

COOLING OF SYNCHRONOUS MACHINE WINDING USING HEAT PIPE**Radek Vlach, Čestmír Ondrůšek***

The paper is concerned with computational simulation of stator winding heating of synchronous machine. Software ANSYS 6.1 was used for computational modeling. Computational model consider heat pipe in the middle of winding slot. The results of computer simulation show effect of heat pipe on winding cooling. Other results show effect of heat pipe position and size of cooling surface on winding heating.

1. Úvod

Příspěvek se zabývá problematikou chlazení statorového vinutí. Cílem je nalézt co nejefektivnější cestu odvodu tepla z drážky vinutí, zvláště pak ze středu svazku plechů. K tomuto účelu se jeví jako vhodná volba využít vlastností tepelné trubice, která má možnost téměř bezztrátově přenést teplo ze špatně chlazených míst na místa podstatně lépe chlazená.

Pro první výpočty je využit model vytvořený v programovém systému ANSYS 6.1 pro konkrétní synchronní motor.

2. Tepelná trubice

Tepelná trubice je velice účinný tepelný vodič. Jde v podstatě o trubici ve které je hermeticky uzavřeno malé množství kapaliny. Jeden konec trubice když se zahřeje, funguje jako výparník, kde se kapalina mění na páru a stoupá téměř rychlostí zvuku ke druhému konci. Na druhém konci je umístěn chladič, čímž se odejme teplo z páry a ta kondenzuje zpět na kapaliny, která stéká po stěně trubice zpět k výparníku.

Parametry uvažované trubice jsou:

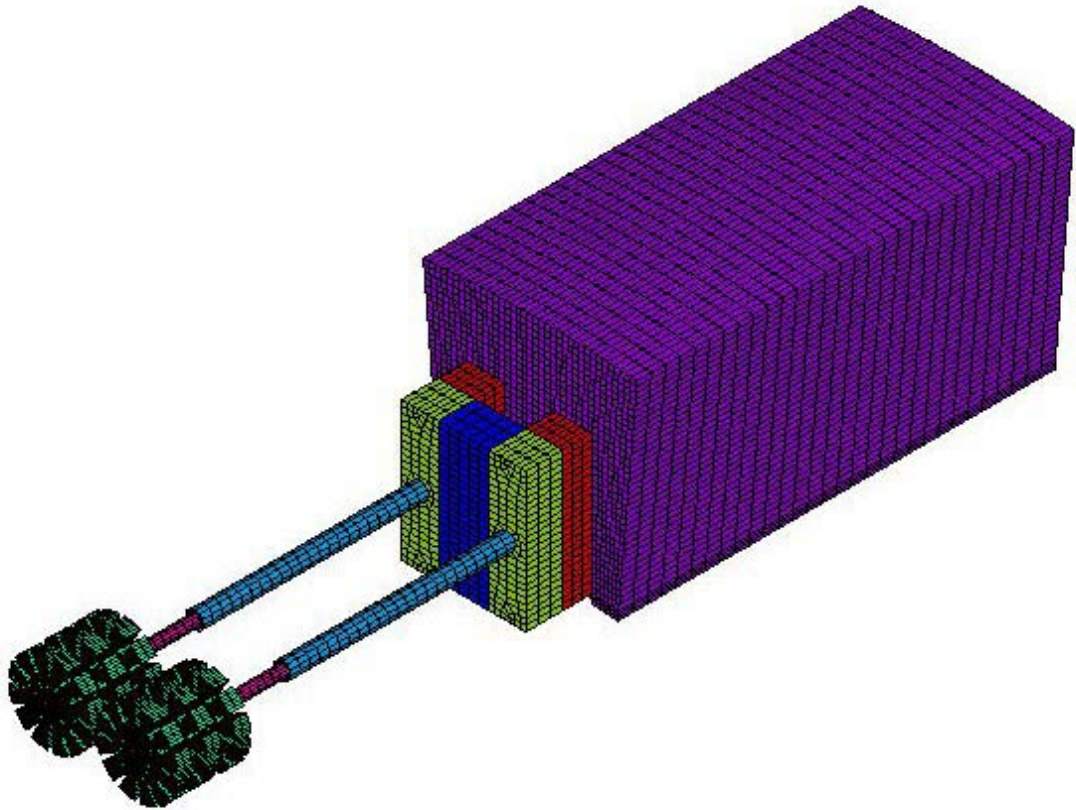
- průměr – 2 mm
- délka – 125 mm
- maximálně přenesený tepelný tok – 12,5 W
- rozsah pracovní teploty – od -200 °C do 250 °C

* Ing. Radek Vlach, Ph.D. : Ústav termomechaniky AV ČR a Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT Brno; Technická 2896/2, 619 69 Brno; tel. +420.5.41142757, fax: +420.5.41142876; E-mail: vlach@umt.fme.vutbr.cz.

Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc. : Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky FEKT VUT Brno; Technická 8, 619 69 Brno; tel. +420.5.41142463, E-mail: ondrusek@feec.vutbr.cz.

3. Výpočtový model

Výpočtový model (Obr. 1) zahrnuje pouze stator synchronního motoru, protože rotor je s permanentními magnety, které nejsou zdrojem tepelných ztrát a nemají tedy podstatný vliv na oteplení vinutí statoru. Při vytváření modelu byla využita jak obvodová, tak osová symetrie stroje. Výpočtový model je tvořen výsečí jednoho páru drážek vinutí a pouze polovinou stroje. Ve středu drážek vinutí je umístěna mosazná trubička, do které je možné zasouvat tepelnou trubici. Vzduchová mezera mezi tepelnou trubicí a vnitřním průměrem mosazné trubice je vyplněna termo-pastou pro lepší vedení tepla. Prostup mezi drážkou vinutí a svazkem plechů je rovněž uvažován. Vinutí má různou tepelnou vodivost v různých směrech, což je uvažováno při ohybu vinutí na čelech. Rovněž svazek plechů má menší tepelnou vodivost v axiálním směru než v ostatních směrech. Vodivost tepelné trubice v axiálním směru je uvažována $50000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a v ostatních směrech $5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [3]. Na konci tepelné trubice jsou připevněny přídatné chladicí plochy.



Obrázek 1 Výpočtový model

Výpočtový model je tvořen parametricky a je tedy možné měnit všechny rozměry včetně jemností sítě. Jedním z parametru je hloubka zasunutí tepelné trubice v drážce vinutí. Rovněž je možné měnit počet respektive velikost přídatných chladicích ploch na konci tepelné trubice.

4. Výpočtové simulace

Pro výpočet je nutné zadat tepelné ztráty a odvody tepla z chlazených ploch. Jediným zdrojem ztrát jsou ztráty ve vinutí statoru. Ztráty v železe zde nejsou uvažovány. Na všechny

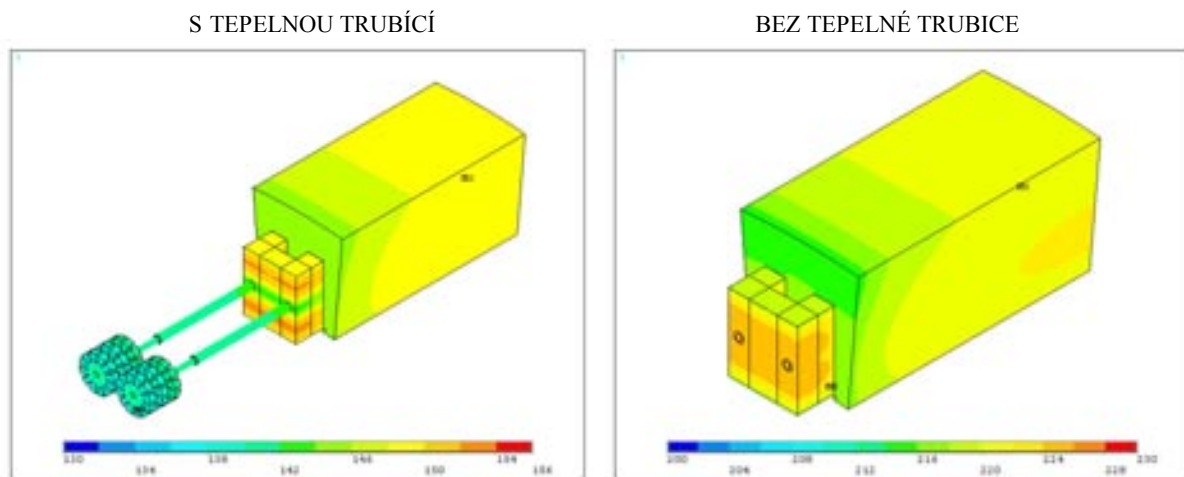
vnější plochy, kromě ploch symetrie, byl zadán stejný součinitel odvodu tepla. Hodnoty nastavených okrajových podmínek jsou:

- ztráty ve vinutí statoru – 20,79 W
- odvod tepla z chlazených ploch - 12 W/mK
- teplota okolí – 0 °C

Výpočtovými simulace byly sledovány následující cíle:

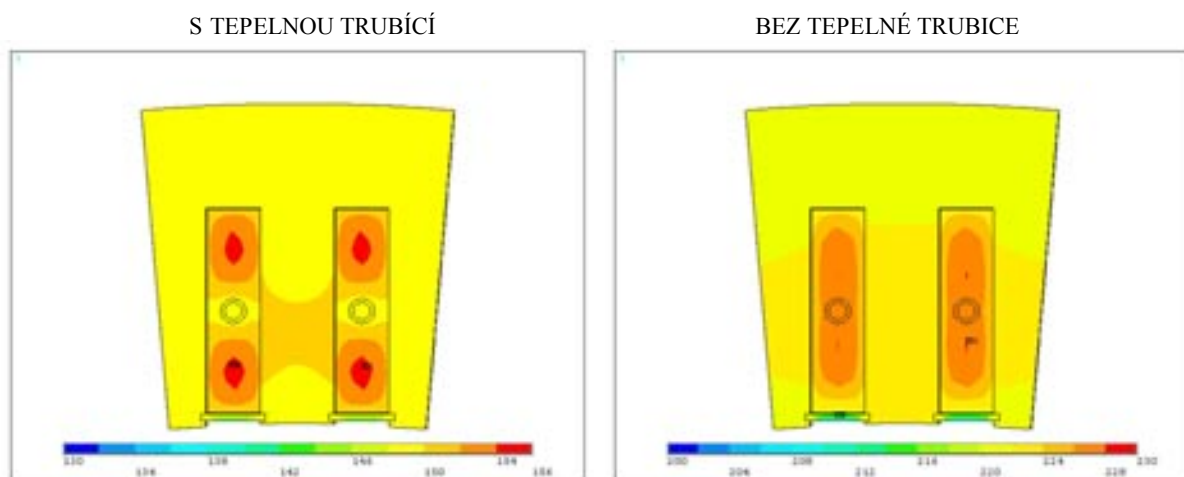
- zjištění účinku tepelné trubice na chlazení vinutí
- stanovení vlivu zasouvání tepelné trubice do drážek vinutí na tepelné poměry
- stanovení vlivu velikosti chladicí plochy na konci tepelné trubice na tepelné poměry

Porovnání výpočtu „s“ a „bez“ tepelné trubice je zobrazeno na následujících obrázcích, které jednoznačně ukazují rozdíl mezi oběma způsoby chlazení

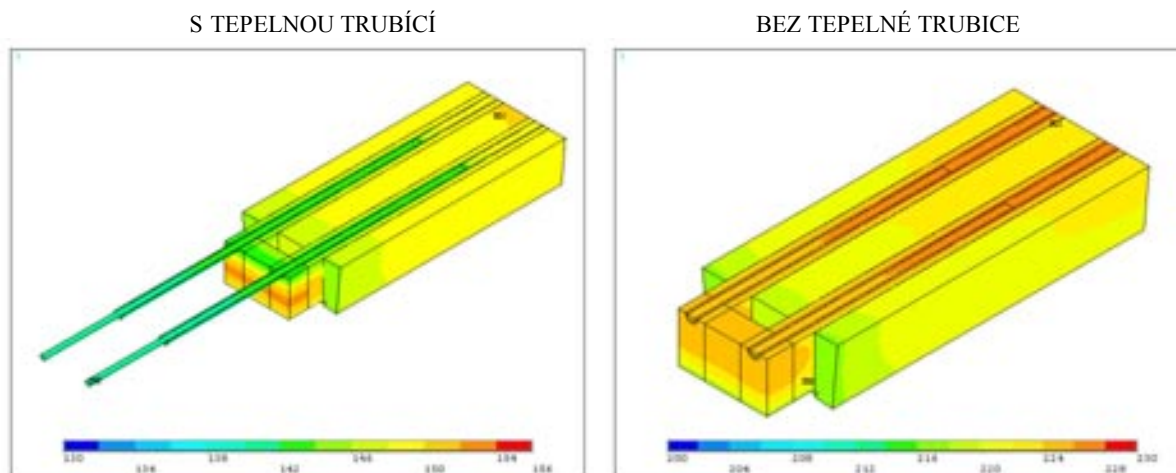


Obrázek 2 Rozložení oteplení

Obrázek 3 ukazuje rozdíl v rozložení oteplení v drážce vinutí, kde v případě využití chlazení tepelnou trubicí je ve středu drážky nižší teplota než na krajích. Rovněž je patrný vliv na oteplenění zubu svazku plechů.



Obrázek 3 Rozložení oteplení ve středu



Obrázek 4 Rozložení oteplení v podélném řezu modelem

5. Analýza výsledků

U jednotlivých simulací byly vyhodnocovány oteplení vybraných částí modelu, které jsou z hlediska chlazení nejdůležitější a také, aby se daly simulace vzájemně lépe porovnat. Sledováno bylo maximální oteplení, střední oteplení vinutí a svazku plechů a oteplení konce tepelné trubice.

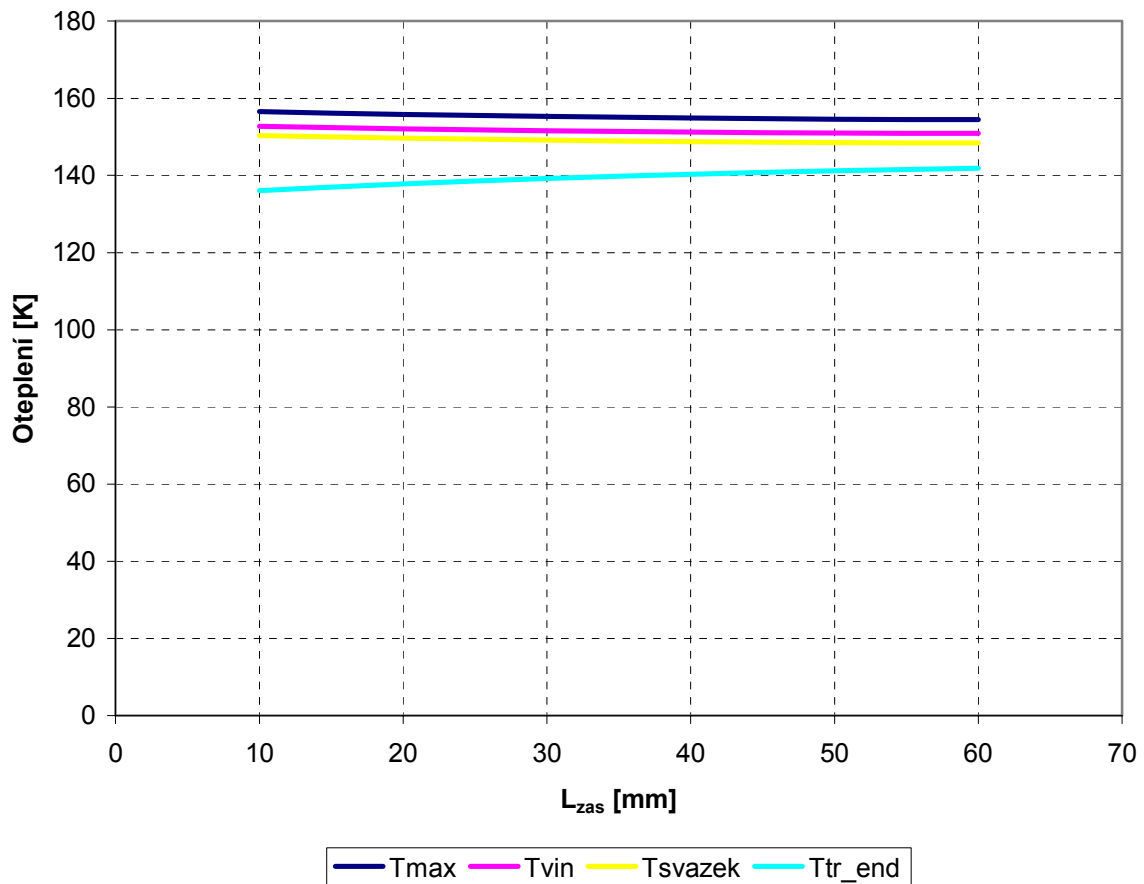
Výsledky výpočtů jsou shrnuty do následující tabulky.

Tabulka 1 Výsledky výpočtových simulací

Popis modelu	ΔT_{\max} [K]	$\Delta T_{\text{vinutí}}$ [K]	ΔT_{svazek} [K]	$\Delta T_{\text{tr_end}}$ [K]
bez tepelné trubice	228,09	224,93	220,75	-
bez tepelné trubice s 3x odvodem tepla s povrchu pláště	138,72	135,74	130,10	-
místo tepelné trubice měděný drát ($L_{\text{zas}}=50\text{mm}$)	179,13	175,64	172,74	85,07
s tep. trubicí s 3x odvod. tep. s pov. pláště ($L_{\text{zas}}=50\text{mm}$)	108,06	104,62	100,52	98,13
s tepelnou trubicí ($L_{\text{zas}}=60\text{mm}$, 3 chladiče)	154,49	150,93	148,47	141,84
s tepelnou trubicí ($L_{\text{zas}}=50\text{mm}$, 3 chladiče)	154,61	151,01	148,58	141,18
s tepelnou trubicí ($L_{\text{zas}}=40\text{mm}$, 3 chladiče)	154,89	151,24	148,81	140,29
s tepelnou trubicí ($L_{\text{zas}}=30\text{mm}$, 3 chladiče)	155,30	151,59	149,18	139,17
s tepelnou trubicí ($L_{\text{zas}}=20\text{mm}$, 3 chladiče)	155,85	152,09	149,70	137,76
s tepelnou trubicí ($L_{\text{zas}}=10\text{mm}$, 3 chladiče)	156,59	152,78	150,39	136,02
s tepelnou trubicí ($L_{\text{zas}}=50\text{mm}$, 2 chladiče)	167,05	165,64	160,92	155,59
s tepelnou trubicí ($L_{\text{zas}}=50\text{mm}$, 1 chladič)	182,39	179,18	176,10	173,57
s tepelnou trubicí ($L_{\text{zas}}=50\text{mm}$, chladiče)	201,90	198,82	195,29	196,18

Z výsledků je zřejmý vliv použití tepelné trubice k chlazení vinutí, protože dochází ke snížení oteplení o cca 74 K. V případě že je použit měděný drát místo tepelné trubice je pokles oteplení cca 48 K. Pokud se však podaří zvýšit odvod tepla s pláště svazku na trojnásobek je rozdíl v oteplení cca 30 K, což však lze považovat také za dobré zlepšení chlazení.

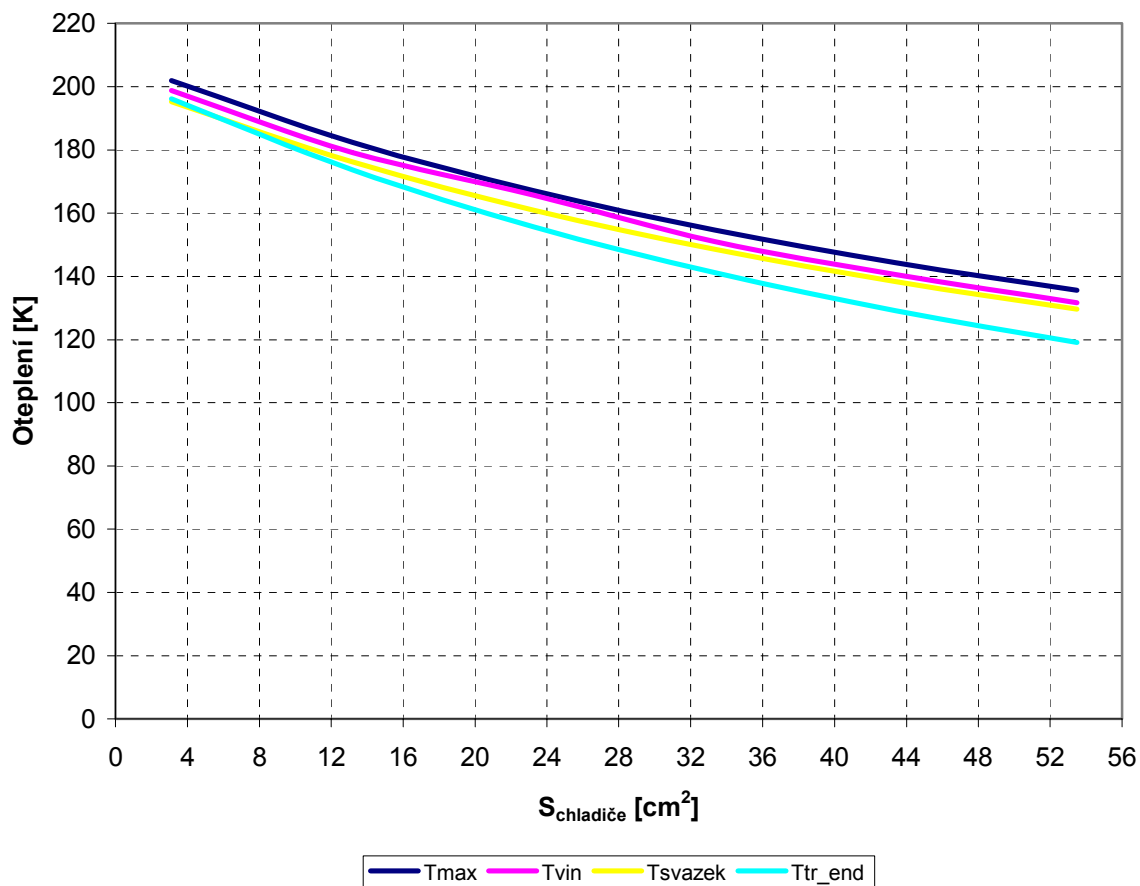
Závislost oteplení na zasunutí tepelné trubice do drážky vinutí je zřejmá z následujícího grafu:



Graf 1 Vliv zasunutí tepelné trubice do drážky vinutí

Zasunutí tepelné trubice nemá zásadní vliv na velikost oteplení. Změna oteplení pro daný rozsah zasunutí se pohybuje do 2 K. Největší je pouze změna oteplení konce tepelné trubice, která se pohybuje kolem 4 K.

Graf 2 ukazuje vliv velikosti chladicí plochy na konci tepelné trubice na oteplení vybraných částí modelu.



Graf 2 Vliv velikosti chladící plochy na konci tepelné trubice

Závislost oteplení na velikosti plochy není lineární a je možné předpokládat, že dojde od určité velikosti chladící plochy jen k malé změně oteplení respektive ustálení. Přesto se ukazuje pro daný rozsah velikosti chladící plochy, že změna oteplení je cca 60K.

6. Závěr

Výsledky výpočtů ukazují vliv tepelné trubice na chlazení vinutí statoru. Chlazení s tepelnou trubicí prokazuje podstatné snížení oteplení oproti standardnímu způsobu chlazení. Výrazně větší vliv má velikost chladící plochy na konci tepelné trubice než její poloha v drážce vynutí. Nevýhodou tepelné trubice může být její cena.

Další výpočty budou zaměřeny na porovnání chlazení pomocí tepelné trubice s chlazením vodou přímo v drážce vinutí, kdy místo tepelné trubice bude mosaznou trubičkou procházet chladící voda. Rovněž bude nutné ověřit elektromagnetický výpočet zda nedojde vlivem nižšího plnění drážky k velkému poklesu momentu motoru.

Pro ověření výpočtů se připravuje experimentální přípravek, na kterém budou provedena příslušná měření při stejných podmínkách jaké byly u výpočtových simulací.

7. Poděkování

Příspěvek byl vypracován za podpory MŠMT v rámci projektu č. MSM 2621 00024 „Výzkum a vývoj mechatronických soustav“.

8. Seznam použité literatury

- [1] Hak, J. , Ošlejšek, O. : Výpočet chlazení elektrických strojů , 1.díl. VUES Brno 1973
- [2] Ondruška, E. , Maloušek, A. : Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých. SNTL Praha 1985
- [3] Thayer, J. : Analysis of a Heat Pipe Assisted Heat Sink. Thermacore International, www.thermacore.com