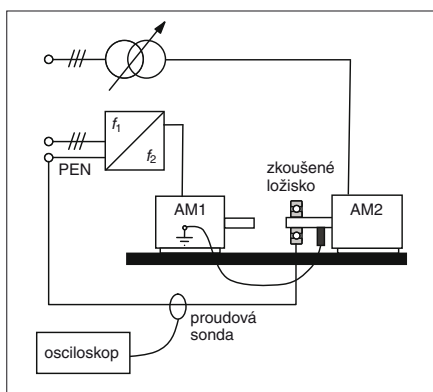


# Prostředky pro zamezení znehodnocování ložisek elektrickým proudem

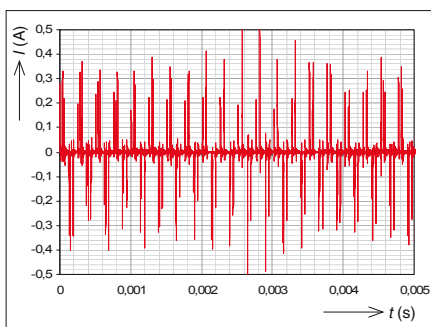
doc. Ing. Karel Chmelík, Ing. Václav Čech, Ph.D.,  
Ing. Jiří Foldyna, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

## 1. Úvod

Je nesporné, že průchod elektrického proudu ložiskem patří k mnoha příčinám, které mohou způsobit poruchu nebo havárii ložiskového uzlu, a tím i havárii elektrického nebo jiného stroje. Příčiny průchodu proudu ložiskem jsou popsány např. v [1]. Pro degra-



Obr. 1. Zkušební pracoviště



Obr. 2. Průběh kapacitních výbojů

ni působení elektrického proudu na jednotlivé ložiskové prvky (kroužky, valivá tělíska, mazivo, klec) má podstatný vliv způsob, tvar a velikost procházejícího proudu. Těto skutečnosti je nutné přizpůsobit i opatření v konstrukci či napájení elektrického stroje, která by průchodu proudu zabránila nebo alespoň omezila jeho degrační působení. Je známo, že elektromotor potřebuje pro své dokonalé fungování také dokonalé sinusový průběh napájecího napětí a proudu. Tento předpoklad není splněn při napájení z měničů frekvence. Proto jsou takovéto pohony vybaveny dod-

tečnými prostředky, které tento požadavek zajistí. Dalšími možnostmi jsou opatření usku-tečněná v elektrickém stroji, a to jak v jeho konstrukci, přesnosti a technologii výroby, tak i při volbě vhodných uzlů a materiálů.

## 2. Možnosti zamezení průchodu proudu ložiskem

Je známo několik možností zamezení průchodu proudu ložisky elektrických strojů:

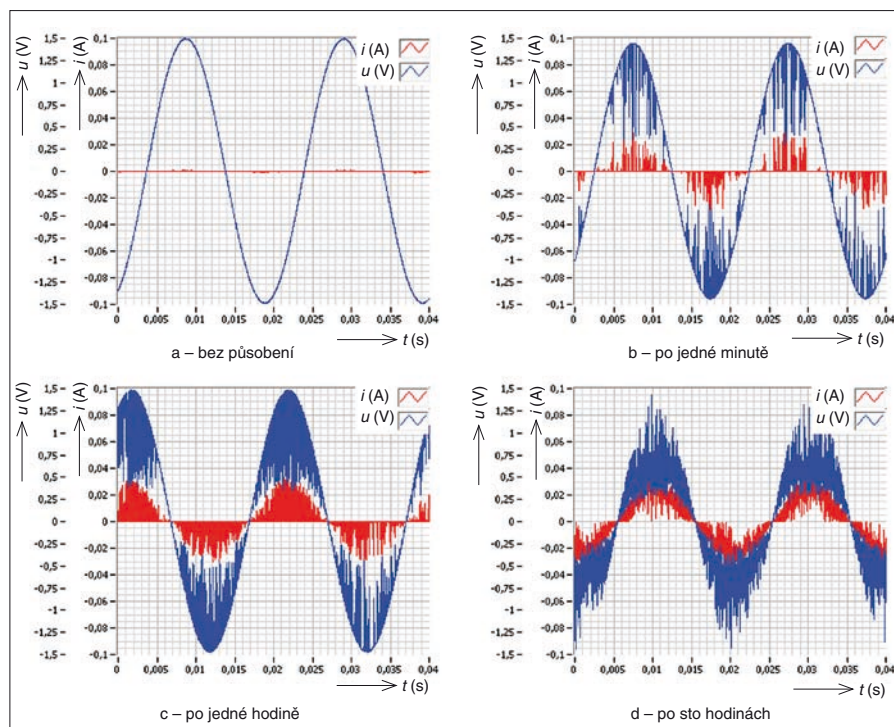
- odstranění všech nesymetrií elektrického i magnetického obvodu již při návrhu a konstrukci;
- správná montáž zařízení – vhodný napájecí kabel a zemnicí systém;
- sinusový průběh napájecího napětí – použití filtrů při napájení z měničů;
- preventivní prostředky a konstrukční úpravy:
  - izolace ložisek nebo ložiskových stojanů, použití keramických nebo hybridních ložisek,
  - připojení uzemněného kartáče na hřídeli.

Některé konstrukční úpravy a prostředky vedou k očekávanému výsledku jen za určitých podmínek. V následující kapitole jsou rozebrány jednotlivé případy.

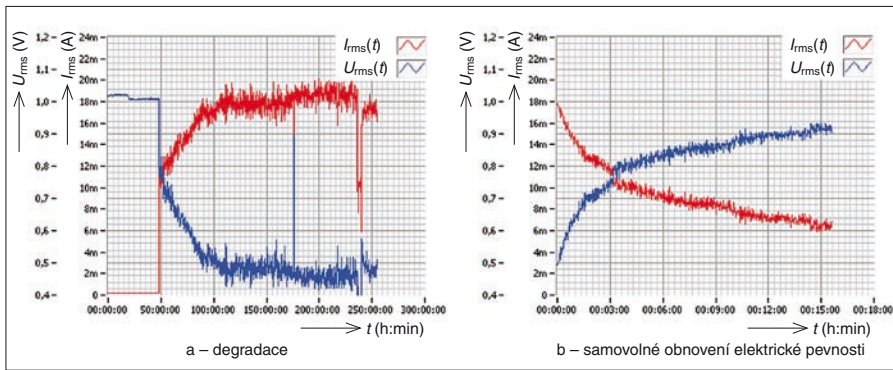
### 2.1 Izolační schopnost maziva

V souvislosti s poškozením ložisek jsme zkoumali izolační schopnosti vrstvy maziva v ložisku. V pravidelných intervalech byl vypnut měnič napájející motor, z jehož kostry bylo přivedeno souhlasné napětí na testované ložisko. Vypnutím měniče zaniklo tedy i toto napětí. Následně bylo ložisko připojeno do obvodu se zdrojem střídavého napětí 1 V, 50 Hz. Pomocí osciloskopu byl sejmut a uložen průběh napětí na ložisku a proudu procházejícího ložiskem. Testované ložisko bylo vždy nejprve po dobu padesáti hodin zabíháno a po této době připojeno do obvodu (obr. 1).

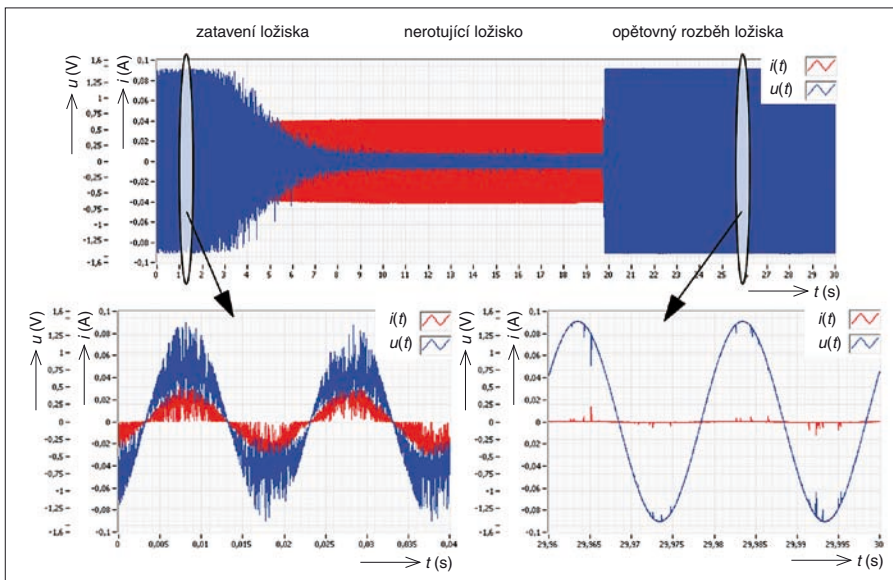
Na obr. 3a je průběh napětí těsně před degraací ložiska souhlasným napětím. Elektrická pevnost vrstvy maziva v rotujícím ložisku je v tomto okamžiku větší než přiložené napětí,



Obr. 3. Vliv napětí na izolační schopnost ložiska



Obr. 4. Změny izolačních vlastností vrstvy maziva ložiska

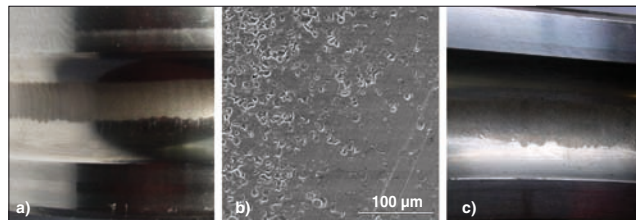


Obr. 5. Změny izolačních vlastností ložiska po zastavení ložiska a opětovném rozběhu

nedochází ani k náhodným kovovým kontaktům mezi valivými tělisky a kroužky ložiska. Na obr. 3b je stejný průběh po jedné minutě působení souhlasného napětí na ložisku – přes ložisko protékal proud charakteru vysokofrekvenčních pulzů (obr. 2). Z průběhu je patrné, že při napětí vyšším než 0,5 V již dochází k průrazům vrstvy maziva. Izolační schopnost se po průrazu ihned obnovuje, dochází tak k opětovným průrazům až do okamžiku, kdy napětí (čistě sinusového průběhu) klesne přibližně pod hodnotu 0,5 V. Po jedné hodině působení souhlasného napětí klesá elektrická pevnost ložiska přibližně na 0,25 V, po sto hodinách již ložisko ztrácí izolační schopnost zcela (obr. 3d).

Izolační schopnost byla sledována v intervalech deseti minut, na začátku testu po jedné minutě. Výpočtem efektivních hodnot napětí a proudu ložiskem z jednotlivých záznamů a vynesení v časové ose lze získat histogram (obr. 4a) zobrazující izolační schopnosti rotujícího ložiska. Z histogramu je patrné, že po sto hodinách dochází k ustálení degradace, kdy ložisko ztrácí izolační schopnost. Po odpojení souhlasného napětí, kdy se ložisko neustále otáčí, se jeho izolační schopnost obnovuje (obr. 4b).

Izolační schopnost ložiska je také obnovena po zastavení a opětovném rozběhu ložiska. Celý děj je zaznamenán na obr. 5.



Obr. 6. Detaily poškozených částí izolovaného ložiska  
a – vnitřní kroužek zkoušeného ložiska,  
b – přechod mezi poškozenou a nepoškozenou částí,  
c – vnější kroužek ložiska demontovaného z motoru

Při těchto zkouškách je na rotující ložisko přivedeno souhlasné napětí, které se objevuje na kostrě motoru napájeného izolovaně z měnič frekvence. Zapojení experimentů simulovalo stav, kdy motor byl napájen z měniče frekvence a jeho hřídel byla lépe uzemněna než kostra motoru. Ložiska motoru byla pak namáhána napětím, jehož amplituda přesahuje 300 V. Toto napětí s určitostí přesahuje izolační schopnosti ložiska. Po jejich překročení dochází k průrazu vrstvy maziva. Při dalším rozběhu dochází k mnohem rychlejší obměně degradovaného maziva.

## 2.2 Izolovaná ložiska

Izolace ložiskových stojanů a přírub se užívá u strojů se stojany. Tyto izolační vrstvy mají tloušťku materiálu řádově v milime-

trech a byly pro svou funkci zamezení ložiskových proudů vhodným prostředkem. Nevýhody tohoto řešení jsou spojeny s rozdílnými mechanickými vlastnostmi izolačních a konstrukčních materiálů. Musí se také izolovat všechny kovové součásti, které mají styk s motorem.

Použití hybridních keramických ložisek (keramická valivá tělesa) je neúčinnější, neboť znemožní poškození ložisek průchodem elektrického proudu. Cena tohoto druhu ložisek je výrazně vyšší než cena obyčejných ložisek.

Cenově dostupnější je použití izolovaného ložiska, je zřejmě také nejrozšířenější. Zpravidla je na vnějším kroužku ložiska nanese tenká keramická vrstva. To však přináší s sebou problémy, které jsou dány především elektrotechnickými parametry izolace, jejími mechanickými vlastnostmi, a také jistě navýšení ceny stroje.

Izolace jednoho ložiska v elektrickém stroji má smysl pouze pro zamezení průchodu proudu vytvořeného indukovaným hřídelovým napětím. A to platí ještě za takových podmínek, které nedovolují proud uzavírat se druhým ložiskem a pohonem. Při zamezování průchodu kapacitních svodových proudů, které vznikají při napájení motorů z měničů frekvence, je zapotřebí izolovat obě ložiska a současně izolovat spojku motoru.

Protože použití měničů frekvence pro napájení motorů je stále rozšířenější, je otázka kapacitních proudů, které v těchto případech vznikají, stále více aktuální. Pro objasnění vlivu kapacitních proudů vznikajících při napájení motorů z měničů frekvence jsme uskutečnili několik pokusů s různými druhy loži-

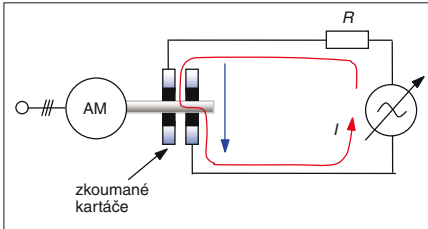
sek. Princip zkoušek je schematicky znázorněn na obr. 1. Na hřídeli jednoho otáčejícího se motoru byla upevňována ložiska a z kostry druhého asynchronního motoru napájeného z měniče frekvence napětového typu bylo na jejich vnitřní kroužek pomocí kartáče přiváděno napětí z kostry motoru proti zemi. Zkoumaná ložiska byla pak po sto hodinách provozu a působení napětových pulzů sejmuta z nástavce, rozřezána a podrobena analýze.

Postupně bylo zkoušeno ložisko hybridní, normální a ložisko izolované na vnějším kroužku. Po sto hodinách provozu se u normálního a izolovaného ložiska zvýšily vibrace i hluk. Po demontáži a rozřezání bylo na oběžných plochách vnějších i vnitřních kroužků zjištěno značné narušení (obr. 6a a obr. 6b).

U hybridního ložiska nebylo po sto hodinách provozu a namáhání napětovými pulzy



Obr. 7. Klasický uzemňovací kartáč (vlevo) a uzemňovací kartáč tvořený vodivými mikrovlákny (vpravo)



Obr. 8. Měření voltampérových charakteristik uzemňovacích kartáčů

zjištěno žádné poškození. U izolovaného ložiska na vnějším kroužku bylo po rozřezání pozorováno poškození obdobné jako u normálního ložiska, bylo však pro danou dobu méně výrazné.

Na obr. 6c je detail poškozeného ložiska, které bylo demontováno z motoru napájeného z měniče frekvence, u kterého dochází k časté poruše ložisek. Porovnáním výsledků experimentů a získaných ložisek z provozu lze říci, že kapacitní výboje narušují oběžné dráhy ložisek. Použitím izolovaného ložiska se tomu zabránit nedá, protože keramická izolační vrstva má tloušťku 100  $\mu\text{m}$  a svými vlastnostmi se při aplikaci uložení chová

jako kondenzátor. Proto se i při jeho použití u motorů napájených z měniče frekvence přenášejí ložiskem kapacitní proudy. Snižují sice amplitudu rázového proudu, protože mění impedanční poměry cesty, přesto tento omezený proud prochází ložiskem a způsobuje jeho poškození. Podobné poškození jsme zaznamenali po demontáži izolovaného ložiska z motoru 1 000 kW, který byl napájen z měniče frekvence.

### 2.3 Uzemňovací kartáče

Při návrhu preventivní ochrany ložisek se často používá řešení, kdy je jedno ložisko izolováno a druhé přemostěno kartáčem. Nejčastěji bývají takto vybaveny asynchronní, ale i stejnosměrné motory napájené z usměrňovačů. Obecně se dá konstatovat, že kluzné kontakty u střídavých elektrických strojů jsou velmi nežádoucím prvkem. Vždy je třeba zvážit pro konkrétní konfiguraci pohonu, co se od kluzného kontaktu při použití pro ochranu ložisek očekává. Kartáče musí splňovat mnoho požadavků. Základní podmínky jsou shodné jako u kluzného kontaktu kartáč-kroužek

nebo kartáč-komutátor. Spojení musí probíhat bez přerušování elektrického obvodu, proto je třeba zajistit dobré elektrické i mechanické spojení kluzných dvojic kartáč-hřídel.

Pro činnost kluzného kontaktu je rovněž velmi důležité vědět, o jaký druh proudu jde. Vznik ložiskových proudů může mít několik příčin. Velikost, tvar a frekvence možných proudů se tak velmi liší (stejnoseměrný proud až vysokofrekvenční proudové pulzy). Od uzemňovacího kartáče se očekává dokonalý svod proudu při minimálním přechodovém úbytku napětí, a to při provozních i přechodných stavech (např. rozběh pohonu a reverzace). Přechodový odpor u kluzného styku však dosahuje při malých proudech velkých hodnot. Funkčnost uzemňovacího kartáče je pak velmi omezená. V případě částečných nebo trvalých styků valivých tělísek a kroužků ložiska ztrácí kartáče smysl, protože odpor užitiny valivého kontaktu ložiska se může pohybovat kolem hodnot 0,1  $\Omega$  [2].

Obecně existuje pět základních skupin kartáčových materiálů:

- uhlografit,
- přírodní grafit,
- elektrografit,
- kovografit,
- speciální materiály.

Pro omezení vlivu ložiskových proudů se běžně používají kartáče kovografitové. V současné době jsou ve spojitosti s vysokofrekvenčními ložiskovými proudy používány uzemňovací kartáče s mikrovlákny. Provedení obou typů kartáčů je zobrazeno na obr. 7.

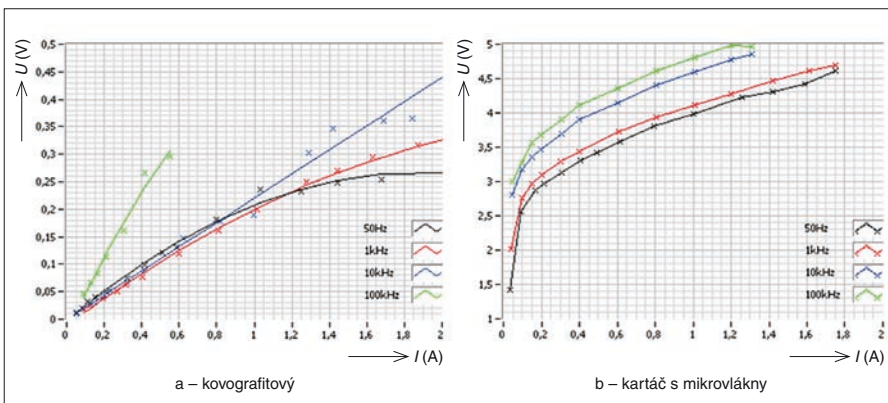
Klasické uzemňovací kartáče se umísťují u asynchronních motorů standardního provedení na vnitřní straně ložiskového štítu. Kluzný kontakt je tak chráněn proti vnějším vlivům a nečistotám. Klasické provedení držáku a kartáče klade poměrně vysoké nároky na montážní prostor. Je-li navíc kluzný kontakt umístěn uvnitř motoru, je kontrola možná až po jeho demontáži. Z tohoto důvodu výrobci motorů někdy umísťují na hřídel kroužek z korozivzdorné oceli, na který přiléhá kartáč. Takovéto provedení je spolehlivější, avšak nákladné a jeho účinnost není také zaručena.

Jiným řešením uzemňovacího kartáče je provedení v podobě mikrovláken. Výrobce těchto kartáčů uvádí jako hlavní výhodu snadnou montáž na asynchronní motor a dále také samočisticí schopnosti. Hřídel motoru není třeba dále upravovat.

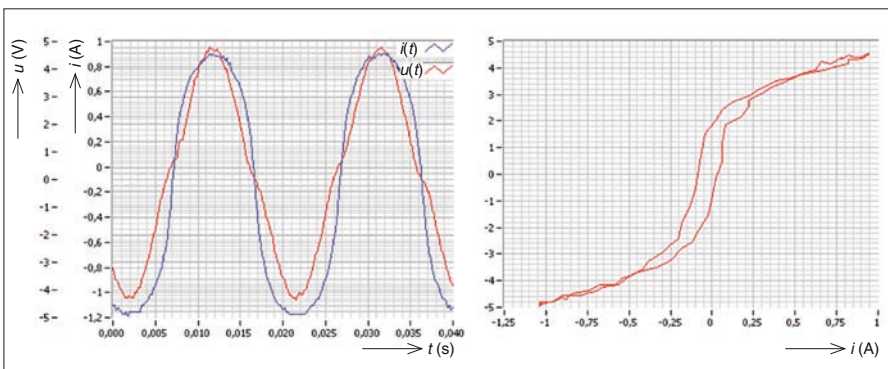
#### 2.3.1 Přechodový úbytek napětí

Přechodové napětí je jednou z charakteristických hodnot kartáčů. Je definováno jako úbytek napětí na dvou přechodech kartáč-kluzné těleso (kroužek) spojených v sérii při jmenovitém proudu a definované hodnotě obvodové rychlosti.

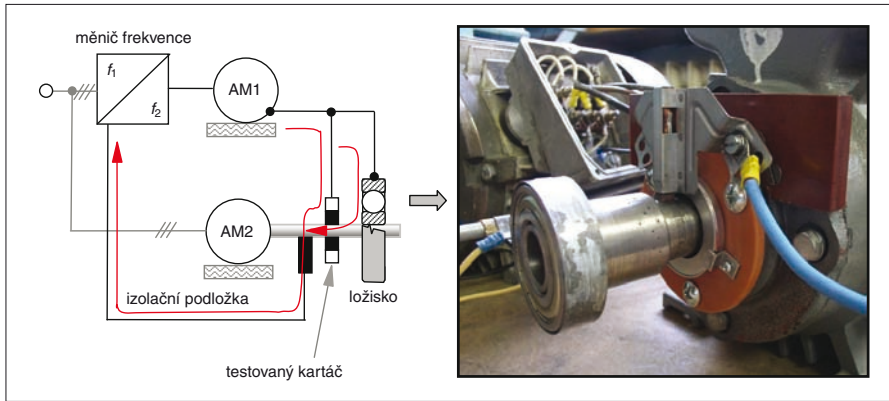
Podobně jako pro klasické kluzné kontakty kartáč-komutátor/kroužek lze i pro uzemňovací kartáče stanovit statickou voltampérovou charakteristiku. Princip těchto zkou-



Obr. 9. Frekvenční závislost úbytku napětí kovografitového kartáče a s mikrovlákny



Obr. 10. Okamžitý průběh úbytku napětí na dvou kartáčích s mikrovlákny a dynamická voltampérová charakteristika odvozená z těchto průběhů



Obr. 11. Zkouška účinnosti uzemňovacího kartáče s mikrovlákný

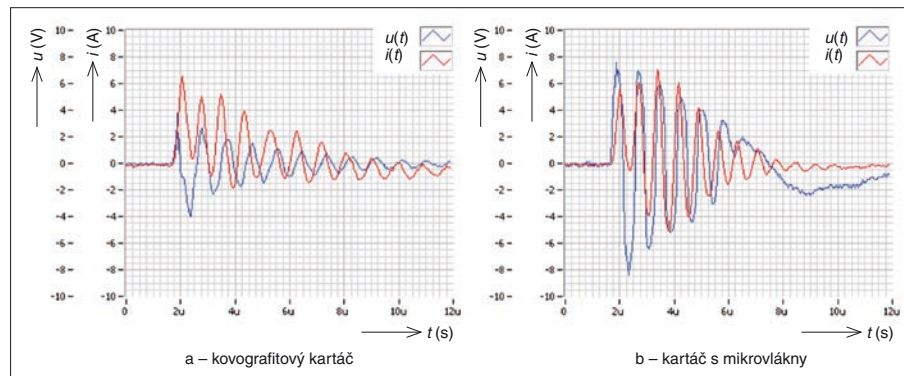
šek je zobrazen na obr. 8. Zdroj proudu je tvořen výkonovým operačním zesilovačem, na jehož vstup je přiveden frekvenčně i amplitudově regulovatelný signál. Výstup je přiveden přes omezovací rezistor  $R$  na dva totožné kartáče zapojené v sérii. Průběh okamžitých hodnot úbytku napětí a proudu je snímán osciloskopem.

Jak již bylo uvedeno, velikost, tvar a frekvence možných proudů se pro uzemňovací kartáče velmi liší. Uzemňovací kartáč může převádět stejnosměrný proud, ale i vysokofrekvenční proudové pulzy. Vlastnosti uzemňovacích kartáčů byly proto také vyšetřovány v závislosti na frekvenci procházejícího proudu. Vlastnosti uzemňovacích kartáčů byly ověřovány na dvou typech kartáčů, a to na kovografitovém kartáči klasického provedení a kartáči s mikrovlákný. Oba typy kartáčů jsou zobrazeny na obr. 7. Pro experimenty byly použity vždy dva stejné kartáče, úbytek napětí odpovídá dvěma přechodům. Kartáče byly upevněny na izolované desce a dosadly na ocelový nástavec, který byl upevněn na hřídeli elektromotoru.

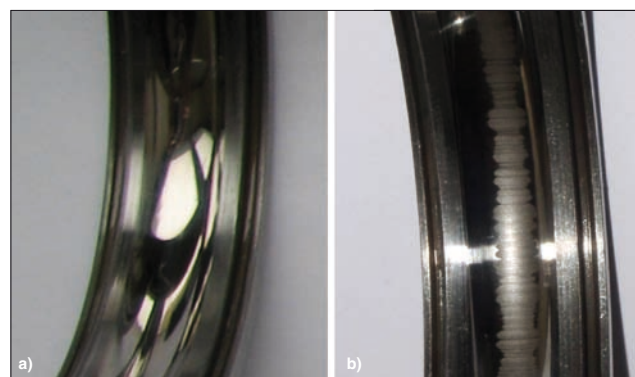
Na obr. 9 je naměřená statická voltampérová charakteristika kovografitového kartáče (a) a kartáče s mikrovlákný (b) pro různé frekvence procházejícího proudu při otáčkách  $1\,455\text{ min}^{-1}$ .

Z naměřených průběhů je patrné, že u kovografitových kartáčů má statická voltampérová charakteristika téměř lineární průběh, což znamená, že přechodový odpor je přibližně konstantní. S rostoucí frekvencí se zvětšuje a roste i sklon voltampérové křivky. Při proudu  $1\text{ A}$ ,  $1\text{ kHz}$  je úbytek na dvou kartáčích přibližně  $200\text{ mV}$ .

U kartáčů s mikrovlákný je voltampérová charakteristika značně nelineární. Základní příčina tohoto jevu spočívá v tom, že patina na styku kartáče s hřídelí ovlivňuje průběh statické voltampérové charakteristiky svými polovodičovými vlastnostmi. Významnější je však hodnota úbytku napětí na dvou kartáčích, která je u kartáčů z mikrovlákný pro proud  $1\text{ A}$ ,  $1\text{ kHz}$  rovna  $4,1\text{ V}$ . Ve srovnání s úbytkem napětí  $200\text{ mV}$  pro kovografitové kartáče je tato hodnota mnohonásobně větší. Úbytek napětí je závislý na velikosti kontaktní síly. U kovografitového kartáče je tato síla



Obr. 12. Úbytek napětí na dvou kartáčích při průchodu kapacitního proudu



Obr. 13. Ložisko uložené paralelně  
a – kartáč s mikrovlákný,  
b – bez paralelního kartáče

vytvářena pružinou, zatímco u mikrovlákný je síla vyvolaná pouze ohybem jednotlivých vláken. Na základě porovnání voltampérových charakteristik má kartáč s mikrovlákný mnohem horší vlastnosti. Kartáč s mikrovlákný je však určen výhradně pro přenos proudu charakteru vysokofrekvenčních pulzů.

Nelineární vlastnosti přechodového odporu u kartáče s mikrovlákný jsou patrné také na okamžitém průběhu úbytku napětí, resp. na dynamické voltampérové charakteristice (obr. 10).

### 2.3.2 Účinnost uzemňovacích kartáčů

V předchozím odstavci byly porovnávány vlastnosti uzemňovacích kartáčů při průchodu sinusového proudu. Při použití uzemňovacích kartáčů u motorů napájených z měničů frekvence lze předpokládat, že možný proud bude mít charakter vysokofrekvenčních pul-

zů. Z tohoto důvodu byly uzemňovací kartáče testovány při paralelní spolupráci s ložiskem a přenosu proudu zmíněného charakteru. Princip experimentu je znázorněn na obr. 11.

Na ocelovém přípravku s upevněným ložiskem přiléhaly dva kartáče. Ocelový přípravek byl spojen s hřídelí poháněcího motoru. Vnější kroužek ložiska byl obehnut páskou zabraňující jeho rotaci, ale umožňující připojení vodiče. Testovaný kartáč byl zapojen paralelně s ložiskem do zemnicí cesty motoru, který byl napájen z měniče frekvence. Druhý kartáč elektricky spojoval ocelový přípravek s kostrou měniče. Na obr. 12a jsou zobraze-

ny průběhy proudu a úbytku napětí na dvou přechodech kovografitového kartáče. Průběhy na obr. 12b odpovídají použití kartáčů s mikrovlákný. Při použití kartáče s mikrovlákný je úbytek napětí na kartáči větší než u kovografitového kartáče. U obou pokusů bylo použito stejné zapojení, pouze byly zaměněny kartáče. Kartáče byly před vlastním měřením zaběhány.

Protože kartáč s mikrovlákný je přímo určen jako preventivní ochrana pro asynchronní motory napájené z měničů frekvence, byl vykonán s tímto kartáčem dlouhodobý test. Přes kartáč s mikrovlákný s paralelně zapojeným ložiskem se nechal po dobu sto hodin protékat proud. Po této době bylo ložisko demontováno a rozřezáno (obr. 13a). Na vnějším a vnitřním kroužku nebylo patrné poškození. Elektrická pevnost maziva rotujícího ložiska byla pro dané podmínky větší než úbytek napětí na

*There are several possibilities known for prevention of current passing through the electric machine bearings: eliminating of all asymmetries of electric and magnetic circuits in the phase of machine design stage, prevention devices and design modification, bearing insulation, use of ceramic or hybrid bearing, grounded brush connected to shaft and various stator damping windings. In accordance to our laboratory tests and analyse of bearing from large electric motor fed from frequency converter is evident that current discharges erode rings, rolling bodies and also lubricant of bearing. These facts give to rise of bearing damage by certain conditions. If only amplitude of current pulses is reduced by bearing insulation the degradation of bearing is thus only decelerated. For that reason for any application it is not possible to define unique protection against bearing depreciation due to electric current. It is important to judge voltage or current and source of motor feeding and operation cycle of the motor. The results of such investigation can be set up by design of protection method against bearing currents. It is possible to combine several methods of protection to obtain high reliability or use more expensive bearings with ceramic rolling bodies. Arrangements made on electrical machines by design, accuracy and production technology, choice of suitable point and materials are a part of next possibilities.*

kartáči. Nebyl-li instalován kartáč, mělo ložisko patrné poškození (obr. 13b).

Elektrická pevnost vrstvy maziva se zmenšuje i s rostoucí teplotou ložiska, a tím klesá účinnost uzemňovacího kartáče. Z uskutecněných testů lze usoudit, že při použití kartáče s mikrovlákny se zpomalí degradace ložiska.

Nepříznivý vliv na funkci kartáče mají také nerovnosti na hřídeli, popř. přechodné stavy motoru. Např. při rozběhu plní kartáč svou funkci až od určitých otáček (obr. 14). Při rozběhu prochází proud nejdříve ložiskem a po vytvoření mazací a izolační olejové vrstvičky v ložisku vede proud kartáč.

Podobný průběh bude i při průchodu proudu s vyšší frekvencí, např. 1 000 Hz. Na obr. 15 jsou znázorněny pracovní stavy, kdy si kartáč s ložiskem na okamžik vyměňují vedení proudu.

### 3. Závěr

Jak bylo uvedeno, jsou vznik ložiskového proudu, jeho velikost a účinek mj. ovlivněny elektrickou pevností ložiska. Elektrická pevnost ložiska je dána jednak elektrickými vlastnostmi maziva, jednak také tloušťkou olejové vrstvy maziva. Tloušťka olejového filmu závisí na otáčkách ložiska, viskozitě maziva a jeho teplotě. Také elektrická pevnost rotujícího ložiska se výrazně liší u různých maziv a je závislá na teplotě. Protože vhodně použité mazivo může v určitých případech zabránit vzniku ložiskového proudu, měla by volba druhu maziva rovněž zohledňovat závislost průrazné pevnosti olejové vrstvy na teplotě.

Podle našich experimentů při hodnocení účinků preventivních opatření lze konstatovat, že přidavná izolace ložisek, jejichž kapacita



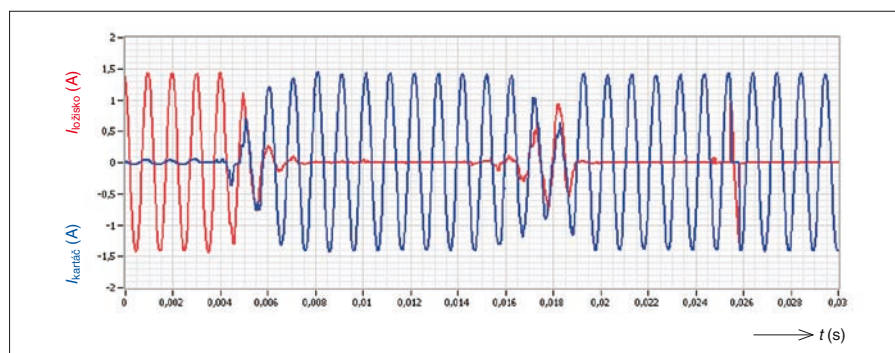
**Doc. Ing. Karel Chmelík**, absolvent VUT FE Brno, obor elektrické stroje a přístroje. Od roku 1962 pracoval v mnoha funkcích bývalé Nové huti Ostrava. V roce 1990 byl jmenován docentem pro obor silnoproudá elektrotechnika a nastoupil na katedru jako její vedoucí. Od roku 1997 do roku 2002 byl děkanem Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB-TU Ostrava. Zabývá se diagnostikou elektrických zařízení, studiem zdrojů pro větrné elektrárny atd.



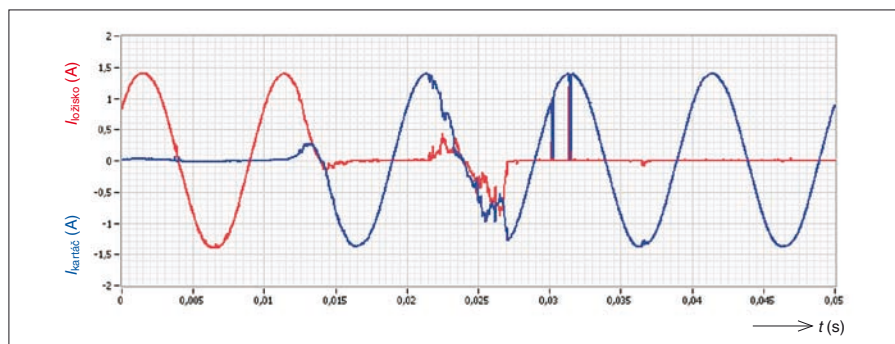
**Ing. Václav Čech, Ph.D.**, absolvent ČVUT Praha. Pracoval v ČKD Praha jako projektant elektrických strojů, později v Hutních montážích Ostrava v projekci pohonů. Od roku 1993 vyučuje na VŠB-TU Ostrava, FEI elektrické stroje. V současné době je vedoucím katedry elektrických strojů a přístrojů. Řeší vědeckovýzkumné úkoly v oblasti elektrických strojů a pohonů.



**Ing. Jiří Foldyna**, absolvent oboru elektrické stroje a přístroje na FEI VŠB-TU Ostrava. Na katedře studuje v doktorském studiu, zabývá se problematikou ložiskových proudů a diagnostikou elektrických strojů.



Obr. 14. Průchod proudu ložiskem a kartáčem při rozběhu motoru



Obr. 15. Průchod proudu ložiskem a kartáčem

se pohybuje řádově v nanofaradech, výrazně neomezí vysokofrekvenční ložiskový proud.

Dále byla zkoumána účinnost uzemňovacích kartáčů. Paralelní spolupráce rotujícího ložiska a kluzného kontaktu je ovlivněna mnoha parametry, proto také účinnost kartáčů není stoprocentní.

Z těchto důvodů nelze pro jakoukoliv aplikaci jednoznačně doporučit určitou ochranu proti znehodnocování vlastností ložisek elektrickým proudem. Je důležité posoudit, jakým napětím či proudem a z jakého zdroje bude motor napájen a také jaký bude pracovní režim provozu motoru (trvalé nebo přerušované zatížení, přerušovaný chod apod.). Závěry takového šetření lze uplatnit při návrhu způsobu ochrany proti ložiskovým proudům. Tam, kde se požaduje vysoká spolehlivost a životnost, je možné kombinovat několik způsobů ochrany nebo volit dražší ložiska s keramickými valivými tělisky.

#### Literatura:

- [1] KRUMPOLC, E.: *Hřídelová napětí a ložiskové proudy u asynchronních strojů*. Technika elektrických strojů, teoretické číslo 1983, VÚES Brno.
- [2] POSPÍŠILÍK, J.: *Podmínky vzniku hřídelových napětí a ložiskových proudů při nesinusovém napájení elektrického stroje*. [Disertační práce.] Ostrava, 2004.