

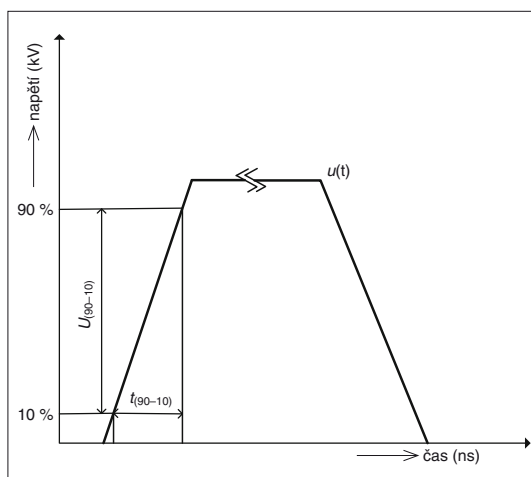
Zvýšení provozní spolehlivosti motorů s měniči s rychlými spínacími prvky

prof. Ing. Václav Mentlík, CSc., doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.,
Ing. Josef Pihera, Ph.D., Ing. Roman Hamar, Ph.D.,
Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni

Nejpočetnější skupinou točivých elektrických strojů jsou malé a střední stroje tvořící prakticky devadesát procent všech vyráběných točivých strojů. Jde o stroje do výkonu několika set kilowattů, u trakčních motorů až jednoho megawattu. Diagnostice a designu této skupiny strojů nebyla vždy věnována potřebná a opodstatněná pozornost. Diagnostika byla často opomíjena z důvodů porovnatelné ceny s případnou opravou stroje a jeho kompletní výměnou. Tento pohled se ale v souvislosti s racionalizací výroby, snahou o snižování nákladů, ale také s možnostmi nových diagnostických postupů a systémů založených na digitálním sběru dat postupně mění. Cena diagnostiky systémů může být vzhledem k narušení výrobního procesu způsobenému výpadkem stroje zanedbatelná. Důležitou roli zde hrají ekonomické rozborů možných vzniklých havarijních situací. Cena točivého stroje nemusí být vysoká, ale důsledky výpadku pohonu, např. výrobní linky, mohou být značné. Často může investice do vhodného diagnostického systému malého točivého stroje zaručit bezporuchový chod důležité výrobní linky. Podobná situace byla v samotném designu asynchronního stroje. Při pohledu na elektroizolační systémy točivého stroje, a to je problematika, kterou se zde zabýváme, dochází během času k postupné evoluci s ohledem na používané materiály izolačního systému, a zejména na jeho komponenty. Např. lze sledovat vývoj kvality používaných pojiv, a to zvláště v oblasti výsledné teplotní třídy izolace. Problematická je situace z hlediska vývoje izolačních systémů v přímé vazbě na pulzní namáhání, tedy na případy, kdy je točivý stroj součástí elektrického pohonu a je napájen z měniče frekvence. Zde ještě výrobci točivých strojů nezareagovali na lokálně zvýšenou degradaci elektroizolačních systémů (čela vinutí, výstupy vodičů z drážek, přepětové jevy, ložiskové proudy). V tomto směru je nutné stále prohlubovat znalosti, uskutečňovat výzkum a zavádět nové postupy řešení tak, aby se spolehlivost řízených pohonů dále zvyšovala.

1. Provozování malých a středních točivých strojů – namáhání pulzním napětím

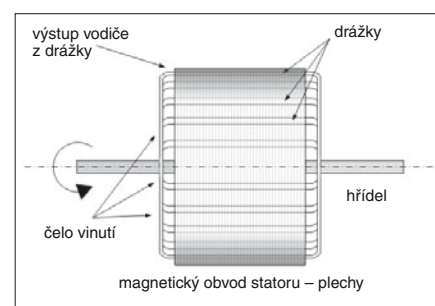
Asynchronní motory se v minulosti používaly zejména v pohonech, kde nebylo nutné řídit otáčky, popř. moment motoru. Byl-li požadavek na přesnou regulaci, využívaly se stejnosměrné stroje. Ty ovšem mají nevýhodu ve větší hmotnosti, složitější, a tedy i dražší konstrukci i nutnosti údržby sběracího ústrojí – kartáčů. Aby bylo možné využít výhod asynchronních strojů v regulovaných pohonech, bylo nutné vyřešit otázku jejich řízení. Toto je možné změnou frekvence napájecího střídavého napětí. Otáčky motoru odpovídají frekvenci napájecího napětí. Plynulou změnou této frekvence je zaručena plynulá regulace otáček motoru, tedy i pohonu. Spolu se vznikem výkonových spínacích součástek, nejprve tyristorů, později tranzistorů, vznikla i možnost modulace napětí na požadovanou frekvenci. Těto techniky bylo využito při vzniku pohonů s asynchronním motorem s měničem frekvence. Toto uspořádání se využívá nejen pro statické pohony (např. výrobních linek apod.), ale i v elek-



Obr. 1. Definice strmosti nárůstu napětí – napětový impulz

trické trakci. Vývoj a výzkum v této oblasti stále pokračují. V minulých letech se tento typ řízených pohonů začal používat postupně v trolejbusové, tramvajové i vlakové dopravě. Stále širší uplatnění nachází také v automobilovém průmyslu, v současné době zejména u hybridních pohonů automobilů. Velkou výhodou moderních pohonů s asynchronními motory je i možnost rekuperace brzděné energie zpět do sítě (u trakčních vozidel) nebo do akumulátorů (automobily).

Díky zpracovatelským technologiím a vývoji materiálů vznikají stále nové spínací součástky. Zvyšují se jejich výkonové spínací možnosti i rychlost změny stavu. To umožňuje jejich použití ve stále náročnější oblasti řízení elektrických pohonů. Rychlejší spínací pochody umožňují dokonalejší způsoby regulace. Proto je v současné době většina vyrobených elektrických točivých



Obr. 2. Zjednodušené zobrazení místa výstupu izolovaného vodiče z drážky – magnetického obvodu statoru elektrického točivého stroje

strojů malých a středních výkonů napájená z některého zařízení umožňujícího přesnou regulaci.

S urychlováním spínacích procesů jsou ovšem spojeny i negativní jevy jejich používání. Bylo zjištěno zvýšené oteplení některých částí izolačního systému, změny účinnosti, pulzní namáhání izolace, ložiskové proudy, hřídelová napětí, vibrace, zvýšená aktivita výbojové činnosti, růst ztrátového činitele a zvýšení hladiny hluku.

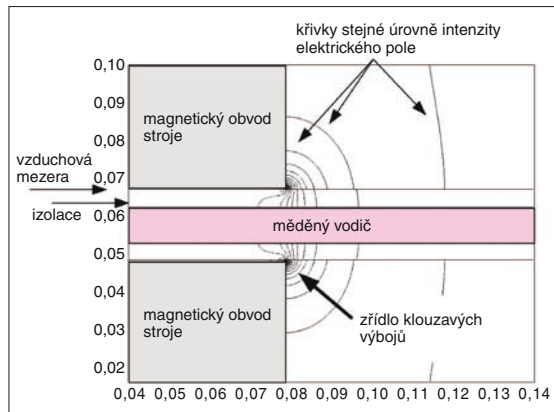
Při popisu problémů spojených s používáním rychlých spínacích součástek se v odborné literatuře ustálil termín *strmost nárůstu*, resp. *poklesu napětí* na spínací součástce, označovaný jako du/dt nebo někdy také jako $\Delta u/\Delta t$ (kV/ μ s; V, s) – obr. 1.

V současné době jsou běžně dosahovány strmosti 20 kV/ μ s, které výrazně převyšují strmosti dosahované dříve (např. strmosti u GTO tyristorů 0,5 kV/ μ s). Norma ČSN EN 62068-1 (Elektroizolační systémy – Elektrická namáhání vyvolaná opakovanými impulzy – Část 1: Všeobecná metoda hodnocení elektrické odolnosti) udává termíny:

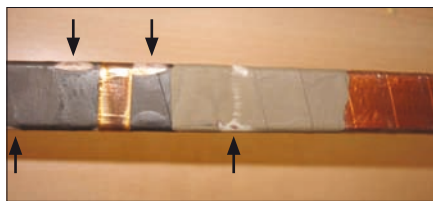
- doba čela impulzu – 1,25násobek časového intervalu 10 až 90 % vrcholové hodnoty impulzního napětí na čele impulzu,
- rychlost nárůstu napětí – 0,8násobek velikosti impulzního napětí dělený časovým

intervalem 10 až 90 % vrcholové hodnoty impulzního napětí.

V současnosti existuje mnoho zařízení, která je možné označit jako zdroje pulzů, jež působí na izolační systémy točivých elektrických strojů jako zátěž. Mezi tato zařízení patří např. pulzní měnič napětí a měnič frekvence.



Obr. 3. Podélný řez drážkou stroje, výstup vinutí z drážky, vysoká intenzita elektrického pole – vznik klouzavých výbojů



Obr. 4. Příklad degradace ochranného laku po expozici napětím

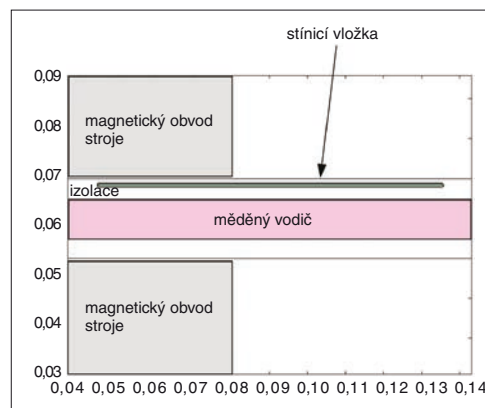
Pulzní měnič napětí je zdroj stejnosměrného napětí, jehož hladina je modulována s třídou doby jednotlivých sepnutí a vypnutí spínací součástky. Bývá používán v pohonech se stejnosměrným motorem (např. tramvaje, trolejbusy, lokomotivy).

Měnič frekvence je z hlediska izolačního systému zdrojem pulzů, které vznikají při modulaci výstupního napětí. Nachází využití při přeměně stejnosměrného napětí na střídavé. Je používán v pohonech s asynchronním motorem (např. trolejbusy, tramvaje, elektromobily, příměstské jednotky).

2. Izolační systém

Pomineme-li stroje těch nejmenších výkonů, pak se izolační systém točivých strojů vyrábí technikou vakuově tlakové impregnace (VPI – *Vacuum Pressure Impregnation*) nebo *Resin-Rich*. Obě techniky využívají izolační materiál tvořený tříslučkovým izolačním systémem. Jedná se o kompozit skládající se z nosné složky, pojiva a dielektrické bariéry. Nosná složka určuje zejména mechanické vlastnosti konečného izolačního systému. Většinou se vyrábí ze skleněných vláken, která mohou mít určitý typ vazby (látková, plátňová, keprová aj.) nebo mohou být zpravována jako whiskery či rouno. Používají se

i jiné materiály, jako jsou např. aramidová vlákna atd. Další možností je použití fólie jako nosné složky (např. PEN nebo PET). Pojivo zajišťuje dobré propojení všech složek kompozitního materiálu a závisí na něm velkou měrou výsledná tepelná třída izolačního systému. Jako pojivo se v současné době používají různé syntetické pryskyřice, jako např. modifikované epoxidové, polyuretanové, polyesterové či silikonové. Dielektrická bariéra zabezpečuje zejména velkou výslednou elektrickou pevnost izolačního kompozitu. Nejčastěji se používá rekonstruovaný slídový papír, ale i jiné materiály (např. Kapton). Po vytvrzení speciálním postupem vzniká výsledný kompozitní materiál, který vyniká velkou elektrickou a mechanickou pevností, velkou rezistivitou a nízkou nasákavostí. V současné době jsou tyto izolační systémy používány při teplotách překračujících tepelnou třídu F (155 °C).



Obr. 5. Vložení stínící vložky

Zmíněné zpracovatelské technologie zaručují vysoký stupeň prosycení kompozitu pojivem. Tím je dosahováno nízkého množství mikronehomogenit – vzduchových bublinek uvnitř vytvrzeného izolačního systému. Takto je značně omezena vnitřní výbojová činnost, která způsobuje rychlou degradaci izolačního materiálu.

V izolačním systému točivého stroje však vzniká také povrchová výbojová činnost. Drážkové výboje mezi izolovanými tyčemi vinutí a stěnou drážky a klouzavé výboje na výstupech vinutí z drážky.

V tomto článku se dále zaměříme na klouzavé výboje, které vznikají na výstupech izolovaných vodičů vinutí z drážek statoru a způsobují zde značnou povrchovou degradaci izolačního systému. Tento jev vzniká jak při napájení stroje střídavým napě-

tím sinusového tvaru, tak při pulzním namáhání. Při pulzním namáhání je tento jev posílen (vzniká při nižších napětových hladinách, má větší dopad na životnost). Vzniká tak slabé místo z hlediska spolehlivosti celého stroje. Změna okolí izolovaného vodiče na výstupu z drážky – tedy magnetického obvodu stroje, způsobuje vysokou hodnotu intenzity elektrického pole (obr. 2 a obr. 3, dolní část obr. 6).

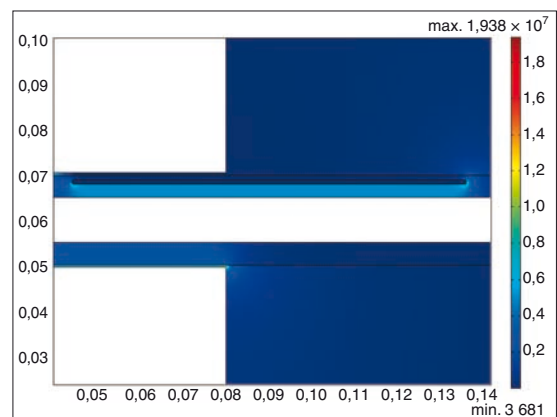
3. Důsledky pulzního namáhání izolačních systémů točivých strojů

Rychle se opakující strmé napětové pulzy působí negativně nejen na izolační systém, ale i na okolní zařízení v podobě rušení. Toto rušení může být přenášeno galvanickou i jinou vazbou (indukční, kapacitní, elektromagnetickou). Vlivem působení pulzního namáhání dochází k nastartování mnoha degračních procesů, které by působením stejnosměrného nebo harmonického napětí vůbec nevznikly. Mnohé další degrační procesy jsou vlivem pulzního namáhání urychleny. Pulzní napětí způsobuje např. růst ztrátového

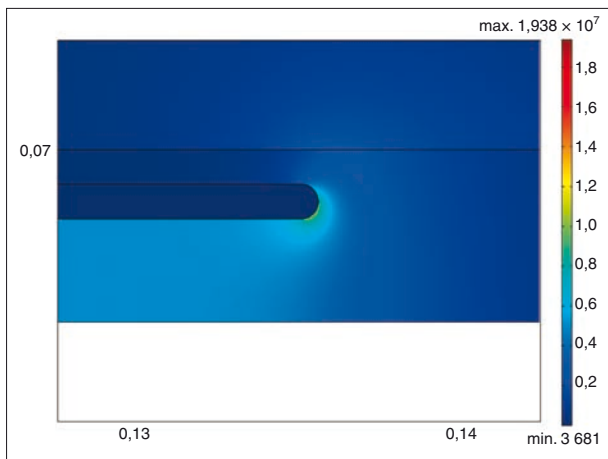
činitele, přepětí v obvodech měnič-kabel-motor, vznik ložiskových proudů, částečné výboje (drážkové výboje, klouzavé výboje na výstupu vinutí z drážek – obr. 2 a obr. 3 – a vnitřní výboje).

4. Diagnostika pulzně namáhaných točivých strojů

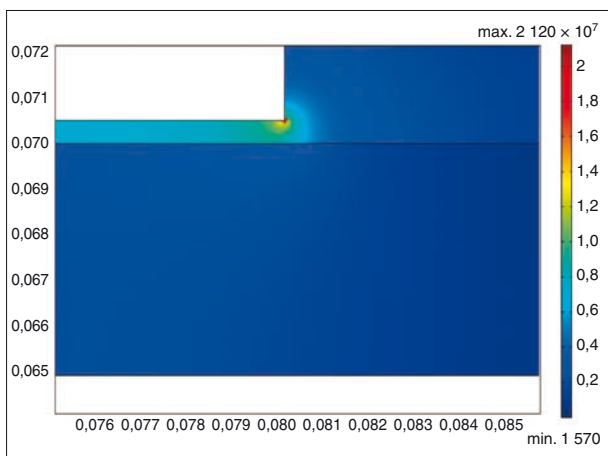
V oblasti problematiky pulzního namáhání elektrických točivých strojů bývají používány různé metody zjišťování stavu zařízení, např. aktivita výbojové činnosti ve statorovém vinutí. Diagnostické metody pro zjištění zkrácení technického života izolačního systému v důsledku expozice pulzním namáháním zatím nejsou v technické praxi používány. Jedna z prvních metod byla vyvinuta v rámci grantového projektu [1] (popsáno i v [6]). Predikce stárnutí izolačního materiálu je založena na nalezení křivek odolnosti izolačního systému vůči pulznímu namáhání.



Obr. 6. Simulace výstupu vodiče z drážky s vloženou stínící vložkou – intenzita elektrického pole



Obr. 7. Simulace výstupu vodiče z drážky s vloženou stínící vložkou – intenzita elektrického pole, detail konce stínící vložky



Obr. 8. Simulace výstupu vodiče z drážky bez stínící vložky – intenzita elektrického pole, detail konce drážky

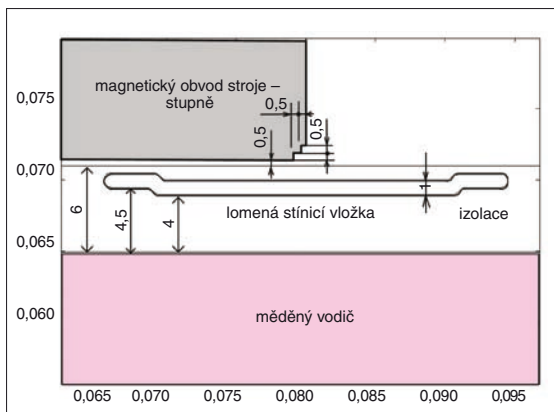
Materiálové vzorky jsou namáhány až do destrukce, přičemž je zaznamenávána doba do průrazu. Měření je vykonáváno na několika šaržích vzorků pro různé strmosti zkušebních napětových pulzů elektrického napětí. Zkoumán je i vliv opakovací frekvence napětových pulzů. Důležitá je implementace modelů stárnutí na izolační systém točivého stroje při pulzním namáhání pro určení životnosti takto namáhaného zařízení, identifikace konstant modelů a použití v predikci životnosti

vrstvu není možné nanést zcela homogenně. Vznikají tak místa s tenčí vrstvou ochranného laku, kde dochází k většímu namáhání – lak je postupně „odprašen“, ochrana izolace tak zmizí a izolační materiál je degradován. Na obr. 4 je ukázka testu polovodivé ochrany po napětové expozici.

Zabývejme se nyní možností omezení velikosti intenzity elektrického pole bez použití dodatečných povrchových úprav exponované části izolačního systému točivých strojů.

Jedna z možností omezení zvýšené intenzity elektrického pole spočívá v umístění vodivé stínící vložky do nitra hlavní izolace jednotlivých izolovaných tyčí vinutí v místech výstupu z drážkové části (obr. 5).

Toto řešení by odstranilo nevýhody v současnosti používaných povrchových ochranných (např. by se mohla zvýšit maximální provozní teplota) a znamenalo by v praxi jen malé změny výrobní technologie izolačního systému točivého stroje. Pro ověření této úpravy byla simulována zmíněná část izolačního systému re-



Obr. 9. Definice rozměrů modifikací

aktivo namáhaného stroje. Diagnostika točivých strojů musí mít zpětnou vazbu do výrobního procesu. V rámci zkušebností získaných během provozu musí vznikat nová technická řešení v konstrukcích točivých strojů.

5. Omezení nepříznivého rozložení potenciálu na výstupu vinutí z drážek

Pro dosažení maximální provozní spolehlivosti stroje je nutné se zabývat zlepšením poměrů intenzity elektrického pole na výstupu izolovaných tyčí vinutí z drážek. V současnosti se k ochraně povrchu izolovaných vodičů před klouzavými výboji běžně používají dvě metody. Jednak je to ovin vodičů speciálními páskami s určitou vodivostí, jednak nátěry ochrannými laky s postupně se snižující vodivostí ve směru od magnetického obvodu stroje (např. [2], [5]).

Ochrana polovodivými nátěry je efektivní, má však mnoho nevýhod. První nevýhodou je vliv lidského faktoru na výsledné vlastnosti ochrany. Ochrannou

vrstvu není možné nanést zcela homogenně. Vznikají tak místa s tenčí vrstvou ochranného laku, kde dochází k většímu namáhání – lak je postupně „odprašen“, ochrana izolace tak zmizí a izolační materiál je degradován. Na obr. 4 je ukázka testu polovodivé ochrany po napětové expozici.

Zabývejme se nyní možností omezení velikosti intenzity elektrického pole bez použití dodatečných povrchových úprav exponované části izolačního systému točivých strojů. Jedna z možností omezení zvýšené intenzity elektrického pole spočívá v umístění vodivé stínící vložky do nitra hlavní izolace jednotlivých izolovaných tyčí vinutí v místech výstupu z drážkové části (obr. 5). Toto řešení by odstranilo nevýhody v současnosti používaných povrchových ochranných (např. by se mohla zvýšit maximální provozní teplota) a znamenalo by v praxi jen malé změny výrobní technologie izolačního systému točivého stroje. Pro ověření této úpravy byla simulována zmíněná část izolačního systému re-

álných rozměrů a napětových poměrů. Nejprve bylo uskutečněno modelování problematického místa metodou konečných prvků v programu Femlab. Simulovány byly rozměry odpovídající reálnému uspořádání. Tloušťka izolace o relativní permitivitě $\epsilon_r = 3$ byla 6 mm, vzduchová mezera mezi izolací a stěnou drážky 0,5 mm, tloušťka stínící vložky 1 mm. V simulacích byla použita hladina napětí 15 kV. Výsledkem simulací jsou plošné grafy intenzit elektrického pole a elektrického potenciálu (nyní je intenzita elektrického pole zobrazena barevnou škálou).

Na obr. 6 je výsledek simulace, který velmi dobře odpovídá předpokladům. Na straně, kde není vložena stínící vložka (na obr. 6 v dolní části), průběh odpovídá provozním zkušenostem. Ze simulace je zřejmé, že se sice vložení stínící vložky odstraní v místě výstupu vodiče z drážky silné elektrické pole, ale problematické místo nově vznikne na konci stínění obr. 7. Maximální intenzita elektrického pole se tak snížila z přibližně $20 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ (viz detail na obr. 8) na $10 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ (obr. 7).

Ze simulace vyplývá, že toto řešení posune problematické místo od okraje drážky, nezamezí však vzniku silného elektrického pole. Nicméně maximální intenzita elektrického pole na výstupu vinutí z drážky klesne na polovinu. Tato skutečnost byla zohledněna v dále uvedených simulacích, kde byly uskutečněny úpravy pro snížení velikosti intenzity elektrického pole (obr. 9). Po úpravách stínící vložky bylo dosaženo snížení maximální intenzity elektrického pole ve zkoumaném místě ještě o 20 %, tj. na $8 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$.

Izolační systém, který se v současné době běžně používá na výrobu hlavní izolace, má průrazné napětí $100 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. Hodnota $8 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, která se objevuje na konci stínící vložky, je tedy značně pod touto hodnotou. Klouzavé výboje při tomto uspořádání nevzniknou na ostré hraně konce magnetického obvodu. Zda vzniknou výboje uvnitř izolačního systému na konci stínící vložky, je nutné prokázat experimentálně. Další možností je použití kapacitně vázaného omezovacího systému pro potlačení namáhání izolace v exponované místě. Jde o metodu založenou na známém principu, který je využíván např. ve vysokonapětových průchodkách s izolačním systémem olej-papír. V oblasti točivých strojů byly zveřejněny experimenty s různým typem takového systému, označované jako *Stress Grading System* [4]. Podobné řešení a simulace rozložení intenzity elektrického pole jsou patrné z obr. 11.

Na obr. 11 jsou částečně vodivé materiály, tvořící systém pro omezení klouzavých výbojů, označeny řeckými písmeny β , γ , δ . Izolační materiál, který obklopuje částečně vodivé vrstvy a tvoří dielektrikum kapacitní vazby (viz dále) je v obr. 11 označen písmenem ϵ .

Ze simulace elektrostatického pole je opět patrné místo se silnou intenzitou elektrické-

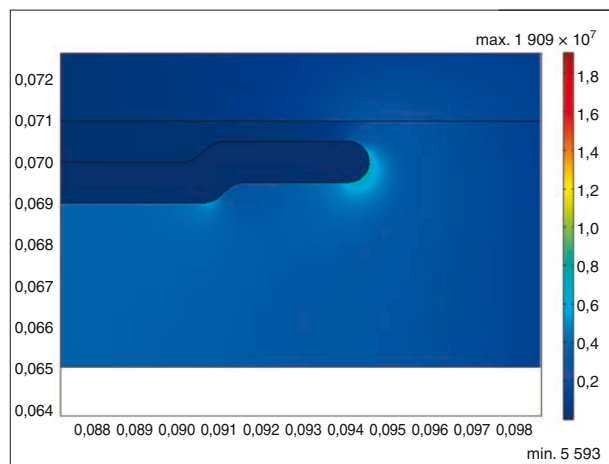
Low and medium power machines form a group of practically 90 % of all produced rotary machines. The machines discussed here are those with power from hundreds of watts up to one megawatt. However, the development in the insulation design and diagnostics of these machines has not yet been completed satisfactorily. Insulating material aging characteristics for 50 Hz AC voltage are well known. Nevertheless, modern power inverter fed drives bring a new type of stresses to the insulating systems. Pulse voltage stresses generate problems which negatively influence the drive reliability. This paper is focused on aspects of one particular problem solving, namely the problem of decreasing the drive reliability due to the gliding discharges activity at machine stator slot ends.

ho pole, označené písmenem α . Silné elektrostatické pole určuje místo vzniku klouzavých výbojů. Až dosud je situace stejná jako v uvedených případech. V okamžiku, kdy intenzita elektrického pole přesáhne určitou kritickou mez, vzniká částečný výboj, který je odváděn ochranným lakem β , jeho odporem je zmenšován proud výboje. Vzniká tak dynamický děj, kde se kapacitní vazbou přenáší rychlá změna napětí při výboji do další části systému pro omezení výbojové činnosti – do vrstvy γ . Zde je již omezeno maximální napětí i principem kapacitního děliče. Děj, který začal v místě α a probíhal ve vrstvě β a byl přenesen vazbou β na γ , probíhá analogicky ve vrstvě γ a ve vazbě γ na δ . Celkově se tento systém používá k omezení výbojové činnosti v této exponované čas-

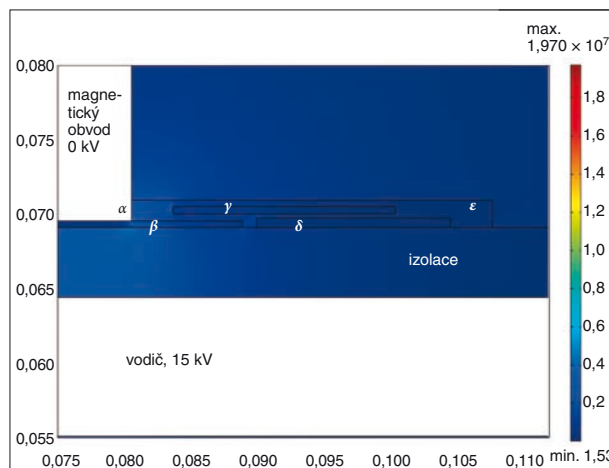
ti vinutí. Tím, že je proud výboje omezen kapacitní vazbou a zároveň odporem samotných částečně vodivých vrstev, nedochází k degradaci izolačního materiálu tyče vinutí.

6. Závěr

V uvedeném textu byl představen jeden z problémů, kterým se v současnosti zabývá mnoho pracovišť po celém světě. Jde o problematiku omezení klouzavých výbojů, které vznikají



Obr. 10. Detail intenzity elektrického pole na konci modifikované stínící vložky



Obr. 11. Simulace výstupu vodiče z drážky s kapacitně vázaným Stress Grading System – princip převzat z [4]



Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc., je absolventem Fakulty elektrotechnické Vysoké školy strojní a elektrotechnické v Plzni.

V roce 1985 obhájil disertační práci Termické analýzy v diagnostice vysokonapěťových izolací na FEL ČVUT Praha. V roce 1990 se habilitoval na ZČU Plzeň v oboru elektrotechnologie – habilitační práce Diagnostika velkých točivých elektrických strojů. Od roku 1991 vede oddělení elektrotechnologie na FEL Západočeské univerzity v Plzni. V roce 1998 se stal profesorem pro obor elektrotechnologie. Vede tvůrčí kolektiv, který řešil mnoho projektů zaměřených na oblast elektrotechnologie. Od roku 2005 je vedoucím řešitelem vědeckého záměru MŠMT ČR MSM 4977751310 Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice, pro období 2005 až 2010. Oblastí jeho odborného zájmu jsou aspekty fyziky izolantů, studium polarizačních jevů v nehomogenním dielektriku, interaktivní děje prvků a systémů s procesem výroby, pracovními podmínkami a prostředím, vývoj nových izolačních materiálů a systémů pro elektrotechnické aplikace, aplikace strukturálních analýz v elektrotechnologické diagnostice, diagnostika elektrických zařízení.



Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D., vystudoval FEL na ZČU v Plzni, obor průmyslová elektronika.

V roce 2005 získal titul Ph.D. na stejné univerzitě. Od roku 2005 byl zaměstnancem katedry technologií a měření ZČU FEL v Plzni. V letech 2002 až 2003 byl studentem na technické vysoké škole Univerzity of Applied Science, Fachhochschule, Regensburg (Německo), šest měsíců působil v oddělení výzkumu Maschinenfabrik Reinhausen (Německo). V letech 2006 až 2007 pracoval jako postdoctoral associate ve vysokonapěťové laboratoři ECE, Mississippi State University, MS, USA. V roce 2008 získal titul docent na Elektrotechnické fakultě Žilinské univerzity v Žilině. V současné době působí na ZČU FEL v Plzni. Je spoluřešitelem výzkumného záměru MSM 4977751310 a projektu MPO. Jeho oblastí zájmu jsou degrační procesy v elektroizolačních systémech. Je členem několika mezinárodních vědeckých organizací, včetně IEEE.



Ing. Josef Pihera, Ph.D., vystudoval FEL na ZČU v Plzni, obor komerční elektrotechnika.

V roce 2005 získal titul Ph.D. na stejné univerzitě. Od roku 2005 byl zaměstnancem katedry technologií a měření ZČU FEL v Plzni. V roce 2002 byl studentem na Univerzity of Applied Science, Fachhochschule, Regensburg (Německo). V současné době působí na ZČU FEL v Plzni jako tajemník katedry pro vědu. Je spoluřešitelem výzkumného záměru MSM 4977751310 a projektu MPO. Jeho oblastí zájmu je problematika částečných výbojů, degradace elektroizolačních systémů a dielektrické spektroskopie.



Ing. Roman Hamar, Ph.D., vystudoval FEL na ZČU v Plzni, obor silnoprůdí elektrotechnika.

Po magisterském studiu pokračoval doktorandským studiem v oboru elektrotechnika na téže fakultě. Titul doktor získal v roce 1999 a již devátým rokem pracuje na katedře teoretické elektrotechniky na ZČU v Plzni jako odborný asistent. Účastnil se řešení grantového projektu GAČR 102/01/1401 Rozvoj efektivních metod analýzy a optimalizace distribučních systémů. V současné době spolupracuje na řešení výzkumného záměru MSM 4977751310 Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice. V odborné oblasti je zaměřen na problematiku počítačové simulace elektrických obvodů a elektromagnetických polí.

na povrchu izolačních systémů točivých strojů. Tento problém se objevuje obecně u strojů provozovaných na větší hladině napětí. Avšak při napájení stroje s rychle se opakujícími napěťovými pulzy (např. měniče frekvence) je minimální kritická hodnota zapalovacího napětí výbojů značně menší. Potlačováním klouzavých výbojů se zabývají jak výrobci generátorů, tak výrobci motorů větších výkonů. Možnosti omezení negativního působení zvýšené intenzity elektrického pole v některém místě izolačního systému točivého stroje jsou různé. Ochranné laky, které se běžně používají pro rozložení elektrického pole tak, aby k výbojům nedošlo, mají omezenou životnost a tepelnou odolnost (obr. 4). Maximální tepelná odolnost může být negativní vlastností stále více používaných polovodivých pásek, které se používají namísto ochranných laků. V článku představená možnost omezení výbojové činnosti pomocí stínící vložky má oproti těmto řešením výhodu v podstatě neomezené tepelné odolnosti. Větší výrobní náročnost může však hovořit proti ní.

Další možností, která byla představena např. v [4], je použití speciálního řešení *Stress Grading System*. To je založeno na obecně známých principech postupně se snižujícího zatížení izolačního systému a vhodně upraveno pro dané účely. Tato logická možnost omezení namáhání exponovaného místa elektroizolačního systému však přináší technologické komplikace, a proto se jen těžko bude zavádět do sériové výroby.

Poděkování:

Práce vznikla v rámci řešení výzkumného záměru MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice – řešeného na pracovišti autorů.

Literatura:

- [1] MENTLÍK, V. a kol.: *Spolehlivost pohonů s elektrickými motory napájenými pulzním napětím*. Závěrečná zpráva grantu GAČR 102/00/362, ZČU, Plzeň, 2002.
- [2] TRNKA, P.: *Problematika ochranných vrstev vinutí elektrických točivých strojů při pulzním*

namáhání. In: *ElectroScope*, 2008, roč. 2008, č. 1, s. 1–4, ISSN 1802-4564.

- [3] VOGELSSANG, R. – WEIERS, T. – FRÖHLICH, K. – BRÜTSCH, X.: *Electrical breakdown of high-voltage winding insulations of different manufacturing qualities*. IEEE DEIS Magazine, květen/červen 2006, roč. 22, č. 3.
- [4] WHEELER, J. C. G. – GULLY, A. M. – BAKER, A. E. – PERROT, F. A.: *Novel stress grading system for converter-fed motors*. IEEE DEIS Magazine, leden/únor 2007, roč. 23, č. 1.
- [5] ESPINO-CORTES, F. P. – CHERNEY, E. A. – JAYARAM, S. H.: *Impact of inverter Drives Employing Fast-Switching Devices on Form-Wound AC Machine Stator Coil stress Grading*. IEEE Electrical Insulation Magazine, leden/únor 2007, roč. 23, č. 1, s. 16–28.
- [6] TRNKA, P.: *Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů*. In: *ElectroScope*, roč. 2007, č. 1, s. 1–7, ISSN 1802-4564.
- [7] MENTLÍK, V. – PIHERA, J. – POLANSKÝ, R. – PROSR, P. – TRNKA, P.: *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd., Praha, BEN – technická literatura, s. 439, ISBN 978-80-7300-232-92008.

Posouzení jištění transformátoru proti nadproudům

Ing. Bernard Lukáš, specialista silnoproudé elektrotechniky

1. Blokové schéma zapojení, jištění a parametry transformátoru

Na obr. je blokové schéma zapojení. Popis jištění a parametry transformátoru jsou uvedeny v tab.

2. Výpočet zkratových proudů

2.1 Primární zkratový proud při zkratu na výstupu obou sekundárních vinutí

$$P_n = 2\,380 \text{ kV}\cdot\text{A}, U_n = 22 \text{ kV}, I_n = 62,5 \text{ A}, u_K = 8,4 \%$$

2.1.1 Výpočet složek impedance zkratového obvodu

a) jmenovitá impedance transformátoru:

$$Z_{nT} = \frac{U_f}{I_n} = \frac{22\,000}{\sqrt{3} \cdot 62,5} = 203,227 \Omega$$

b) impedance transformátoru nakrátko:

$$Z_{KT} = u_K \cdot Z_{nT} = 0,084 \times 203,233 = 17,072 \Omega$$

c) činný odpor a reaktance transformátoru nakrátko za podmínky, že:

$$u_{KX}/u_{KR} = \tan \varphi = 4,4 \Rightarrow \cos \varphi = 0,222 \text{ a } \sin \varphi = 0,975:$$

$$\square \text{ činný odpor: } R_{KT} = Z_{KT} \cdot \cos \varphi = 17,072 \times 0,222 = 3,79 \Omega$$

$$\square \text{ reaktance: } X_{KT} = Z_{KT} \cdot \sin \varphi = 17,072 \times 0,975 = 16,645 \Omega$$

d) pro vedení AXEKCY 3 × 1 × 70, 250 m platí:

$$R_K = 0,128 \Omega$$

$$X_K = 0,073 \Omega$$

e) celková impedance obvodu:

$$Z = \sqrt{(R_{KT} + R_X)^2 + (X_{KT} + X_X)^2} = \sqrt{(3,790 + 0,128)^2 + (16,645 + 0,073)^2} = 17,171 \Omega$$

f) ustálený třífázový zkratový proud:

$$I_{K3} = \frac{22\,000}{\sqrt{3} \cdot 17,171} = 740 \text{ A}$$

g) ustálený dvoufázový zkratový proud:

$$I_{K2} = \frac{22\,000}{2 \cdot 17,171} = 641 \text{ A}$$

S přihlédnutím na útlum venkovní napájecí sítě 22 kV budou skutečné zkratové poměry:

h) ustálený třífázový zkratový proud skutečný:

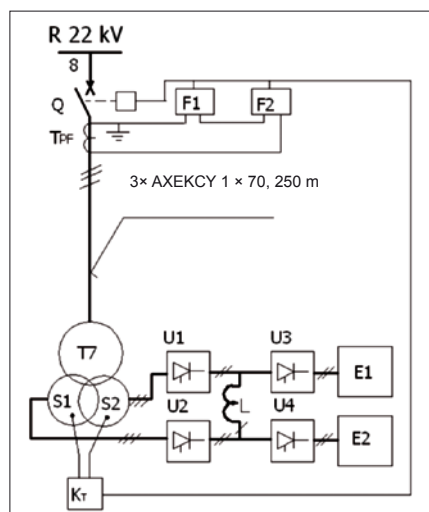
$$I_{K3s} = 0,95 I_{K3} = 0,95 \times 740 = 703 \text{ A}$$

i) ustálený dvoufázový zkratový proud skutečný:

$$I_{K2s} = 0,8 I_{K2} = 0,8 \times 641 = 513 \text{ A}$$

2.2 Primární zkratový proud při zkratu na výstupu jednoho sekundárního vinutí

$$P_n = 1\,190 \text{ kV}\cdot\text{A}, U_n = 22 \text{ kV}, I_n = 31,25 \text{ A}, u_K = 7,3 \%$$



Blokové schéma transformátoru F7 a výkonové elektroniky kelímkové pece