

Rešerše: Moderní chlazení elektrických strojů s využitím aditivních technologií

Pracoviště:	Regionální inovační centrum elektrotechniky
Číslo dokumentu:	22190-024-2023
Typ zprávy:	Výzkumná zpráva
Řešitelé:	Martin Skalický, Lukáš Sobotka, Lukáš Veg, Roman Pechánek, Jan Kaska, Zdeněk Frank
Vedoucí úkolu:	Roman Pechánek
Počet stran:	30
Datum vydání:	28.02.2023
Oborové zařazení:	2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Electrical and electronic engineering

Zadavatel / zákazník:	Zpracovatel:
Centrum pokročilých strojů a výrobních technologií - TN02000028	Západočeská univerzita v Plzni Research and Innovation Centre for Electrical Engineering Univerzitní 8 306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Ing. Martin Skalický
skalickm@fel.zcu.cz

Anotace

Výzkumná zpráva obsahuje přehled a zhodnocení současného stavu vývoje chladících systémů moderních elektrických strojů realizovaných pomocí technologií additive manufacturing (AM).

Klíčová slova

Elektrické stroje, chladící systémy, aditivní výroba, 3D tisk

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Review: Modern thermal management systems for electrical machines with application of additive manufacturing

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

The research report reviews and evaluates current trends and development in field of thermal management systems for modern electrical machines realized by additive manufacturing technologies.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Electrical machines, thermal management, additive manufacturing, 3D printing.

Obsah

ÚVOD	4
1 PŘÍMÉ AKTIVNÍ CHLAZENÍ STATOROVÉHO VINUTÍ	5
2 AKTIVNÍ CHLAZENÍ VINUTÍ POMOCÍ DRÁŽKOVÝCH KANÁLŮ	9
3 ZLEPŠENÍ CHLAZENÍ ČEL VINUTÍ.....	14
4 OPTIMALIZACE WATER JACKETU	16
5 NÁSTROJE PASIVNÍHO CHLAZENÍ	19
6 CHLAZENÍ POMOCÍ SKUPENSKÉ PŘEMĚNY	23
7 ZHODNOCENÍ	24

Úvod

Téměř každá publikace zabývající se možnostmi výroby elektrických strojů za pomoci aditivních technologií je uváděna slovy, že v současné době topologie a technologie výroby elektrických strojů dospěla do takové dospělosti, že každý další pokrok by vyžadoval velké úsilí a vynaložené prostředky a proto je nutné k dosažení pokroku přehodnotit přístup k návrhu elektrických strojů jako takový. A k tomu by mohl dopomoci v poslední době často diskutovaný pokrok v oblasti 3D tisku především kovů, který umožňuje návrháři dosud nevídanou geometrickou svodu a otevírá dveře aplikaci optimalizovaným geometriím nevídaných tvarů. Rovněž použití 3D tisku umožňuje podstatně rychlejší a levnější výrobu jak prototypů, tak i pozdější nasazení do sériové výroby.[1], [2]

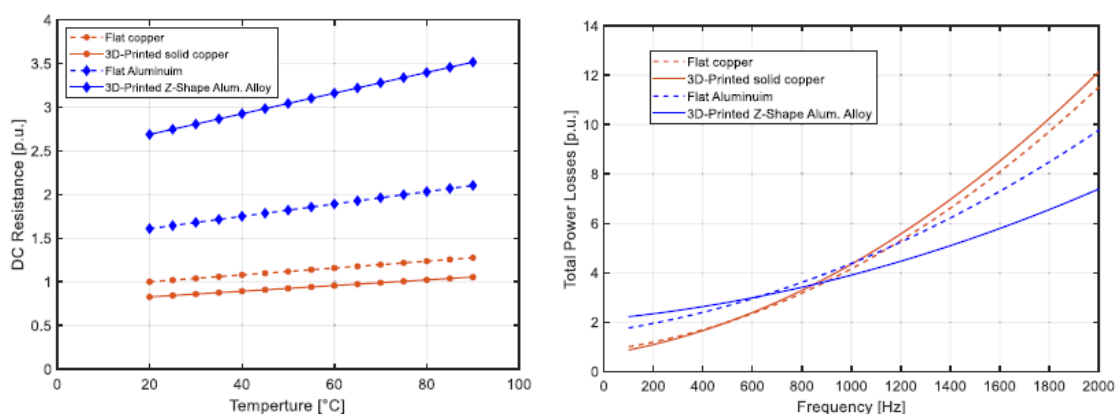
V oblasti chlazení elektrických strojů by se prozatím publikované aplikace s použitím aditivních technologií dali rozdělit na následující oblasti:

- Přímé aktivní chlazení statorového vinutí
- Aktivní chlazení vinutí pomocí drážkových kanálů
- Zlepšení chlazení čel vinutí
- Optimalizace water jacketu
- Nástroje pasivního chlazení
- Chlazení pomocí skupenské přeměny

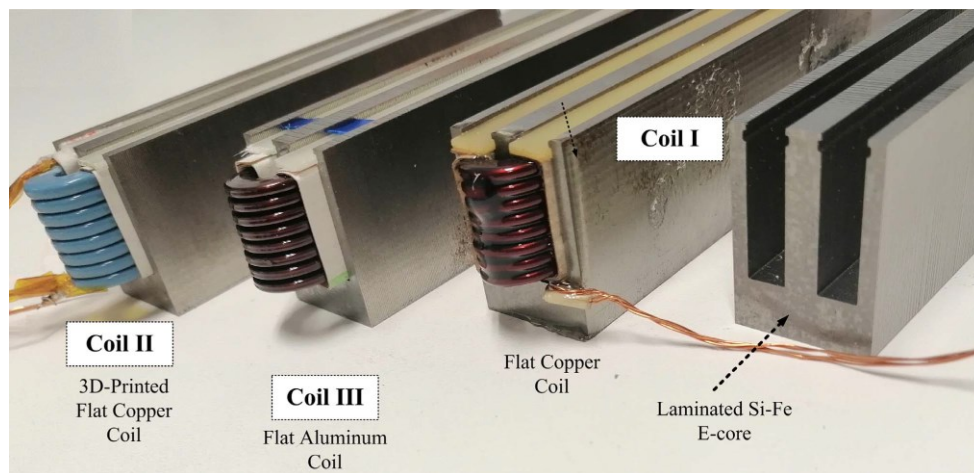
1 Přímé aktivní chlazení statorového vinutí

Jedna z oblastí použití aditivních technologií je výroba statorového vinutí. Na rozdíl od tradičních vsypávaných vinutí, je možné geometrii vinutí přímo uzpůsobit tvaru drážky a dosahovat tak výrazně vyšších činitelů plnění drážky a tím i velmi dobrému přenosu tepla mezi vinutím a magnetickým obvodem. Je předpokládána aplikace převážně na zubová vinutí, kde s použitím tisku odpadá omezení s minimálním poloměrem ohybu vodiče čímž je umožněno zkrácení čel vinutí. Hlavní nevýhodou tištěných vinutí jsou zvýšené přídavné ztráty ve vinutí vlivem působení rozptylových toků a napájení vyššími frekvencemi. Problematikou snížení střídavých ztrát tištěných vinutí se zabývají například publikace [3], [4]

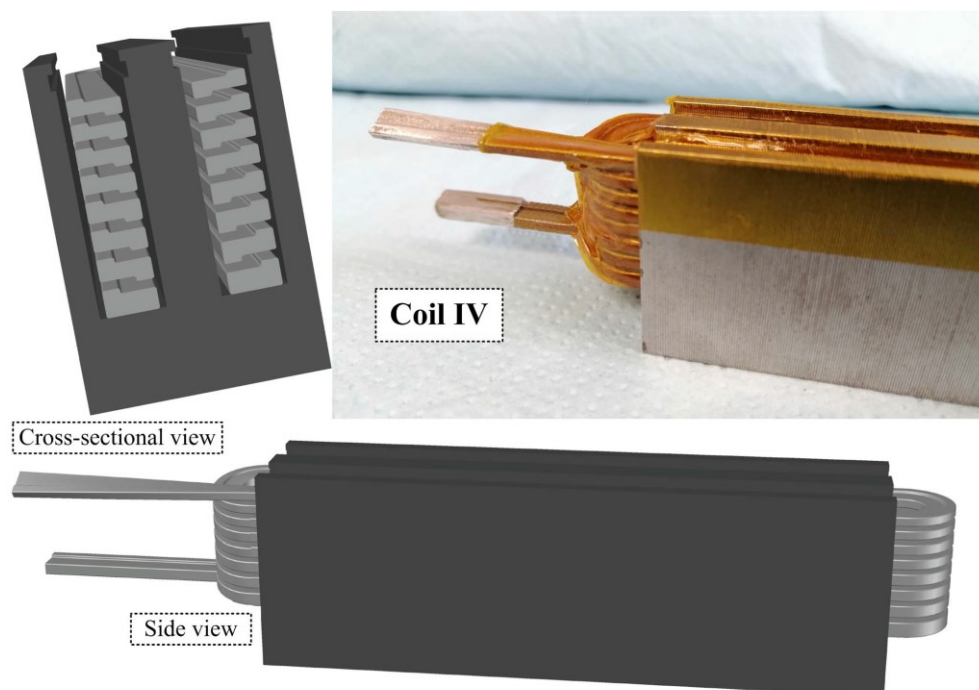
Zajímavá je zejména publikace [4], kde jsou porovnány z hlediska ztrát cívky vyrobené tradičními technologiemi se vzorky vyrobenými z tištěné mědi, hliníku a s optimalizovanou geometrií vodičů. K vytištění měděné cívky byla použita čistá měď, přičemž bylo dosaženo 99,88% hustoty čisté mědi, k výrobě optimalizované hliníkové cívky byla využita slitina $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$, porovnání odporů výsledných cívek a celkových ztrát v závislosti na frekvenci je na Obrázku 1. Obrázek 2 ukazuje analyzované vzorky a Obrázek 3 model a vzorek optimalizované cívky. Z výsledků je vidět že při vyšších frekvencích již od 1kHz mají optimalizované hliníkové cívky menší ztráty než klasické měděné vodiče, přičemž hliníkové vinutí má nižší hmotnost a je snadněji vyrobitelné [4].



Obrázek 1: DC odpor a celkové ztráty v závislosti na frekvenci [4]

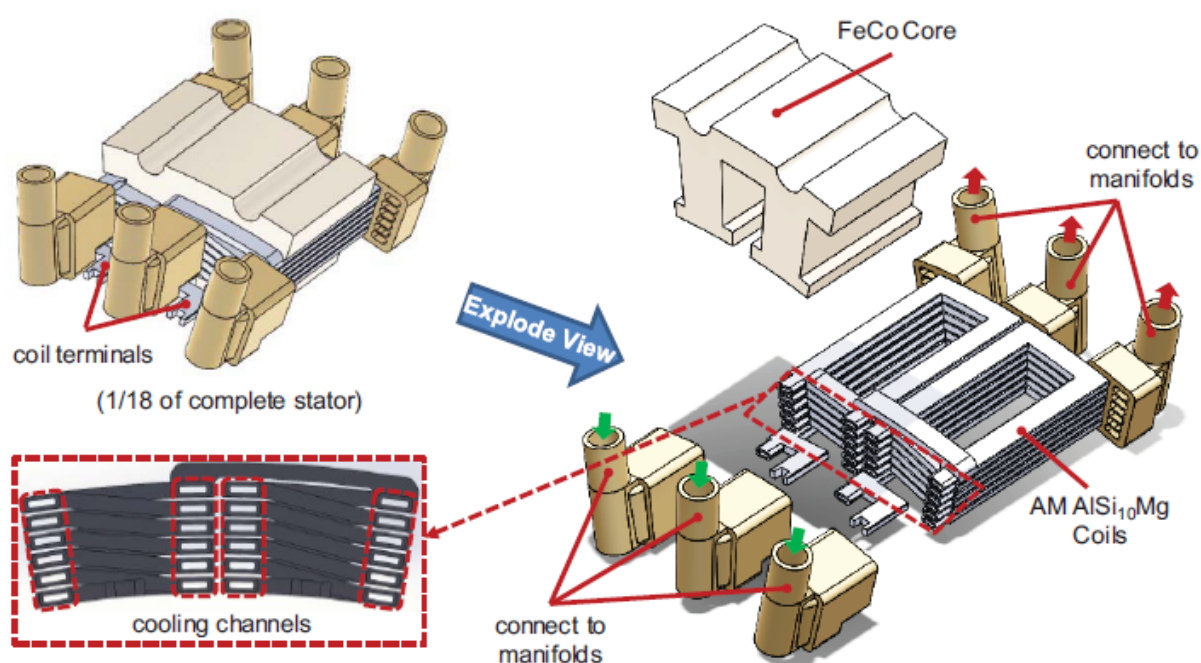


Obrázek 2: Analyzované vzorky[4]



Obrázek 3: Optimalizovaná hliníková cívka[4]

Právě nízké hmotnosti a výhodných vlastností při vyšších frekvencích je využito v publikaci [5] kde se autoři snaží zkonstruovat lehké stroje pro aplikaci v nových pohonech elektrických letadel s vysokou hustotou výkonu. Základ je stavěn na intenzivně chlazených tištěných hliníkových cívkách protékaných vodou, jejichž výroba je umožněna pouze za použití aditivních technologií.

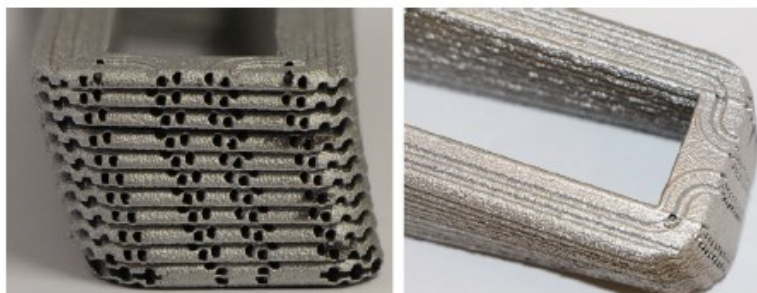


Obrázek 4: Koncepce lehkých intenzivně chlazených cívek [5]

V článku je vytvořen analytický tepelný model provázaný s elektromagnetickým výpočtem pomocí MKP, na jehož základě byla provedena parametrická optimalizace za účelem navýšení specifického výkonu stroje. Z výpočtu vychází proudová hustota 20 A/mm^2 a dosažený

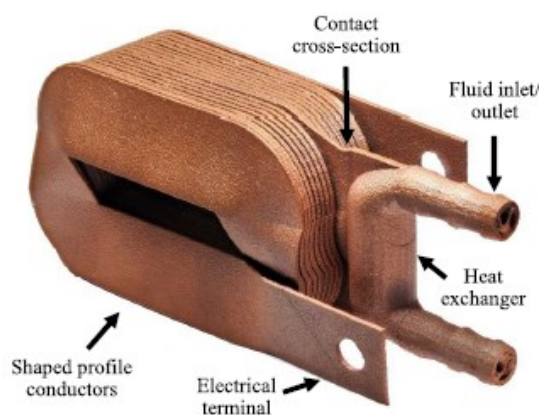
specifický výkon 20 kW/kg. Výsledku je dosaženo při průtoku jedním kanálem 0.057 l/min. s teplotou chladiva 85°C. Maximální teplota vinutí je necelých 110°C.[5]

Dalším příkladem je publikace [6], kde byl vytvořen prototyp hliníkové cívky s integrovanými chladicími kanály, přičemž bylo z měření dosaženo proudové hustoty 70 A/mm² při maximální teplotě vodičů 180 °C. Test byl proveden pouze pomocí DC proudu. Z konečnoprvkové analýzy vyšla průměrná proudová hustota při 100 Hz 58,5 A/mm². [6]

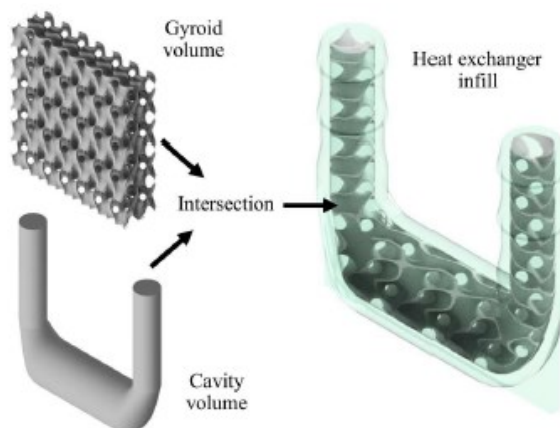


Obrázek 5: Prototyp aktivně chlazené cívky[6]

Posledním zástupcem aktivně chlazeného vinutí je publikace [7], která představuje koncept tepelného výměníku vytištěného jako součást vinutí v oblasti čel vinutí (Obrázek 6). Pro zlepšení chladicího efektu je kanál vyplněn strukturou zvětšující chladicí plochu (Obrázek 7).

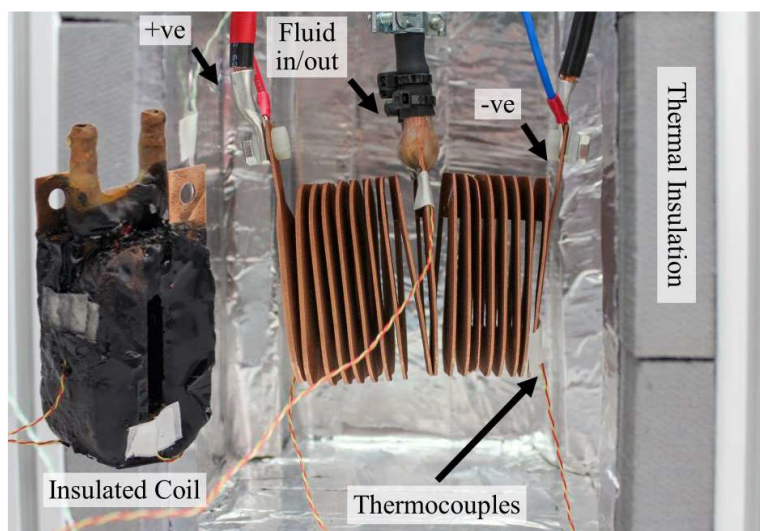


Obrázek 6: Prototyp cívky s výměníkem tepla[7]

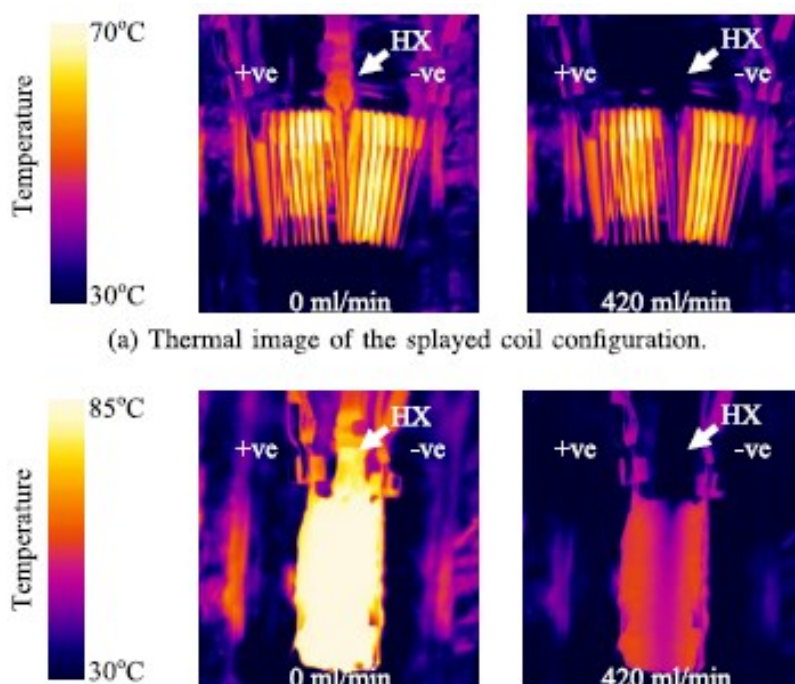


Obrázek 7: Výplň chladicího kanálu[7]

Článek představuje model, na jehož základě je určena optimální pozice výměníku. Model zohledňuje vedení tepla napříč závitů i vedení podél mědi. Dále je vytištěn prototyp ze slitiny CuCrZr dosahující 62% elektrické vodivosti standardní elektrolytické mědi. Na vzorcích jsou otestovány oba směry tepelného toku. Nejprve je cívka roztažena pro analýzu tepla vedeného podél závitů, a další cívka zaizolována v epoxidu a je změřen vliv vedení tepla přes izolaci (Obrázek 8).



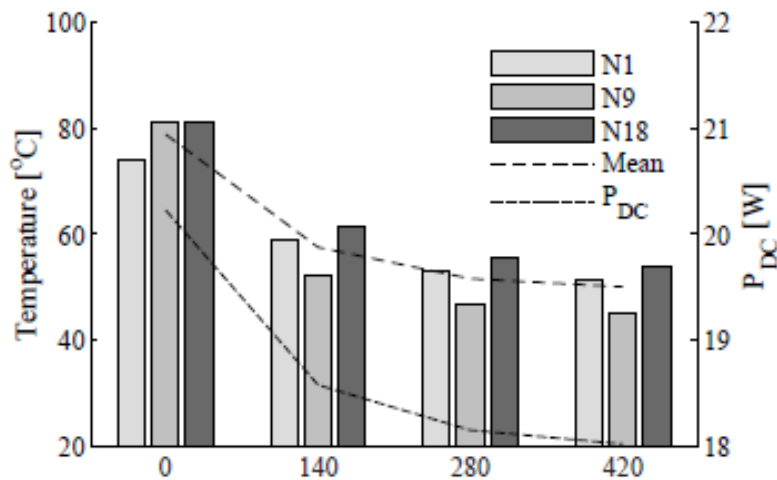
Obrázek 8: Stanovení vlivů jednotlivých směrů toku[7]



Obrázek 9: Rozložení teplot[7]

Výsledky ukazují že teplo je vedeno především napříč závitů (Obrázek 9). Teploty v závislosti na průtoku (Obrázek 10) ukazují že již 0,140 l/min dokáže efektivně snížit teplotu o 20 K. V závěru autoři především vyzdvihují schopnost výměníku celkem efektivně odvádět teplo z vinutí, přičemž nedochází ke snižování plnění drážky vlivem kanálů v drážce a zároveň není řešení tak citlivé na kontakt mezi vinutím a magnetickým jádrem. Nevýhoda je v aplikaci na

stroje s větší axiální délkou, jelikož bude na vinutí nastávat velký tepelný spád mezi chlazenou a nechlazenou stranou.[7]

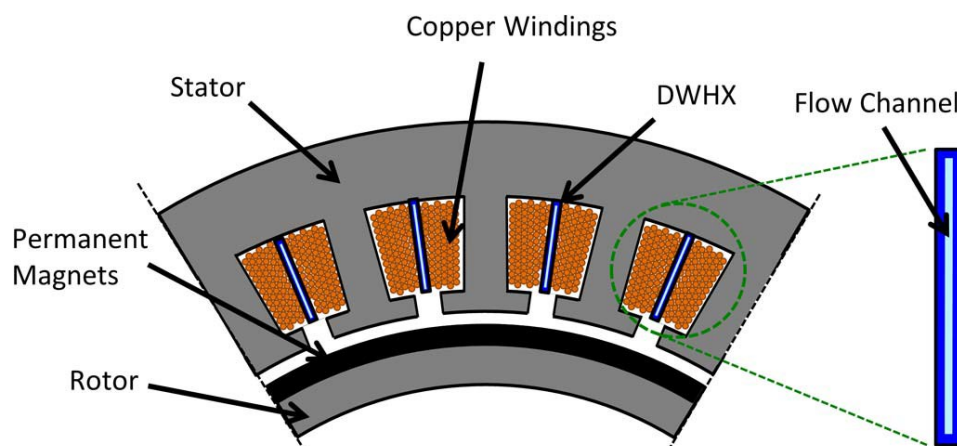


Obrázek 10: Vliv průtoku na teplotu vinutí[7]

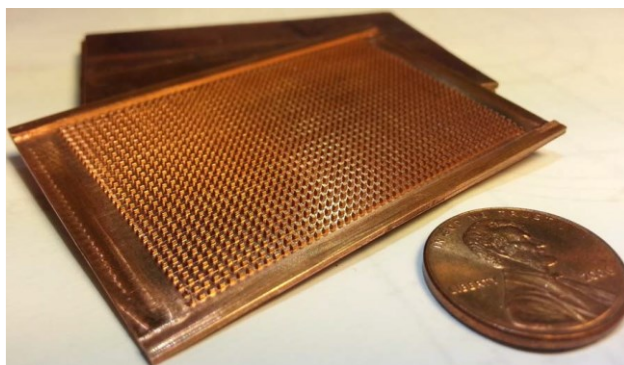
2 Aktivní chlazení vinutí pomocí drážkových kanálů

Na rozdíl od předchozí kapitoly, v tomto případě jsou použity tradiční cívky z měděných vodičů a za pomoci aditivních technologií jsou vytvářeny chladicí kanály umístěné v kontaktu s vinutím. Výhodou tohoto přístupu je menší tepelný odpor mezi chladivem a místem vzniku většiny ztrát. V porovnání s tradičním chlazením za použití water jacketu. Nevýhodou je snížený koeficient plnění drážky vlivem umístění kanálu a komplikovanější topologie stroje.

První takové řešení je v publikaci [8] kde je pro chlazení zubového vinutí využit kanál umístěný v drážce mezi jednotlivými cívkami (Obrázek 11). Pro výrobu prototypu nebylo v tomto případě využito aditivních technologií, kanál byl vyroben z čisté mědi rozdělený na dvě poloviny a později byl spájen do kompletního kanálu. Vnitřní povrch obsahuje malé výčnělky pro zvýšení koeficientu přestupu tepla (Obrázek 12). Právě za účelem optimalizace geometrie uvnitř kanálu by bylo výhodné pro tu aplikaci využít 3D tisku.



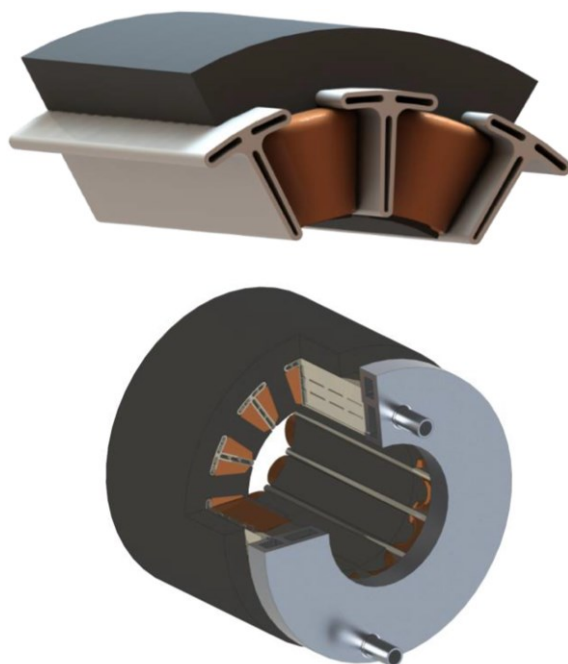
Obrázek 11: Umístění chladicího kanálu[8]



Obrázek 12: Geometrie uvnitř chladicího kanálu[8]

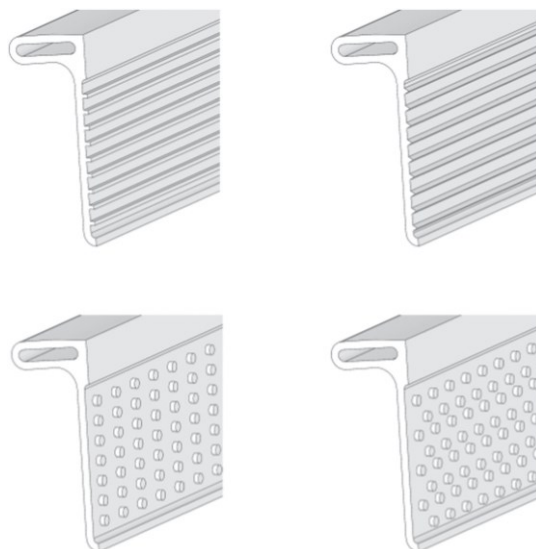
Kanál je v tomto případě vyroben z kovu, který by způsoboval dodatečné ztráty, a navíc by bylo potřeba použít i izolaci mezi vinutím a kanálem zhoršující vedení tepla, která v článku použita nebyla. Test byl proveden pouze DC proudem s maximální proudovou hustotou $27,8 \text{ A/mm}^2$. Při průtoku 5 l/min přes 10 paralelních kanálů maximální teplota dosáhla $131,3 \text{ }^\circ\text{C}$. [8]

Propracovanější řešení bylo prezentováno v publikaci [9]. Zde je použit tepelný výměník vytištěný z keramiky, zasunutý do volného prostoru mezi cívky zubového vinutí (Obrázek 13). jako materiál byla použita keramika oxidu hlinitého, který je výborný elektrický izolant, přičemž má dobrou tepelnou vodivost 24 W/mK a tepelnou odolnost až $1650 \text{ }^\circ\text{C}$.

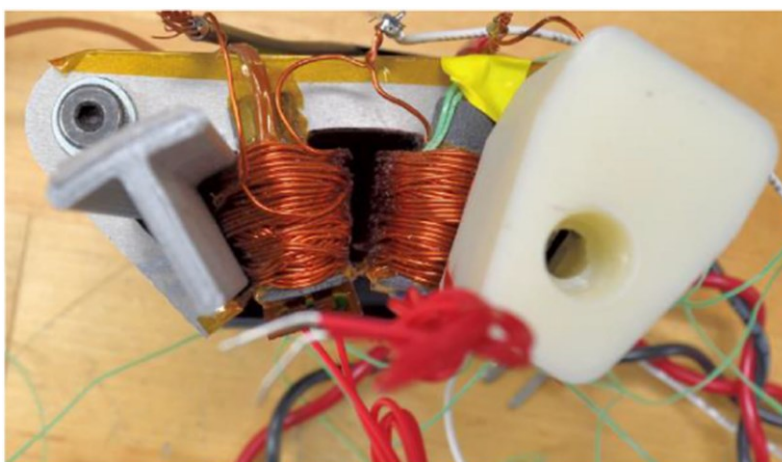


Obrázek 13: Keramický výměník tepla[9]

Bylo uvažováno s několika geometriemi žebér v chladicím kanále (Obrázek 14). Jednotlivé kanály byly analyzovány pomocí CFD a nakonec byly vytištěny prototypy s rovnými žebry, kterými byl osazen segment statorového paketu (Obrázek 15). Výměníky byly schopné odvést ztráty odpovídající 3 kW ztrátového výkonu stroje a při průtoku 1 l/min bylo dosaženo maximální teploty $200 \text{ }^\circ\text{C}$ (Tabulka 1). Tomu je odpovídající proudová hustota 35 A/mm^2 . [9]



Obrázek 14: Uvažované žebrav chladícím kanále[9]

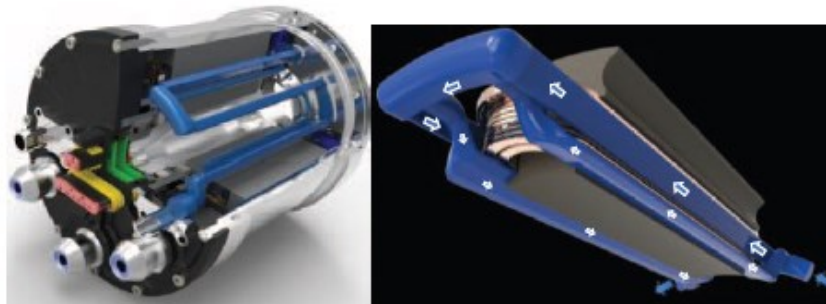


Obrázek 15: Segment statoru pro ověření výměníku tepla [9]

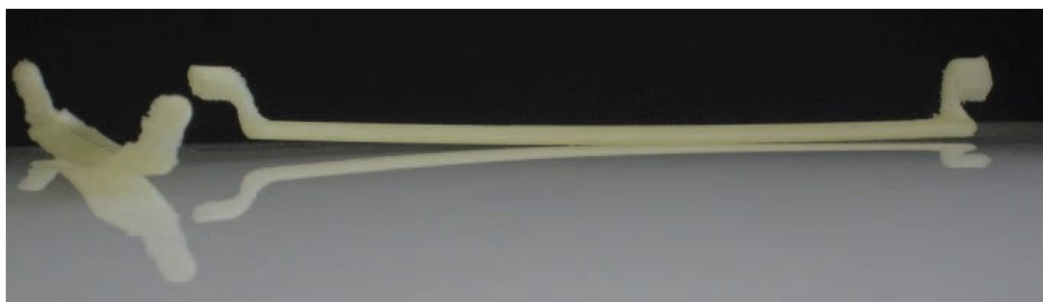
Tabulka 1: Shrnutí výsledků měření tepelných výměníků[9]

Variable		Copper Loss Only	Simulated Iron Loss		
Flow Rate (L/min)		0.45	0.45	0.95	0.95
Current Density (A/mm ²)		30.7	30.7	30.6	35.7
Heat Loads (W)	Per Coil	137.0	142.7	139.4	211.9
	Per Film Heater	0	34.6	34.5	38.4
	Equivalent Total Motor Loss	1643	2128	2087	3004
Measured Temperatures (°C)	In-Slot Hotspot (TC1)	124.6	142.0	135.0	184.6
	End Winding	131.9	150.5	143.3	199.6
	Ceramic 3D-DWHX Surface (TC3)	49.8	55.4	47.2	55.8
	Coil Average	107.7	119.8	114.0	156.3

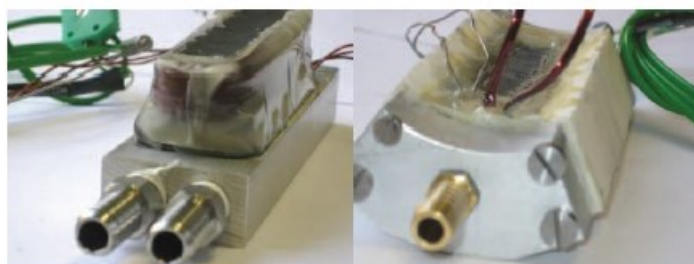
Další způsob tvorby chladících kanálů je popsán v [10]. Pro kanály je opět použit nevyužitý prostor okolo cívek zubového vinutí (Obrázek 16). Kanál je vytvarován z vodou rozpustného polyvinyl alkoholu (PVA) dodávaného jako klasický filament na tiskí rozpustitelných podpor (Obrázek 17). Po vytisknutí je kanál obalen vrstvou polyimidu pro izolaci mezi chladičem a vinutím a následně je kanál spolu s vinutím zalit do epoxidu. Nakonec je materiál kanálu rozpuštěn a v zalitém vinutí vznikne chladící kanál požadovaných rozměrů. Jsou vytvořeny 2 vzorky zubu stroje, jeden chlazený kanálem v kostře a druhý kanálem ve vinutí (Obrázek 18). Při ztrátách ve vinutí 100 W klesne teplota vinutí při použití kanálu ve vinutí z 223 °C na pouhých 82 °C při vstupní teplotě vody 50 °C. [10]



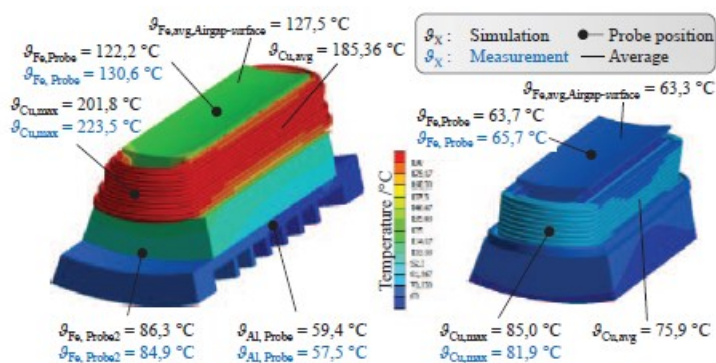
Obrázek 16: Geometrie chladících kanálů[10]



Obrázek 17: Profil kanálu vytisknutý z PVA[10]

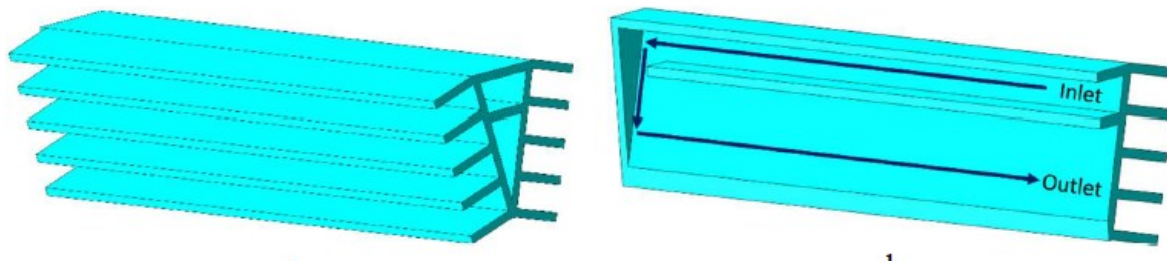


Obrázek 18: Měřené vzorky[10]



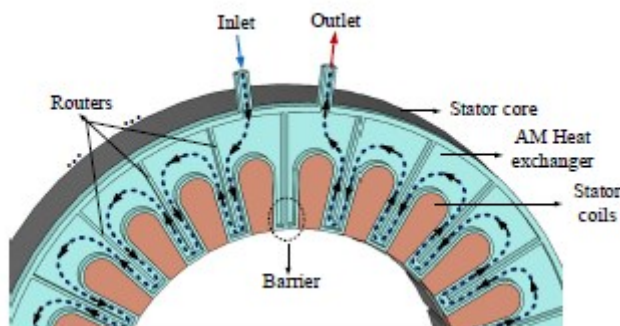
Obrázek 19: Výsledky simulace a měření[10]

V publikaci [11] byl vytvořen tepelný výměník z teplo vodivého nylonového filamentu (Obrázek 20). Jedná se o pevný nylon Ice9 od výrobce TCpoly který má tepelnou vodivost 4 W/mk v podélném směru a 1 W/mk ve směru napříč vrstvami tisku, přičemž má tento materiál tepelnou odolnost až 200 °C [12]. Rovněž se jedná o elektrický izolant, v kterém nevznikají dodatečné ztráty.

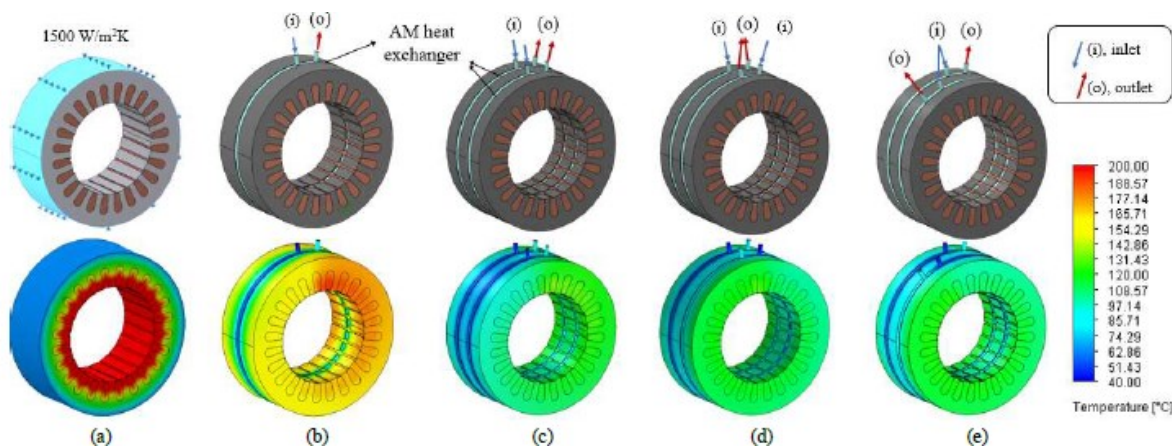


Obrázek 20: Navržený výměník tepla [11]

Poslední zástupce nepřímě chlazených vinutí je prezentován v [13]. Na rozdíl od ostatních případů zde není situován axiálně ve statorové drážce, ale kanál je veden tangenciálně ve statorovém paketu (Obrázek 21). Autor zde představuje možnost tisku chladicí vložky z hliníku, přičemž představuje a numericky analyzuje různé rozložení kanálů (Obrázek 22). Oproti axiálně vedenému kanálu nevýhoda s menší stykovou plochou mezi kanálem a chladičem, výhoda je snadná výrobitelnost a není snižováno množství mědi v drážce. Z výsledků (Tabulka 2) je vidět že je to oproti water jacketu celkem efektivní řešení, kde se dokázalo snížit oteplení až o 100 K. Autor udává že je možné dosáhnout proudové hustoty v tomto případě 26 A/mm². [13]



Obrázek 21: Tangenciální chladicí kanál [13]



Obrázek 22: Výsledky simulací různých rozložení kanálů [13]

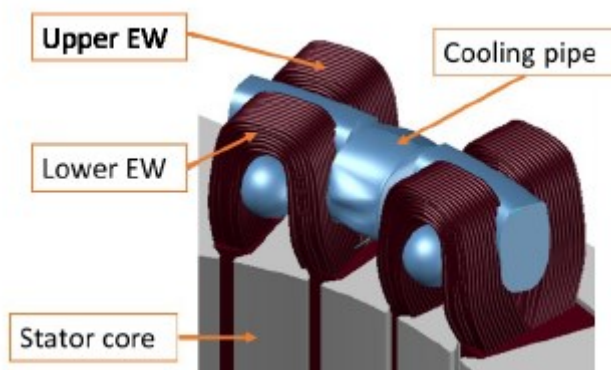
Tabulka 2: Tabulka výsledků z analýzy tangenciálních kanálů[13]

Design	Axial length	Total flow rate	Temp. adjusted copper loss	Average coil temperature	Maximum coil temp.	Maximum core temp.
Housing jacket cooling	100 mm	-	5.2 kW	185 °C	225 °C	221 °C
Proposed single HX	108 mm	1.5 L/min	4.8 kW	155 °C	193 °C	189 °C
Proposed double HX	114 mm		4.2 kW	108 °C	137 °C	132 °C
Proposed double HX with reverse flow			4.2 kW	108 °C	130 °C	128 °C
Proposed double HX with reverse flow and shift			4.2 kW	109 °C	126 °C	122 °C

Uvedený odhad proudové hustoty bude dosti optimistický, jelikož autor uvádí ekvivalentní tepelnou vodivost vinutí 4,6 W/mK a autor nikde neuvádí, zdali jsou ztráty ve vinutí zvětšeny o přírůstek v axiální délce a hliníková vložka bude způsobovat přídavné ztráty, které nejsou v tomto článku analyzovány.

3 Zlepšení chlazení čel vinutí

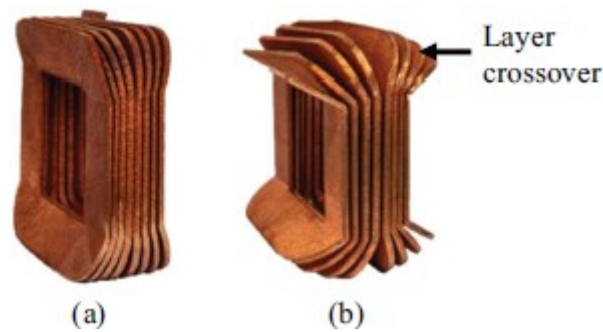
Několik autorů se věnovalo možnosti zlepšení chladících poměrů v oblasti čel vinutí. První z nich v publikaci [14] uvažoval nad umístěním flexibilní silikonové trubice mezi vodiče za účelem snížení teploty hotspotu konkrétního uvažovaného stroje s cílem prodloužení jeho životnosti. Silikonová trubice se při větším tlaku dokáže roztáhnout a zvětšit kontaktní plochu mezi trubicí a vinutím. Výsledkem simulace zatížení stroje v cyklu EUDC bylo snížení teploty drážky o 33 °C a teploty čela o 80 °C.[14]



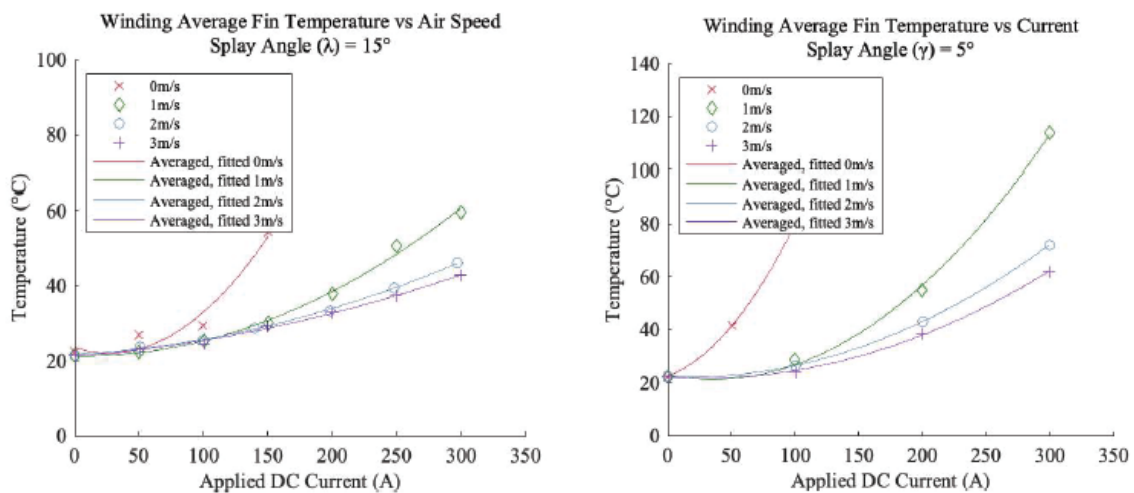
Obrázek 23: Chladící kanál umístěný v čelech[14]

V tomto případě aditivních technologií využito nebylo, ale chladící trubice by mohla být vyrobena z dříve zmíněného teplovodného vinylu, nebo technologií popsanou v [10], tak aby bylo dosaženo co možná nejlepšího přenosu tepla z vinutí do chladiva.

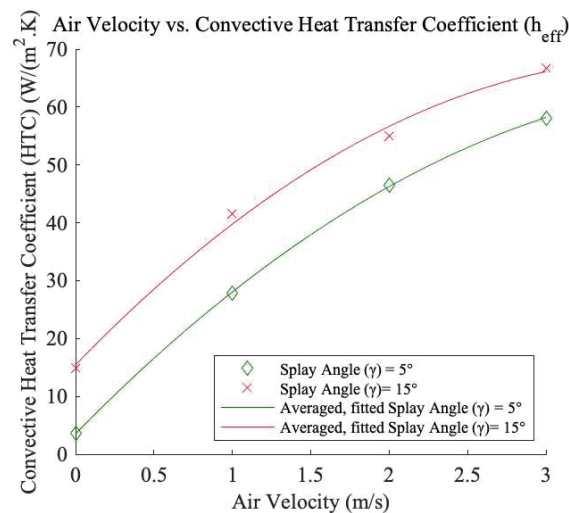
Další publikace [15] zkoumá vliv roztažení jednotlivých závitů tištěné měděné cívky, na zlepšení koeficientu přestupu tepla a tím i snížení teploty celého vinutí. Byly vytištěny vzorky rozevřené v úhlech 5 a 15° (Obrázek 24). Následně byly cívky umístěny do malého větrného tunelu s kontrolovanou rychlostí proudění vzduchu a bylo provedeno měření v rozsahu 0÷3 m/s, zatímco byly snímány teploty jednotlivých závitů cívky. Výsledné teploty pro různé nastavení parametrů ukazuje výrazný pokles teploty při roztažení 15° (Obrázek 25). Nakonec jsou analyzovány koeficienty přestupu tepla a je stanoveno průměrný nárůst koeficientu o 11 W/m²K při zvýšení roztažení z 5° na 15° (Obrázek 26).[15]



Obrázek 24: Cívky z čely pro zlepšení přenosu tepla[15]



Obrázek 25: Výsledné teploty v závislosti na proudu[15]

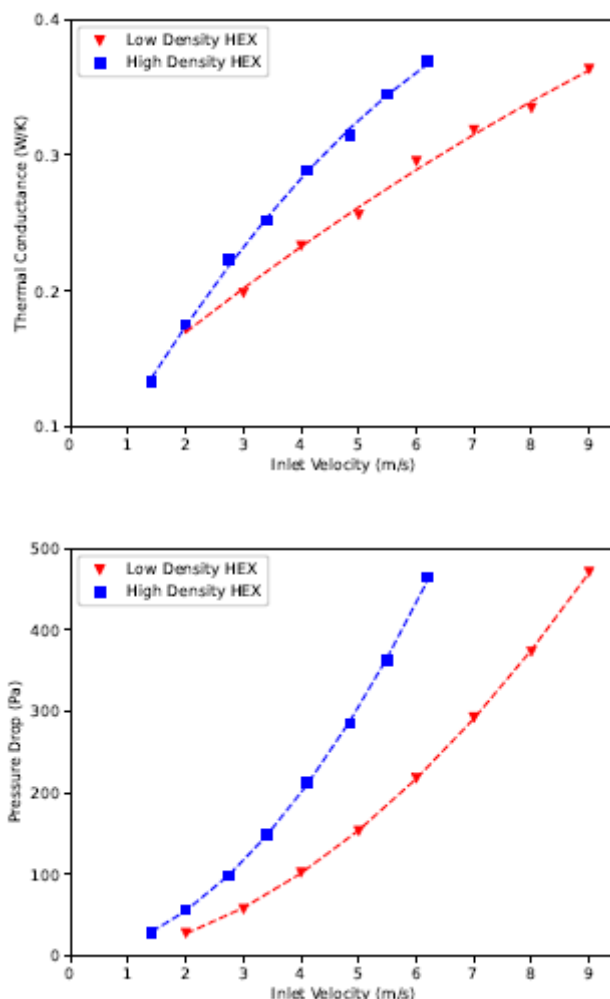


Obrázek 26: Závislost koeficientu přestupu tepla na rychlosti proudění

Další přístup je tištěná cívka s přímo integrovaným chladičem [16]. V tomto článku je představena z hliníku tištěná cívka motoru studentské formule, s integrovaným chladičem na jednom z čel cívky (Obrázek 27). Autor nejprve provádí numerické analýzy pro stanovení chladicí schopností a ty jsou následně ověřeny experimentem v malém větrném tunelu kde jsou získány charakteristiky chladicího odporu a tlakové ztráty v závislosti na rychlosti proudění (Obrázek 28). U hliníkové cívky bylo dosaženo proudové hustoty 11 A/mm^2 při maximální teplotě 180°C pro vodivost přestupu $0,37 \text{ W/K}$ a axiální délce vinutí 100 mm . [16]



Obrázek 27: Vytisknutá cívka s integrovaným chladičem čela[16]



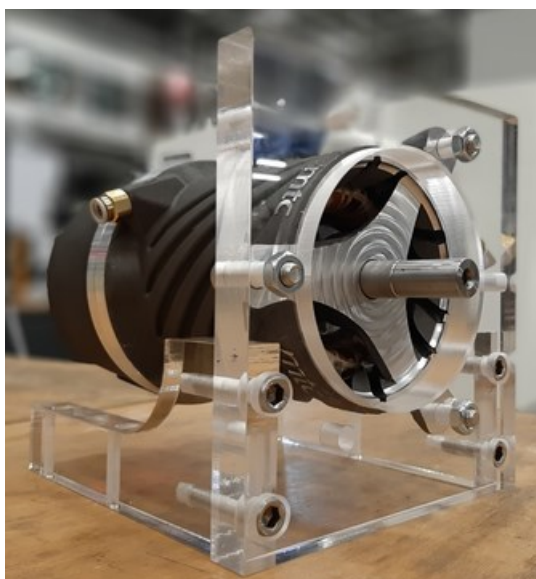
Obrázek 28: Závislost chladicí schopnosti a tlakového úbytku na chladiči[16]

4 Optimalizace water jacketu

Water jacket jakožto základní a nejjednodušší způsob aktivního vodního chlazení elektrických strojů byl dosud omezen výrobitelností geometrií kanálů. Dosud byla výroba omezena na frézování, či odlévání obyčejných kanálů a následnou kompletaci a izolování k zabránění úniku chladiva. Aditivní technologie umožňuje výrobu kostry stroje i s chladicími kanály v jednom celku, přičemž geometrická volnost umožňuje využívání optimalizací pro maximalizaci chladicího účinku a snížení hmotnosti[2]. Jedná se již způsob chlazení s využitím aditivních technologií v pokročilejším stádiu vývoje, který je již demonstrován různými výrobci komponent aditivními technologiemi. Například britské národní centrum aditivní výroby MTC představuje dva demonstrátory tištěných koster pro komerčně dostupné asynchronní motory, přičemž bylo dosaženo 10 % úspory hmotnosti a 30 % úspory zástavbových rozměrů.[17]

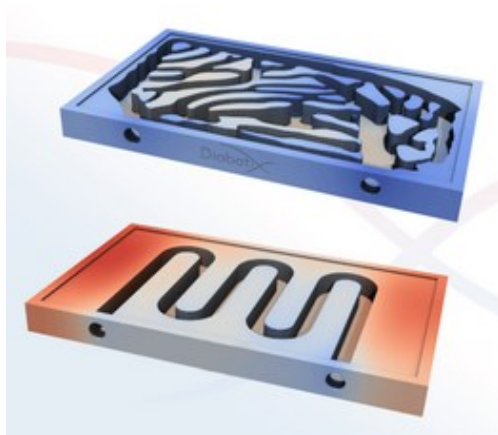


Obrázek 29: Motor s tištěnou kostrou s integrovanými kanály[18]



Obrázek 30: MTC demonstrátor tištěné kostry[17]

Společnost Diabatix využívá umělé inteligence pro optimalizace geometrií hliníkových chladičů vyráběných aditivními technologiemi (Obrázek 31). Uvádějí že jejich řešení snižuje o 25 % tepelný odpor, o 15 % zlepšuje rovnoměrnost rozložení teploty a o 50% snižuje tlakový úbytek. Po aplikaci takovéto geometrie na kostru elektrické stroje (Obrázek 32), bylo dosaženo snížení teploty motoru o 21 % a 80 % úspory baterie vlivem zmenšení tlakových ztrát[19].



Obrázek 31: Optimalizovaná geometrie chladiče[19]



Obrázek 32: Optimalizovaný chladič aplikovaný v kostře elektrického stroje[19]

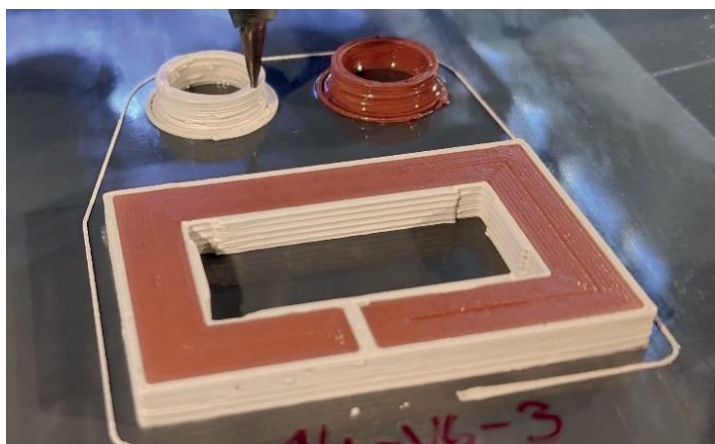
Další příklad je uveden na stránkách european powder metalurgy association (EPMA) kde je uvedena kostra trakčního motoru elektromobilu (Obrázek 33), na které bylo dosaženo 16% úspory hmotnosti a chladicí poměry byly navýšeny o 37 % oproti původnímu řešení.[20]



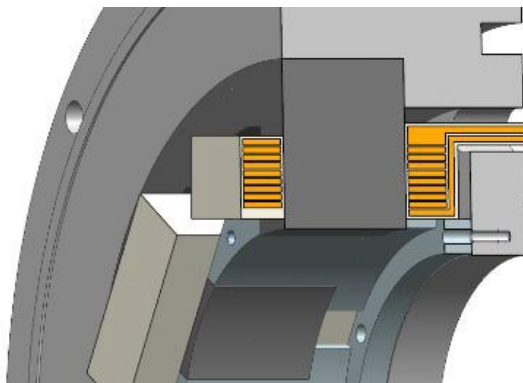
Obrázek 33: Tištěná kostra motoru elektromobilu [20]

5 Nástroje pasivního chlazení

V této kapitole jsou zmíněna řešení, které mají za úkol použitím pasivního vedení tepla zlepšit přenos z míst vzniku ztrát k chladicímu povrchu, což je ve všech těchto případech vodou chlazená kostra. První z řešení usiluje o odstranění tepelného odporu mezi vinutím a magnetickým jádrem, použitím netradiční cívky vyrobené multimateriální aditivní technologií[21], [22]. Cívky jsou tištěné technologií, v které je z prášku a pojiva vytvořena hmota, která je vrstvena (Obrázek 34), přičemž je možné používat při tisku i různých materiálů. Po vytištění je cívka zahřata, díky čemuž se pojivo vypálí a prášek je sintrováním spojen do konečné podoby cívky. Jako materiál vodiče je použita měď, která dosahuje vodivosti 71 % standardní elektrolytické mědi. Pro izolaci je použita keramika, která vykazuje dobrou tepelnou vodivost a odolnost. Cívky jsou vyrobeny pro SRM motor (Obrázek 35) zamýšlený pro pohon setrvačnickového úložiště energie, který je provozován pod sníženým tlakem, a tudíž bylo potřeba zlepšit tepelný přenos mezi vinutím a chladicí plochou[21].

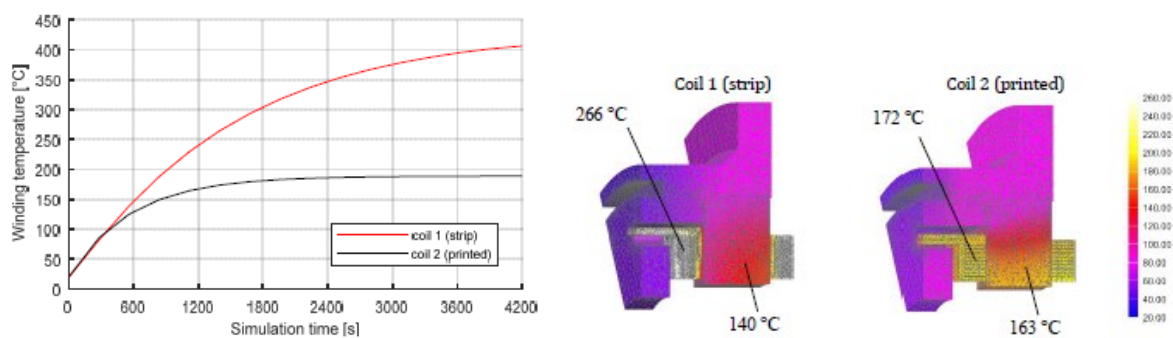


Obrázek 34: Multimateriálový tisk cívky[21]

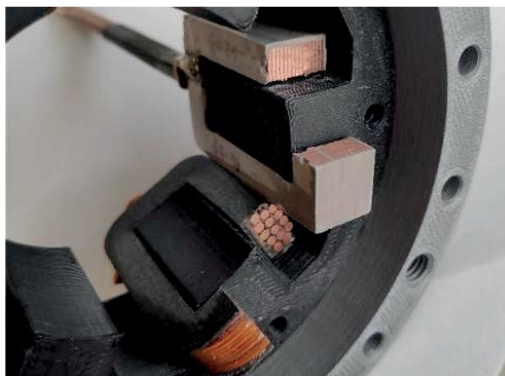


Obrázek 35: Řez cívkou SRM[22]

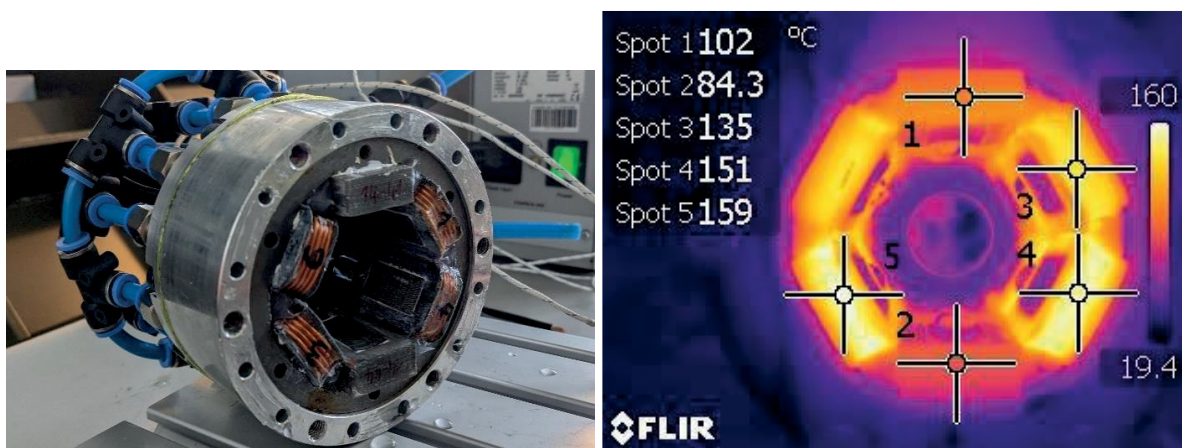
V prvním kroku byla proveditelnost řešení ověřena numerickými simulacemi, přičemž takto tištěná cívka byla porovnána s cívkou vyrobenou z měděných pásů. Obě varianty byly podrobeny transienční tepelné simulaci v provozu ve stejném pracovním bodě. Z výsledků (Obrázek 36) jsou jasně vidět schopnost dobrého přenosu tepla do magnetického obvodu, což vedlo na výrazné snížení teploty 266 °C na 172 °C, přičemž díky vlivu teploty na odpor cívky byly výsledné ztráty tištěné cívky nižší, než cívka z čisté mědi[22]. Další publikace autorů se již věnuje výrobě prototypu, v kterém jsou použity 2 tištěné cívky a 4 cívky vyrobené tradičně měděných vodičů (Obrázek 37). Kontaktní povrch keramických cívky je obroben na přesný rozměr a mezi cívku a magnetický obvod je aplikována teplo vodivá pasta.



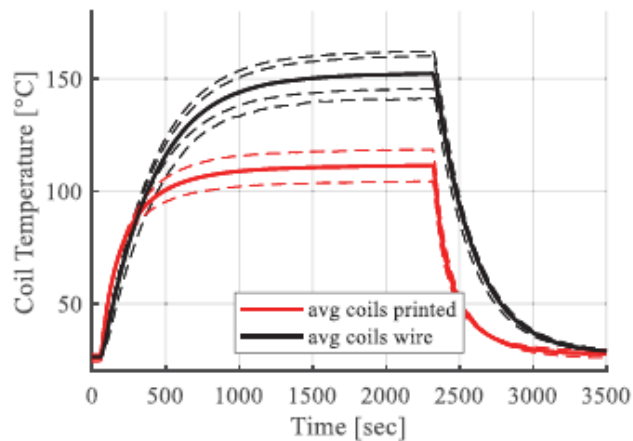
Obrázek 36: Výsledky simulací[22]



Obrázek 37: Řez porovnávanými cívkami [21]



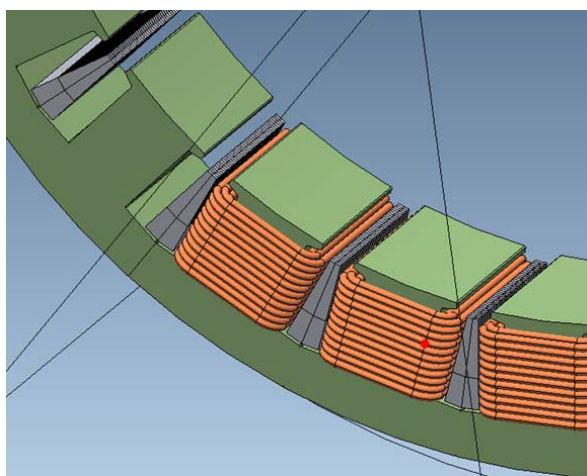
Obrázek 38: Testovaný prototyp SRM[21]



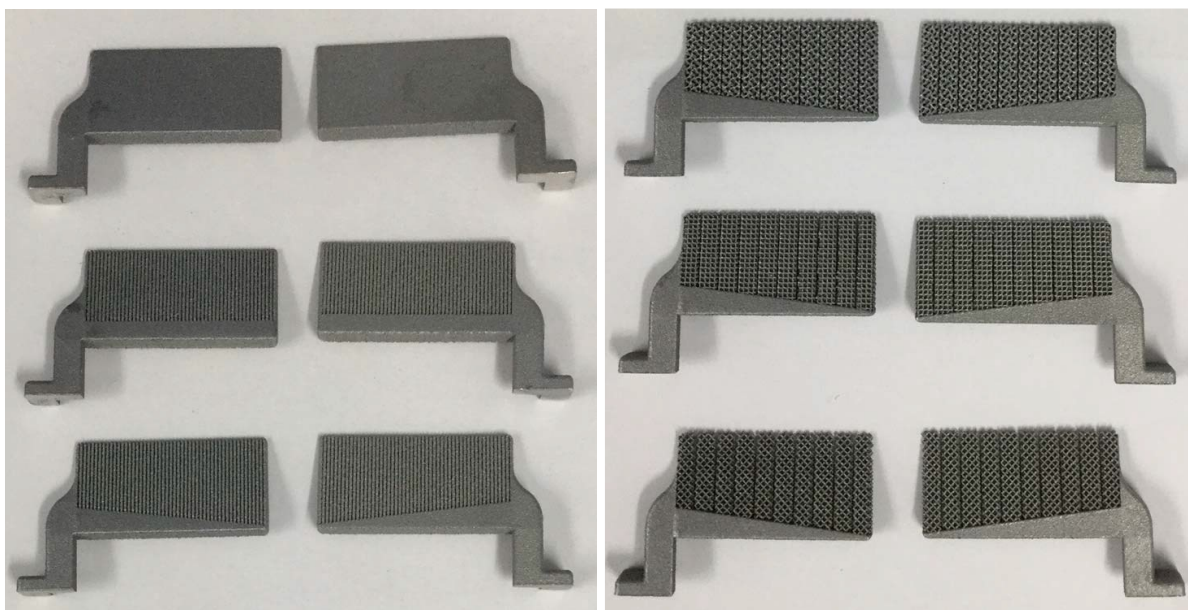
Obrázek 39: Výsledek jednoho tepelného cyklu při 9000 rpm, 0,5 Nm[21]

Nejprve byly cívky zapojeny do série a stoj byl tepelně testován stejnosměrným proudem 28,5 A (Obrázek 38). Následně byl prototyp testován v pracovních bodech až do 24 000 rpm a 0.5 Nm. Z ukázky kompletního tepelného cyklu pro 9 000 rpm (Obrázek 39) je opět vidět výborná chladicí schopnost navrženého vinutí[21].

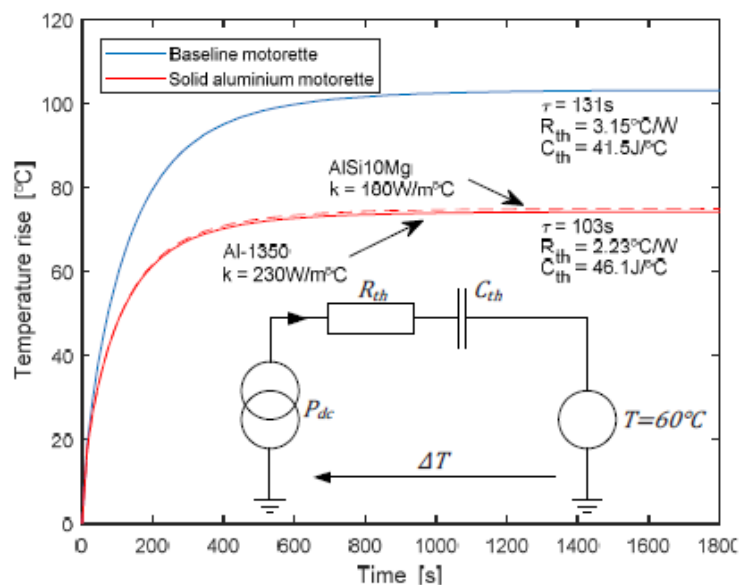
Další dvě publikace jsou podobné svým přístupem. Myšlenka je umístit do volného prostoru mezi cívkami tepelný vodič, která bude pomáhat odvádět teplo z vinutí přímo k chlazené ploše kostry. V publikaci [23] jsou tepelné vodiče umístěné pouze v drážce (Obrázek 40) a je uvažováno několik geometrií, lišící se hustotou a směrem drážkování pro omezení přídavných ztrát. Koncept je analyzován na sdružené elektro-tepelné úloze, přičemž je stanoven možný nárůst výkonu stroje až 40 % při nízkých frekvencích a 20 % při vyšších frekvencích. Simulace je částečně ověřena na segmentu stroje při použití geometrie z masivního hliníku. Simulace byla ověřena DC testem, přičemž je z ustálené teploty (Obrázek 42) vidět vliv tohoto konceptu.



Obrázek 40: Umístění tepelných vodičů v drážce[23]

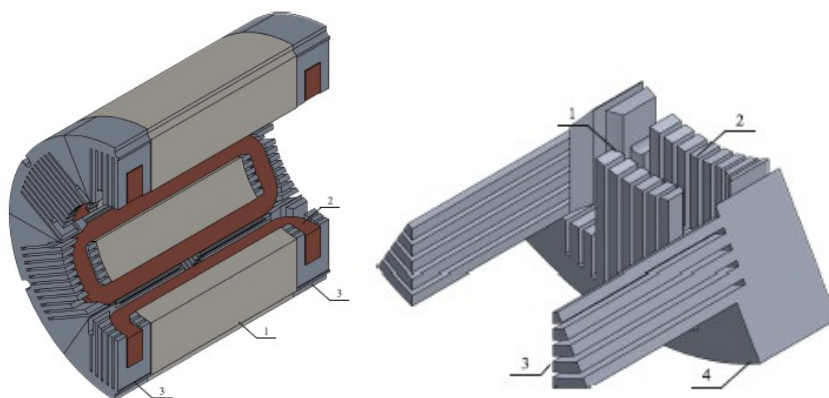


Obrázek 41: Různé uvažované geometrie[23]

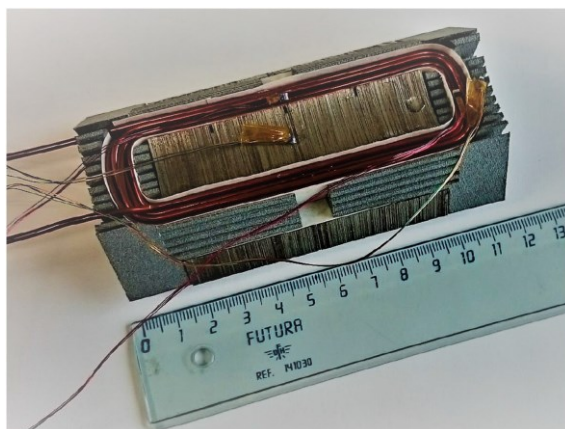


Obrázek 42: Porovnání vlivu tepelného vodiče při DC testu[23]

Druhý přístup rozšiřuje tepelné vodiče i do oblasti čel vinutí (Obrázek 43) [24]. Na rozdíl od předchozí publikace zde autor nepublikuje analýzu vlivu přídatných ztrát vznikajících v kovových částech vodiče. Pouze se zmiňuje, že je materiál drážkovaný za účelem potlačení ztrát. Vliv vodičů byl numericky simulován na modelu, který byl ověřen DC testem na vyrobeném segmentu stroje (Obrázek 44). Autor uvádí že tímto řešením je možné navýšit proudovou hustotu na 26,5 A/mm² oproti 19 A/mm² v případě použití zalití epoxidovou pryskyřicí[24].



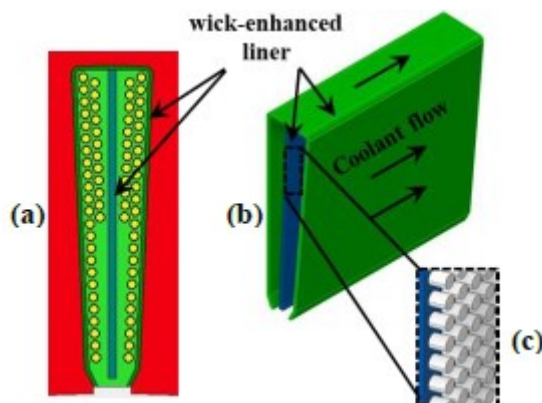
Obrázek 43: Koncept tepelných vodičů pro zlepšení chlazení čel vinutí[24]



Obrázek 44: Segment stroje s instalovanými tepelnými vodiči

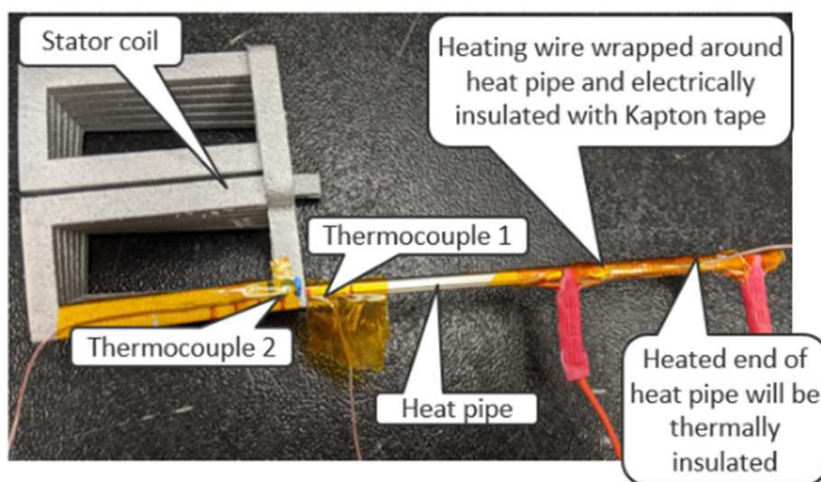
6 Chlazení pomocí skupenské přeměny

Aditivní technologie výroby rovněž rozšiřuje možnost využití efektivního chlazení pomocí skupenské přeměny, a to především využitím principu heat pipe (HP)[1]. 3D tisk umožňuje tvorbu struktur chovajících se jako porézní knot, který přepravuje kapilárně kondenzované chladivo v HP, tudíž je proveditelné tiskout samotné trubice jako komponenty stroje[25]. Další možnost je vytvoření vyložení drážky či kanálu se strukturou knotu (Obrázek 45) v které by docházelo k vypařování chladiva a tím i efektivnímu chlazení drážky[26].



Obrázek 45: Řešení pro chlazení drážky pomocí skupenské přeměny.[26]

Nejdále je v aplikaci HP pro tištěné vinutí publikace [27]. Jsou použity obdobné tištěné cívky jako v [5] s integrovanými chladicími kanály ve vodičích, ale v tomto případě je do dutiny ve vodiči instalována HP, která přenáší teplo z místa vzniku ztrát do chladiče. V článku jsou experimentálně ověřeny schopnosti použité HP odvádět teplo (Obrázek 46) a jsou získány okrajové podmínky pro numerické analýzy. Byly provedeny jak elektromagnetické, tak tepelné simulace z čehož autoři stanovily dosažitelnou hustotu výkonu 23.8 W/kg při účinnosti 91,8 %.[27]



Obrázek 46: Test tepelné zatížitelnosti HP[27]

7 Zhodnocení

Z prezentovaných publikací je vidět že se možnostem výroby chladících systémů s využitím aditivních technologií v poslední době začíná věnovat spousta pozornosti. Nejvíce pokročilou technologií v tomto ohledu je chlazení za použití vodních kanálů v kostře a konstrukčních částech strojů. Jedná se o snadné aplikovatelné řešení použitelné bez dalších předchozích úprav aktivních částí stroje. Zavedení 3D tisku umožňuje snadnější a levnější výrobu, přičemž otevírá možnosti optimalizací a tím snižování hmotnosti a talkových úbytků za současného navýšení efektivity chlazení i díky tomu je to jediné s představených řešení, které již nachází průmyslové uplatnění.

Další proveditelné řešení, které by mohlo dostat brzké aplikace je aktivní vinutí pomocí kanálů. Jedná se opět o řešení, které je aplikovatelné na tradičně vyráběné stroje. Lze tímto způsobem dosahovat velkých proudových hustot, především díky malému tepelnému odporu mezi místem vzniku největšího množství ztrát, což je tradičně vinutí, a chladičem. Problém zde představuje umístění kanálu, pokud je kanál veden axiálně v drážce podél vinutí, zabírá kanál v drážce prostor, čímž klesá činitel plnění drážky. Proto se většina aplikací zaměřuje na využití mezer vznikajících v drážce mezi cívkami zubových vinutí. Další překážkou je správná volba materiálů kanálu. Kov má lepší teplo vodivé a mechanické vlastnosti, ale na druhou stranu je i elektricky vodivý a způsobuje přídatné ztráty. Pak je důležité zhodnotit, zda takovýto systém i přes dodatečné ztráty bude přínosem. Polymery jsou sice elektrické izolanty, ale až na výjimky vykazují nízkou tepelnou vodivost a odolnost. Ideální je v tomto případě keramika, která ovšem vyžaduje speciální technologie pro tisk a díky své křehkosti by mohlo dojít v provozu k poškození.

Aplikace aktivně chlazených vinutí se jeví jako použitelné řešení pro stroje mezních hustot výkonu. Jelikož je možné u tištěných cívek dosahovat vysokých hodnot plnění drážky, přičemž aktivní chlazení zaručuje nižší pracovní teplotu vinutí. Pak již záleží na konkrétní aplikaci a pracovním bodu, zdali je chlazení schopno odvést i dodatečné střídavé ztráty vznikající v masivnějších vodičích a dosáhnout tak větších proudových hustot než konvenčně vyráběná cívka.

Řešením již s menším přínosem je aplikace tepelných vodičů či úpravy geometrií čel vinutí. Tato řešení se hodí aplikovat v kombinaci s vodním chlazením kostry. Tepelné vodiče můžou pomoci dopravit ztráty z nejvíce náchylných míst, jako jsou například právě čela, přímo k chlazenému povrchu kostry. Opět je ale nutné řádně zvážit použitý materiál a podrobně aplikované řešení ověřit simulacemi.

Nejkomplikovanější publikované práce se věnují využití tepelných trubíc. Již bylo ověřeno, že lze pomocí 3D tisku vyrábět struktury fungující jako knot dopravující chladivo v tepelných trubících, nicméně takové řešení v oblasti chlazení elektrických strojů publikováno nebylo. Je nutné použít správnou kombinaci materiálu trubice a chladiva pro dosažení kýženého efektu při daném tlaku, navíc trubice se nehodí do teplot nad 200 °C, jelikož může nastat situace, že chladivo se nebude stíhat dopravovat do části výparníku a trubice „vyschne“ [27].

Aditivní technologie by rovněž mohly být použitelné pro rozvoj chlazení pomocí rozstřiku kapaliny (spray cooling), nicméně v této oblasti nebyl dohledán žádný publikovaný výzkum. Například by mohlo být možné tisknout přímo trysky a optimalizovat je tak na konkrétní aplikace, či by bylo možné vytvořit kanály pro rozvod chladiva přímo v tištěných kostrách či štítech.

Literatura

- [1] M. Sarap, A. Kallaste, P. S. Ghahfarokhi, H. Tiismus, a T. Vaimann, „Utilization of Additive Manufacturing in the Thermal Design of Electrical Machines: A Review", *Machines*, roč. 10, č. 4, dub. 2022, doi: 10.3390/machines10040251.
- [2] L. Szabo, „Survey on Applying 3D Printing in Manufacturing the Cooling Systems of Electrical Machines", in *2022 23rd IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics - THETA, AQTR 2022 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/AQTR55203.2022.9801983.
- [3] N. Simpson, J. Jung, A. Helm, a P. Mellor, „Additive Manufacturing of a Conformal Hybrid-Strand Concentrated Winding Topology for Minimal AC Loss in Electrical Machines", in *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2021 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, s. 3844–3851. doi: 10.1109/ECCE47101.2021.9595059.
- [4] A. Selema, M. N. Ibrahim, a P. Sergeant, „Additively Manufactured Ultralight Shaped-Profile Windings for HF Electrical Machines and Weight-Sensitive Applications", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, roč. 8, č. 4, s. 4313–4324, pro. 2022, doi: 10.1109/TTE.2022.3173126.
- [5] F. Wu a A. M. El-Refaie, „Additively Manufactured Hollow Conductors with Integrated Cooling for High Specific Power Electrical Machines", in *Proceedings - 2020 International Conference on Electrical Machines, ICEM 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., srp. 2020, s. 1497–1503. doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270871.
- [6] C. Wohlers, P. Juris, S. Kabelac, a B. Ponick, „Design and direct liquid cooling of tooth-coil windings", *Electrical Engineering*, roč. 100, č. 4, s. 2299–2308, pro. 2018, doi: 10.1007/s00202-018-0704-x.
- [7] N. Simpson, G. Yiannakou, H. Felton, J. Robinson, A. Arjunan, a P. H. Mellor, „Direct Thermal Management of Windings enabled by Additive Manufacturing", *IEEE Trans Ind Appl*, 2022, doi: 10.1109/TIA.2022.3209171.
- [8] S. A. Semidey a J. R. Mayor, „Experimentation of an electric machine technology demonstrator incorporating direct winding heat exchangers", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, roč. 61, č. 10, s. 5771–5778, 2014, doi: 10.1109/TIE.2014.2303779.
- [9] W. Sixel, M. Liu, G. Nellis, a B. Sarlioglu, „Ceramic 3-D Printed Direct Winding Heat Exchangers for Thermal Management of Concentrated Winding Electric Machines", *IEEE Trans Ind Appl*, roč. 57, č. 6, s. 5829–5840, 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3104273.
- [10] M. Schiefer a M. Doppelbauer, „Indirect slot cooling for high-power-density machines with concentrated winding", in *Proceedings - 2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2015*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., úno. 2016, s. 1820–1825. doi: 10.1109/IEMDC.2015.7409311.
- [11] A. Hembel, G. Cakal, a B. Sarlioglu, „In-slot Cooling of Electrical Machines Using Traditional Techniques and Additive Manufacturing", in *24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe)*, Hanover: IEEE, řij. 2022.

- [12] TCPOLY, „Technical Data Sheet Ice9TM Rigid". https://tcpoly.com/wp-content/uploads/2022/05/ice9_Rigid_r405.pdf?fbclid=IwAR3bLL1FE-ns1NV6Z-YPmRqsl1yvMK6CzngQ3c6PDHNOXFp5pnqz1AzltfA (viděno 28. března 2023).
- [13] G. Cakal, A. Hembel, a B. Sarlioglu, „Additively Manufactured Heat Exchanger for Improved Cooling of Electric Machines", in *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ECCE50734.2022.9947712.
- [14] V. Madonna, C. Spagnolo, P. Giangrande, a M. Galea, „Improving Performance and Extending Lifetime of PMSMs via Advanced End-Winding Cooling", in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., čer. 2020, s. 319–325. doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152243.
- [15] F. E. Tocher, G. Yiannakou, N. Simpson, a P. Mellor, „Experimental Analysis of Additively Manufactured Air-Cooled Splayed End-Windings", in *11th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2022)*, Newcastle: IET, zář. 2022. doi: 10.1049/icp.2022.1085.
- [16] J. Pecotich, D. Klink, G. Heins, a B. Bahrani, „Additively Manufactured Electric Machine Conductors with Integrated End Turn Heat Exchangers", in *2022 International Conference on Electrical Machines, IECM 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, s. 1498–1504. doi: 10.1109/IECM51905.2022.9910686.
- [17] „Additive Manufactured Electric Motor". <https://ncam.the-mtc.org/case-studies/additive-manufactured-electric-motor/> (viděno 29. března 2023).
- [18] „MTC team successful in AM electric motor project." <https://www.the-mtc.org/media/bwyjpqkx/microsoftteams-image-17.png> (viděno 24. března 2023).
- [19] L. Vervecken, „Artificial intelligence is driving better cooling for critical EV components.", 9. prosinec 2021. <https://www.diatatix.com/blog/ai-driving-better-ev-cooling> (viděno 24. března 2023).
- [20] „Cooling jacket with internal helix structure". <https://www.epma.com/spotlight-on-pm/cooling-jacketwith-internal-helix-structure> (viděno 24. března 2023).
- [21] F. Lorenz, J. Rudolph, M. Weigelt, a R. Werner, „3D Printed High Performance Windings Prototypes and Testing in a Three Phase SRM", in *Electromechanical Drive Systems 2021; ETG Symposium*, Online: VDE, lis. 2021.
- [22] F. Lorenz, J. Rudolph, a R. Werner, „High Temperature Operation and Increased Cooling Capabilities of Switched Reluctance Machines using 3D Printed Ceramic Insulated Coils", in *2018 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo, ITEC 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., srp. 2018, s. 146–151. doi: 10.1109/ITEC.2018.8450089.
- [23] R. Wrobel a A. Hussein, „Design Considerations of Heat Guides Fabricated using Additive Manufacturing for Enhanced Heat Transfer in Electrical Machines", in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland: IEEE, pro. 2018.
- [24] H. Vansompel a P. Sergeant, „Extended End-Winding Cooling Insert for High Power Density Electric Machines with Concentrated Windings", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, roč. 35, č. 2, s. 948–955, čer. 2020, doi: 10.1109/TEC.2019.2953577.

- [25] R. Wrobel a R. J. McGlen, „Opportunities and challenges of employing heat-pipes in thermal management of electrical machines", in *Proceedings - 2020 International Conference on Electrical Machines, ICEM 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., srp. 2020, s. 961–967. doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270932.
- [26] A. Tikadar, Y. Joshi, a S. Kumar, „Comparison between Direct Winding Heat Exchanger and Slot-liner Confined Evaporative Cooling of Electric Motor", in *InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm*, IEEE Computer Society, 2022. doi: 10.1109/iTherm54085.2022.9899573.
- [27] T. Chowdhury *et al.*, „Thermal Management System for an Electric Machine with Additively Manufactured Hollow Conductors with Integrated Heat Pipes", in *2022 International Conference on Electrical Machines, ICEM 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, s. 1920–1926. doi: 10.1109/ICEM51905.2022.9910918.

Seznam obrázků

Obrázek 1: DC odpor a celkové ztráty v závislosti na frekvenci [4].....	5
Obrázek 2: Analyzované vzorky[4]	5
Obrázek 3: Optimalizovaná hliníková cívka[4]	6
Obrázek 4: Koncepce lehkých intenzivně chlazených cívek [5]	6
Obrázek 5: Prototyp aktivně chlazené cívky[6]	7
Obrázek 6: Prototyp cívky s výměníkem tepla[7]	7
Obrázek 7: Výplň chladicího kanálu[7]	7
Obrázek 8: Stanovení vlivů jednotlivých směrů toku[7]	8
Obrázek 9: Rozložení teplot[7]	8
Obrázek 10: Vliv průtoku na teplotu vinutí[7]	9
Obrázek 11: Umístění chladicího kanálu[8]	9
Obrázek 12: Geometrie uvnitř chladicího kanálu[8]	10
Obrázek 13: Keramický výměník tepla[9].....	10
Obrázek 14: Uvažované žebrov chladicím kanále[9].....	11
Obrázek 15: Segment statoru pro ověření výměníku tepla [9].....	11
Obrázek 16: Geometrie chladicích kanálů[10]	12
Obrázek 17: Profil kanálu vytištěný z PVA[10]	12
Obrázek 18: Měřené vzorky[10].....	12
Obrázek 19: Výsledky simulace a měření[10]	12
Obrázek 20: Navržený výměník tepla [11]	13
Obrázek 21: Tangenciální chladicí kanál[13]	13
Obrázek 22: Výsledky simulací různých rozložení kanálů[13].....	13
Obrázek 23: Chladicí kanál umístěný v čelech[14]	14
Obrázek 24: Cívky z čely pro zlepšení přenosu tepla[15].....	15
Obrázek 25: Výsledné teploty v závislosti na proudu[15].....	15
Obrázek 26: Závislost koeficientu přestupu tepla na rychlosti proudění	15
Obrázek 27: Vytištěná cívka s integrovaným chladičem čela[16]	16
Obrázek 28: Závislost chladicí schopnosti a tlakového úbytku na chladiči[16]	16
Obrázek 29: Motor s tištěnou kostrou s integrovanými kanály[18]	17
Obrázek 30: MTC demonstrátor tištěné kostry[17]	17
Obrázek 31: Optimalizovaná geometrie chladiče[19].....	17
Obrázek 32: Optimalizovaný chladič aplikovaný v kostře elektrického stroje[19]	18
Obrázek 33: Tištěná kostra motoru elektromobilu [20]	18
Obrázek 34: Multimateriálový tisk cívek[21]	19
Obrázek 35: Řez cívkou SRM[22].....	19
Obrázek 36: Výsledky simulací[22].....	20
Obrázek 37: Řez porovnávanými cívkami [21]	20
Obrázek 38: Testovaný prototyp SRM[21]	20
Obrázek 39: Výsledek jednoho tepelného cyklu při 9000 rpm, 0,5 Nm[21]	20
Obrázek 40: Umístění tepelných vodičů v drážce[23].....	21
Obrázek 41: Různé uvažované geometrie[23]	21
Obrázek 42: Porovnání vlivu tepelného vodiče při DC testu[23]	22
Obrázek 43: Koncept tepelných vodičů pro zlepšení chlazení čel vinutí[24]	22
Obrázek 44: Segment stroje s instalovanými tepelnými vodiči	22
Obrázek 45: Řešení pro chlazení drážky pomocí skupenské přeměny.[26].....	23

Obrázek 46: Test tepelné zatížitelnosti HP[27]	23
--	----

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	28.02.2023	Martin Skalický