

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tepelné trubice

autor: Martin Radoš

2016

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku tepelných trubice a možnosti jejich chlazení. Úvodní část se věnuje současnému stavu chlazení trakčních motorů. Jsou zde uvedeny varianty, které jsou výrobci nejvíce využívány, a jejich specifické vlastnosti. V druhé části je popisován princip, konstrukce i nevýhody tepelných trubice a jsou zahrnuté také příklady současného použití. Poslední část práce seznamuje se základním matematickým popisem pohybu pracovní kapaliny a přenosem tepla v tepelné trubici. Zmíněny jsou i omezující podmínky, při jejichž dosažení dojde k částečnému nebo úplnému přerušení přenosu tepla.

Klíčová slova

Tepelná trubice, chlazení, trakční motor, matematický popis tepelné trubice, konstrukce tepelné trubice, vlastnosti tepelné trubice, omezující podmínky

Abstract

The bachelor thesis consists of three parts and focuses on the topic of heat pipes and their possibilities of cooling. The first part is devoted to contemporary types of traction motors cooling, the variants of most used cooling systems and their properties. The second part is focused specifically on heat pipes and describes their principles, construction, disadvantages and current use. The final part follows up with a basic mathematical description of working fluid movement and heat transfer inside heat pipes. Mentioned are also heat pipe limitations and why the heat transfer is partly or fully interrupted when reaching the limitation level.

Key words

Heat pipe, cooling, traction motor, mathematical description, heat pipe construction, heat pipe properties, heat pipe limitations

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 1.6.2016

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Romanu Pechánkovi Ph.D. za rady a podnětné připomínky při vedení mé práce a rodině za podporu a trpělivost.

OBSAH

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ	8
ÚVOD	10
1. CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ	12
1.1 ZTRÁTY VE STROJI	12
1.2 DRUHY CHLAZENÍ POUŽÍVANÝCH V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH	12
1.3 NABÍDKY MOTORŮ A JEJICH MOŽNOSTI CHLAZENÍ	14
2. TEPELNÉ TRUBICE	19
2.1 PRINCIP TEPELNÝCH TRUBIC	19
2.2 VLIVY NA PŘENOS ENERGIE	20
2.3 NEVÝHODY TEPELNÝCH TRUBIC	23
2.4 DNEŠNÍ POUŽITÍ TEPELNÝCH TRUBIC	23
2.5 MATEMATICKÝ POPIS TEPELNÝCH TRUBIC	27
2.6 OMEZUJÍCÍ PODMÍNKY FUNKČNOSTI TEPELNÝCH TRUBIC	28
3. ZÁVĚR	32
POUŽITÁ LITERATURA	34

Seznam symbolů

A_K	průřez v příčném řezu, m^2
C	tepelná kapacita, $J/(Kg K)$
F	vnější fyzikální síly (například gravitace)
g	gravitační zrychlení ($9,8 m/s^2$)
h_{fg}	zbytkové teplo po vypařování, J/kg
I	proud, A
l	celková délka trubice, m
l_{eff}	efektivní délka, m
m	počet fází
p	tlak, N/m
Δp_c	maximální kapilární tlak, N/m
Δp_t	součet ztrát tlaku v trubici, N/m
P	činný výkon, W
Q	teplo, W
Q_b	omezení varem
Q_c	kapilární omezení
Q_e	omezení strháváním
Q_s	akustické omezení
Q_{vp}	viskózní omezení
r	poloměr, m
R	činný odpor, Ω
t	čas, s
T	teplota, K
u_2	rychlost kapaliny, m/s
u_1	rychlost páry, m/s

Řecká abeceda

η	dynamická viskozita, N-s/m ²
κ	dilatační viskozita, N-s/m ²
K	permeabilita, H/m
λ	tepelná vodivost, W/(m K)
μ	viskozita kapaliny, N-s/m ²
ρ	hustota tekutiny, kg/m ³
σ	povrchové napětí, N/m
ψ	úhel mezi kapalinou a strukturou, °

Obecné indexy

<i>ave</i>	průměrný
<i>c</i>	kapilární
<i>con</i>	kondenzátor
<i>e</i>	výparník
<i>l</i>	kapalina
<i>t</i>	celková (totální)
<i>v</i>	výpary

Úvod

Již od vzniku prvních elektrických strojů existuje snaha o výrobu menších, výkonnějších a odolnějších modelů. Není to ale jednoduché, protože jsme omezeni technickými možnostmi. Pro potřebný výkon stroje nelze vytvořit libovolné rozměry. Výpočtem získáme minimální rozměry jádra, máme danou minimální výšku izolace, při manuální i automatizované výrobě vznikají odchylky. Z těchto důvodů se stále vyvíjejí nové odolnější materiály a sloučeniny. Při vývoji každé části motoru musíme ale dbát na množství faktorů a ne jen na ty elektrické. Jsme omezeni mechanickou pevností materiálů, kdy při provozu točivých strojů vznikají obrovské odstředivé síly. Při plném zatížení strojů působí různé chemické reakce mezi částmi stroje a okolním prostředím. Vlivem vznikajícího tepla při trvalém nebo přerušovaném provozu dochází k degradaci materiálů. Při návrhu stroje dbáme na co nejúčinnější odvod tepla, aby nedocházelo třeba jen k lokálnímu zvýšení teploty. Následné zestárnutí izolace způsobí rychlé snížení životnosti celého stroje. Do celého procesu nám vstupuje i nejdůležitější hledisko – ekonomické. Stroje musí být vyráběny co nejúčinnější, ale zároveň co nejlevnější.

Elektrické stroje doznaly mnoha podob v závislosti na jejich použití a prostředí, ve kterém jsou provozovány. Musíme vždy chránit vinutí a ostatní části pod napětím před vniknutím cizích těles z okolního prostředí. Ať se jedná o nepovolený dotyk obsluhy či neúmyslného dotyku cizí osoby nebo vniku prachových částic. Z těchto důvodů jsou zavedené normy pro značení strojů, které označují a popisují konstrukční uspořádání stroje, intenzitu ochrany, typ a druh chlazení.

Značení probíhá pomocí písmen a číslic. Ochrana stroje před vniknutím cizích částí je v naší zemi dána normou ČSN 60529. Značku druhu krytí tvoří písmena IP (z anglického názvu International Protection) a dvojčíslí za mezerou. První číslice nám vyjadřuje stupeň ochrany před nebezpečným dotykem a před vniknutím cizích předmětů (číslice jsou v rozmezí 0 až 6), druhá číslice vyjadřuje stupeň ochrany před vniknutím vody (rozmezí 0 až 8). Výsledná ochrana stroje může vypadat například IP 44.

Stejný způsob označování platí i pro chlazení strojů. Chlazení, neboli odvádění tepla chladivem, je proces, kdy se ztráty přeměněné ve stroji v teplo odvádějí primárním chladivem. Oteplené primární chladivo můžeme buď ze stroje odvádět a neustále přivádět nové chladivo s nižší teplotou nebo se chladí sekundárním chladivem ve výměníku tepla. Značení je trochu rozšířené a popisuje nám jej norma ČSN 60034-6. V tomto případě používáme písmena IC (z anglického International Cooling). Pro chlazení strojů nemusíme

využívat jen jednoho chlazení, ale můžeme mít i dva okruhy chlazení. Často máme totiž motor umístěný v omezených či zcela uzavřených prostorech a musíme chladivo přivádět z míst mimo pohon. První číslice je společná pro oba chladicí okruhy a znamená způsob proudění chladiva. Je v rozmezí 0 až 9.

- 0 – volný okruh, chladicí médium se nasává z okolního prostředí a tam se i vyfukuje
- 1 – přívod média z prostředí mimo umístění stroje a výfuk do prostředí, kde je stroj umístěn
- 2 – odvod chladiva mimo prostředí stroje
- 3 – přívod i odvod chladiva
- 4 – povrchové chlazení
- 5 – vestavěný výměník tepla (chlazeno médiem okolního prostředí)
- 6 – nástavbový výměník (chlazeno médiem okolního prostředí)
- 7 – vestavěný výměník (jiné chladicí médium, nejčastěji voda)
- 8 – nástavbový výměník (jiné chladicí médium, nejčastěji voda)
- 9 – oddělený výměník (vodní chlazení s odděleným tepelným výměníkem)

Dále je ve značení chlazení kombinace písmeno a číslo, pro dva okruhy dvakrát. Písmeno označuje, jakým médiem chladíme, a číslo udává způsob ventilace daného média.

- | | |
|------------|-------------------|
| A – vzduch | C – oxid uhličitý |
| W – voda | N – dusík |
| H – vodík | F – freon |
| U – olej | S – ostatní média |

V případě jednoduchého chlazení vzduchem s jedním chladicím okruhem se písmeno „A“ v označení neuvádí. Číslice za písmenem označují zdroj tlaku pro protlačení chladicího média.

- 0 – přirozená ventilace
- 1 – vlastní ventilace
- 2-4 – dosud neurčeno
- 5 – vestavěný ventilátor se samostatným elektrickým pohonem
- 6 – v nástavbě je zabudován ventilátor se samostatným elektrickým pohonem
- 7 – oddělená chladicí jednotka, s přívodem chladiva od jednoho nebo více strojů
- 8 – náporové chlazení v důsledku relativního pohybu stroje (např. v trakci)
- 9 – proudění v důsledku jiného pohybu

1. Chlazení elektrických strojů

1.1 Ztráty ve stroji

Ztráty v elektrických zařízení znamenají přeměnu elektrické energie na tepelnou energii. V trakčních motorech se jedná o nežádoucí a nevyužitelné ztráty. Jouleovy ztráty P lze vypočítat známým vzorcem a pro elektrické stroje přidáváme ještě počet fází m . Výsledný vzorec vypadá

$$P = m \cdot R \cdot I^2 \quad (1.1)$$

kde R je činný odpor a I je napájecí proud. Největší problém vytváří právě proud. Chceme-li dosáhnout dvojnásobného výkonu, naroste spotřeba proudu čtyřikrát. Potřeba vysokého výkonu u trakčních motorů je hlavně při rozjezdech z nulové rychlosti. Při vysokých odběrech proudu poté dochází k rychlému zahřívání celého motoru. Dále máme ve stroji např. ztráty v železe, které dělíme na hysterezní a ztráty vířivými proudy. Vznikají ztráty v zubech statoru a rotoru nebo ztráty mechanické při běhu stroje. Lokální ohřevy jsou nebezpečné v první řadě pro izolaci, která je na zvýšení teploty velmi citlivá a při překročení maximálních dovolených teplot rychle klesá jejich izolační odolnost. Stroje zvládají i krátkodobé přetížení, musíme mít ale zajištěné dostatečné chlazení.

1.2 Druhy chlazení používaných v elektrických strojích

Kvůli konkurenceschopnosti se snaží každý výrobce vytvářet co nejuniverzálnější pohonné jednotky. Je zřejmé, že jeden motor nemůže vyhovovat všem potenciálním prostředím, ve kterých se bude vyskytovat. Například v České republice se pravidelně střídají roční období a dochází k vysokým výkyvům teplot, které ale nekolísají do extrémů. Oproti tomu v Rusku je sice průměrně nižší teplota, ale může klesat i do velmi nízkých hodnot. Spolu se sněhovou pokrývkou nám vzniknou extrémní podmínky pro fungování motoru. Ty proto musí mít vysoký stupeň IP ochrany a zároveň zvyšují nároky na způsob chlazení motorů. Výrobci na všechny tyto podmínky hledí při konstrukci elektrických pohonů a vždy vytvářejí univerzální pohon, který má možnosti různých připojení a úprav. Vše v závislosti na požadavcích klienta. Často se tedy neseťkáme pouze s jednou variantou chlazení, ale jedná se o kombinaci. Výhoda elektrických pohonů je jejich krátkodobá přetížitelnost. K této vlastnosti přihlížíme i u chlazení. U aplikací, kde nedochází k velmi časté akceleraci nebo brzdění si většinou vystačíme s jednoduchým vlastním vzduchovým chlazením. Když se motor rozbíhá, nevytváří se kvůli malé rychlosti dostatečný proud

vzduchu k chlazení stroje. Je-li ovšem rozběh dostatečně rychlý, postačí v motorech aplikovat základní izolaci s vysokou tepelnou odolností. Díky moderním materiálům, lze aplikovat izolace s tepelnou odolností i přes 220 °C bez trvalého poškození. To nám umožňuje používat pouze základní izolace i tam, kde to dříve nebylo možné a muselo se instalovat přídavné cizí chlazení. Pro časté rozběhy trakčních motorů již musíme využívat dalších možností chlazení kvůli vysokým ztrátám. Nejčastěji jsou k tomuto účelu využívány cizí ventilace nebo vodní chlazení. Jak už bylo zmíněno dříve, pro trakční motory to není jednoznačné. Každý výrobce je schopen jednotlivé motory upravit na přání, ať se jedná o ochranu proti vniku, nebo pro způsoby chlazení strojů. Chlazení se provádí v axiálním směru, tedy vodorovně s osou motoru. Následující popisy jsou nejrozšířenější možnosti chlazení trakčních motorů.

V nejobecnějším rozdělení se trakční motory dělí na otevřené a uzavřené. Otevřené stroje odebírají chladivo z prostředí, ve kterém pracují a vypouští ho do téhož prostředí. Pro trakční motory se používá vzduch. Velkou výhodou vzduchu je, že je dostupný a je zdarma. Nevýhodou odebírání vzduchu jsou přítomné prachové částí, které se usazují a způsobují problémy. Proto potřebujeme prachové filtry, které je nutné v relativně krátkých intervalech čistit nebo vyměňovat.

Uzavřené stroje mají vlastní chladicí systém. Chladivo je do prostoru motoru přiváděno z jiného prostředí, než je prostředí pracovní. Chlazení se vede do stroje přívodním potrubím nebo kanálem a je odváděno opět do jiného než pracovního prostředí. To platí pro stroje značení IC 3X.

Chladivo může procházet přímo strojem. K tomu jsou vytvořené otvory ve statoru. Primární chladivo tedy proudí v uzavřeném oběhu a předává teplo v chladiči sekundárnímu chladivu, kterým je prostředí, v němž stroj pracuje. Chladič je poté umístěn ve stroji a je jeho součástí. To platí pro motory označení IC 5X.

Způsob chlazení se pro jednotlivé motory také liší. Nejjednodušší variantou je vlastní chlazení. Chlazení probíhá vlastní prací motoru. Proudění chladiva vzniká rozdílem tlaků nebo zařízením k tomu určeným a umístěným přímo na hřídeli nebo na rotoru. [6] Značíme tak motory IC X1. Výhodou tohoto chlazení je, že je velmi jednoduché nenáročné na údržbu a v neposlední řadě levné. Je vhodné ale pouze na málo přetěžované motory bez častých rozjezdů. Tento typ chlazení využíváme hlavně pro odvedení ztrát při běhu motoru. Při rozběhu nemívají motory ještě dostatečné otáčky a chlazení je nedostačující.

Kvůli ztrátám při rozběhu se aplikuje izolace s vysokou třídou tepelné odolnosti (220 a výš).

Dochází-li k častému nebo pomalému rozběhu, můžeme využít cizí ventilace. Ventilátor je nezávislý na pohybu motoru a je řízen externě. To se hodí při častých rozbězích a ventilátor nám dodává potřebné množství chladiva. Pro velmi časté rozběhy nebo pro motory se zvýšenou variantou krytí můžeme využívat i kapalinové chlazení. Takové motory značíme IC X7, kde se proudění chladiva děje pomocí samostatného odděleného elektrického nebo mechanického zařízení, které není umístěno na stroji a je na něm nezávislé nebo tlakem v rozvodném systému chladiva.

Zdroj energie pro oběh chladiva skupiny IC X8 je na základě relativního pohybu stroje. Relativní pohyb chladiva se děje přemisťováním stroje vzhledem k chladivu (např. trakční motor chlazený vzduchem z prostředí, v němž stroj pracuje, nebo motor pohánějící ventilátor, chlazený takto vzniklým proudem vzduchu). [6]

1.3 Nabídky motorů a jejich možnosti chlazení

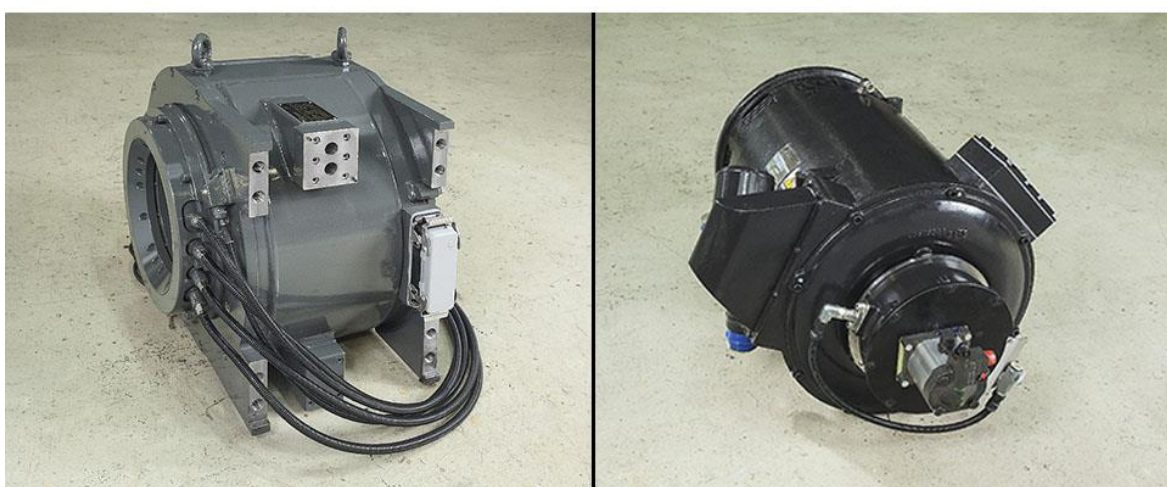
Škoda Transportation

- Trakční motory pro trolejbusy
ML 3450 K/4, 19 ML 3550 K/4 – cizí ventilace
MLU 3649 K/4, ML 3842 K/6 – vlastní ventilace
- Trakční motory pro tramvaje
ML 3534 K/4, 2 MLU 3343 K/4 – vlastní ventilace
MLU 2945 K/4-VA – vodní chlazení
HLU 3436 P/44-VA – motor s permanentními magnety – vodní chlazení
- Trakční motory pro lokomotivy a předměstské jednotky
ML 3942 K/4, MD 4549 K/6 - cizí ventilace
MLU 4245 K/6 – vlastní ventilace
- Trakční motory pro vozy metra
ML 3844 K/4, ML 3647 K/4 - vlastní ventilace [18,27]



Motor pro lokomotivy
MD 4549 K/6

Motor pro metro
ML 3647 K/4



Motor pro tramvaje
HLU 3436 P/44 - VA

Motor pro trolejbusy
ML 3846 K/6

Obr. 1 Trakční motory Škoda [18]

ABB

- Bezrámový trakční motor – uzavřená vlastní ventilace, otevřená vlastní ventilace, otevřená nucená ventilace nebo vodní chlazení [19]



Obr. 2 Trakční motor ABB [19]

1 jsou plechy statorového balení, 2 je rám motoru, 3 je kryt ložiska a mazání ložiska, 4 jsou možnosti ventilace – otevřená vlastní, otevřená cizí, 5 značí vysoce legovanou hřídel, 6 značí uchycení drákové, pro přímou montáž k podvozku.

Metalrota

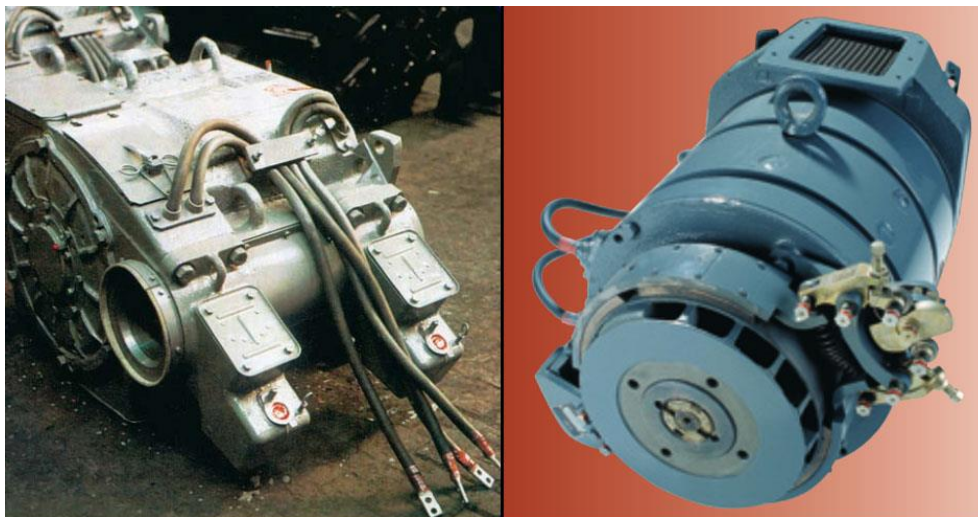
- Trakční asynchronní motory – vodní chlazení [20]
- Trakční stejnosměrné motory – bez ventilace, vnitřní ventilace, cizí ventilace [21]
- Trakční motory s permanentními magnety – vodní chlazení [22]

Ekova Electric

- Trakční synchronní motor pro elektrobus – Vodní chlazení [23]

SKD Trade

- Trakční stejnosměrný motor TE015, TE051C, TE019A03, TE022J – cizí ventilace
- Trakční stejnosměrný čtyřpolový motor TE023A01, TE026A02 – vlastní ventilace
- Trakční asynchronní motory – ATM090W02 – vlastní ventilace [24]

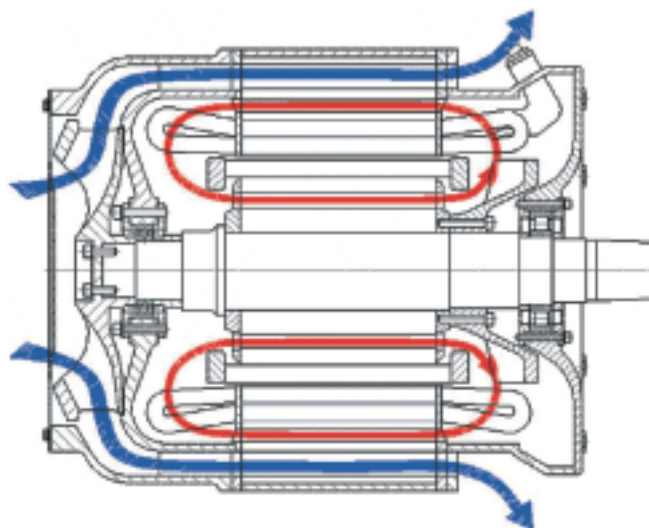


Motor TE015C

Motor TE023A01

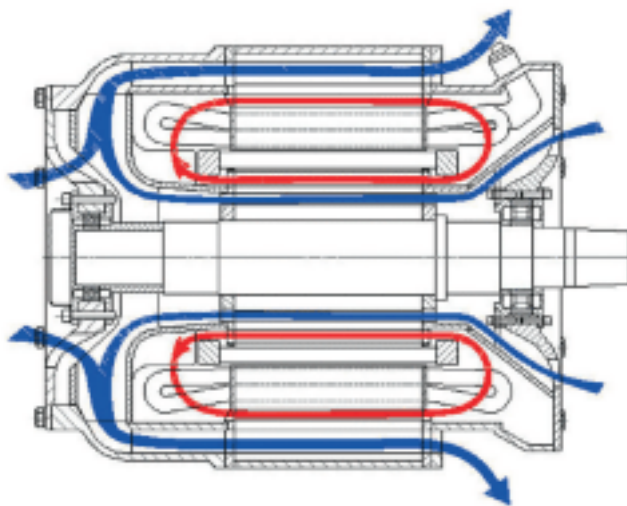
Obr. 3 Tračkní motory SKD [24]

V nedávné době byly vyvinuty další variace chlazení. Potřeba snižování profilu tramvají pro zrychlení dopravy a zvýšenému pohodlí při nastupování pasažérů vede k omezování zástavbového prostoru podvozku. To se týká i pohonných jednotek. Dále se tím navyšuje potřeba měrné hustoty výkonu oproti jednoduchosti, spolehlivosti a náročnosti na údržbu. Proto byly vyvinuty uzavřené motory, které se co nejvíce snaží splňovat tyto podmínky a jsou vybaveny dvěma ventilačními okruhy – vnitřním a vnějším.

*Obr. 4 Dvouokruhový ventilační systém uzavřeného motoru MLU 3436 K/4.[17]*

Vnitřní okruh je uzavřený. „Zdrojem tlaku vzduchu pro motor je malý radiální ventilátor, který je umístěn na hřídeli pod čely statorového vinutí na zadní straně motoru. Vzduch se nasává z rotorových axiálních ventilačních kanálů, poté prochází přes lopatky ventilátoru košem čel statorového vinutí na straně spojení cívek, vstupuje do vnitřní řady statorových axiálních kanálů, z kterých vystupuje na přední straně motoru a po průchodu mezi čely statorových cívek vstupuje do rotorových kanálů, kde se okruh uzavírá.“ [17] Vzduch se ochlazuje ve statorových kanálech a na ložiskových štítech motoru. Vnější okruh je uzavřený a radiální tlačný ventilátor je umístěn na přední straně motoru. Nasává přes ochranné síto vzduch z okolí stroje a poté se profukuje vnější řada statorových kanálů. Vzduch se vyfukuje na zadní straně motoru.

Vylepšený ventilační systém má motor 4MLU 3436 K/4 vyvinutý firmou Škoda Electric. Jedná se o uzavřený asynchronní motor s vlastní ventilací a profukovaným rotorem. Jeho hlavní předností je přidání další ventilační větve do vnějšího okruhu chlazení. Okolní vzduch tak proudí nejen vnějšími statorovými kanály, ale zároveň i rotorem. Vzduch tak vstupuje navíc i ze zadní strany motoru. Vylepšený způsob chlazení přinesl nárůst výkonu o více než 5% při stejných zástavbových rozměrech.



Obr. 5. Motor s profukovaným rotorem 4MLU 3436 K/4– okolní vzduch proudí nejen vnějšími statorovými kanály, ale i rotorem [17]

2. Tepelné trubice

Když se řekne tepelné trubice, nemusí být hned jasné, co se pod tímto názvem skrývá. Znamější a používanější je anglické označení Heat Pipe. Tepelné trubice dnes představují velmi účinný přenos tepla a hlavně pracují pasivně a samostatně. Není tedy potřeba žádného dalšího zařízení k přenosu. V práci je popisován jejich tvar, součásti a funkce a také možné další vylepšení vlastností.

Prvotního zájmu se tepelné dočkaly v aplikacích pro vesmírný program, největšího zájmu se v minulosti ale dočkaly při nárůstu výpočetního výkonu v počítačové elektronice. Při zmenšování rozměrů součástek počítačů nastal problém s chlazením celé soustavy. Hlavním důvodem pro rozšíření tepelných trubic je tedy limitace a omezení prostorem a později také snižování váhy u notebooků. V porovnání s chladiči mají tepelné trubice výborný tepelný výkon s nižší vahou a mohou lehce přenášet teplo od procesorů do ostatních částí zařízení, kde je teplo odevzdáno do okolí. Existují dva hlavní důvody pro rozšíření. Nárůst poptávky po takto efektivních řešeních chlazení srazila cenu tepelných trubic rychle dolů a zvýšila se tedy jejich aplikace. Dříve bývaly právě kvůli vysoké ceně používány pouze v prémiových vysoce výkonných systémech. Dnes jsou základem každých lepších součástek. Důležité je také zmínit, že právě kvůli pasivnímu odvádění tepla nevytvářejí tepelné trubice žádný hluk. Díky tomu se snižuje i hlučnost a náročnost chlazení celých soustav. Místo několika menších chlazení stačí mít jedno větší a efektivnější s nižším počtem decibelů. Tepelné trubice jsou také skvělou designérskou pomůckou, kdy v podstatě nechladíme efektivně jen samostatnou součástku, ale i její okolí. Proto můžeme bez obav další součástky citlivější na teplo umístit blíže ke zdroji tepla.

2.1 Princip tepelných trubic

Tepelné trubice jsou pasivní přenašeče tepla s extrémně velkou vodivostí. Dvofázový mechanismus tepelného přenosu má vlastnosti stokrát až několika tisíckrát lepší než ekvivalentní kus mědi. Tepelné trubice jsou uzavřené nádoby, ve kterých se vyskytuje vakuum a jsou částečně naplněny kapalinou – pro elektronická zařízení jako počítače je to voda, která slouží jako přenašeč energie. Obal tepelných trubic je nejtypičtěji vyroben z mědi a má tvar válce. Mohou se ale také vyskytovat varianty s obdélníkovým průřezem a větší plochou.

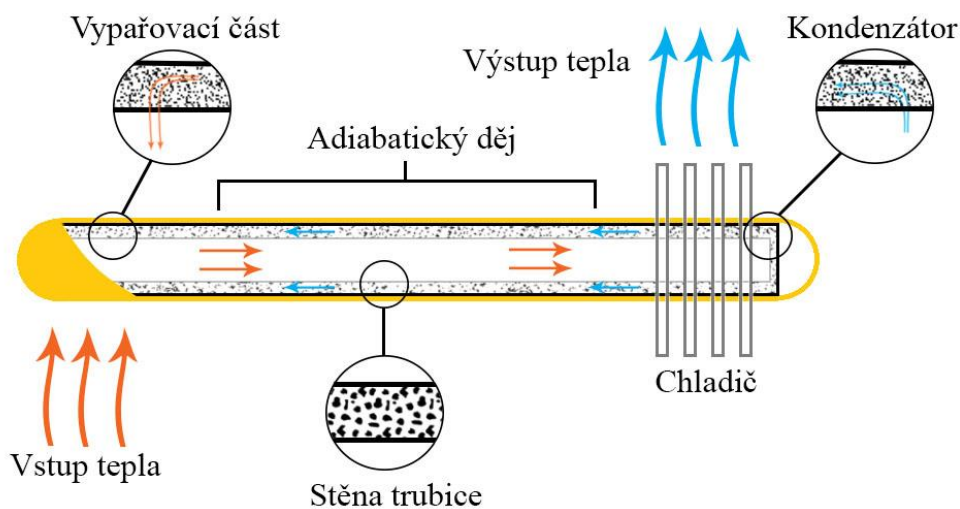
Vnitřní stěny nádoby jsou pórovité a uplatňují se zde kapilární síly. Tyto síly vytahují kondenzát z kondenzátorové části tepelné trubice do výparní sekce. Jakmile se

teplo dostane na povrch tepelné trubice, dojde uvnitř k vypaření kapaliny. Páry ve výparnickové sekci mají nepatrně vyšší teplotu a tlak než ostatní části trubice. Vytvářejí teplotní spád, který nutí páry přecházet do studenějších částí tepelné trubice. Když páry kondenzují na stěnách tepelné trubice, teplo se přenáší do stěn trubice a následně na chladič. Dochází k odstranění tepla z par. Kapilární efekt následně transportuje kapalinu zpět do výparnickové sekce.

Jedná se o uzavřenou smyčku, která pokračuje tak dlouho, jak je tepelná trubice ohřívána. Tento dvoufázový uzavřený systém poskytuje obrovskou tepelnou vodivost. V číslech měděný drát s průměrem 3 milimetry a délkou 10 centimetrů, který je na jednom konci ohříván, na druhém ochlazován, a který je mezi těmito částmi izolovaný, má výsledný rozdíl teplot 353 °C. Oproti tomu tepelná trubice se stejnými rozměry a za stejných podmínek ztratí při přechodu z jednoho konce na druhý jen pod 5 °C. To je zhruba sedmdesátkrát lepší tepelná vodivost pro tepelné trubice než samotná měď. [8,9]

Vstupující teplo způsobuje vypařování pracovní kapaliny. Je vytvořen teplotní rozdíl, který nutí výpary k přesunu ke kondenzátoru.

Pracovní páry vydávají své teplo a kondenzují. Kapalina je vtahována do stěny trubice a navrací se zpět do vypařovací části.



Slouží jako pumpa využívající kapilární síly pro pracovní kapalinu, která se navrací z kondenzátoru do vypařovací části.

Obr. 6 Ilustrační znázornění tepelné trubice

2.2 Vlivy na přenos energie

Největší vliv na tepelný přenos mají pracovní kapalina a porézní struktura. Nejtypičtější používané kapaliny jsou voda, amoniak, freon či metanol. Pro komerční

využití se preferuje voda, protože rozsah teplot, které chceme chladit, se pohybuje v rozmezí 50 až 150 °C. Voda má vysoké povrchové napětí, které nám dovoluje generovat vyšší tlak pro tepelnou pumpu než u kterékoliv jiné kapaliny. Struktura vody také způsobuje nejnižší přenos materiálu v kapalně i výparné fázi. To zapříčiňuje velmi výkonný oběh.

Porézní struktura reprezentuje systém pumpy, kde cirkuluje kondenzát z kondenzátoru do výparníku. Existují různé tvary uzpůsobené pro jiná použití. Pro tepelné trubice tvořené mědí a vodou jsou to například: drážky, síťovina nebo spékané prášky. Schopnost přenášet je dána průměrem pórů a permeabilitou materiálu. Čím jsou póry menší, tím větší je kapacita pumpy a tím je i větší propustnost.

Drážky jsou vytvářeny jako vnitřní část trubice při výrobním procesu. Poskytují nízkoenergetický přenos, ale kvůli výrobním omezením na velikost drážek může být schopnost přenosu média limitována. Síťovaná struktura je vytvořena s menšími póry, a proto může nabídnout vyšší výkon. Oproti drážkám je ale připevnění síťoviny dalším krokem při výrobě, což může prodloužit celkový čas výroby tepelné trubice. Z toho důvodu je výroba těchto trubic o něco dražší. [8]



Drážky

Síťová struktura

Spékané prášky

Obr. 7 Kapilární struktury tepelných trubic [26]

Spékané prášky jsou vytvořené z padesáti procent z porézní kovové struktury, která je nedílnou součástí obalu tepelné trubice. Hlavní výhodou těchto trubic je, že mohou pracovat pod jakýmkoliv úhlem a to dokonce i proti gravitaci – tepelný zdroj je nad chladičem. Obecně se tepelný přenos snižuje, jakmile se zvyšuje úhel oproti gravitaci. Drážkové a síťované trubice nemusí vytvořit dostatečné kapilární síly, aby překonaly gravitační pole. To může zapříčinit, že se kapalina nedostane zpět do výparnickové části a trubice „vyschne“. Dojde k přerušení tepelného oběhu. Trubice se spékanými prášky také

dokáží odolávat vysokým teplotním výkyvům. Je zde velké množství povrchu dostupného pro vypařování. Normální tepelná trubice se spékanými prášky dokáže odolávat změnám 50 W/cm^2 a v testovacích podmínkách zvládly až 200 W/cm^2 . Na porovnání tepelné trubice se síťovanou strukturou dokáže zvládnout přibližně 10 W/cm^2 a drážkované trubice 5 W/cm^2 . Pro klasické zakulacené tepelné trubice platí, že nesmí být moc ohýbány. Nejvyšší dovolený rádius ohybu je třikrát průměr tepelné trubice. Větší zahnutí může způsobit kolaps nebo zablokování oběhu výparů, v lepším případě omezení přenosu tepla. Ani počet ohybů by neměl být příliš velký. Měla by se volit co nejkratší cesta v závislosti na rozložení ostatních součástí. [1,2]

O důsledcích natočení tepelných trubic více pojednává například článek *Comparative Study of Heat Pipes Performances in Different Orientations* [10]. Byl proveden experiment, kdy došlo k natáčení tří tepelných trubic v úhlech od $+90$ do -90 stupňů. V první části se zkoumá výkon tepelných trubic s různou strukturou a třech různých průměrech trubic za stálé teploty. Z výsledků je patrné, že při natočení tepelných trubic, kdy je kondenzátorová část nahoře a výparníková část dole se uplatňuje gravitace. Až do vodorovné polohy mají všechny tři tepelné trubice téměř stejné výsledky. Jakmile se dostává výparníková část nad kondenzátorovou, klesá tím i účinnost vedení tepla pro drážkované a síťované struktury. Tepelné trubice z kovových prášků mají minimální dopad na vodivost tepla při různém natočení.

V další části se zkoumají tři tepelné trubice s různou strukturou při zvyšujícím se tepelném namáhání. Zde jsou výsledky podobné jako v první části. Když se uplatňuje gravitační efekt, mají všechny trubice dobrou tepelnou vodivost. Při zvyšovaném namáhání ale dochází k rychlému poklesu tepelné vodivosti. Trubice s kovovými prášky si vede nejlépe.

Ve třetí části je zkoumána tepelná trubice s průměrem 6 milimetrů a vytvořená z práškových slitin za zvyšující se okolní teploty $35 \text{ }^\circ\text{C}$, 45°C , a $55 \text{ }^\circ\text{C}$. Z výsledků lze vyčíst, že jakmile se zvyšuje okolní teplota, klesá teplotní rozdíl mezi vypařovací a kondenzátorovou částí trubice. Proto by měla být trubice více efektivní v přenosu tepla za vyšší okolní teploty. [10]

Jedním z parametrů trubic je také šířka stěny tepelné trubice. Ta však nemá na přenos tepla téměř žádný vliv. Průchod tepla stěnou je velmi dobrý a její ztenčení nemá přínos. Rozměry vnitřní části trubice, kde probíhají hlavní přeměny energie, zůstávají neměnné a to je rozhodující. [10,11]

2.3 Nevýhody tepelných trubic

I když jsou tepelné trubice velmi jednoduché součástky, musíme brát ohled na několik faktorů. Musíme dávat pozor při výběru pracovní kapaliny a materiálu tepelné trubice. Kapalina nesmí v žádném případě chemicky reagovat s materiálem tepelné trubice, musí být chemicky inertní. Může dojít ke vzniku nekondenzujících par, které se budou hromadit v kondenzátoru. Následuje neefektivní přenos energie a rychlá degradace materiálu uvnitř trubice. Chemická reakce pracovní kapaliny s obalem vede k narušení vakua uvnitř trubice. Tepelná trubice také nesmí být poškozena vnějším prostředím, ve kterém se vyskytuje. Mohlo by dojít k narušení obalu a následnému zničení. Z těchto důvodů je dnes nejvyužívanější kombinace měděné trubice a vody jako pracovní kapaliny. Vzájemně nereagují a vydrží tisíce hodin bez výrazného snížení přenosu tepla.

V závislosti na prostředí, ve kterém se vyskytuje tepelná trubice, se začínají objevovat problémy při teplotách pod bodem mrazu. Voda při ochlazování zvětšuje svůj objem až to takové míry, že dojde k poškození obálky tepelné trubice nebo narušení struktury pro kapilární přenos. Dobře si v těchto podmínkách ale vedou trubice se spékanými prášky, které dokáží pohltit a redukovat expanzi vody za nízkých teplot. [9] V testech bylo zjištěno, že tepelné trubice složené v kombinaci měď a voda se stěnou ze spékaných prášků, dokáží pracovat bez problémů i v $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Musíme počítat i s náchylností na mechanické změny a vibrace u tepelných trubic. Přílišné namáhání může poškodit jak vnitřní kapilární strukturu, tak i oddělit strukturu od tepelné trubice. Opět dojde ke snížení tepelné vodivosti. Nejlépe v testech opět obstály tepelné trubice se spékanými prášky. Jejich vnitřní struktura jim zabezpečuje dostatečnou pevnost. Dokázaly obstát i v armádních podmínkách, které jsou daleko za hranicemi typického komerčního využití. I přesto musíme stále myslet na to, že tepelná trubice je jen kus kovu, který musí být dostatečně vyztužený. K tepelným trubicím je připojen chladič. Pro menší aplikace jsou nejvyužívanější hliníkové chladiče. Jelikož se jedná o vzájemný kontakt dvou kovů, musíme v některých případech dát pozor opět na to, ve kterém prostředí se vyskytují. Např. při zvýšené vlhkosti nebo obsahu solí v atmosféře musíme vylepšit izolaci mezi těmito dvěma kovy, aby nedošlo ke galvanické reakci. [9]

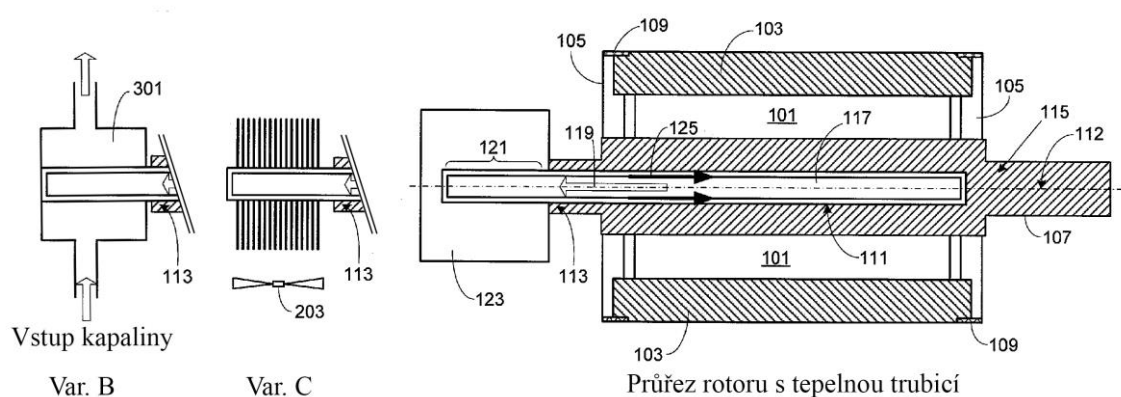
2.4 Dnešní použití tepelných trubic

S tepelnými trubicemi se můžeme nejčastěji setkat v osobních počítačích. V přenosných počítačích, kde je prostor velmi omezený, můžeme využít několika

samostatných trubíc, které odvádí teplo do jednoho místa s chladičem. Následuje odvod tepla mimo zařízení. V oblasti motorů je lze použít pro chlazení jednotlivých součástí. Nemusí být ani přímo součástí motorů. Lze chladit ovládací prvky motorů, které produkují obrovské množství tepla vzhledem ke svým rozměrům, například výkonové součástky. Díky tepelným trubiciím lze teplo z malé plochy odvést do lepších a efektivnějších chladičů, které můžeme lépe konstrukčně umístit.

Motor od firmy Tesla

K velkému množství variant chlazení samotných elektrických motorů můžeme až z nedávné doby přidat další typ, a to chlazení rotorů pomocí tepelných trubíc. Jedná se tedy spíše o odvod tepla z nejkritičtějších míst a ochlazování tepelné trubice. Motory na tomto principu používá např. firma Tesla pro chlazení pohonů svých elektromobilů. Používáme nejméně jednu tepelnou trubici a tepelný výměník. Rotor je nepohyblivě spojen s hřídelem. Právě do prostoru hřídele zabudováváme tepelné trubice. Ty jsou umístěny podélně v celé délce rotoru a jsou paralelní s osou rotoru. Jeden konec trubice je vyveden na druhou stranu od hřídele do prodloužené části. Rotor může být buď celistvý s otvory pro tepelné trubice, nebo se zde nachází dutina, ve které jsou trubice uloženy. V rotoru může být jedna, nebo častěji větší počet tepelných trubíc, které mohou být i zploštěné do eliptického tvaru. Trubice jsou vždy stejně daleko od osy rotoru a rozloženy do kruhu. V prodloužené části hřídele se nachází tepelný výměník, který může zahrnovat chladič. Ten je složen z několika lopatek (radiální lopatky, lopatky s různým natočením). Lopatky by měly být alespoň částečně zakryty. Odvod tepla může být také zajištěn pomocí kapaliny.

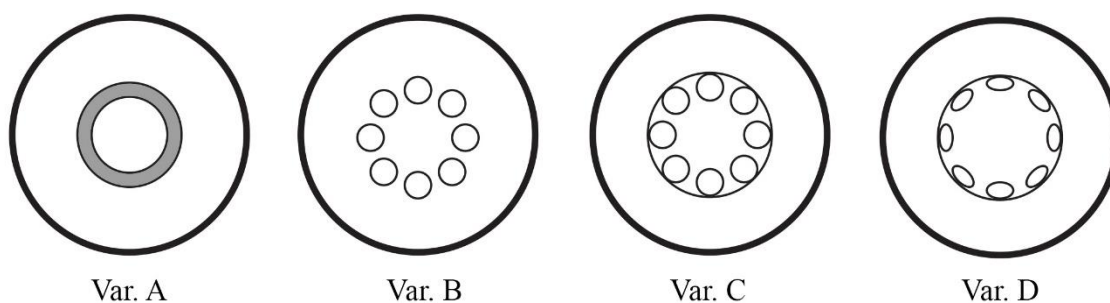


Obr. 8 Průřez rotorem s tepelnou trubicí ve hřídeli a chlazením. Varianta B – vodní chlazení, Varianta C – Vzduchové chlazení [14]

V obr. 8 je znázorněný průřez rotoru podél osy s tepelnou trubicí ve hřídeli. Rotor je složený z plechů, které tvoří rotorový paket (101), které tvoří jádro rotoru, a při povrchu jsou vodivé tyče (103). Ty přesahují na obou stranách přes magnetické jádro. Pomocí kruhu nakrátko (105) se provádí mechanické i elektrické spojení tyčí (103). Tyto části rotoru jsou připevněny ke hřídeli (107). V některých případech montáže může být rotor opatřen kontejnmentovým prstencem (109). Část hřídele je dutá (111). Z jedné části je hřídel uzavřena (113) a na druhé straně otevřený (113). Dutina je paralelní s osou rotoru (112) a je v ní umístěna minimálně jedna tepelná trubice (117). V případě většího množství trubic mohou být svázaný, připájeny, naletovány nebo jinak přichyceny. Zde je důležité správné připevnění trubic, aby došlo k dostatečnému přestupu tepla mezi tepelnou trubicí a rotorem. V některých konfiguracích se provádí přímý kontakt mezi tepelnou trubicí a povrchem dutiny. Jindy se aplikuje lepidlo nebo pájka s velkou tepelnou vodivostí.

Při provozu zařízení dochází ke vzniku tepla uvnitř rotoru. V dutině se podél magnetického jádra nachází vypařovací část, a proto může teplo přecházet do trubice v celé délce jádra (119). Páry poté přechází směrem k výparníku (121). Zde dojde ke kondenzování par a teplo je předáno do chladiče (123). Chlazení může být provedeno pomocí lopatek (203) – vlastního chlazení, nebo chladicí kapalinou (301) – nuceným oběhem.

I když materiály pro tepelné trubice mohou být různé, preferují se kvůli svým vlastnostem měděné tepelné trubice se spékánými prášky a jako pracovní kapalina je nejlepší voda. [14]



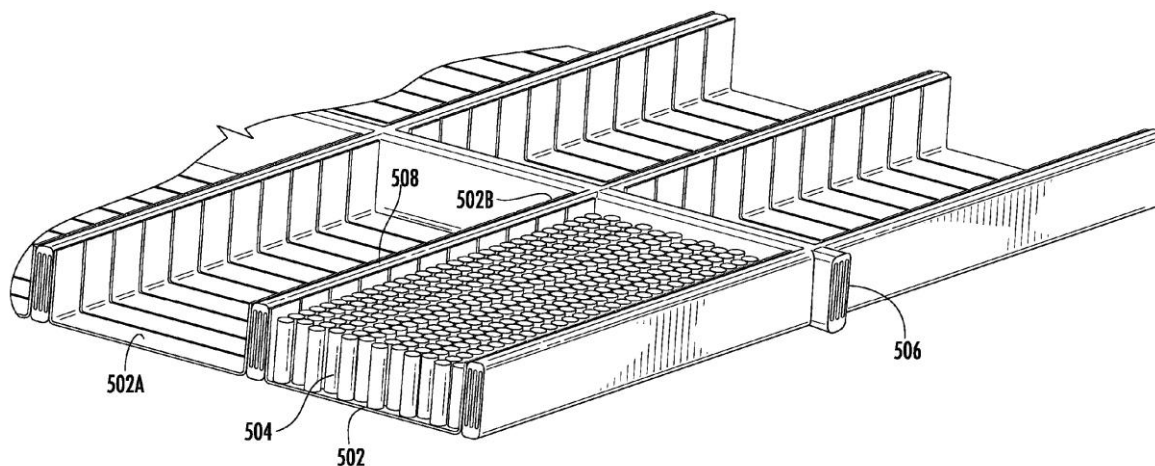
Obr. 9 Varianty rozložení tepelných trubic v rotoru.

Varianta A – jedna tepelná trubice ve středu rotoru, varianta B – tepelné trubice rozmístěné v kruhu, varianta C – dutina v rotoru s tepelnými trubicemi rozmístěnými do kruhu, varianta D – dutina v rotoru s eliptickými tepelnými trubicemi rozmístěnými do kruhu.

Baterie

Systémy založené na skladování energie mají mnoho podob. Například v elektrických automobilech se vyskytuje několik samostatných zásobníků energie umístěných do přihrádek. Dohromady vytvářejí soubor baterií. Všechny tyto baterie vytvářejí během využívání teplo. Ať při jejich nabíjení, nebo při provozu, kdy dodávají energii např. do elektrických pohonů. Balíčky baterií mohou být uzpůsobeny např. tak, že jsou všechny baterie natočeny stejně a „stojí“. Jsou propojené zespoda pomocí anody a seshora pomocí katody. Mezi jednotlivými bateriemi je trochu prostoru, ve kterém je umístěné chladicí potrubí a každé se dotýká alespoň většiny baterií. Potrubím protéká chladicí kapalina, která odvádí přebytečné teplo mimo buňky s bateriemi. Musíme mít ale zajištěný oběh kapaliny pro baterii.

Pro zlepšení odvodu tepla lze využít tepelné trubice. Umístíme je na dno buňky a jednotlivé baterie postavíme na tepelné trubice. Samozřejmě se elektricky oddělí, aby nedošlo ke zkratu. Tepelné trubice jsou na jednom konci nebo na obou zahnuté. Jsou do tvaru U nebo do L. Trubice pak mají alespoň jednu kondenzační část za ohybem. Z této části odvádíme teplo do centrálního chladicího systému, který může obsahovat chlazení kapalinou. Existují i další varianty, ale všechny využívají tepelných trubic k odvodu tepla na krátkou vzdálenost do hlavního systému chlazení. [16]



Obr. 10 Chlazení buněk s bateriemi. 502 – tepelná trubice umístěná pod bateriemi, 502A – vypařovací část, 502B – kondenzační část, 506 – hlavní systém chlazení, 508 – pomocný systém chlazení [16]

Solární kolektory

Jedná se o variaci tepelné trubice, která je tvořená ze skla. Používá se pro absorbování slunečního záření a transport ke sběrači tohoto tepla. Trubice má kapilární strukturu tvořenou z částeczek zrnitého skla a jsou dohromady ztavené. [25]

2.5 Matematický popis tepelných trubice

Vytvoření matematického modelu není jednoduché, protože se nám v trubicích projevují i fyzikální jevy, které způsobí vytvoření složitého nelineárního systému částečných diferenciálních rovnic. Ty jsou závislé na čase, prostoru, rychlosti, teplotě a tlaku. Musíme také započítat případné změny tvaru trubic. Často se pro jednodušší aplikace můžeme setkat se zanedbáním některých méně ovlivňujících jevů.

Následující rovnice jsou sestavené pro základní tepelné trubice, na kterých se uplatňují obecné předpoklady. Trubice jsou horizontálně umístěné a můžeme tedy zanedbat ovlivnění gravitací. Lze zanedbat i vliv sálání tepla mezi jednotlivými konci trubice, protože rozdíl teplot je velmi malý. Také se předpokládá, že tepelná trubice je uprostřed vždy dutá a že výpary z pracovní kapaliny se nevyskytují v kapilární struktuře a je zde pouze kapalina. Pro tuto trubicí také všechny procesy fungují ideálně. Lze však tyto rovnice rozšířit o zanedbané proměnné a získat lepší výsledky.

Pohyb kapaliny ve struktuře

V této rovnici je použita Brinkmanova rovnice, Navier-Stokův systém rovnic, který se používá pro pohyb kapaliny skrz porézní médium. Například existuje i jednodušší Darcyho rovnice, která vychází z rovnic pro kapalinu proudící skrz porézní médium jako je například písek.

$$\rho \frac{\partial u_l}{\partial t} - \nabla \cdot \eta (\nabla u_l + (\nabla u_l)^T) - \left(\frac{\eta}{K} u_l + \nabla p - F \right) = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla u_l = 0 \quad (2.2)$$

Rovnice jsou závislé na čase, hustota tekutiny je ρ , dynamická viskozita η , permeabilita K , tlak p , rychlost kapaliny u_l a vnější síly jsou označeny F (například gravitace), nabla operátor ∇ reprezentuje skalární součiny.

Pohyb par uvnitř trubice

Následující rovnice je vyjádřena Navier-Stokesovou rovnicí, která popisuje průtok par.

$$\rho \frac{\partial u_v}{\partial t} + \rho(u_v \cdot \nabla)u_v = \nabla \cdot \left[-pl + \eta(\nabla u_v + (\nabla u_v)^T) - \left(\frac{2\eta}{3} - \kappa \right) (\nabla \cdot u_v)l \right] + F \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_v) = 0 \quad (2.4)$$

u_v značí rychlost páry, p je tlak, η je dynamická viskozita, κ dilatační viskozita, ρ je hustota a t je čas.

Přenos tepla v trubici

Pro přenos tepla v trubici, se zanedbáním tepelného sálání, lze použít rovnici

$$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = Q - \rho \cdot C \cdot u \cdot \nabla T \quad (2.5)$$

Kde C_v je tepelná kapacita páry, T je teplota, t je čas a λ je tepelná vodivost pracovní látky. Část rovnice $\rho \cdot C \cdot u \cdot \nabla T$ reprezentuje započítání přestupu tepla konvekcí, která se obvykle zanedbává. [13]

2.6 Omezující podmínky funkčnosti tepelných trubíc

Limitní podmínky nám udávají, v jakém rozmezí se mohou jednotlivé parametry nacházet, aby mohly tepelné trubice správně fungovat. Každý ze vztahů vyjadřuje pouze část z celkového tepelného výkonu a obecně se nazývá jako limitní podmínky pro přenos tepla. Je jich několik a každá část je něčím specifická a není závislá na ostatních.

Celkové omezení přenosu tepla

Použijeme-li kapacitu pro přenos tepla, jako funkci hlavní pracovní teploty (adiabatická teplota páry), můžeme poté určit jednotlivé limitní funkce. Tento způsob vytvoří oblast výkonu pro tepelné trubice jako v obrázku č. 10. Kombinací jednotlivých limit v podstatě vznikne pracovní oblast vhodná pro tepelné trubice. Je to kombinace maximálních teplot a přenosových kapacit. Je tedy možné určit, bude-li tepelná trubice schopná za daných podmínek přenášet teplo. Omezení se dělí na několik typů.

Kapilární omezení

Kapilární omezení je spojeno s rozdílem tlaků mezi jednotlivými konci tepelné trubice. Tekutina vzlíná od kondenzátoru do výparníku. Maximální kapilární tlak $(\Delta p_c)_{max}$ musí být větší než součet jednotlivých ztrát tlaku v celé trubici Δp_t .

$$(\Delta p_c)_{max} \geq \Delta p_t \quad (2.6)$$

Maximální kapilární tlak Δp_c vznikající v tepelné trubici je dán Laplace-Youngovou rovnicí

$$\Delta p_c = \frac{2\sigma}{r_{eff}} \cos \psi \quad (2.7)$$

Kde ψ je kontaktní úhel mezi kapalinou a strukturou. Jedná se o vyjádření schopnosti pracovní kapaliny smáčet se do kapilární struktury (když $\psi = 0^\circ$, jedná se o perfektně smáčivý systém). r_{eff} je efektivní rádius pórů struktury, lze určit pro různé typy struktury.

V případě, kdy nejsou síly mezi výparníkem a kondenzátorem dostatečně velké, dojde k vyschnutí tepelné trubice a ta přestane vést. Pro většinu tepelných trubíc můžeme určit kapilární limit rovnicí

$$Q_C = \frac{\sigma_l \rho_l l_v}{\mu_1} \cdot \frac{K A_K}{l_{eff}} \cdot \left(\frac{2}{r_{eff}} - \frac{\rho_l g l_t \cos \psi}{\sigma_l} \right) \quad (2.8)$$

Kde σ povrchové napětí kapaliny, K je permeabilita struktury (m^2), A_K je průřez v příčném řezu (m^2), ρ_l je hustota kapaliny (kg/m^3), μ_1 je viskozita kapaliny ($N \cdot s/m^2$), r_{eff} je kapilární rádius ve výparníku (m), g je gravitační zrychlení ($9,8 \text{ m/s}^2$), l_t je celková délka trubice (m), l_{eff} efektivní délka trubice (m). [14]

Viskózní omezení

Omezení se vyskytuje při nízkých teplotách, kdy se nemusí objevit dostatečně velký tlak pro zahájení vypařování a celkový oběh.

$$Q_{vp} = \frac{\pi \cdot r_v^4 \cdot h_{fg} \cdot \rho_{v,e} \cdot P_{v,e}}{12 \cdot \mu_{v,e} \cdot l_{eff}} \quad (2.9)$$

Kde r_v je rádius výparníkového jádra v příčném řezu, h_{fg} zbytkové teplo po vypařování.

Akustické omezení

Akustické omezení vzniká při nízké hustotě tlaku společně s daným množstvím kapaliny a může vést k velmi velkým rychlostem výparů. To může vést ke krátkodobým přerušením toku při přenosu páry.

$$Q_s = 0,474 \cdot A_K \cdot h_{fg} \cdot (\rho_v \cdot P_v)^{0,5} \quad (2.10)$$

Omezení strháváním

Objevuje se v případě vysokých sil, které vznikají při návratu kapaliny do výparníku (proti pohybu páry). Tyto síly mohou způsobit „strhávání“ kapaliny zpět do páry a jsou přeneseny opět do kondenzátoru. To způsobuje nedostatečný tok kapaliny ve struktuře.

$$Q_{ent} = A_K \cdot h_{fg} \cdot \left(\frac{\rho_v \sigma_l}{2 \cdot r_{con,ave}} \right)^2 \quad (2.11)$$

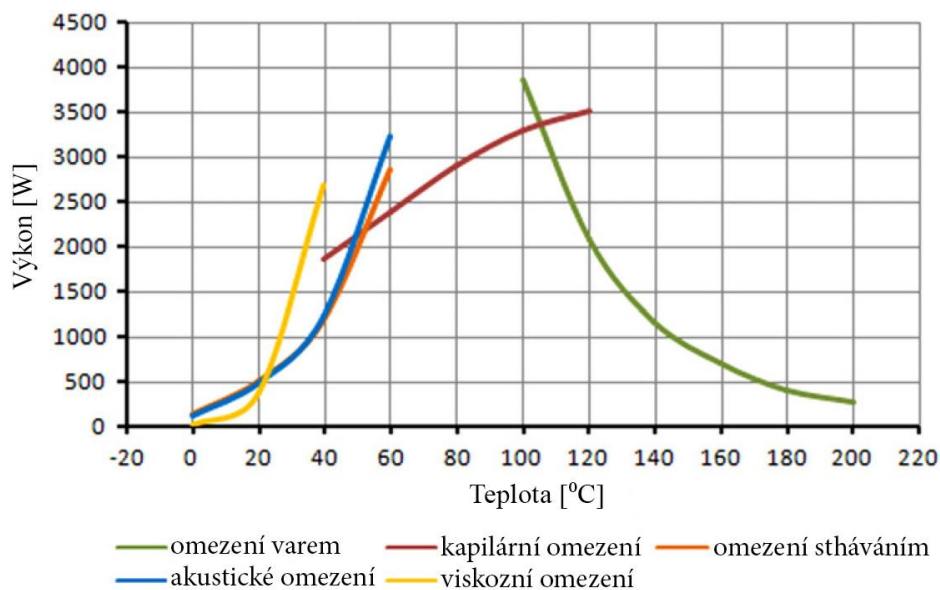
Kde $r_{c,ave}$ průměrný poloměr kondenzátoru.

Omezení varem

Vzniká, když je výparníková část namáhána příliš velkým teplem. To může zapříčinit vznik bublin v této části, které částečně brání návratu kapaliny ze struktury, a to vede k vyschnutí tepelné trubice. Nazývá se také jako mezní tepelný tok. [14]

$$Q_b = \frac{4\pi \cdot l_{eff} \cdot \lambda_{eff} \cdot T_v \cdot \sigma_l}{h_{fg} \cdot \rho_v \cdot \ln \frac{r_i}{r_e}} \cdot \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_{eff}} \right) \quad (2.12)$$

Kde λ_{eff} je efektivní tepelná vodivost kombinace voda-kapilární struktura, T_v je saturační teplota páry (K), r_i je vnitřní poloměr nádoby (m), r_v je rádius výparníkového jádra, r_n je nukleační poloměr.



Obr. 10 Graf omezení přenosu tepla v tepelných trubicích [26]

V obr. 10 jsou znázorněny matematické výpočty jednotlivých omezení pro tepelnou trubici, která je ze spěkaných prášků, pracovní médium je voda, vnitřní průměr je 20 mm, celková délka 2 m, natočená o 90° (kondenzátor nahoře). V závislosti na rozměrech tepelné trubice, složení struktury a typu pracovní kapaliny se jednotlivá omezení liší.

Základní parametry tepelné trubice jsou

Délka výparníku	l_e	[m]
Délka adiabatické sekce	l_{ad}	[m]
Délka kondenzátoru	l_{con}	[m]
Celková délka	l_t	[m]
Efektivní délka	l_{eff}	[m]
Příčný řez	A	[m ²]
Úhel natočení	ψ	[°]
Tepelná vodivost	λ_m	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Plocha kapilární struktury v příčném řezu	A_k	[m ²]
Rádus výparníku	r_e	[m]

Parametry v závislosti na typu kapilární struktury

Parametry potřebné k přesnějším výpočtům pohybu kapaliny v různé kapilární struktuře.

Struktura drážková	Výška drážky	h	[m]
	Šířka drážky	b	[m]
	Rozteč drážky	s	[m]
	Permeability	K	[m ²]
	Efektivní rádus kapilární struktury	r_{eff}	[m]
Struktura kapilární	Efektivní tepelná vodivost	λ_{eff}	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
	Průměr kapiláry	d	[m]
	Šířka kapiláry	a	[m]
	Poréznost	e	[m]
	Permeabilita	K	[m ²]
Struktura ze spěkaných prášků	Efektivní rádus kapilární struktury	r_{eff}	[m]
	Efektivní tepelná vodivost	λ_{eff}	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
	Průměr sféry	d	[m]
	Poréznost	e	[m]
	Permeabilita	K	[m ²]
	Efektivní rádus kapilární struktury	r_{eff}	[m]
	Efektivní tepelná vodivost	λ_{eff}	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]

3. Závěr

Trakční motory jsou nabízeny v co nejuniverzálnějším řešení. Pro jednotlivé motory jsou nabízené různé stupně krytí s možností jeho zlepšení. Stejně možnosti platí i pro chlazení motorů a jsou pro tyto případy navrhovány. Záleží na podmínkách, ve kterých bude motor ve finále pracovat. Dnešními nevyužívanějšími typy chlazení trakčních motorů je vlastní vzduchové chlazení nebo cizí vodní chlazení. Vzduchové chlazení je levné, konstrukčně jednoduché a využívá všudypřítomného nového vzduchu. Vodní chlazení má samostatný vodní okruh a tepelný výměník, ale je účinnější než vzduchové chlazení. Navíc rychlostí procházejícího chladicího média můžeme zlepšit chlazení stroje. Zrychlovat ale nelze do nekonečna. Jedním z problémů je také nerovnoměrné ochlazování stroje. Lépe chlazené jsou prostory, kde vstupuje chladivo do stroje. U výstupu je chladivo nejteplejší a zde dochází dlouhodobě k největším oteplením stroje. I s tímto problémem by nám mohly pomoci tepelné trubice.

Tepelné trubice jsou pasivní součástky umožňující okamžitý a bezztrátový přenos tepla z jednoho konce trubice na druhý. Lze jimi odvádět teplo z kritických míst a následně předávat chladicímu médiu. Nejedná se tedy přímo o chlazení, ale spíše o přenos tepla z kritických míst. Hlavní výhodou je ulehčení chlazení těžko přístupných míst. Velký přínos by mohl být pro aplikace s dvojitým chlazením, například uzavřené motory. Vnitřní okruh odebírá teplo z vnitřku stroje a odvádí mimo pracovní prostory. Poté klasicky dochází k přenosu tepla přes stěnu motoru, která má zvětšenou plochu povrchu žebrováním. Pro přenos tepla by se dala vytvořit síť z tepelných trubic procházejících skrz stěnu motoru. Z místa vnitřního chladicího okruhu by se dalo lépe přenášet teplo do sekundárního okruhu. Nevýhodné to může být z hlediska těsnění kolem trubic.

Dalším způsobem využití tepelných trubic v trakčních motorech je aplikace přímo do rotoru. Vypařovací část tepelné trubice se nachází v celém prostoru rotoru a dochází tak k rovnoměrnému přenášení tepla z rotoru. Nevzniká jedna teplejší část rotoru. Následně dochází k chlazení vodou nebo vzduchem.

Nejuniverzálnější tepelné trubice mají kapilární strukturu vyrobenou ze spékaných prášků, která je nejméně náchylná na síly působící na trubici například při rozjezdu soustavy nebo otáčení rotoru (gravitační, odstředivé, setrvačné síly). Také u nich téměř nezáleží na poloze, ve které jsou umístěny. Jejich tepelný přenos je dlouhodobě neměnný a jsou proto nejvhodnější do náročných aplikací.

Nejvyžívanější jsou tepelné trubice vyrobené z mědi a pracovní kapalinou je voda, která má nejvhodnější teploty pro vypařování a kondenzaci. Tvarově jsou nejpoužívanější válcové nebo obdélníkové. Tepelné trubice jsou ale náchylné na mechanické namáhání, proto musíme dbát na jejich dostatečné upevnění, stejně tak jako na maximální kontakt s ochlazovanou plochou, aby byl co největší tepelný přenos.

Použitá literatura

- [1] Petrov G.N.; *Elektrické stroje I*; Academia, 1980
- [2] Hassdenteufel J., Květ K. a kol.; *Elektrotechnické materiály*; SNTL, 1967
- [3] BuL B. K a kol.; *Elektrické přístroje*; SNTL, 1977
- [4] Ota Roubíček; *Elektrické motory a pohony*; BEN, 2004
- [5] Bartoš V.; *Elektrické stroje*; Západočeská univerzita, 1995
- [6] Ondruška E., Maloušek A; *Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých*; SNTL, 1985
- [7] Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V.; *Design of rotating electrical machines*; Druhé vydání, Wiley, 2014

Články z veřejně dostupné online internetové databáze www.ieee.org ke dni 20.5.2016

- [8] Hong Xie, Andre Ali, Rakesh Bhatia; *The use of heat pipes in personal computers*, 1998 [Cit 20.5.2016]
- [9] Jerome Toth, Robert DeHoff, Kevin Grubb; *Heat Pipes: The silent Way to Manage Desktop Thermal Problems*, 1998 [Cit 20.5.2016]
- [10] CK Loh, Enisa Harris, DJ Chou; *Comparative Study of Heat Pipes Performances in Different Orientations*, 2005 [Cit 20.5.2016]
- [11] Zhang Jie, Ren Yan, Zhang Lihong, Liang Himin; *Analysis of influencing factors of heat transfer performance of Heat pipe heat exchanger*, 2009 [Cit 20.5.2016]
- [12] Deng Qing-fang, Zhou Dongyi; *Research on Numerical Simulation of High Temperature Heat Pipe*, 2011 [Cit 20.5.2016]

Články z online databáze knihovny Západočeské univerzity v Plzni ke dni 21.5.2016. Dostupné z WWW: <http://zcu.summon.serialssolutions.com/>

- [13] Mathematical Modeling, *Numerical Simulation and Statistical Optimization of Heat Pipe Design*, 2006 [Cit 21.5.2016]
- [14] Patrik Nemeč, Alexander Čaja, Milan Malcho; *Mathematical model for transport limitations of heat pipe*, 2011 [Cit 21.5.2016]
- [26] Patrik Nemeč, Alexander Čaja, Milan Malcho, *Mathematical model for heat transfer limitations of heat pipe*, 2011 [Cit 21.5.2016]

Internetové zdroje dostupné ke dni 22.5.2016.

- [15] Tesla Motors, Inc. *Rotor assembly with heat pipe cooling system*, US 2014/0368064 A1, United States Patent Application Publication [Cit 22.5.2016]
<http://www.google.com/patents/US20140368064>
- [16] Tesla Motors, Inc. *Energy storage system with heat pipe thermal management*, US 2015/0244036, United States Patent Application Publication, [Cit 22.5.2016]
<http://www.google.com/patents/US20150244036>
- [17] Odbornecasopisy.cz. [online]. [Cit 22.5.2016]. Dostupné z WWW:
<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/inovace-ventilacniho-systemu-uzavreneho-tramvajoveho-motoru--14024>
- [18] Škoda a.s. [online]. [Cit 22.5.2016]. Dostupné z WWW:
<http://www.skoda.cz/cs/produkty/trakcni-motory/>
- [19] Brožura firmy ABB. [online]. [Cit 22.5.2016]. Dostupné z WWW:
https://library.e.abb.com/public/f3e14a1d9af9aa8bc1257d580042f707/Traction_Motors-Brochure-9AKK106320-EN-09-2014.pdf
- [20] Raveo s.r.o. [online]. [Cit 22.5.2016]. Dostupné z WWW:

- <http://www.raveo.cz/trakcni-ac-motory>
- [21] Raveo s.r.o. [online]. [Cit 22.5.2016]. Dostupné z WWW:
<http://www.raveo.cz/sites/default/files/download/2015/09/DC%20Motors%20Catalogue.pdf>
- [22] Raveo s.r.o. [online]. [Cit 22.5.2016]. Dostupné z WWW:
<http://www.raveo.cz/sites/default/files/download/2015/09/Brushless%20PMS%20ENG.pdf>
- [23] EKOVA ELECTRIC a.s. [online]. [Cit 22.5.2016]. Dostupné z WWW:
<http://d2pq0d091hcfvs.cloudfront.net/uploads/assets/d9c7833e-b0b9-4d3c-995e-cd172e3321b8.pdf>
- [24] SKD Trade s.r.o. [online]. [Cit 22.5.2016]. Dostupné z WWW:
<http://www.skd.cz/firma/index.htm>, záložka točivé stroje
- [25] Kunshan Jue-Chung Electronics Co., Ltd. *Multi-section heat-pipe solar collector*, 2013/0167834 A1, United States Patent Application Publication, [online]. [Cit 22.5.2016]
<http://www.google.com/patents/US20130167834>
- [26] Frostytech.com. [online]. [Cit 22.5.2016]. Dostupné z WWW:
<http://www.frostytech.com/articleview.cfm?articleID=2466>
- [27] Škoda Electric a.s. [online]. [Cit 25.5.2016]. Dostupné z WWW:
<http://www.skoda.cz/cs/o-spolecnosti/spolecnosti-skoda/skoda-electric-as/Contents.2/0/E525F378620334383998389E0CC4EC64/resource.pdf>