



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

LOŽISKOVÉ PROUDY V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

Miroslav Patočka¹

Abstrakt:

Článek se zabývá problematikou parazitních ložiskových proudů v elektrických strojích. Důraz je kladen na fyzikální mechanismus poškození ložiska průtokem elektrického proudu. Jsou uvedeny experimentální výsledky, na jejichž základě je formulována hypotéza mechanismu poškození, která je poněkud odlišná od běžně přijímané představy elektrického průrazu tenké vrstvy maziva na povrchu valivé dráhy ložiska.

Klíčová slova:

Ložisko, ložiskový proud, poškození ložiska elektrickým proudem, elektrický stroj.

1. Úvod

V období posledních 15-ti let, kdy jsou hromadně používány tranzistorové měniče, narůstá problém poškození ložisek elektrických strojů vlivem parazitních ložiskových proudů. Ložiskové proudy mohou vzniknout v důsledku dvou odlišných fyzikálních jevů. Lze hovořit o *vf. kapacitních* proudech nebo *nf. induktivních* případně i *vf. induktivních* proudech. Z hlediska poškození ložiska je destruktivní účinek těchto proudů téměř rovnocenný. Nelze hovořit o tom, že některý z uvedených typů je škodlivý méně než ostatní. Mechanismu vzniku těchto proudů je věnován příspěvek na jiném místě sborníku. V tomto článku budou shrnuty výsledky experimentálních prací, které kromě jiného snad přispějí i k objasnění fyzikálního mechanismu vlastního poškození ložiska.

¹ Doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka, VUT FEKT Brno, Technická 8, 61600 Brno
E-mail: patocka@feec.vutbr.cz

2. Experimentální uspořádání

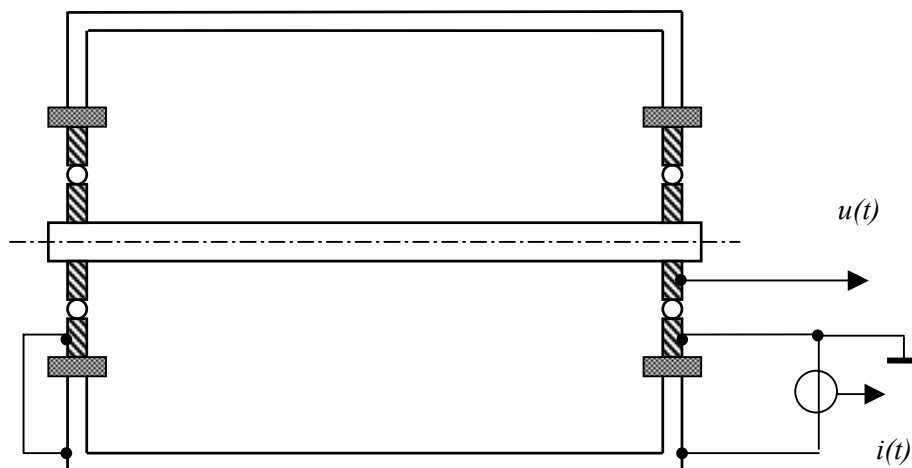
Experimenty byly velmi podrobně prováděny na stejnosměrném stroji s cizím buzením, napájeném z tranzistorového měniče. Stroj byl k tomuto účelu speciálně upraven, měl izolovány vnější ložiskové kroužky obou ložisek od ložiskových štítů. Izolační vložku bylo možno přemostit (zkratovat) vodičem podle *Obr.1*. Jedině tímto způsobem je možno snímat osciloskopicky skutečný proud tekoucí ložiskem, protože zkratovací vodič je možno provléci měřicí proudovou sondou. Druhým kanálem osciloskopu je možno snímat současně napětí na ložisku, způsobené průchodem proudu. Jedná se o napětí mezi vnějším a vnitřním kroužkem ložiska, tedy o napětí „na kuličkách“. Snímací kontakt na vnitřním kroužku musí být kluzný (ložisko se při měření může točit). Kluzný kontakt musí být velkoplošný a robustní (nesmí odskakovat).

Měření bylo provedeno těmito přístroji:

Osciloskop HP 54645A, 100MHz, 200Ms/s, 1MB obrazová paměť

Proudová sonda Tektronix A6303, 100A / 0 - 15MHz,

Proudová sonda Tektronix A6312, 20A / 0 - 100MHz



Obr. 1 : Princip dvoukanalového snímání napětí a proudu na ložisku osciloskopem. Napětí $u(t)$ je snímáno z vnitřního kroužku ložiska přes kluzný kontakt. Měřicí země osciloskopu je totožná s nepohyblivým vnějším kroužkem ložiska.

3. Experimentální výsledky

Typický dvoukanalový záznam napětí a proudu ložiska je uveden na *Obr.2*. Z obrázku je vidět, že oba průběhy jsou téměř dokonale shodné. Nabízí se jediná možná fyzikální interpretace: ložisko se chová jako lineární činný odpor, pro který platí Ohmův zákon ve tvaru

$$u(t) = R i(t) \tag{1}$$

V žádném případě nelze naměřený průběh interpretovat jako *elektrický průraz* tenké tukové vrstvičky ve smyslu jiskrového výboje, tak jak je uváděno často v literatuře. Např. v [1] je vlastní tuková vrstva nahrazována paralelní kombinací rezistoru, kondenzátoru a spínacího kontaktu. Spínací kontakt zde symbolicky představuje „průrazovou cestu“ jiskrového výboje.

Prohlédneme-li velmi podrobně *Obr.2*, vidíme, že k elektrickému výboji zde nedochází. Ten by se musel projevit tím, že v určitém časovém intervalu by došlo ke „skokovému“ poklesu napětí při současném „skokovém“ nárůstu proudu. Takový jev nebyl autorem nikdy pozorován a to při libovolném časovém rozlišení osciloskopu v rozmezí ms, μ s i zlomků μ s. Přičemž „hoření oblouku“ trvající pouhé jednotky μ s nebo dokonce zlomky μ s je z fyzikálního hlediska tak jako tak velmi nepravděpodobné.

Je třeba zdůraznit, že podobných oscilogramů bylo naměřeno více, na různých typech ložisek, mazaných různými typy maziv (i suchá nemazaná ložiska). Výsledek byl vždy podobný, pokud bylo měření provedeno pečlivě. Je pravda, že při velmi malých signálech mohou být průběhy napětí i proudu deformovány přítomností rušivých signálů, např. rozptylové toky motoru mohou rušivě působit na proudovou sondu (v tomto smyslu není použita sonda neomylná).

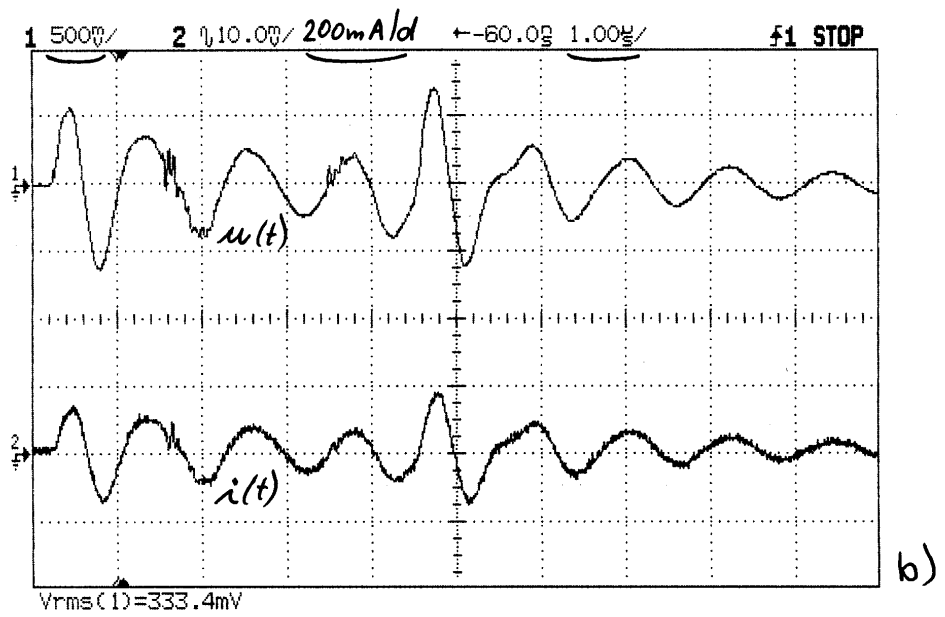
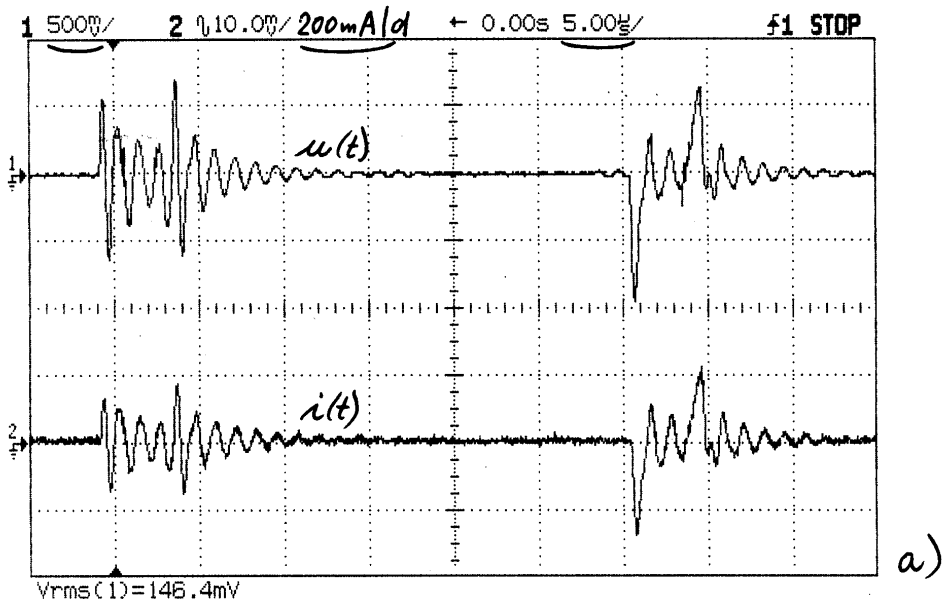
Velmi též záleží na provedení třetího kontaktu, kterým je snímáno napětí z vnitřního otáčejícího se kroužku ložiska. Měření musí být totiž uskutečněna na běžícím motoru. Bylo totiž experimentálně zjištěno, že odpor ložiska - zpětně určený z oscilogramů podle rovnice (1) - závisí *velmi výrazně* na otáčkách motoru. Příklad závislosti odporu ložiska na otáčkách pro dvě velikostně podobná ložiska je uveden na *Obr.3*.

Je vidět, že odpor obou ložisek prudce vzroste již při malé rychlosti a pak je již přibližně konstantní. Ačkoli se jedná o ložiska *podobné velikosti*, jejich odpor se *liší řádově*.

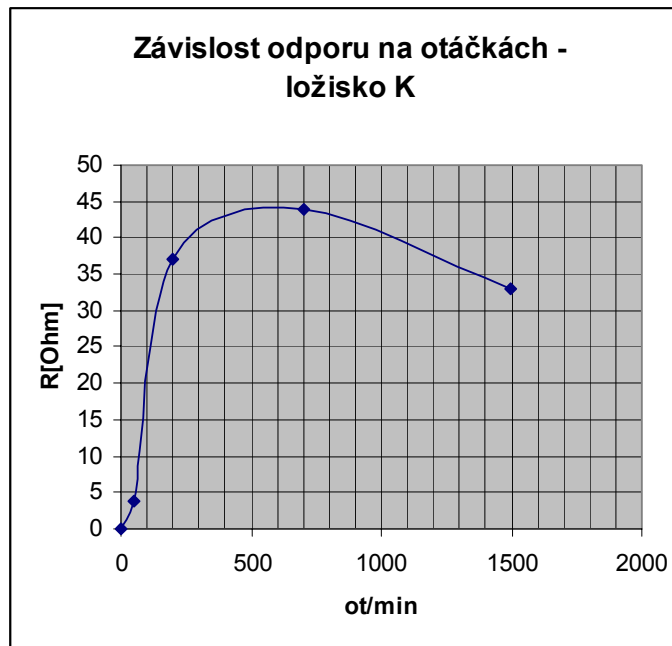
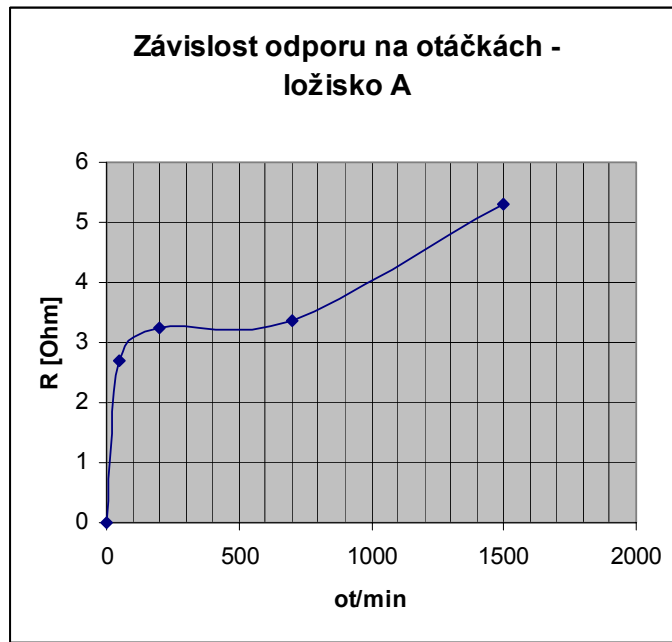
Experimentálně bylo zjištěno, že odpor ložiska závisí kromě otáček na mnoha dalších faktorech:

- Radiální síla působící na ložisko.
- Axiální síla působící na ložisko.
- Stupeň předchozího poškození ložiska.
- Typ maziva.
- Teplota.

Velmi zajímavé je též chování ložiska v klidu při nulových otáčkách. Zde není odpor zcela nulový (jak zjednodušeně vyplývá z *Obr.3*). Odpor je velmi malý, jeho velikost závisí na všech předchozích jmenovaných faktorech, ale navíc závisí na *poloze* i na *čase* (v rámci sekund až minut). S rostoucím časem odpor stojícího ložiska vždy klesá. Je lze vysvětlit tak, že viskózní vrstva tuku se postupně vymačkává z prostoru mezi kuličkou a kroužkem, dochází k lepšímu elektrickému kontaktu a tudíž odpor klesá.



Obr. 2 : Příklad průběhu napětí a proudu na ložisku.



Obr. 3 : Příklad závislosti odporu ložiska na otáčkách. Pro dvě různá, ale velikostně podobná ložiska.

Při přesném rozboru *Obr.2* je vidět, že proud se nepatrně opoždí za napětím. Lze z toho usoudit, že ložisko vykazuje v náhradním schématu navíc i k odporu *sériově* řazenou nepatrnou indukčnost. Její vliv se na kmitočtu cca 1MHz projeví tímto způsobem. Indukčnost je způsobena především přítomností feromagnetického materiálu ložiska.

Naproti tomu je však velmi zajímavé, že byly zaznamenány i průběhy, kde se naopak sinusové kmity proudu předbíhaly oproti napětí téměř přesně o 90° elektrických. Náhradní elektrické schema takového ložiska lze vyjádřit čistou kapacitou bez přítomnosti odporu. Jedná se o kapacitu tenké tukové vrstvy. Zdá se, že takto se chovají ložiska, jejichž mazací tuk má vysokou viskozitu a současně se jedná o ložiska nová, u nichž ještě *nedošlo ke znečištění* tuku vodivými nečistotami (mikročástice kovu, zuhelnatělého tuku atd.). V současnosti však autor nemá dostatek experimentálních údajů, které by potvrdily či vyvrátily uvedenou domněnku.

4. Interpretace výsledků

Při experimentálně potvrzeném poznatku, že některá ložiska se chovají jako *lineární elektrický odpor*, lze vyslovit tuto domněnku:

Mezi kuličkou a kroužkem teče proud pouze několika *nepatrnými kontaktními ploškami* vytvořenými v místech mikroskopických vyvýšenin v nerovném povrchu. Celková plocha těchto paralelně zapojených mikrokontaktů je tak malá, že proudové hustoty dosahují velkých hodnot (odhadem až desítky A/mm^2 ? - zatím chybí věrohodné údaje o počtech a velikosti kontaktních plošek na jedné kuličce). Tyto mikrokontakty nutně vykazují napěťový úbytek při průchodu proudu, tudíž vykazují i celkový elektrický odpor zjistitelný experimentálně.

Veliké proudové hustoty způsobují lokální přehřátí a natavení oceli. Při následném odtrhu kuličky dojde pravděpodobně jednak ke vzniku mikrokráteru a jednak ke spálení maziva a vzniku tuhého kousku spáleniny.

Autor se domnívá (na základě oscilogramů zobrazujících současně proud i napětí ložiska), že v ložisku *nedochází ke vzniku oblouku* ve smyslu elektrického průrazu tukové vrstvy. Napětí na rozpojovaném nebo spojovaném kontaktu je totiž stále velmi malé - ostatní paralelní bodové kontakty tvoří trvalý „zkrat“. Při pohybu kuliček *neustále současně vznikají a zanikají* nové mikrokontakty, jejich počet však musí být ve *střední hodnotě stále stejný* (pro danou rychlost). Při vyšší rychlosti bude střední počet kontaktů klesat (tuková vrstva se vlivem své setrvačné hmoty nenechá vytlačit z dráhy). Menším počtem paralelních kontaktů lze pak vysvětlit zvyšování odporu s rostoucími otáčkami, viz Obr.3. Naopak stojící ložisko bude mít velký počet kontaktů a tudíž velmi malý odpor.

Počtem paralelních kontaktů lze pak vysvětlit i závislost odporu ložiska na mechanickém tlaku (v klidu i při pohybu) nebo závislost odporu na poloze i čase (pouze v klidu).

Autor se domnívá, že vznik mikrokráterů je způsoben natavením vodivých mikrokontaktů a nikoli elektrickými průrazy tukové vrstvy. Lze tak lépe vysvětlit experimentální poznatky.

Odborníci firmy SKF uvádějí, že tuhé zbytky spáleného maziva se hromadí na dráze a přispívají ke vzniku mechanických rezonančních kmitů kuliček, jejichž výsledkem je vznik typické „valchy“ v podobě příčných rýh na valivé dráze.

Je velmi zajímavé, že valcha vzniká především na *vnějším* kroužku ložiska, nikoli na vnitřním. To zvyšuje podezření, že mechanické jevy hrají při poškození ložiska velmi významnou roli a nelze zkoumat izolovaně pouze jevy elektrické.

Zdá se tedy, že poškození ložisek není způsobeno pouze čistě elektrickými vlivy, ale je výsledkem souhrnného namáhání elektrického, mechanického a mnoha dalších vlivů:

- Radiální síla působící na ložisko.
- Axiální síla působící ložisko.
- Rychlost otáčení.
- Mechanické rezonance celého stroje (včetně hnaného zařízení).
- Stáří maziva.
- Typ maziva (tuk nebo olej). Ložisko může být např. konstrukčně součástí převodovky a tudíž je vymýváno velkoobjemovou olejovou lázní převodového oleje. Spálené částice maziva se pak nehromadí na dráze - životnost ložiska je větší.
- Teplota a viskozita maziva.
- Znečištění maziva mechanickými nečistotami (prach).

Je experimentálně doloženo, že všechny jmenované jevy mohou velmi výrazně (až řádově) ovlivnit celkovou dobu života ložiska.

5. Závěr

Uvedené experimentální výsledky svědčí o tom, že problematika poškození ložiska elektrickým proudem je velmi složitá. Zdá se, že samotný fyzikální mechanismus poškození není doposud v literatuře uspokojivě objasněn.

Navíc je zcela zřejmé, že rychlost destrukce valivé dráhy ložiska závisí velmi výrazně na mnoha jiných *neelektrických* vlivech uvedených výše. Problematiku poškození je tedy nutno řešit výrazně interdisciplinárním systémovým přístupem.

Problematika byla řešena za podpory grantové agentury GAČR, v rámci projektu 102/01/1291 *Diagnostika elektromagnetických vlastností elektrických strojů pomocí vibračních a akustických polí*.

Literatura

[1] www.evolution.skf.com

Abstract

The physical mechanism of the bearing damage by the electric current. The paper deals with the bearing damage by the electrical currents in the electrical machines. The experimental results are introduced. On the basis of these results the hypothesis of the bearing damage is created.