

# Možnosti zjednodušování teplotního modelu transformátoru pro trakční použití

Lukáš Veg

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Fakulta elektrotechnická

Západočeská univerzita v Plzni

vegl@kev.zcu.cz

## The possibilities of the simplifying of the thermal model of the transformer for traction use

**Abstract** – This article deals with the thermal analysis of traction transformer. The traction transformers are special kind of the transformers. The windings have lots of voltage terminals for various voltage levels and various supply systems. In the article is described the thermal mathematical model of the traction transformer. The possibilities of simplification of calculation model and high accuracy of simulation results compared with reality.

**Keywords** – Thermal model; power transformer; transformer cores; traction transformer; thermal analysis

### I. ÚVOD

Nejjednodušší verze trakčního transformátoru je pro jedno-systémové drážní jednotky. V případě univerzálnosti transformátoru roste jeho složitost a cena. Snažíme se o co nejmenší provedení s pokud možno nízkou hmotností, protože se v poslední době tyto transformátory stále častěji umísťují na střechu vozidla kvůli nízkému profilu vozidla, případně pro bezbariérové jednotky. Komplikovaná řešení můžeme nalézt u více systémových jednotek podporujících více napájecích hladin. Tato univerzálnost se neřeší více trakčními transformátory, ale jedním zařízením s více odbočkami. Obr.1.

Často se do obvodu sekundárního vinutí zařazuje vysoká reaktance, kvůli šetření prostoru na střechu vozidla a dále i snižování ceny a váhy. U těchto transformátorů je pak tepelný výpočet velmi komplikovaný, ale při olejovém nuceném chlazení se dá zjednodušit. Často bývá potřeba zjistit, zda se transformátor dokáže uchlazení při různých režimech. Dalším požadavkem pro tepelný model může být predikce pro spotřebu elektrické energie potřebné pro nucené chlazení olejového obvodu transformátoru. [1-3]



**Obrázek I.** Ukázka počítaného a měřeného transformátoru s odbočkami

## II. VÝBĚR MODELU TRAKČNÍHO TRANSFORMÁTORU

### A. Popis problému

Pro modelování tepelného chování, je nezbytné znát přesnou konstrukci a parametry všech modelovaných dílů. V případě, že tato informace není k dispozici, je nutné zjednodušit model. V tomto článku je příkladem skutečný trakční transformátor použitý pro železniční vozidlo (příměstská jednotka). Trakční transformátor je dodáván na jednu úroveň napětí 25 kV a konstantní frekvenci 50 Hz. Další část práce se zabývá možnostmi zjednodušení výpočtu. Dále se práce zabývá vlivem zanedbávání detailní specifikace na celkovém rozdílu mezi měřeným transformátorem a tepelným modelem transformátoru.

### B. Obecné vstupní parametry trakčního transformátoru

Tab I. ukazuje hodnoty, ze kterých se při tvorbě modelu vycházelo. Článek se bude zabývat konkrétním trakčním transformátorem, který je nasazený v provozu. Od tohoto transformátoru jsou známy pouze některé údaje. Úplná specifikace nebyla zveřejněna. Pro tento transformátor je vytvořen teplotní model popisující jeho chování a oteplení jednotlivých částí. Bylo pro zjednodušení uvažováno tři části. První část je vinutí s magnetickým obvodem. Bohužel nebylo přesně známé rozmístění a jednotlivé počty závitů ani blíže známé vnitřní rozměry. Pro tento krok bylo provedeno zjednodušení na objem a váhu. Jsou totiž známy vnější rozměry transformátoru, jeho plášť a vnější zapojení. Informace o množství oleje je též dostupná.

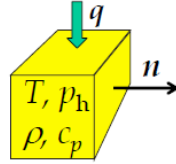
Vnitřní rozměry byly zjednodušeny na těleso ve tvaru kvádrů o určité hmotnosti. Není totiž důležité, znát přesně zapojení. Důležité je znát objem, plochu, přes kterou se vznikající teplo šíří do okolí a hmotnost zadaného tělesa pro výpočet tepelné kapacity. Materiály použité pro daný transformátor jsou známy a je to měď a železo. Pro výpočet bylo uvažováno tyto poměry v poměru 2/3. Izolace vodičů, způsobující horší průchod tepla nebyla uvažována, z důvodu nejjistitelnosti a neznámosti materiálových vlastností. Protože se uvažuje, že okolo jádra bude proudit určitou rychlostí chladivo (inhibovaný minerální olej) uvažuje se i přímý přestup tepla z vodiče do chladicí kapaliny. [4].

TABULKA I. PARAMETRY TRAKČNÍHO TRANSFORMÁTORU

Parametr	Hodnota	Jednotky
Jmenovitý výkon	1.28	MVA
Jmenovitá frekvence	50	Hz
Fázové napětí– Vysokonapěťová strana (HV)	25	kV
Jmenovitý proud – (HV)	51.2	A
Fázové napětí– Nízkonapěťová strana (LV)	2 x 1878	V
Jmenovitý proud – (LV)	2 x x341	A
Nominalní I <sup>2</sup> R ztráty (HV + LV)	47	kW
Váha chladicí a izolační kapaliny	330	Kg

### III. OBECNÝ VÝPOČET POMOCÍ ROVNICE PRO ŠÍŘENÍ TEPLA

Pro výpočet modelu je nezbytné zavést rovnice, dle kterých se bude počítat. Při počítání teplotního modelu trakčního transformátoru se uvažoval jednoduchý tvar. Bude provedeno zobecnění a určité zanedbání menších rozměrů. Bude uplatněno následujících vztahů. Ty jsou pro přehlednost vypsány a počítány s tvarem dle obr. 2.



**Obrázek II. Výkonová rovnováha v objemu**

Kde  $p_h$  jsou ztráty vznikající v objemu,  $n$  je normálový vektor,  $\rho$  je hustota,  $c_p$  je měrná tepelná kapacita,  $q$  je tepelný tok a  $T$  je teplota. Výkon přivedený do objemu lze spočítat jako:

$$P_c = -\oint_S \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S} \quad (1)$$

Při zobecnění na jakýkoliv objem

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} - p_h = 0 \quad (2)$$

Následněm dosazení rovnice tepelného toku

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T \quad (3)$$

Dostáváme Biot-Fourierovu rovnici

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = p_h \quad (4)$$

### IV. VLASTNÍ TEPELNÁ ROVNICE PRO DANÝ PŘÍPAD

Pro dostatečný popis modelu lze napsat soustavu tří rovnic popisující jako celek distribuci tepla a chování transformátoru.

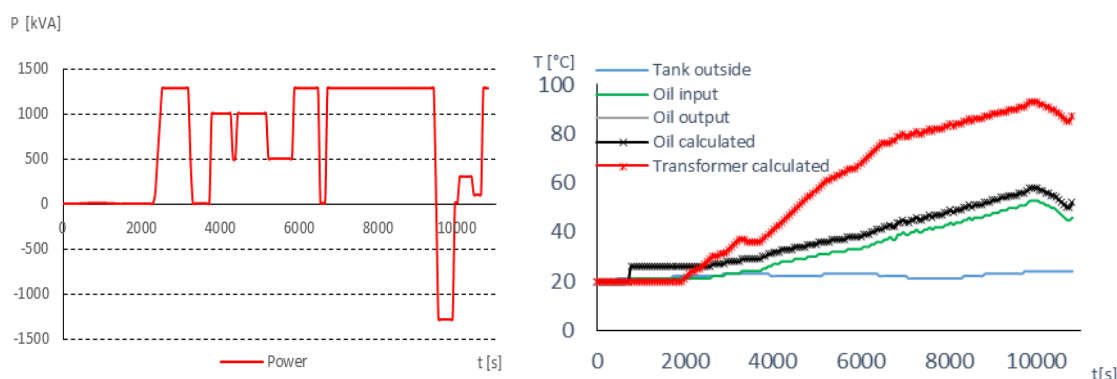
$$C_{j\acute{a}dra} \frac{dT_1}{dt} + \frac{1}{R_{12}} (T_1(t) - T_2(t)) = Z_m \quad (5)$$

$$C_{oil} \frac{dT_2}{dt} + \frac{1}{R_{12}} (T_2(t) - T_1(t)) + \frac{1}{R_{23}} (T_2(t) - T_3(t)) = 0$$

$$C_{cont} \frac{dT_3}{dt} + \frac{1}{R_{23}} (T_3(t) - T_2(t)) + \frac{1}{R_{30}} (T_3(t) - T_0(t)) = 0 \quad (6)$$

Kde  $C_{j\acute{a}dra}$  je tepelná kapacita elektrického a magnetického obvodu transformátoru,  $R_{12}$  je tepelný odpor pro přestup tepla mezi oblastí 1 a 2,  $C_{oil}$  je tepelná kapacita inhibovaného minerálního oleje,  $R_{23}$  je tepelný odpor pro přestup tepla mezi oblastí 2 a 3,  $C_{cont}$  je tepelná kapacita nádoby transformátoru,  $R_{30}$  je tepelný odpor pro přestup tepla mezi nádobou transformátoru a okolním vzduchem. Teplota okolí se bere 20°C.  $S$  je plocha skrz kterou teplo prochází a  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla.

## V. POROVNÁNÍ MODELU A MĚŘENÍ - GRAFY



## VI. ZÁVĚR

Úkolem provedeného výzkumu bylo navrhnout zjednodušený teplotní model trakčního transformátoru, který by byl v praxi srovnatelný s reálným chováním stroje. Článek se dále zabývá možností zjednodušení modelu, aby byla zachována průkazná přesnost výpočtu v porovnání s naměřenými hodnotami skutečného zařízení. Dále se řeší vliv neznalosti bližší specifikace na celkovou odlišnost od skutečného provedení a chování. Je vidět, že i přes nutné optimalizace a zanedbávání konkrétních tvarů a zapojení, odpovídá výsledný model realitě a je možno ho použít jako zjednodušující prvek. Jednotlivé odchylky modelu od reálného měření jsou nižší jak 8%.

Výsledkem provedeného výzkumu je zjištění, že u velkých trakčních transformátorů do výkonu 1MVA není nutné znát přesné parametry jednotlivých částí (použitá izolace a tloušťka, počet závitů, zapojení vinutí), ale že pro vypovídající hodnotu a možnost tvorby relativně přesného modelu stačí, znát objem, hmotnost, materiálové vlastnosti a procházející výkon.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2016-006 a projektu SGS-2015-038

## LITERATURA

- [1] M. Prishvin, R. Zaridze, G. Bit-Babik and A. Faraone, "Modified heat equation for thermal calculation on a realistic model," *Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory*, 2009. DIPED 2009. International Seminar/Workshop on, Lviv, 2009, pp. 53-57
- [2] C. Andre-philippe and F. Didier, "Evolution and future of traction transformer on rolling stocks," *Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), 2015 International Conference on*, Aachen, 2015, pp. 1-6.
- [3] Ding Feng, Zhengyou He and Qi Wang, "A reliability assessment method for traction transformer of high-speed railway considering the load characteristics," *Prognostics and Health Management (PHM), 2015 IEEE Conference on*, Austin, TX, 2015, pp. 1-7.
- [4] A. Wilk, J. Nieznanski and I. Moson, "Nonlinear model of a wound iron core traction transformer with the account of magnetic," *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*, Rome, 2010, pp. 1-7