

Analýza účinku geometrických charakteristik CFD simulací na teplotní pole sinusového filtru

Ing. Jan Kořínek, prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.,
Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera,
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

1. Úvod

Se stále se zvětšujícím množstvím aplikací měničů elektrické energie, které pracují se šířkově pulzní modulací realizovanou rychlými spínacími tranzistory, roste i význam kvalitního odstínění rušivých vlivů těchto zařízení. Měníče se šířkově pulzní modulací se využívají ve frekvenčně řízených pohonech, v technice fotovoltaických zdrojů, v nabíjecích systémech pro elektromobilitu, ve zdrojích zálohového napájení, v energetice a dalších oblastech. Strmosti napětových pulzů u nejčastěji používaných spínacích součástek IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) dosahují hodnot až v okolí 5 000 V/μs, v případě spínacích prvků na bázi SiC může jít o strmosti ještě několikrát vyšší. Důsledkem velkých hodnot du/dt a harmonického zkreslení proudů jsou zejména parazitní kapacitní proudy, vazby mezi obvody dané parazitními vzájemnými indukčnostmi, elektromagnetické vyzařování s dopady na rušení okolních elektronických zařízení, rušení pronikající do napájecí sítě a zvýšené napětové namáhání motorů, zvýšení jejich hlučnosti a snížení jejich účinnosti v případě frekvenčně řízených elektromotorů.

Elektromagnetickou kompatibilitu (EMC) elektronických zařízení, limity rušení a měřicí metody řeší i odpovídající technická legislativa. Stěžejní je soubor norem ČSN EN 61000 *Elektromagnetická kompatibilita*. V případě elektrických pohonů jde o základní normu ČSN EN 61800-3 ed. 2 *Systémy elektrických výkonových pohonů s nastavitelnou rychlostí – Část 3: Požadavky EMC a specifické zkušební metody*. V případě drážních zařízení, je v dané oblasti základním dokumentem soubor norem ČSN EN 50121 *Drážní zařízení – elektromagnetická kompatibilita*, u silničních vozidel (elektromobility) je nejdůležitějším dokumentem předpis EHK 010 *Elektromagnetická kompatibilita*.

Základní prvky pro odrušení měničů pracujících se šířkově pulzní modulací jsou řešeny na bázi pasivních součástek – tlumivek a kondenzátorů. Odrušovací členy zvyšují požadavky zařízení na objem, hmotnost, cenu a v případě tlumivek, které jsou zpravidla navinuty na feromagnetickém jádře, jsou nepřijemnou vlastností tepelné ztráty. Tepelné ztráty odrušovacích tlumivek vznikají jednak ve vinutí, jednak v železném magnetickém obvodu. Velikost tepelných ztrát tlumivky je

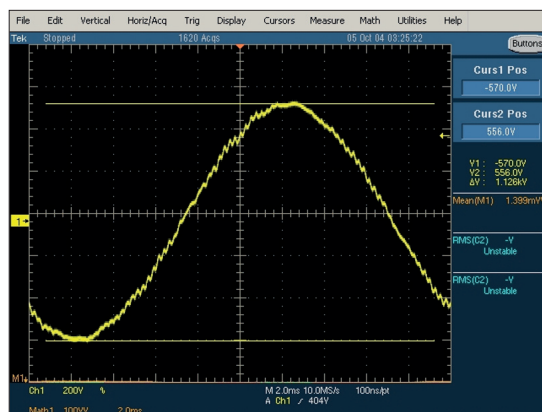
závislá na konstrukčních parametrech (geometrické uspořádání, použité materiály), na protékajícím proudě, úbytku napětí a na harmonickém složení proudu a napětí. Například v tlumivkách sinusových filtrů se jmenovitým proudem v řádu stovek ampérů činí ztrátový výkon až stovky wattů. Povrchové teploty tlu-

tečně empirické metody, částečně referenční měření. Mnoho výpočetních metod je chráněno jako duševní vlastnictví firem. Jednou z nejnáročnějších etap návrhu jsou výpočty tepelných vlastností a oteplení odrušovacích tlumivek, i v kontextu s okolním prostředím. Velmi sofistikovaný přístup poskytují postupy využívající metody konečných prvků. Jde o postupy náročné jak z hlediska správného zadání systému a jeho parametrů, tak i z hlediska požadavků na výpočetní hardware, software a výpočetní dobu. Tyto postupy se zpravidla vyplatí provádět v případech, kdy je ne-reálné vykonávat ověřovací experimenty na hotových výrobcích s postupnou korekcí konstrukce, popř. tehdy, jde-li o velké výrobní série odrušovacích komponent, či pro ověření jednodušších výpočetních metod.

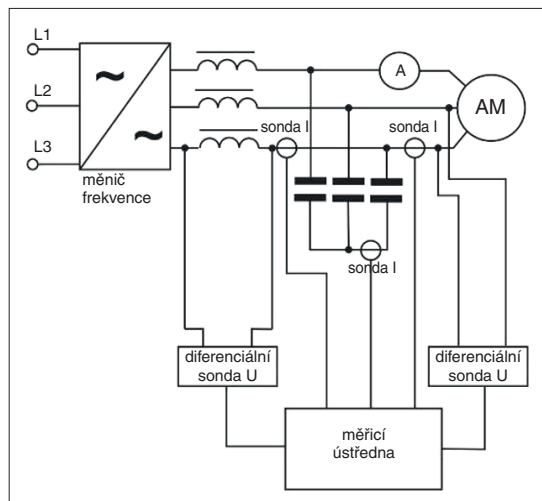
V předkládaném článku jsou prezentované metody aplikovány na sinusový LC filtr vyrobený firmou Skybergtech, s. r. o., se jmenovitým proudem 16 A, jmenovitým napětím 3 × 400 V, který je přednostně určen k odrušení výstupu měniče frekvence pro asynchronní motor. Sinusový filtr je velmi účinný odrušovací prostředek, který v převážné míře eliminuje vlivy šířkově pulzní modulace, na jeho výstupu je téměř sinusový průběh napětí a proudu (obr. 1).

Základními vstupními hodnotami návrhu tepelného modelu, který postihuje tepelné vlastnosti filtru, jsou ztrátové výkony ve vinutích a magnetickém obvodu tlumivky. V [3] je prezentována jedna z možných výpočetních metod zjištění ztrátových výkonů, která respektuje skutečnost, že na velikost ztrátového výkonu má rozhodující vliv velikost spínací frekvence měniče a harmonické spektrum proudů vinutí.

Zjištění ztrátového výkonu tlumivky sinusového filtru v předkládaném článku bylo ověřováno i měřením elektrického výkonu tlumivky podle schématu na obr. 2. Byl použit měnič frekvence Siemens Master drives s výkonem 11 kW a čtyřpólový asynchronní



Obr. 1. Oscilogram výstupního napětí sinusového filtru

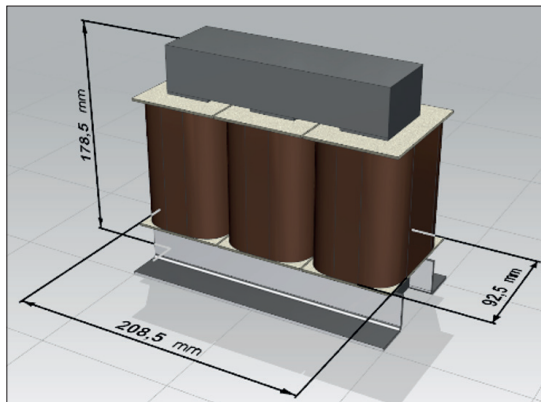


Obr. 2. Zapojení obvodu při měření elektrického výkonu tlumivky sinusového filtru

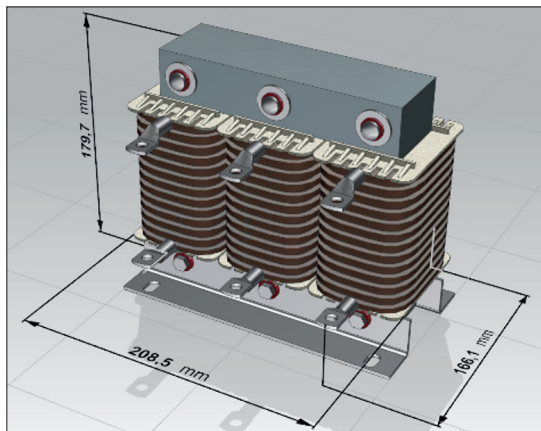
mivek mohou dosahovat až 70 °C a více. Další informace o obecné problematice EMC výkonových zařízení lze nalézt např. v [1], [2].

2. Podmínky ověřování tepelných vlastností odrušovacího prvku

Návrh odrušovacích tlumivek se zpracovává postupy, které mnohdy využívají čas-



Obr. 3. CAD model tlumivky sinusového filtru (varianta I) [8]



Obr. 4. Detailní CAD model sinusového filtru – pohled I (varianta II) [8]

motor nakrátko 3×400 V, 15 kW, který byl provozován se sníženým zatížením. K měření byla použita ústředna NI PXI. Ztrátový výkon byl určen na jedné fázi podle definičního vztahu sumací násobků vzorků proudů a napětí na tlumivce, násobením počtem fází a vydělením počtem vzorků:

$$P = \frac{3}{n} \sum_{i=1}^n u_i \cdot i_i \quad (1)$$

Vzorkovací frekvence byla nastavena na 200 kS/s, délka záznamu 100 000 vzorků. K rozdělení celkového ztrátového výkonu P na ztráty ve feromagnetiku a ztráty ve vinutí byl využit výpočet ztrát ve vinutí P_j podle vztahu:

$$P_j = 3kRl^2 \quad (2)$$

Koeficient k respektuje vliv povrchového jevu. Stejná měřicí ústředna byla využita i k měření, zpracování a archivaci dat naměřených na jednotlivých částech tlumivky filtru termočlánky při měření oteplení.

Při designování vinutého dílu na magnetickém jádře ovlivňuje magnetický obvod tloušťka použitého materiálu. Tato tloušťka se může do určité míry lišit. Vlivem toho vzniká i rozdíl ztrát, což znemožňuje přesněji určit jejich velikost. Tlumivkou sinusového filtru dále vlivem spína-

cí frekvence měniče teče vysoko-frekvenční složka proudu, která obsahuje široké spektrum harmonických. Pro provedení výpočtu je třeba počítat se základními harmonickými složkami a jejich velikost určit tak, aby v ní byly zohledněny ztráty i ostatních harmonických.

Dalším faktorem je dosažené oteplení. Toto oteplení má vliv na zvýšení ztrát sinusového filtru [4].

Z důvodu zmíněných vlivů bylo pro ověření výpočtu ztrátových výkonů a simulace sdílení tepla experimentálně měřeno oteplení sinusového filtru.

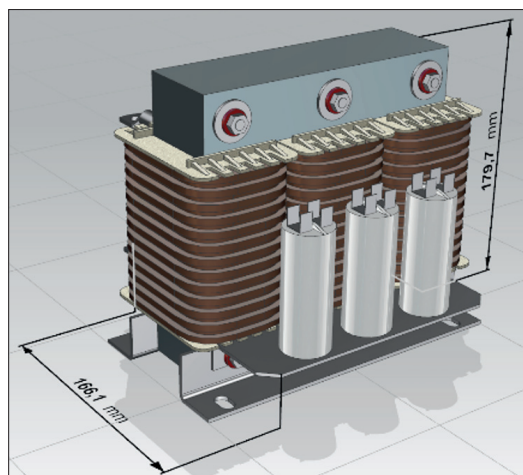
3. Koncepce simulace teplotního pole

Pro tepelné simulace byly použity dvě varianty CAD dat, každá o různém stupni geometrických detailů.

První varianta zahrnuje zjednodušený geometrický model tlumivky sinusového filtru s charakteristickými rozměry podle produktové specifikace. Součinitel přestupu tepla je numericky počítán jako jeden z výsledků simulace, která je řešena pomocí software Ansys Fluent.

Druhá varianta je řešena obdobným numerickým přístupem.

Rozdíl je ve významně větší komplexnosti geometrie v porovnání s první variantou. Jsou zde zohledněny další prvky a přidány další součásti jako např. kondenzátory, šrouby nebo upínací oka. Vinutí, stahovací konstrukce a kostry vinutí jsou vymodelovány se znatelně větším množstvím detailů. Pro řešení teplotního pole je zde použit taktéž Ansys Fluent. Z důvodu přidání a zohlednění kondenzátorů bude pro druhou variantu používán termín *sinusový filtr*; avšak v první variantě bude model nazýván *tlumivka sinusová*.

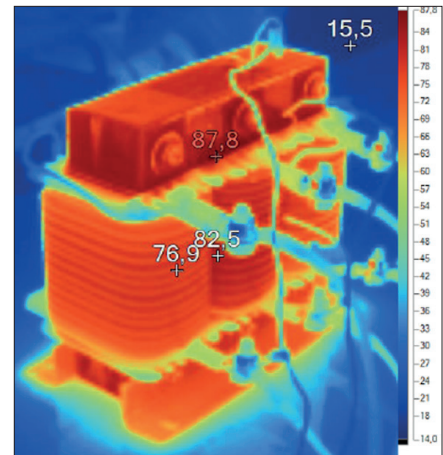


Obr. 5. Detailní CAD model sinusového filtru – pohled II (varianta II) [8]

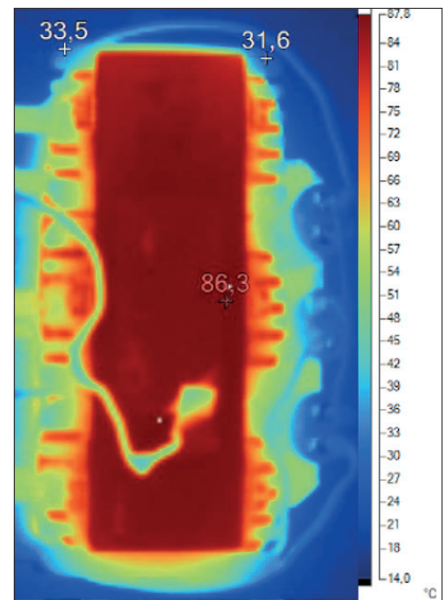
vého filtru [8].

4. Vstupní geometrická a materiálová data

Jádru filtru je složeno z izotropních za studena válcovaných plechů. Jejich počet určuje konečnou šířku jádra. Jelikož plechy na sebe těsně doléhají, pro potřeby výpočtu je uvažován model jádra jako monolitický při zachování charakteristických rozměrů podle



Obr. 6. Teplotní pole měřené termokamerou – pohled I [7]



Obr. 7. Teplotní pole měřené termokamerou – pohled II [7]

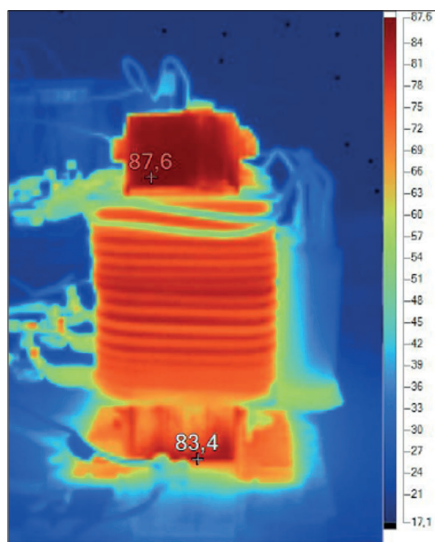
Waasner DIN EN 10106, EI 175/175 s materiálovými vlastnostmi M330-50A. Obdobný předpoklad byl pro potřeby výpočtu zaveden také v případě vinutí z měděného drátu. Vinutí cívky tak představuje monolitický solid s přiřazenými materiálovými vlastnostmi mědi a charakteristickými rozměry podle produktové specifikace sinusového filtru. Kostře vinutí jsou přiřazeny materiálové charakteristiky pro Pocan B4239. Šroubům, maticím, upínacím okům a stahovací konstrukci byly přiřazeny materiálové charakteristiky standardní konstrukční oceli nebo mědi [8].

Sít obou variant obsahuje také výpočetní doménu okolního prostředí (5 × 5 × 6 m). Většina prvků je polyhedrálního typu. Řešení bylo koncipováno jako symetrické v rovině ZY pro úsporu výpočetního času [8].

5. Nastavení řešiče a okrajových podmínek

Jedním z parametrů vstupujících do výpočtu je počáteční teplota. Protože při experimentální validaci byla teplota okolí 15 °C, do simulace byla tedy uvažována taktéž.

Okrajová podmínka tepelného toku byla plošně aplikována na jádro a cívky sinusového filtru. Záměrem výrobce bylo zjistit, jak dlouho je možné přetížít sinusový filtr 1,5násobkem nominálního střídavého proudu. Na zá-

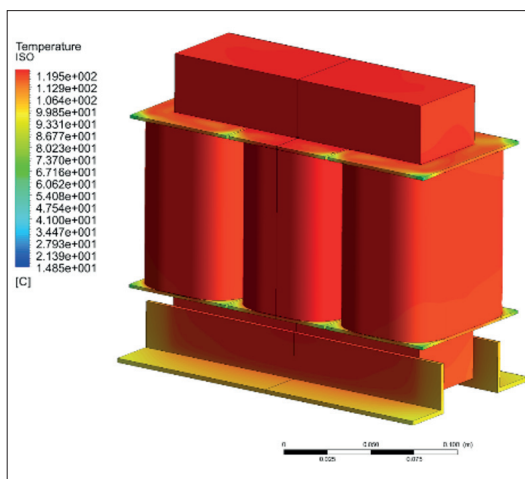


Obr. 8. Teplotní pole měřené termokamerou - pohled III [7]

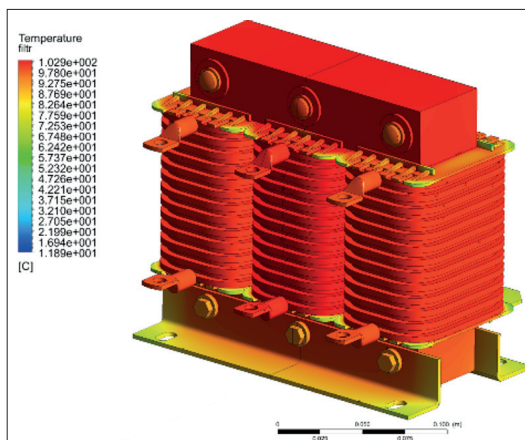
kladě toho byla na jádro aplikována okrajová podmínka ztrátového výkonu 17,2 W/cívka. Ztrátový výkon na samostatné cívce je 15,9 W. Tyto hodnoty jsou kritické z hlediska distribuce tepla celou geometrií a je nutné je zohlednit. Obě hodnoty byly poskytnuty výrobcem.

Úloha je řešena pomocí pressure-based solveru (výpočetní numerický přístup, kde se tlakové pole extrahuje řešením tlakové nebo tlakové korekční rovnice, která je získána pomocí rovnic kontinuity a hybnosti) se zohledněním gravitačních účinků na okolní proudění jako pseudotransientní řešení. Výhodou tohoto přístupu je automatický výpočet pseudočasového kroku jak pro pevný objem, tak i pro objem tekutiny. Délkové měřítko pro pevný objem a pro tekutinu je tak počítáno zvlášť, což umožňuje dosáhnout rychlejší konvergence. Časově závislé řešení by v tomto případě trvalo přibližně 46 dní, než by maximální teplota dosáhla ustálení. Pseudotransientní výpočet oproti tomu dosáhne teploty ustálení za 4 h [10].

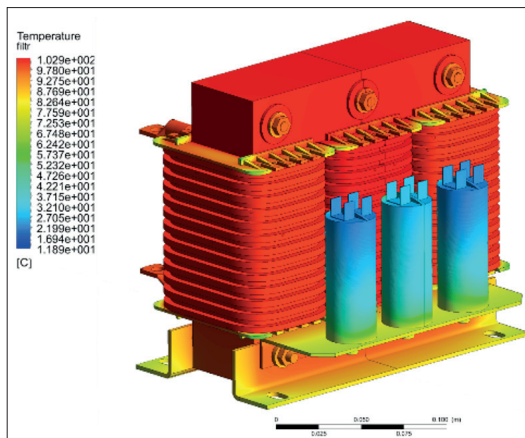
Výpočetní model taktéž zahrnuje energetickou rovnici. Tato rovnice reprezentuje energetický přenos pomocí konvekce, difuze, viskózní disipace a objemového zdroje. V pevných látkách energetická přenosová



Obr. 9. Teplotní pole z CFD simulace - (varianta I) [8]



Obr. 10. Teplotní pole z CFD simulace - pohled I (varianta II) [8]



Obr. 11. Teplotní pole z CFD simulace - pohled II (varianta II) [8]

rovnice nabývá následujícího tvaru [6] [8]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{q} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (3)$$

kde
 t je čas,
 ρ hustota,
 h entalpie,
 \vec{q} rychlost,
 k tepelná vodivost,

T teplota,
 S_h objemový zdroj.
 Charakter proudění byl určen pomocí hodnoty Rayleighova čísla:

$$Ra = \frac{\beta \Delta T L^3 \rho}{\mu \alpha} \quad (4)$$

kde
 g je gravitační zrychlení,
 β součinitel objemové roztažnosti,
 μ dynamická viskozita,
 α teplotní vodivost.

V tomto případě se průměrná hodnota Rayleighova čísla pohybuje do meze 10^8 . Tento fakt indikuje laminární charakter okolního proudění. Okrajové podmínky teploty okolí a ztrátových výkonů zůstávají stejné jako ve variantě I [8].

6. Validace teplotního pole

Sinusový filtr byl umístěn v prostoru na vodorovné desce bez vynuceného proudění nebo působení dalších zdrojů tepla. Teplota okolního vzduchu byla 15 °C. Charakter obtékání stěn tak odpovídá volné konvekci. Sinusovým filtrem protékal střídavý proud o frekvenci 50 Hz s přidanou vysokofrekvenční složkou proudu od spínací frekvence měničové frekvence. Teploty sinusového filtru zatíženého proudem 23,8 A byly měřeny za pomoci termokamery.

Infračervené záření generované povrchem sinusového filtru bylo snímáno termokamerou Fluke® Ti125. Pro vyzáření množství infračerveného spektra je tak zásadní aktuální povrchová teplota a emisivita povrchu materiálu. Na základě těchto naměřených hodnot termokamera spočítala povrchovou teplotu. Emisivita nastavená v zařízení pro detekci byla zkalibrována na hodnotu 0,96 na základě porovnání změření druhého sinusového filtru, jehož teplota byla ustálena na teplotu okolí. Termokamerou lze měřit v rozmezí teplot od -20 do +350 °C s přesností ±2 °C nebo 2 % podle toho, která hodnota je větší. Tepelná citlivost detekce je 0,1 °C při teplotě cíle 30 °C [5]. Na obr. 6, obr. 7 a obr. 8 je možné vidět, že v průběhu celého měření byla pro zobrazení zachycených snímků použita barevná paleta se spektrem modrá-červená. Důvodem využití tohoto spektra je lepší názornost při porovnávání s CFD simulací teplotního rozložení [7].

7. Vyhodnocení naměřených hodnot a výsledků simulace

7.1 Měření teplot na povrchu termokamerou

This paper deals with the issue of the interference elements used in frequency-controlled electric drives, especially with the conditions of verification of the thermal properties of the interference suppression element. Here is an analysis of the CFD settings for simulating the temperature field of sinusoidal filter, including input of geometric and material data, solver settings and boundary conditions including the effect of changing geometric characteristics. Furthermore, validation of the temperature field with evaluation of measured data and simulation results is included in the article. Finally, the possibilities of further CFD optimization are outlined for simulating of the heat transfer of the sinusoidal filter.

Na dále uvedené sérii obrázků je možné vždy spatřit teplotní pole sejmuté termokamerou se zobrazením teplotní škály a maximálních teplot dosažených v konkrétním pohledu. Teploty byly odečteny po pěti hodinách konstantní zátěže. Ze zkušenosti je známo, že teplota má tendenci ještě mírně růst, než se ustálí. Tento nárůst je přibližně 2 °C. Pro potřeby porovnání měřeného teplotního pole s teplotním polem ze simulace je však uvedený stav dostačující.

Na obr. 6 jsou vyznačeny body pro orientační přehled v místech na povrchu stranového a prostředního vinutí. Dále je zaznamenána nejvyšší změřená teplota na aktuálním snímku 87,8 °C. Ze snímků je také patrné, že charakter rozložení teplotního pole na středním vinutí koresponduje se simulací [7].

7.2 Výsledné rozložení teplotního pole v ustáleném stavu

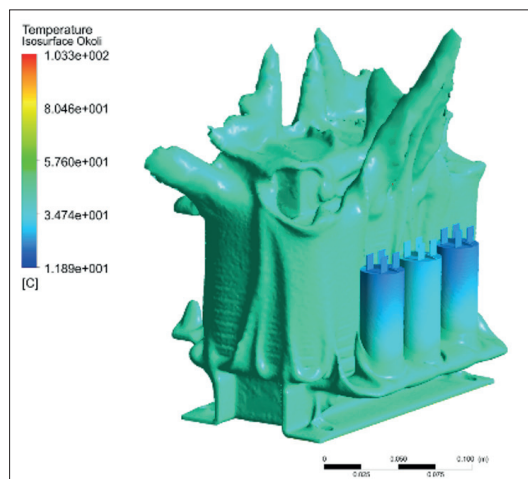
Řešení varianty I dosáhlo konvergence po 1 700 iteracích. Teplotní pole je obdobné tomu z termokamery, avšak je zde možné najít znatelné rozdíly. Nejvýznamnější z nich je hodnota maximální teploty po dosažení ustáleného stavu. Tato hodnota je 119,5 °C a vyskytuje se uprostřed středního vinutí tlumivky sinusového filtru – viz obr. 9. Na tuto skutečnost může mít hlavní vliv geometrická přesnost detailů a s ní související výpočet součinitele přestupu tepla z pevného povrchu do okolního vzduchu. [8]

Na obr. 10 a obr. 11 je teplotní pole varianty II. Vliv vyšší komplexnosti detailů způsobil snížení maximální dosažené teploty v ustáleném stavu. Po 1 800 iteracích se teplota ustálila na 102,9 °C. Stejně jako v případě varianty I, i zde se místo s nejvyšší teplotou nalézá přibližně uprostřed středního vinutí [8].

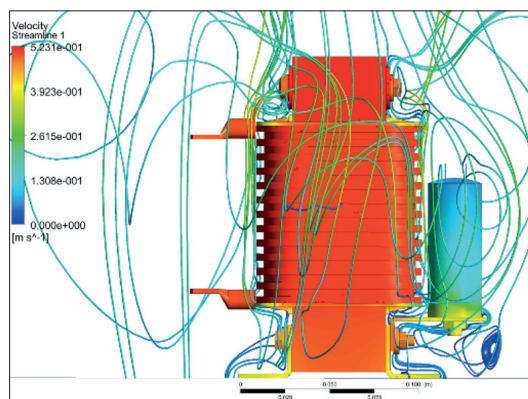
Obrázky 10 a 11 dále ukazují, že nejvyšší teplota na upínacích okách dosáhla přibližně 90 °C. Teploty hlav šroubů se pohybují v rozmezí od 80 do 90 °C. Obecně lze říci, že nejteplejší oblast je v horní a současně ve střední části sinusového filtru. Dále je možné si všimnout, že stejně jako má nejvyšší teplotu

prostřední vinutí, dosahuje také prostřední kondenzátor vyšší teploty oproti ostatním [8].

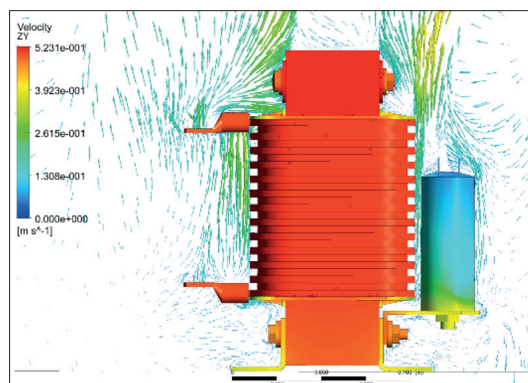
Jednou z dalších z možností postprocesingu je zobrazení teplot v okolí sinusového filtru ve formě izoploch, jak je vidět na obr. 12. Hodnota hledané teploty je nastavena na 50 °C. Je tak patrná oblast, kde je vzduch



Obr. 12. Izoplochy teploty okolního vzduchu (varianta II)



Obr. 13. Streamlines okolního proudění (varianta II)



Obr. 14. Vektory rychlosti okolního proudění (varianta II)



Ing. Jan Kořínek je absolventem oboru letadlová technika na Fakultě strojní ČVUT v Praze. Po ukončení magisterského studia v roce 2014 začal pracovat v oblasti automotive na pozici aplikačního konstruktéra multifunkčních pohonů GPA společnosti Robert Bosch. V současné době pracuje v R&D centru pro společnost Valeo jako vývojový konstruktér CMS systémů se zaměřením na externí aerodynamiku. Paralelně se v rámci kombinované formy doktorského studia na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice zabývá CFD simulacemi teplotních polí EMC zařízení.



Prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc., ukončil studium na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze v oboru silnoproudá elektrotechnika v roce 1989. V roce 1992 ukončil studium ve vědecké výchově na téže fakultě na Katedře elektrických pohonů a trakce. Od roku 1992 pracoval jako odborný asistent, od roku 2003 jako docent v Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. V letech 1995 až 2001 úzce spolupracoval s firmou Elektrosystem Praha, s. r. o., v oblasti vývoje a využití elektrických pohonů a řídicích systémů v průmyslových aplikacích. Od roku 2011 pracuje jako profesor na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice. Svou odbornou činností zaměřuje zejména do oblastí elektrických pohonů, výkonové elektroniky, elektrické trakce a mikroprocesorového řízení.

ohřátý na tuto teplotu nebo vyšší. Uvedená forma zobrazení je vhodná při plánování instalace sinusového filtru do zástavby současně s dalšími výrobky. Rovněž ji lze s výhodou využít pro volbu nejhodnějšího umístění dalších komponent v jeho blízkosti.

Na obr. 13 jsou zobrazeny streamlines okolního proudění vzduchu volné konvekce. Tyto křivky jsou tangenti k vektorům rychlosti proudění a ukazují směr, ve kterém se pohybuje nehmotná proudová částice v libovolném čase. Díky nim je možné detekovat místa, kde vzniká cirkulace, nebo naopak, kde je obtékání přilnuté k povrchu. V návaznosti na tepelný design produktu zejména při nucené konvekci lze tyto informace rovněž využít jako indikátor vhodného umístění.

Na obr. 14 jsou zobrazeny hodnoty vektorů rychlosti proudění okolního vzduchu. V místech nad sinusovým filtrem dosahuje rychlost až 0,5 m·s⁻¹. Vlivem ohřevu vzduchu od sinusového filtru se díky změně jeho hustoty rychlost zvyšuje. V oblasti spodních upínacích ok a připevnění kondenzátorů jsou rychlosti nižší a pohybují se asi do 0,1 m·s⁻¹.

Se zvětšující se výškou roste i rychlost, to je možné spatřit např. v oblasti horních upínacích ok, kde je již často okolo hodnoty $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a více.

Z hlediska tepelné optimalizace lze říci, že v tomto případě jsou kondenzátory instalovány na velmi vhodném místě. Ohřev kondenzátorů od vinutí je minimalizován díky charakteru obtékání okolního vzduchu, který je ukázán na obr. 14. Toto tvrzení lze i ověřit pomocí obr. 12, kde je vidět, že kondenzátory nejsou umístěny v nejvíce ohřivaném proudu vzduchu.

8. Závěr

Při porovnávání snímků z termokamery a 3D modelu tlumivky sinusového filtru je u varianty I zřejmé, že se teplotní pole ze simulace více odlišuje od reálného rozložení. Dochází k tomu v místě kontaktu desky a nosníku stahovací konstrukce, u vinutí poblíž upínacích ok pro napájení a také na horizontální ploše koster vinutí. V simulaci by bylo možné pro zpřesnění teplotního rozložení toto ovlivnit propracováním geometrie 3D modelu do větších detailů, např. přidáním žebrování koster vinutí, upínacích ok, přidání geometrie podstavné desky i držáku kondenzátorů.

Všechny tyto náměty vedly k vytvoření CFD simulace varianty II. Reálný sinusový filtr

má vlivem vinutí drátu na cívkách drážkování, které značně ovlivňuje charakter obtékání během volné konvekce, a tím i přestup tepla do okolí. Hodnota součinitele přestupu tepla je tak vyšší. Tento efekt ve výsledku napomáhá k celkovému snížení teploty zařízení. Tento fakt potvrzují výsledky z kapitoly 7.2, kde maximální dosažené teploty varianty II jsou obecně blíže teplotám změřeným termokamerou než teploty zjednodušené geometrie z varianty I [8].

Dále je třeba zvážit vliv změny teploty na změnu ztrátového výkonu. Vlivem rozdílně ohřátých vinutí se budou ztrátové výkony do určité míry mezi sebou lišit. V okrajových podmínkách pro 3D model byl uvažován ztrátový výkon na každé cívice stejný. To má vliv na rozdíl ve výsledném teplotním poli na jednotlivých vinutích [8].

Zmíněné souvislosti tak ukazují nový potenciál, který lze využít ke zpřesnění vstupních parametrů pro matematický model simulace. Výhledově tak bude možné přidat více geometrických detailů do aktuálního modelu, aplikovat hodnoty změřených ztrát a tím docílit změny rozložení teplotního pole.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu Studentská grantová soutěž SGSDFJP_2016001. Vznik příspěvku podpořila firma SKYBERGTECH, s. r. o., která zapůjčila tlumivku si-

nusového filtru a zároveň poskytla podporu při validačním měření.

Recenze: doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.

Literatura:

- [1] KÚS, V. – SKÁLA, J. – HAMMERBAUER, J.: *Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů*. Praha, Ben – nakladatelství technické literatury, 2013.
- [2] NOVÁK, J.: *Frekvenčně řízené elektrické pohony a jejich elektromagnetická kompatibilita*. ELEKTRO, 2005, č. 7.
- [3] NOVÁK, J. – CHYSKÝ, J. – KOŘÍNEK, P.: *Ztráty sinusových filtrů pro měniče se spínacími tranzistory*. ELEKTRO, 2013, č. 10.
- [4] KRISHNAMOORTHY, P.: *Electromagnetic And Heat Transfer Modeling Of Microwave Heating In Domestic Ovens*. Lincoln, University Of Nebraska At Lincoln, May 2011.
- [5] FLUKE. fluke.com: Ti90, Ti95, Ti100, Ti105, Ti110, Ti125 TiR105, TiR110, TiR125 *Performance Series Thermal Imagers* [online]. © 2012 [cit. 2016]. Dostupné z: <http://www.fluke.com/fluke/czcs/support/manuals/default.htm>
- [6] ANSYS INC: *Ansys Fluent Theory Guide*. Canonsburg, 2016. Dostupné z: <http://www.ansys.com>
- [7] KOŘÍNEK, J.: *Validation of Sinus Filter Choke Temperature Model*. Transactions On Electrical Engineering. Praha, Ergo Nomen, o. p. s., k13114 FEE CTU IN PRAGUE, 2016.
- [8] KOŘÍNEK, J.: *Thermal Analysis of the Sinus Filter and Verification*. Studentská tvůrčí činnost 2017. Praha, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017.



FLIR T500-Series

Profesionální termografická kamera

Vynikající výkon a design

- Optický blok se otáčí o 180° a umožňuje obsluhu vidět úplný obraz situace – nad, pod i okolo překážek.
- Rozlišení až 161 472 pixelů u bezkontaktních měření teploty
- Zůstaňte flexibilní a používejte objektiv u více kamer – koncepce AutoCal™
- Nejlepší záruka v oboru od společnosti FLIR na 2–10 let



Vyměnitelná optika AutoCal™



4" LCD displej odolný proti poškrábání

www.flir.com



The World's Sixth Sense®