



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002
13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

OPTIMALIZACE TVARU LAMELY KOMUTÁTORU

Miroslav Španiel*, Ctirad Novotný†

Abstract: *Commutator is an important part of direct-current electromotor, the function of which is to switch single windings of its rotor. Presented paper is focused on improvement of mechanical properties of commutator by searching for better shape of its lamella. We collaborate with Komutex, s.r.o., and our common research is part of more complex project including materials and technology of production. It is supported by grant of Ministry of industry and bussiness of Czech Republic. Methodology of automated finite element sensitivity study of lamella cross section shape was partial target of our research. Our solution is based on idea, that various shapes may be compared using simplified planar (2D) model of lamella and commutator body. Developed methodology requires parametric geometry of lamella cross section. Large number of FE tasks are to be solved for various combinations of dimensions. The results are there filtered using own software.*

Klíčová slova: *commutator, design sensitivity*

1 Úvod

Komutátor je důležitou součástí stejnosměrného elektromotoru. Jeho funkcí je postupně zapojovat jednotlivá vinutí rotoru. S rostoucí úhlovou rychlostí a výkonem elektromotoru se rapidně zvyšují nároky na tuhost, pevnost a elektrické vlastnosti komutátoru. Stávající konstrukce komutátorů se opírají o elementární poznatky mechaniky poddajných těles a vycházejí z dlouholetých zkušeností. Cílem projektu, ze kterého vychází tento příspěvek, je využití numerické analýzy deformace a napjatosti k systematickému zlepšování konstrukce komutátoru.

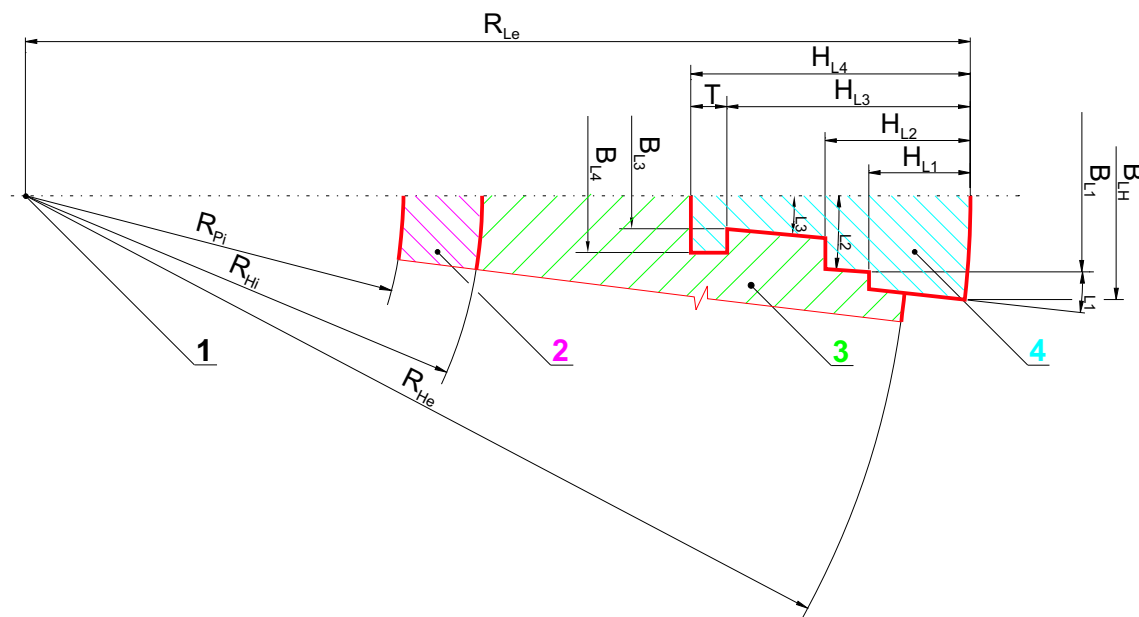
Příspěvek shrnuje výsledky etapy projektu zaměřeného na zlepšení mechanických vlastností komutátoru hledáním optimálního tvaru jeho lamely. Výzkum byl

*Ing. Miroslav Španiel, CSc., FS ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6; tel. +420 2 2435 2561, e-mail: spaniel@lin.fsid.cvut.cz

†Ing. Ctirad Novotný, FS ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6; tel. +420 2 2435 2561, e-mail: novotnyc@u-205.fsid.cvut.cz

prováděn za podpory grantu Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky a za spolupráce s firmou Komutex, s.r.o.

Komutátor je tvořen měděnými lamelami zalisovanými v plastické hmotě. Těloso je vyrobeno vstřikováním a lisováním za tepla, při kterém jsou lamely podepřeny malým plastickým kroužkem. Po vytvrzení tělesa komutátoru jsou lamely obrobeny tak, aby jejich pracovní plochy ležely na společném válci jehož osa je osou rotace. Při výrobě komutátorů je používáno několik typů lisovacích hmot. Lamely jsou vyráběny z polotovaru, jehož profil je možno dodavateli předepsat.



Obrázek 1: Geometrie segmentu a lamely: 1 ... osa rotace; 2 ... ocelové pouzdro; 3 ... tělo komutátoru; 4 ... lamela.

Hlavní provozní zatížení je dáno rotací a teplotním polem. Provozní deformace lamel je nerovnoměrná a zhoršuje tak výrazným způsobem geometrii pracovní plochy. To má nepříznivý vliv na funkci i na opotřebení komutátoru. V případě přetížení může docházet i vytrhávání jednotlivých lamel.

Cílem naší práce je metodika pro nalezení suboptimálního tvaru a rozměrů lamel. Závislost deformace a polí napjatosti na tvaru lamely je komplikovaná a nelze ji řešit analyticky. Strategie řešení musí zahrnovat použití numerické metody. V předchozích etapách projektu byl metodou konečných prvků (MKP) vytvořen podrobný model segmentu stávajícího komutátoru s jednou lamelou, využívající cyklické symetrie. Mohutnost tohoto modelu znemožňuje jeho využití v jakémkoliv optimalizačním procesu, který vyžaduje opakované výpočty. Proto bylo rozhodnuto "optimalizovat" nejprve tvar a rozměry průřezu lamely s využitím níže popsaného 2-D modelu.

V současnosti se běžně používají lamely dle obrázku 1. Vzhledem k tomu, že naše znalosti o vlivu jednotlivých geometrických parametrů na deformaci a napjatost soustavy lamela–těloso jsou nedostatečné, bylo rozhodnuto zmapovat podrobně celý návrhový prostor. Místo aplikace optimalizační strategie, která přímo minimalizuje zvolenou kritériální funkci–radiální posuv pracovní plochy lamely $u_r \rightarrow \min$ –za splnění podmínek bezpečnosti $k \geq 1$, vychází prezentované řešení výše formulovaného problému ze studie citlivosti radiálního posuvu pracovní plochy lamely a

bezpečnosti soustavy lamela–těleso vůči porušení na změny návrhových geometrických parametrů definujících průřez lamely. V rámci této studie je definován velký počet úloh, jejichž zadání se liší hodnotami výše zmíněných geometrických parametrů. Tyto úlohy jsou řešeny MKP za stejných kinematických i silových okrajových podmínek. Z výsledku výpočtu je zaznamenána hodnota radiálního posuvu pracovní plochy lamely a hodnoty napjatosti potřebné pro posouzení provozní bezpečnosti. Takto získaná množina případů je pak interpretována z hlediska závislosti kritériální funkce a podmínek bezpečnosti na vybraných návrhových parametrech, a po vyloučení obtížně vyrobitelných případů z ní může být vybrán suboptimální profil lamely.

Oproti původní představě hodnotit bezpečnost podle klasických bodových kritérií pevnosti [1] se při experimentálním výzkumu použitých umělých hmot ukázalo nezbytné kvantifikovat míru nebezpečnosti stavu napjatosti tělesa komutátoru s lamelami pomocí speciálních kritérií, která zohledňují nejen absolutní velikost špičky napjatosti, ale také objem, ve kterém vysoká mechanická napětí působí. Tato kritéria vyžadují znát nejenom hodnoty složek napjatosti v hodnocených lokalitách, ale také velikosti jejich gradientů. Typickým představitelem takového kritéria je "Tsai-Hillovo" kritérium [3].

2 Realizace řešení

Cílem našeho výzkumu byla metodika automatizované konečněprvkové parametrické studie tvaru řezu lamely. Řešený model představuje řez komutátoru rovinou kolmou na osu rotace viz obr. 1. Využitím cyklické symetrie byl získán segment těla komutátoru s jednou lamelou, jejichž interakce je modelována jako kontakt bez adheze, což odpovídá experimentálně potvrzeným faktům. Byly přijaty následující předpoklady:

- Pro odezvu lamel různých průřezů na zatížení je možno použít rovinný model segmentu komutátorů, který vznikne řezem komutátoru rovinou kolmou na osu rotace a využít cyklickou symetrii.
- Na rozhraní lamela - hmota komutátoru je na základě předchozích zkušeností modelován kontakt.
- Rovinný model segmentu komutátoru je zatěžován radiální objemovou silou, která odpovídá "odstředivému zrychlení".
- Zatížení teplotou je při porovnávání ignorováno, předpokládá se, že změna teploty ovlivní absolutní velikost vypočtených posuvů, ale ne jejich posloupnost.
- Srovnávací veličinou je radiální posuv pracovní plochy lamely u_r . Vypočtené výsledky jsou vzhledem k aplikovaným zjednodušením v absolutních hodnotách považovány za nepříliš přesné, ale předpokládá se, že pro dvě modelové lamely a jim odpovídající reálné lamely bude zachováno pořadí posuvů tak, jak bylo určeno výpočtem.
- Jako hmota komutátoru byla při srovnávacích výpočtech použita jedna ze tří hmot, z nichž se v současnosti komutátory vyrábějí. Předpokládá se, že změna materiálu ovlivní velikost vypočtených posuvů, ale posloupnost ne.

- Pro hodnocení namáhání hmoty komutátoru je použito modifikované "Tsai-Hillovo" [3] kritérium.

Vzhledem k potřebě grafických prezentací citlivostních studií při vyhodnocování výsledků byl navržen postup, ve kterém se v rámci jedné studie mění v cyklech několik geometrických parametrů, ostatní jsou zvoleny pevně. Graficky jsou reprezentovány závislosti vybraných kritérií (radiálního posuvu, bezpečnosti, ...) na dvou z nich. Tímto způsobem je citlivostní studie reprezentována řadou trojrozměrných grafů. Tento přístup vyžaduje vhodnou volbu proměnných parametrů.

3 MKP model

MKP model je koncipován jako rovinná úloha (v podmínkách rovinné deformace). Model sestává ze dvou těles – lamely a hmoty komutátoru. Interakce těchto těles je zprostředkována obecným kontaktním algoritmem. Segment je na okrajích uložen v obvodovém směru, což zajišťuje dostatečné splnění podmínek cyklické symetrie. Zatížení je objemovými silami od rotace. Úloha je řešena jako nelineární materiálově i geometricky. Měď (lamela) je modelována jako elasto-plastický materiál. Plastická hmota těla komutátoru je popsána jako elastický izotropní materiál. Celý model je zatěžován rotací 50 000 ot./min.

4 Citlivostní analýza

Vyvinutá metodika vyžaduje vytvoření parametrické geometrie řezu lamely. Množství variant řešených při citlivostních studiích je enormní (u studie prezentované v této zprávě se jedná o více než 4000 variant). Proto bylo nutné vytvořit program pro automatické zpracování výsledků výpočtů do tabelované a grafické podoby. Tento program je napsán v jazycích C++ a makrojazyce ANSYSu (APDL) a poskytuje:

- Generování, výpočty a zaznamenání výsledků jednotlivých úloh (APDL).
 - Výpočet návrhových parametrů (NP) pro daný případ. NP jsou uvedeny v tabulce 4 a na obrázku 1. Meze intervalů jsou stanoveny tak, aby průřez byl geometricky korektní.
 - Generování geometrického modelu, MKP sítě a výpočet v programu ANSYS 5.6.
 - Zpracování výsledků.
 - Uložení NP a výsledků do souboru.
- Zpracování výsledků citlivostní studie (C++).
 - Čtení všech vstupních parametrů a výsledků.
 - Výpočet bezpečnosti těla komutátoru je založen na Tsai-Hillově kritériu [3].
 - Třídění úloh založené na rozměrech geometrie.
 - Vytvoření grafických výstupů radiálního posuvu a bezpečnosti v závislosti na vybraných geometrických rozměrech. Je generován skript pro vykreslení grafů, který spouští program GNUPlot [5].

- Nepřípustná řešení z hlediska bezpečnosti mohou být z grafického výstupu vyloučena.
- Textový výstup studie řešení používá publikační systém L^AT_EX [4]. Je členěn na kapitoly podle přípustných kombinací parametrů T a B_{L3} . V těchto kapitolách jsou publikovány grafické závislosti radiálního posuvu pracovní plochy lamel a bezpečnosti na parametrech H_{L4} a B_{L4} .

Výše uvedený aparát je obecně použitelný pro další studie a představuje hlavní výsledky prezentované práce.

Parametr	Proměnná	hodnota	jednotky	komentář
n_L	NL		1	Počet lamel
R_{Hi}	RHI		mm	pevná hodnota
R_{He}	RHE		mm	pevná hodnota
R_{Le}	RLE		mm	pevná hodnota
R_{Pi}	RPI		mm	pevná hodnota
H_{L1}	HL1		mm	pevná hodnota
H_{L2}	HL2		mm	pevná hodnota
H_{L3}	HL3		mm	$h_{L4} - t$
B_{Lh}	BLH		mm	pevná hodnota
B_{L1}	BL1		mm	pevná hodnota
α_1	AL1		°	pevná hodnota
α_2	AL2		°	pevná hodnota
α_3	AL3		°	pevná hodnota
H_{L4}	HL4	$< h_{L4 \min}; h_{L4 \max} >$	mm	návrhový parametr
T	T	$< T_{\min}; T_{\max} >$	mm	návrhový parametr
B_{L3}	BL3	$< 0.4; b_{L3 \max} >$	mm	návrhový parametr
B_{L4}	BL4	$< b_{L4 \min}; b_{L4 \max} >$	mm	návrhový parametr

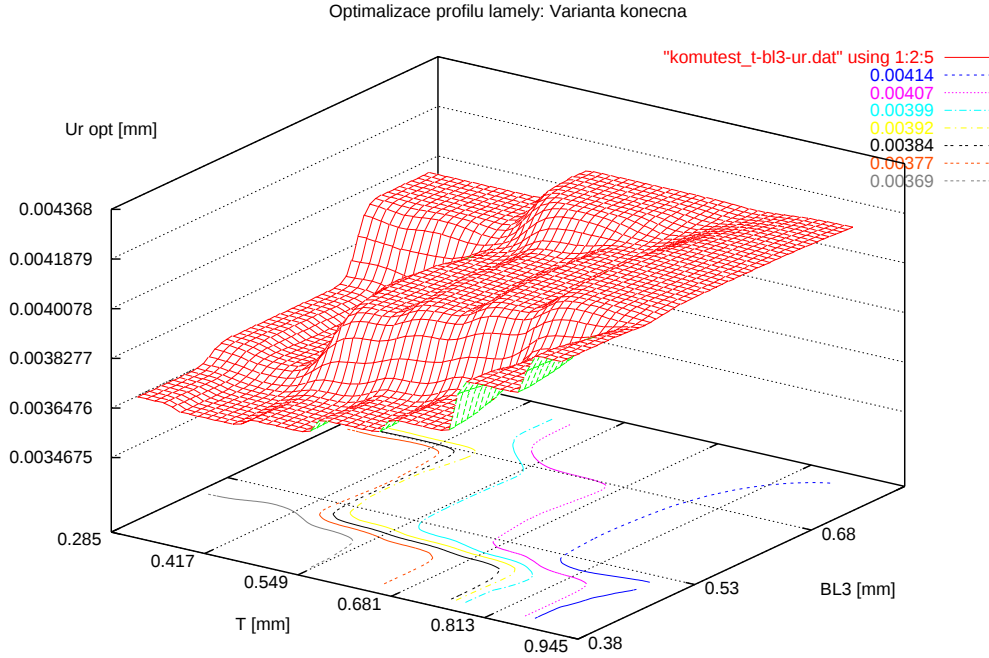
Tabulka 1: Parametry popisující geometrii průřezu segmentu komutátoru dle obrázku 1. Konkrétní hodnoty nejsou uvedeny. Splnění níže uvedených vztahů zaručuje geometrickou korektnost profilu lamely. $B_{L3 \max} = B_{L1} - 2(H_{L2} - H_{L1}) \tan \alpha_2 - 0.1$; $H_{L4 \min} = H_{L2} + T + 0.15$; $H_{L4 \max} = R_{Le} - \frac{B_{L3}}{2 \tan(180/N_L)} - 0.15$; $B_{L4 \min} = B_{L3} + 0.05$; $B_{L4 \max} = 2(R_{Le} - H_{L4}) \tan(180/N_L) - 0.05$.

Na následujících řádcích je prezentována studie stávajícího komutátoru daného průměru D s ocelovým pouzdem. Pro řízení výpočtů byl použit výše zmíněný program, který postupně mění parametry T , B_{L3} , H_{L4} , B_{L4} ve zvolených intervalech a vyhodnocuje výsledky z výpočtů MKP. Pro prezentovanou studii bylo vyřešeno celkem 4361 rovinných úloh. Výsledky studie jsou prezentovány ve formě závislosti radiálního posuvu u_r , bezpečnosti k^{TH} a maximálního redukovaného napětí v lamele σ_{red}^{maxHMH} na návrhových parametrech.

5 Zhodnocení výsledků studie citlivosti

Na základě výsledků studie citlivosti lze usuzovat na možnost zlepšit stávající konstrukci změnou vybraných rozměrů. Pro první orientaci byly z množiny všech vý-

sledků vybrány pouze ty, u kterých je bezpečnost dle Tsai–Hillova kritéria $k^{TH} \geq 1$. Dále pak pro každou dvojici parametrů $[T; B_{L3}]$ byla vybrána přípustná varianta s minimálním radiálním posuvem pracovní plochy lamely $u_{r \min}$. Z grafů na obrázcích 2 a 3 je evidentní, že oblasti malého radiálního posuvu odpovídají poměrně vysokým bezpečnostem. Na obrázku 4 je vynesena závislost maximálního redukovaného napětí v lamelě na $[T; B_{L3}]$ vždy pro přípustnou variantu s minimálním radiálním posuvem. Je vidět, že v oblastech, které se jeví z hlediska k^{TH} a $u_{r \min}$ optimální, je i úroveň namáhání lamely nízká.

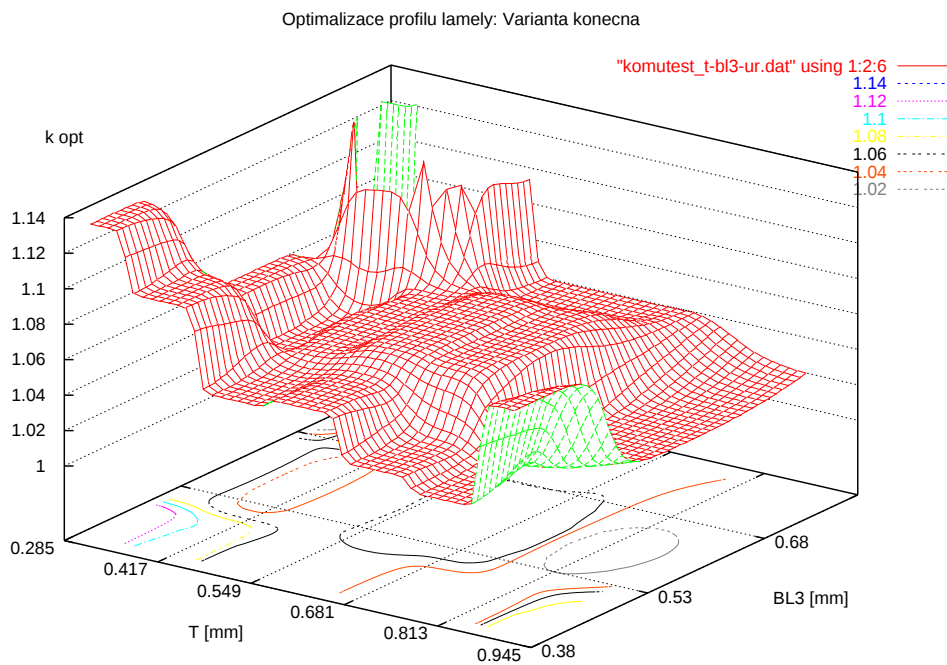


Obrázek 2: Závislost minimálního $u_{r \min}$, na t a b_{L3} .

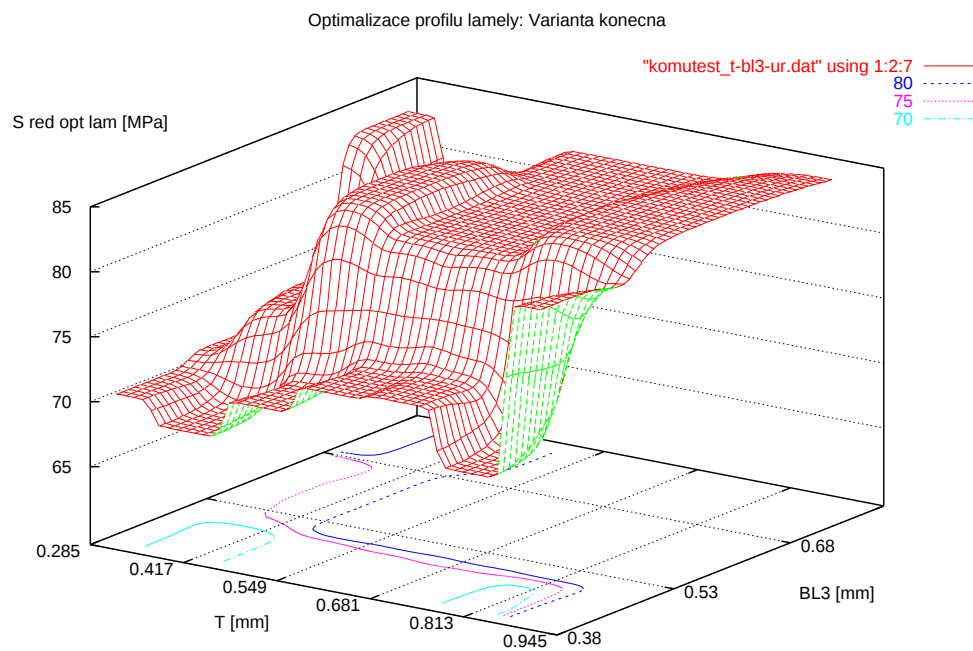
5.1 Suboptimální varianta

Na základě provedených analýz byla vybrána suboptimální varianta. Při $T = 0,4$ mm, $B_{L3} = 0,4$ mm, $H_{L4} = 3,550$ mm a $BL4 = 0,856$ mm je vypočtený radiální posuv $u_{r \min} = 0,00365$ mm nejmenší. Bezpečnost vůči modifikovanému Tsai–Hillovu kritériu porušení pro umělou hmotu tělesa komutátoru je $k^{TH} = 1,099$. Maximální redukované napětí v lamelě činí $\sigma_{red \max}^{HMH} = 68,42$ MPa. Hodnoty návrhových parametrů stávající varianty jsou $T = 0,5$ mm, $B_{L3} = 0,6$ mm, $H_{L4} = 3,7$ mm a $B_{L4} = 2,0$ mm. Na obrázcích 5, resp. 6 jsou vyneseny izočáry radiálního posuvu pracovní plochy lamely v závislosti na H_{L4} a B_{L4} pro suboptimální, resp. stávající variantu. Barevně je vyznačena oblast $k^{TH} \geq 1$.

¹Bezpečnost stávající provozované varianty je $k_0^{TH} = 0,5$. Výpočet bezpečnosti k^{TH} je založen na experimentálním výzkumu porušování hmoty těla komutátoru [1]. Podmínky při výrobě vzorků pro tato měření nejsou totožné s podmínkami při výrobě komutátoru. Výpočtové otáčky jsou téměř dvakrát větší než provozní a při dosažení těchto otáček u stávající vyráběné varianty dochází ve významném počtu případů k destrukci. Na základě uvedených zkušeností by bylo možno požadovanou bezpečnost $k^{TH} \geq 1$ ještě snížit.



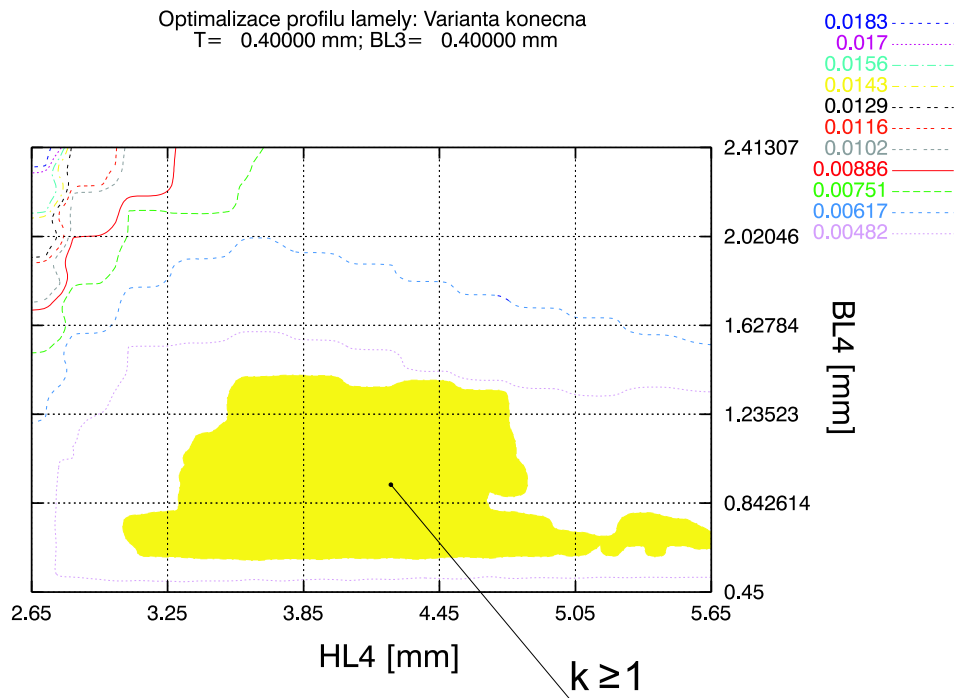
Obrázek 3: Závislost bezpečnosti k při minimálním $u_{r \min}$, na t a b_{L3} .



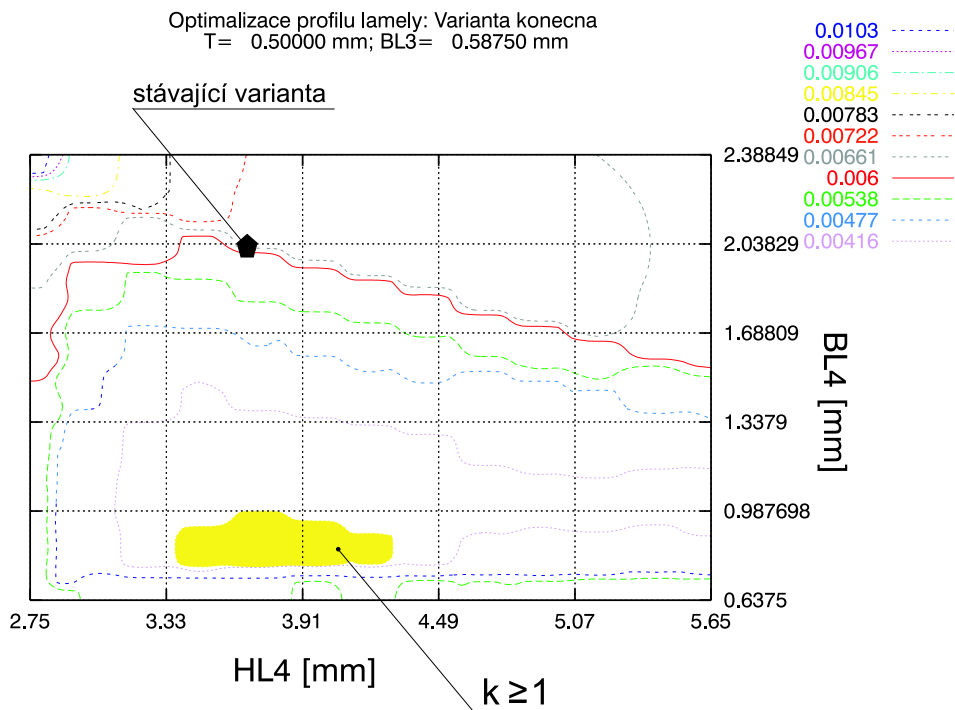
Obrázek 4: Závislost maximálního reduk. napětí v lamelě $\sigma_{red \max}^{HMH}$ při minimálním $u_{r \min}$, na t a b_{L3} .

6 Závěr

Byla navržena a realizována metodika pro nalezení suboptimálního tvaru komutátoru založená na sérii numerických analýz MKP parametrického rovinného mo-



Obrázek 5: Závislost radiálního posuvu pracovní plochy lamely u_r na parametrech H_{L4} a B_{L4} v suboptimálním případě při $T = 0,4$ mm, $B_{L3} = 0,4$ mm. Barevně je vyznačena oblast, pro kterou je bezpečnost $k_{TH} \geq 1$.



Obrázek 6: Závislost radiálního posuvu pracovní plochy lamely u_r na parametrech H_{L4} a B_{L4} ve stávajícím případě při $T = 0,5$ mm, $B_{L3} = 0,5875$ mm. Barevně je vyznačena oblast, pro kterou je bezpečnost $k_{TH} \geq 1$.

delu komutátoru s různými rozměry. Přínos této práce spočívá ve vyvinutí softwaru umožňujícího postupné řešení velkého množství variant součásti s měnícími se rozměry metodou konečných prvků, jejich vyhodnocení podle zvolených kritérií a konečně vytvoření grafické a textové reprezentace těchto výsledků. Uvedený přístup byl verifikován na optimalizaci stávajícího typu průřezu lamely. V budoucnosti jsou plánovány studie průřezů lamel s odlišnou topologií a jejich srovnání.

Literatura

- [1] M. Růžička, J. Michalec. Podklady pro posouzení pevnosti komutátoru. *Technická zpráva 205/01/21 FS ČVUT v Praze*. ČVUT, 2001.
- [2] M. Španiel, C. Novotný, J. Vtípil. Optimalizace tvaru lamely komutátoru. *Technická zpráva 205/01/22 FS ČVUT v Praze*. ČVUT, 2001.
- [3] B.D. Agarwal, L.J. Broutman. Vláknové kompozity. SNTL Praha, 1987.
- [4] Československé sdružení uživatelů T_EXu. <http://www.cstug.cz/>.
- [5] Gnuplot Central. <http://www.gnuplot.vt.edu/>.

Tento výzkum je podpořen grantem MPO FA-E3/032/00.