896,6\Omega$$

Závěr:

Z měření transformátoru nakrátko a následných výpočtů vyplývá užitečnost tajuplného e_k (nebo též u_{1k}). Toto číslo umožňuje velice snadno získat hodnoty zkratových proudů trafo (důležité při návrhu jištění) a velikosti impedancí, které nás zajímají například při paralelním spojení transformátorů (zátěž se rozděluje v poměru impedancí).

Další použitelnou oblastí jsou ztráty nakrátko. Z fyzikální podstaty transformátoru vychází, že jsou tvořeny zejména ztrátami v mědi, v poměru ke kterým jsou ztráty nakrátko v železe zanedbatelné.

Shrnutí poznatků z měření č. 1

Cílem měření bylo ověřit si postup získání nejzákladnějších informací o transformátoru potřebných pro radioamatéra: převod, výkon, ztráty a oteplení, impedanci. Dobré je uvést i fyzikální podstatu transformátoru. Z ní pak vyjde, při jakém režimu lze ty, či ony informace získat.

Demonstrována měření jsou úmyslně zjednodušena na svoji „ještě fungující“ podstatu, protože radioamatérovi jde v dřtivé většině případů o věrohodné informace, ne o exaktní laboratorní hodnoty. Proto například nejsou prováděny korekce spotřeby použitých přístrojů a uváděny přesnosti měření.

% U1	U1			U2			U3			p1	p2
	α	k	[V]	α	k	[V]	α	k	[V]		
25	55	1	55	29	0,2	5,8	57	0,5	28,5	0,11	0,52
50	110	1	110	60	0,2	12,0	57	1,0	57	0,11	0,52
75	82	2	164	90	0,2	18,0	85	1,0	85	0,11	0,52
100	110	2	220	47	0,5	23,5	113	1,0	113	0,11	0,51

U1			I1			R1 [Ω]	cosφ0	P1 [W]	PCu [W]	PFe [W]
α	k	[V]	α	k	[mA]					
49	5	245	17	5	85	20	0,38	7,91	0,14	7,77

U1			I1			I2			ek [%]	I1zkr [A]	I2zkr [A]
α	k	[V]	α	k	[mA]	α	k	[A]			
25,5	1	25,5	49	5	245	20	0,1	2	11,6	2,11	17,25

U1			I1			U2			I2			P			S [VA]	cosφ
α	k	[V]	α	k	[mA]	α	k	[V]	α	k	[mA]	α	k	[W]		
49	5	245	24	5	120	53	0,5	26,5	29	20	580	11	2	22	29,4	0,75
49	5	245	32	5	160	52	0,5	26,0	10	100	1000	17	2	34	39,2	0,87
49	5	245	43	5	215	51	0,5	25,5	15	100	1500	23	2	46	52,7	0,87
49	5	245	52	5	260	50	0,5	25,0	20	100	2000	29	2	58	63,7	0,91
49	5	245	64	5	320	49	0,5	24,5	25	100	2500	36	2	72	78,4	0,92