



**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

Katedra elektrických strojů a přístrojů



# **Negativní vlivy měničů frekvence na asynchronní motor**

**Autoreferát doktorské disertační práce**

Ing. Petr BERNAT

Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Odborný školitel: Doc. Ing. Karel Chmelík

Ostrava, 2006

Doktorská disertační práce byla vypracována v rámci kombinovaného doktorského studijního programu na VŠB – Technické univerzitě v Ostravě, Fakultě elektrotechniky a informatiky v oboru Elektrické stroje, přístroje a pohony.

**Autor:** Ing. Petr BERNAT  
Katedra elektrických strojů a přístrojů  
FEI, VŠB-TU Ostrava

**Školitel:** Doc. Ing. Karel CHMELÍK  
Katedra elektrických strojů a přístrojů  
FEI, VŠB-TU Ostrava

**Oponenti:** Prof. Ing. Petr CHLEBIŠ  
FEI, VŠB-TU Ostrava  
  
Prof. Ing. Karel MENTLÍK, CSc.  
KET/ET, FEL, ZČU Plzeň  
  
Doc. Ing. Karel Záliš, CSc.  
FEL, ČVUT Praha

Obhajoba se koná dne 21.6.2006 ve 13<sup>00</sup> hodin v místnosti D206 před komisí pro obhajoby disertační práce ve vědním oboru Elektrické stroje, přístroje a pohony na Fakultě elektrotechniky a informatiky Vysoké školy báňské – Technické univerzity, se sídlem v Ostravě – Porubě, 17. listopadu 15.

Prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
předseda komise pro obhajobu  
disertační práce ve vědním oboru  
Elektrické stroje, přístroje a pohony

S vlastní disertační prací je možné se seznámit na oddělení vědy a výzkumu děkanátu Fakulty elektrotechniky a informatiky Vysoké školy báňské – Technické univerzity v Ostravě.

# OBSAH

<b>Anotace.....</b>	<b>4</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>5</b>
<b>Cíle disertační práce .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Asynchronní motor a měnič frekvence .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Harmonické v soustavě měnič - motor .....</b>	<b>7</b>
2.1. Vnitřní harmonické v asynchronním stroji.....	8
2.2. Vnější harmonické při napájení z měniče .....	8
<b>3. Vlivy znehodnocující funkční vlastnosti asynchronního motoru.....</b>	<b>9</b>
<b>4. Vliv způsobu napájení na izolační systém.....</b>	<b>10</b>
4.1. Tepelné namáhání izolačního systému.....	11
4.2. Elektrické namáhání izolačního systému .....	11
4.3. Napěťové poměry v soustavě měnič - motor .....	12
<b>5. Vliv způsobu napájení na konstrukční části asynchronního motoru .....</b>	<b>13</b>
5.1. Hřídelová napětí .....	13
5.2. Ložiskové proudy .....	14
<b>6. Změněné mechanismy vzniku ztrát.....</b>	<b>15</b>
6.1. Změna rozložení proudové hustoty v průřezu vodičů vinutí.....	16
6.2. Ztráty v železe .....	16
<b>7. Úpravy AM pro napájení z měniče .....</b>	<b>16</b>
<b>8. Diagnostika a měření AM napájeného z měniče frekvence.....</b>	<b>17</b>
<b>9. Vybrané diagnostické metody pro asynchronní motor. ....</b>	<b>18</b>
9.1. Měření izolačního stavu .....	19
9.2. Kontrola vinutí rázovou vlnou .....	19
9.3. Měření částečných výbojů.....	20
9.4. Analýza příměsí v chladicím vzduchu stroje .....	20
9.5. Měření oteplení a skutečných teplot jednotlivých částí a uzlů stroje.....	21
9.6. Měření ložiskových proudů a hřídelových napětí .....	23
9.7. Měření napětí na konstrukčních částech stroje.....	25
9.8. Frekvenční analýza charakteristických veličin stroje.....	26
9.9. Měření vibrací .....	26
9.10. Měření hluku, hluková analýza .....	27
9.11. Měření a analýza napájecího proudu stroje.....	27
9.12. Měření rozptylového elektromagnetického pole .....	30
<b>Závěr .....</b>	<b>33</b>
<b>10. Literatura.....</b>	<b>35</b>
<b>11. Internetové zdroje.....</b>	<b>37</b>
<b>12. Publikace.....</b>	<b>38</b>
<b>Příloha .....</b>	<b>39</b>

## **Anotace**

Disertační práce se zaměřuje na popis negativních účinků napájení z měniče frekvence na asynchronní motor a jeho klíčové uzly. Podrobně rozebírá jednotlivé degradační mechanismy, které se při změněném napájení uplatní a vyvozuje jejich možný vliv na sníženou spolehlivost pohonu, tvořeného soustavou měnič-motor a případně příčinnou souvislost mezi nimi a konkrétními poruchami jednotlivých uzlů stroje. Znalost těchto souvislostí je důležitým předpokladem efektivní diagnostiky a zabraňuje jejich, v současné době bohužel časté dezinterpretaci, která vede k chybné technologii oprav a v konečném důsledku i zvýšené pravděpodobnosti opakování závady. Jsou nastíněny možné konstrukční úpravy motoru vedoucí k omezení či eliminaci některých nepříznivých vlivů napájení z měniče.

Na popis změn v motoru při změně napájení navazuje část, zabývající se možnostmi měření a diagnostiky motoru v takové soustavě. Většina dosud používaných diagnostických metod byla prakticky ověřena jen na strojích s klasickým napájením. Je proto proveden výběr metod použitelných pro motor napájený z měniče a tyto metody jsou zdokonaleny a prakticky ověřeny na modelech i strojích v provozu tak, aby plnily svůj hlavní účel – analýzu současného stavu stroje a predikci jeho dalšího vývoje.

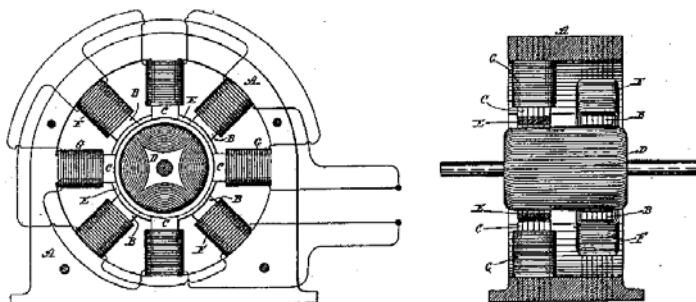
## **Anotation**

This thesis deals with negative effects of power supply of asynchronous motor from a frequency changer to this motor and its key parts. It analyses in detail individual degrading factors, which affect this system when there are changes in power supply. This thesis also deduces possible effects of these factors on lowered reliability of the drive, which is made up from the system changer - motor and/or the causality between them and the failures of particular parts of the machine. The knowledge of these dependences is very important precondition for effective diagnosis and it also prevents misinterpretation of these dependences that is unfortunately very frequent at the present times and that very often conduces to an incorrect technology of breakdown reparations and finally owing to it to increased probability of a repetition of the failure. There are outlined the basic principles of design changes of a motor that lead to reduction or to elimination of some unfavorable influences of power supply from frequency changer.

The part of this thesis dealing with possibilities of measuring and diagnostics possibilities of motors in such system follows up with a description of motor changes caused by changes of power supply. Most of the diagnostics methods used at the present time have been verified only on machines with classic power supply. Therefore a choice of methods was performed which are suitable for a motor powered from a frequency changer and these methods are improved and practically verified on models and working machines in such a way to perform their main aim - the analysis of the present time condition of the machine and the prediction of its further development.

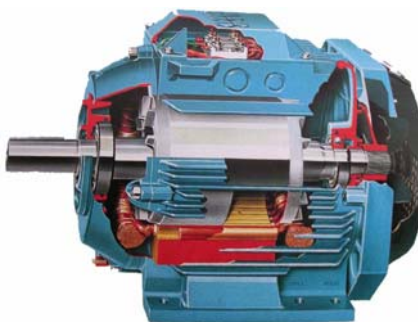
## Úvod

Historie vývoje pohonů s asynchronními motory i motorů samotných je charakterizována konstrukčním úsilím o zvyšování účinnosti, regulačních možností, spolehlivosti a životnosti při současném snižování rozměrů, hmotnosti a investičních i provozních nákladů. I přes značné úsilí konstruktérů a techniků v oblasti návrhu všech komponentů i pohonu jako celku se často nedaří optimalizovat všechny vlastnosti pohonu. Především ekonomické požadavky (dnes více než dříve zvláště nízké výrobní náklady) jsou mnohdy v protikladu s ostatními výchozími podmínkami a vlastnostmi pohonu. Každá revoluční konstrukční změna některého z uzlů pohonu navíc přináší nové problémy v ostatních, časem už prověřených částech, nejvýraznější je obvykle vliv na spolehlivost.



Obr. 1 Asynchronní motor (nákres z patentové přihlášky Nikoly Tesly z roku 1890).

Významnou změnou v použití asynchronních motorů bylo použití měničů frekvence pro jejich napájení. Takto koncipované pohony v posledním desetiletí minulého století doznaly značného rozšíření a u některých druhů pohonů (především doprava médií) začaly převažovat nad přímo napájenými pohony. Zpočátku byly z měničů frekvence napájeny asynchronní stroje běžné konstrukce. U těchto strojů se ale brzy objevil problém zvýšené poruchovosti, především poruchy izolačního systému a poruchy ložisek, příčina poruch byla přičítána změně způsobu napájení a provozu stroje.



Obr. 2 Asynchronní motor – řez současným nejběžnějším provedením s odlévanou kotvou nakrátko.

Asynchronní motor je navržen pro napájení elektrickou energií s harmonickým průběhem hlavních veličin. Jednotlivé konstrukční a funkční uzly – vinutí, magnetický obvod, kostra, ložiska atd. jsou navrženy tak, aby vykazovaly optimální provozní vlastnosti

při určitých hodnotách těchto veličin. V okamžiku, kdy je motor napájen z měniče frekvence se podmínky mění, všechny uzly stroje jsou zvýšeně namáhány a navíc se objevují nové příčiny namáhání, které se při sinusovém napájení neuplatní (díky přítomnosti harmonických v hlavních veličinách stroje se „zdůrazní“ všechny – i velmi malé nesymetrie apod.). Při nepříznivé souhře konstrukčních nedostatků a výrobních tolerancí pak dojde k překročení technických mezí a poruše jednoho nebo více uzlů stroje.

Nejvíce namáhanými uzly stroje napájeného z měniče jsou vinutí (vysoké strmosti napájecích impulsů a přepět'ové špičky) a ložiska (ložiskové proudy z téže příčiny a z důvodu nesymetrií). Tato skutečnost se odráží i jako nejčastější příčina poruch.

Navazující na uvedené problémy je i problematika diagnostiky a měření na motorech napájených z měniče. Diagnostické metody pro asynchronní motory prošly dlouhým vývojem. Část z nich je dnes používána rutinně při provozní diagnostice, řada z nich je však vázána na sinusové průběhy hlavních veličin, a proto u regulovaných pohonů nepoužitelná. Jiné metody naopak vykazují značné chyby a falešné výsledky díky zarušení diagnostické veličiny harmonickými z napájení (z měniče). Je proto nutné provést výběr použitelných metod a vyvinout metodiku interpretace jejich výsledků tak, aby dále plnily svůj hlavní účel – analýzu současného stavu stroje a predikci jeho dalšího vývoje. Význam diagnostiky není nutno zdůrazňovat, i když právě diagnostika je dnes často opomíjena a problémy pohonů se většinou řeší až v okamžiku (mnohdy i opakovaně) poruchy. Častá je také dezinterpretace příčinné souvislosti, která vede k chybným postupům při opravách a k opakování závad.

## **Cíle disertační práce**

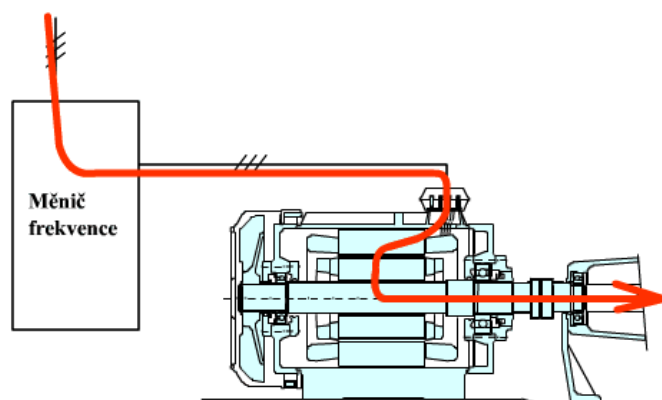
Cílem disertační práce je popis jednotlivých degradačních činitelů souvisejících se změnou napájení asynchronního stroje a určení možné příčinné souvislosti mezi těmito činiteli či jevy a reálnou změnou provozních, fyzikálních, technických či spolehlivostních vlastností jednotlivých uzlů stroje. Na základě znalostí těchto souvislostí pak je proveden návrh některých opatření pro zamezení či omezení jejich vlivu na životnost a spolehlivost těchto uzlů i stroje jako celku.

Na tato opatření navazuje výběr vhodných diagnostických metod a určení metodiky měření a vyhodnocení diagnostických parametrů pro vybrané druhy závad stroje a zvolené diagnostické metody. Část metod je zdokonalena a přizpůsobena novým podmínkám v provozu stroje (především nesinusovému napájení a s tím souvisejícím změnám ve většině fyzikálních dějů v motoru případně soustavě měnič – motor).

## **1. Asynchronní motor a měnič frekvence**

Elektrické stroje obecně jsou technické soustavy, určené k přeměně energie jednoho druhu na energii jiného druhu nebo stejnou s jinými parametry a vlastnostmi. Účinnost této přeměny je limitována reálnými fyzikálními vlastnostmi jednotlivých součástí, obecně největší část z dodané energie se přenesení k dalšímu využití (obr. 3), menší část řadíme mezi parazitní energetické děje. Jejich podrobným rozbořením najdeme řadu

vedlejších vlivů, které odčerpávají část energie z jejího hlavního toku strojem na základě několika rozdílných mechanismů (tepelné ztráty, vibrace a hluk, elektromagnetické vyzařování, tření atd.).



Obr. 3 Cesta dominantní přeměny energie v soustavě měnič – motor.

U asynchronního stroje je jednou z tvořených nebo dodávaných energií energie elektrická, druhá mechanická. Na pozadí dominantní obousměrné přeměny těchto energií vznikají v asynchronním stroji dílčí procesy, které tuto přeměnu zčásti podporují, zčásti omezují a zčásti jsou na ní nezávislé. Tyto parazitní procesy ve většině případů snižují energetickou účinnost přenosu energie nebo snižují spolehlivost a životnost stroje, např. urychlením degradace izolačního systému a provozních vlastností dalších použitých materiálů.

Asynchronní stroje jsou konstruovány pro sinusový průběh elektrických veličin. V okamžiku, kdy je asynchronní stroj napájen z měniče frekvence, se situace ve stroji (pohonu) dramaticky mění. Motor napájený z měniče tedy tvoří s tímto měničem soustavu, ve které se většina fyzikálních dějů odehrává za jiných podmínek než u samotného motoru napájeného ze sítě – především ty, jež jsou úměrně závislé na časových změnách elektrických a magnetických veličin. Poměr závažnosti vlivu parazitních procesů na hlavní proces přeměny energie je jiný, objevují se nové děje svázané s vysokými spínacími frekvencemi a vysokými strmými veličin, navíc děje, které byly konstrukčními úpravami v průběhu vývoje minimalizovány, jsou často právě těmito frekvencemi opět posíleny a vystupují nad únosnou mez (především elektromagnetické a elektrostatické děje s vlivem na izolační systém a konstrukční části).

V současné době pracují všechny moderní napěťové měniče s pulsně šířkovou modulací výstupního napětí. Spínací jev, který je vyvolán při každém spínacím pulsu, je původcem značně strmých impulsů, běžně až 10 kV/ $\mu$ s.

## 2. Harmonické v soustavě měnič - motor

Z hlediska vlivu na funkční uzly elektrického stroje je nutný frekvenční rozbor především magnetických a elektrostatických veličin stroje. Harmonické působí na činnost elektrických strojů zpravidla negativně, proto je důležitý jejich rozbor nejen z hlediska

jejich vzniku a účinků na vlastnosti stroje, ale také z důvodu hledání možnosti jejich potlačení.

Harmonické se mohou vyskytovat v napětí, k němuž je stroj připojen nebo kterého je zdrojem, v proudu protékajícím vinutím stroje, ale také v magnetickém poli ve vzduchové mezeře tj. v magnetickém napětí a magnetické indukci.

## **2.1. Vnitřní harmonické v asynchronním stroji**

Časový a prostorový průběh elektrických a magnetických veličin ve střídavých elektrických strojích není ve skutečnosti čistě sinusový ani u stroje napájeného ze sítě. Příčiny jejich deformace jsou jednak v samotném konstrukčním uspořádání elektrického stroje, jednak v různých nesymetriích, vzniklých při výrobě nebo jako následek poruch v elektrické, magnetické či mechanické části stroje. Použitím Fourierovy transformace na kteroukoliv veličinu získáme frekvenční spektrum, v němž bude vedle základní harmonické i řada harmonických a také subharmonických.

V točivém elektrickém stroji může vznikat několik druhů harmonických. Nejvýznamnější jsou prostorové, stupňové, drážkové a diferenční. Jednotlivé vnitřní harmonické se ve stroji navzájem superponují, některé mohou být potlačeny konstrukčními úpravami (zešíkmení drážek, magneticky vodivé klíny drážek, zvětšení vzduchové mezery, zkrácení kroku vinutí). Mnohé z těchto úprav se však mnohdy navzájem vylučují nebo jsou v rozporu s dalšími požadavky na stroj (především vysokou účinnost a požadované mechanické vlastnosti – moment atd.). Proto se vnitřní harmonické nedají zcela potlačit.

## **2.2. Vnější harmonické při napájení z měniče**

Kromě harmonických, vznikajících přímo ve stroji se v něm vyskytují i harmonické, které jsou mu „vnuceny“ zvnějšku a které označujeme jako časové harmonické. Tyto harmonické jsou výrazné právě v okamžiku napájení stroje z měniče frekvence.

U napěťových měničů má napětí buď tvar obdélníku nebo je ve tvaru pulsů. Tedy u těchto měničů obsahuje značné množství harmonických křivka napětí. U proudového měniče je proud připojeného motoru blízký obdélníku či lichoběžníku a naopak napětí je blízké sinusovce s komutačními špičkami. Cyklokonvertor jako zdroj nízkého kmitočtu generuje sinusové proudy i napětí s relativně menším obsahem harmonických, negativní vlivy jsou u něj menší než u výše uvedených měničů. V současné době je nejrozšířenějším typem měniče napěťový měnič, rozbořem jeho vlivu se proto zabývá tato práce.

### 3. Vlivy znehodnocující funkční vlastnosti asynchronního motoru.

Funkčnost, spolehlivost a životnost technického díla, tedy i asynchronního elektromotoru, je ovlivněna třemi základními etapami:

1. **předvýrobní**, danou úrovní aplikace vědy a výzkumu, projekcí a konstrukcí, návrhem vhodných materiálů a jejich optimálním využitím
2. **výrobní**, závisící na kvalitě použitých technologií při zpracování materiálů a jednotlivých částí stroje, na dodržování předepsaných technologických postupů a pečlivé výrobní kontrole, kvalifikaci a kázni pracovníků
3. **provozní**, do níž je zahrnuto i skladování, doprava, montáž, správná volba a dimenzování motorů při projekci technologických celků, pracovní podmínky pro něž je stroj určen a v neposlední řadě i správná obsluha, údržba a jištění.

Výsledkem působení provozního prostředí na elektrické stroje je znehodnocování funkčních schopností jejich jednotlivých prvků degračními vlivy působícími na stroj:

- teplota (často je uváděna jako hlavní, někdy je uvažována i jako jediný degrační činitel)
- elektrické napětí (způsob napájení)
- mechanické namáhání (přetěžování, rázy, vibrace)
- termomechanické namáhání
- vlivy klimatu
- vnější vlivy provozního prostředí (fyzikální a chemické)

Povaha všech dějů je náhodná a proto každá část stroje je v každém okamžiku definována určitým stavem vlastností a určitou pravděpodobností přechodu těchto vlastností do jiného stavu. Nový budoucí stav je vlivem působení degračních činitelů horší.

Se změnou způsobu napájení souvisí i změna degračních mechanismů a rovněž jejich vliv na celkovou životnost a spolehlivost asynchronního motoru. Mění se rozložení namáhání jednotlivých uzlů stroje a tím i jejich využití, které může být i výrazně odlišné od projektovaných parametrů. Z hlediska spolehlivosti stroje jako celku je nutné věnovat pozornost především klíčovým uzlům stroje – vinutí a ložiskům. Pro podporu této teorie se nabízí srovnání údajů o poruchách za delší časové období v databázi poruch strojů jednoho velkého hutního podniku. Srovnáme-li poruchovost v roce 2002 s rokem 1989, kdy ještě použití pohonů s měniči frekvence bylo jen ojedinělé, je patrná změna četnosti zaznamenaných poruch právě u ložisek a izolace vinutí (závitové zkraty). Pokles počtu tepelně znehodnocených (spálených) vinutí zase ukazuje na výrazné snížení tepelného přetěžování motorů v dynamických dějích. Velikost databáze je dostatečná pro vyloučení

statistické odchylky (je patrné, že zbývající příčiny poruch se udržují poměrně v malých mezích).

Prvotní příčina poruchy	Upřesnění	Procentní podíl v roce 1989	Procentní podíl v roce 2002
<b>Porucha vinutí</b>		65,0 %	41,4 %
	Závitový zkrat	13,6 %	21,0 %
	Zkrat mezi fázemi	7,9 %	6,7 %
	Tepelné znehodnocení	39,0 %	11,0 %
	Přerušené vinutí	0,6 %	0,3 %
	Nízký izolační stav	4,5 %	2,3 %
<b>Porucha ložisek</b>	Zadření, valcha...	9,1 %	35,3 %
<b>Porucha hřídele</b>	Ukroucená, zlomená...	14 %	17,9 %
<b>Jiné příčiny</b>	Svorkovnice, kostra...	11,7 %	5,5 %

Z uvedených údajů ještě nelze usuzovat na přesné příčiny, které stojí na počátku děje, jenž vyústí v poruchu (označení „prvotní příčina poruchy“ v tabulce je jen název statistického údaje), lze se však v dalším zkoumání zaměřit na nejporuchovější uzly a podrobněji popsat všechny degradační činitele, které na ně působí.

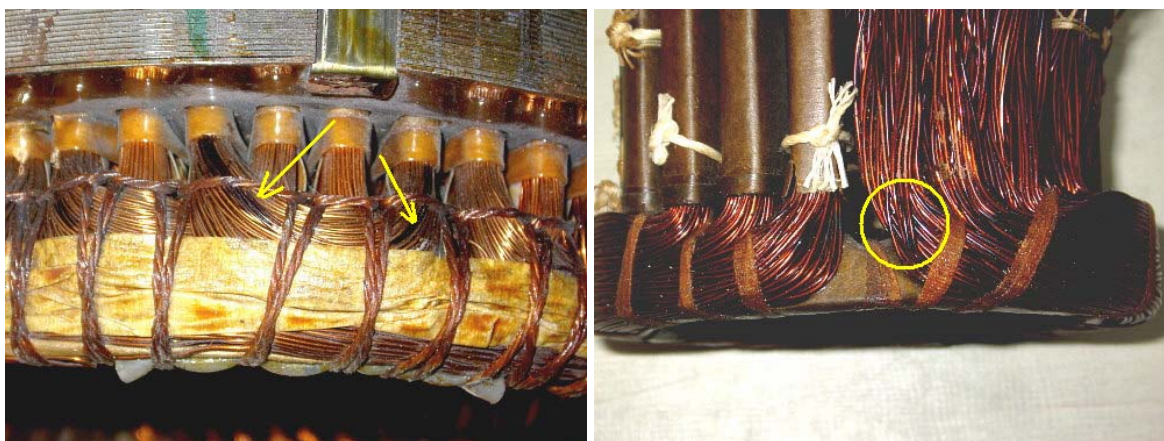
#### 4. Vliv způsobu napájení na izolační systém

U stroje napájeného ze sítě jsou napěťové procesy ve vinutí a jejich vliv na izolační systém dostatečně prozkoumány a známy. Ze znalostí těchto procesů vyplývá i celá metodika návrhu vinutí i izolačního systému. Jakost izolačního systému se v průběhu historie vývoje asynchronních strojů zvyšovala i díky novým izolačním materiálům a dokonalejším technologiím výroby izolace a tím i celého vinutí. Při zachování prostoru v drážce je současná izolace podstatně napěťově i tepelně odolnější než byly dřívější izolační systémy, díky jistému předimenzování se u ní zvýšila odolnost proti přepětí a přetížení (obecně proti běžným degradačním vlivům) a v důsledku toho i její životnost a spolehlivost.

U stroje napájeného z měniče je ale namáhání izolace (a nejen jí) zcela odlišné. K procesům v dielektriku, které můžeme u klasického napájení považovat téměř za statické, přistupuje dynamické namáhání a vliv přepětíových špiček, které už nejsou ojedinělým jevem s málo pravděpodobným výskytem, ale jevem, který doprovází každý napájecí impuls. Dielektrické jevy vedou ke zvýšení ztrát v izolaci a ke zvýšenému oteplení, dielektrikum se tak stává dalším zdrojem tepla ve stroji. Degradační mechanismy v izolaci jsou pak jiné, než u klasicky napájeného stroje, jiná (nižší) je tak i životnost izolace a naopak vyšší je pravděpodobnost její poruchy.

Kromě samotné velikosti přepětí má rozhodující vliv na namáhání izolace i změna rozložení napětí na vinutí. V důsledku této změny je značně namáhána závitová izolace

vstupní cívky a už jen z této příčiny může dojít k jejímu rychlému napěťovému průrazu (obr. 4).



Obr. 4 Fotografie vinutí AM znehodnocených lokálním mezizávitovým zkratem.

#### 4.1. Tepelné namáhání izolačního systému

Oteplování jednotlivých prvků izolačního systému je prvotně zapříčiněno vlivy provozu tj. proudovým zatížením vodičů, četností spínání, časovým využitím a zvláště dobou trvání přechodných dějů (rozběhy, brždění). Záleží rovněž na přípustné přetížitelnosti motoru (velikosti tepelné rezervy). Při napájení z měniče se částečně mění rozložení zdrojů oteplení v závislosti na uvedených provozních stavech, snižuje se podíl přechodných dějů při spouštění a brždění a omezuje se tak i vliv četnosti spínání. Tento příznivý vliv měniče na oteplení je však v protikladu se zhoršeným chlazením (jen u motorů s vlastním chlazením a regulací na nižší otáčky) a zvýšeným vývinem tepla ve všech aktivních i konstrukčních částech díky vlivu harmonických v napájení viz dále.

Teplo je řazeno mezi nejvýznamnější degradační činitele. Za stárnutí izolantů vlivem tepla odpovídají nevratné fyzikálně - chemické děje, které jsou způsobeny oxidací, hydrolýzou (působení vodní páry), pyrolýzou (rozklad teplotou), případně i odpařováním nízkomolekulárních složek. Tyto degradační děje byly u strojů napájených ze sítě dominantní. U stroje napájeného z měniče však nad těmito mechanismy stárnutí převažují dielektrické (polarizační a depolarizační) procesy, přítomnost výbojové činnosti (částečné a klouzavé výboje) a fyzikálně-chemické produkty, doprovázející výboje (např. silně oxidační vlastnosti ozónu).

#### 4.2. Elektrické namáhání izolačního systému

Kromě tepelného namáhání se v izolaci projevují i další degradační děje, jejichž prvotní příčinou je elektrické namáhání. Některé z nich jsou ve svém důsledku zdrojem oteplení a tím i další příčinou urychlení teplotního stárnutí. Ve srovnání s klasicky napájeným strojem se jedná především o dielektrické ztráty v izolantu a vliv výbojové činnosti.

**Dielektrické ztráty** vznikají v izolačním systému působením elektrického pole. Ztrátová energie se pak mění v teplo, kterým se dielektrikum zahřívá. Ztráty vzrůstají se

čtvercem kmitočtu. Podle mechanismu vzniku a fyzikální podstaty existují tři druhy dielektrických ztrát: vodivostní, polarizační a ztráty následkem elektrických výbojů.

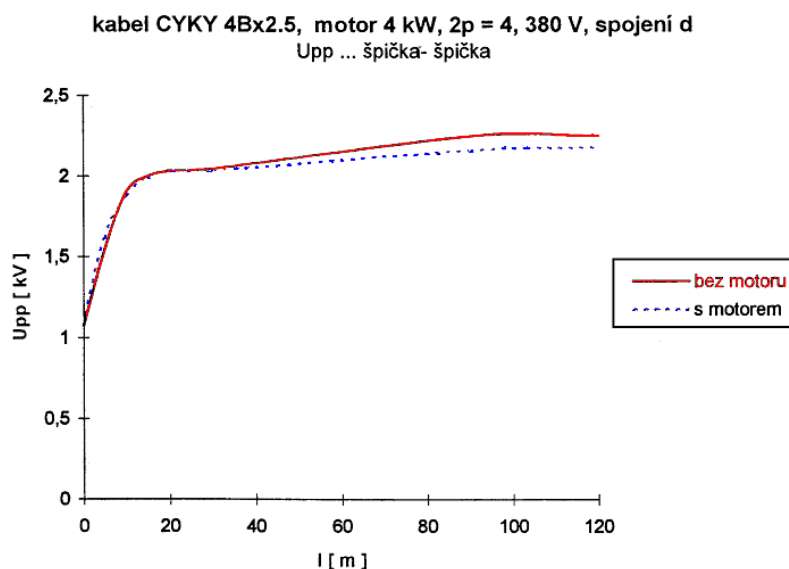
Následkem překročení mezních parametrů izolace nastává její průraz. Elektrický průraz izolace je obecně náhodný jev. U dobrého izolačního systému a dobré technologie závisí pravděpodobnost průrazu izolace na:

- počtu slabých míst v izolaci tj. na její homogenitě
- velikosti a charakteru a době působení a strmostí změn napětí mezi závity
- velikosti jejich styčné plochy
- homogenitě elektrického pole.

#### 4.3. Napět'ové poměry v soustavě měnič - motor

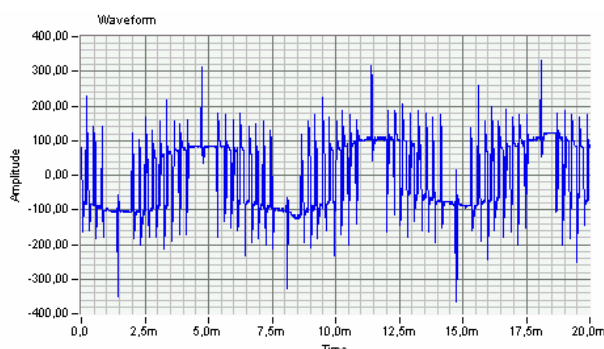
Zdroj v soustavě měnič – motor generuje posloupnost napět'ových pulsů (stále je uvažován výhradně měnič frekvence s napět'ovým meziobvodem). Tyto napět'ové pulsy postupují po vedení, které propojuje měnič s motorem (kabelu) směrem k motoru ve formě šířící se vlny. Vzhledem k rychlosti dějů, které se v soustavě odehrávají, je nutné uvažovat i se skutečností omezené rychlosti šíření vlny (rozdíl potenciálů mezi začátkem a koncem vedení) a počítat s možností odrazu vlny na rozhraních.

Není-li doba nárůstu napětí na začátku kabelu podstatně větší než doba šíření vlny po kabelu, vznikne nestacionární děj a je možno ve stejném časovém okamžiku naměřit různé napětí na různých místech kabelu. Existuje určitá kritická délka vedení  $l_{kr}$ , závislá na době nárůstu napětí  $t_r$  a rychlosti šíření po vedení  $v$ . Pro kabel nízkého napětí a dobu čela rovnou  $0,1 \mu s$  je tato délka cca 15 m (obr. 5). Napětí na konci vedení stoupá při  $l_p \geq l_{kr}$  až na dvojnásobek napětí v meziobvodu. Velikost napětí na svorkách motoru tak závisí i na délce kabelu mezi měničem a motorem a na parametrech kabelu:



Obr. 5 Experimentálně ověřená závislost napětí na konci kabelu na jeho délce.

Vzhledem k vysoké spínací frekvenci a především vysoké strmosti napájecích pulsů není možné ani na samotné vinutí motoru pohlížet jako na elektrický obvod se soustředěnými parametry, pro výzkum dějů uvnitř vinutí a v izolaci je nutné elektrický obvod stroje a měniče chápat jako soustavu s rozloženými (prostorově rozprostřenými) parametry. Časově rychlé změny napájecího napětí jsou příčinou nabíjecích a vybíjecích přechodných dějů, které mají charakter nabíjecích a vybíjecích pulsů. U izolovaného motoru vzniká na jeho kostře elektrický potenciál, jehož časový průběh je stejný jako průběh součtu okamžitých hodnot napětí všech tří napájecích fází (obr. 6). Toto tzv. souhlasné napětí může u stroje běžné velikosti dosáhnout i hodnot nebezpečných pro obsluhu a být příčinou nesprávné funkce ochrany či nekontrolovaných výbojů statického náboje:



Obr. 6 Napětí naměřené na kostře izolovaného motoru napájeného z měniče.

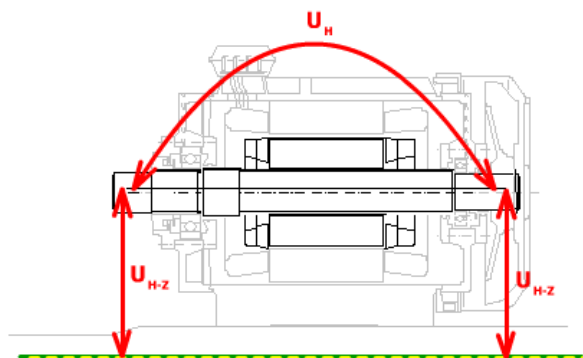
Dojde-li u izolovaného motoru ke spojení s nulovým potenciálem přes hřídel (spojkou na uzemněný poháněný agregát), veškerý kapacitní proud z kostry motoru se bude uzavírat cestou, která vede mj. i přes ložiska. V tomto okamžiku je nutno zkoumat i vliv tohoto proudu na konstrukční části stroje.

## 5. Vliv způsobu napájení na konstrukční části asynchronního motoru

Napájení stroje z měniče frekvence mění podmínky provozu i pro konstrukční části, především ložiska (ložiskové proudy), kostru (přídavné ztráty a dodatkové oteplení) a částečně i hřídel (parazitní momenty). Z hlediska vlivu na spolehlivost je nejvýraznější působení ložiskových proudů.

### 5.1. Hřídelová napětí

U elektrických strojů dochází v některých případech ke vzniku hřídelových napětí. Tato napětí se dříve objevovala spíše u větších strojů, dnes se s nimi můžeme setkat u každého stroje. **Hřídelové napětí** je vnitřní napětí indukované časovou nebo prostorovou změnou magnetického toku. Kromě tohoto se ještě může objevit **napětí na hřídeli**, což je napětí, které vzniká v důsledku vlivu rozložení elektrostatického potenciálu kapacitních vazeb (obr.7). Hřídel je v tomto případě jen součástí přenosové cesty vyrovnávacích proudů, ne jeho zdrojem.



Obr. 7 Hřídelové napětí  $U_H$  a napětí na hřídeli  $U_{H-Z}$ .

Hřídelové napětí je příčinou proudů uzavírajících se různými cestami, např. uzavřeným obvodem tvořeným kroužkem motoru, štíty, ložisky a hřídelí. V jiných případech se může jednat o obvod skládající se z kapacit vinutí, vzduchové mezery, ložiska, případně kapacit dalších částí proti zemi. Ložiskové proudy mohou tedy být nejen cirkulační, ale také kapacitní, zemní apod. Všeobecně vznikají hřídelové napětí a ložiskové proudy za dvou podmínek - první je existence elektrického potenciálu mezi mechanicky oddělenými částmi, druhou podmínkou je taková konfigurace strojních a elektrických součástí, která vytvoří uzavřenou proudovodnou cestu, jejíž součástí je i samotné ložisko.

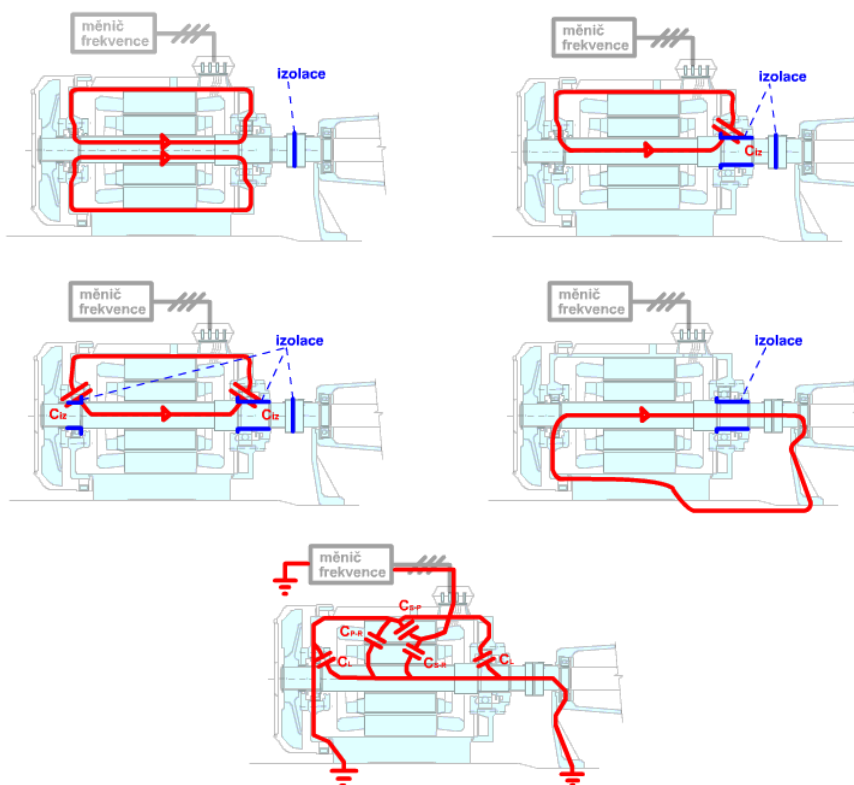
## 5.2. Ložiskové proudy

Ložisko je obecně konstrukční součást elektrického stroje, nepodílí se tedy (až na zdůvodněné výjimky) na přenosu elektrické energie. Jeho funkcí je zabezpečit jistý stupeň volnosti (umožnit rotaci) mezi statorem a rotorem při definovaném radiálním nebo axiálním zatížení a pro dané mechanické či provozní vlastnosti po definovanou dobu životnosti. V případě splnění podmínek pro vznik ložiskového proudu se ložisko stává součástí elektrického obvodu, což může vést až k jeho poruše právě proto, že se s průchodem proudu při návrhu a konstrukci ložiska a jeho součástí nepočítá. Mechanismus poškození se liší podle typu (valivé, kluzné) a konstrukce ložiska.

Při analýze příčiny poruch ložisek je nutné vyloučení jiných vlivů (mechanické příčiny, přetížení, konstrukční a výrobní vady, chybná montáž a poškození při montáži či dopravě stroje apod.) a kromě vizuální a srovnávací analýzy je vhodné provést např. i metalografický rozbor. Analýza poruch ložisek není triviální záležitostí, příčinná souvislost mezi proudem protékajícím ložiskem a následným poškozením ložiska je většinou nepřímá a bez znalosti dalších souvislostí (vliv vibrací, kovových mostů, vodivosti maziva atd.) obtížně vystopovatelná. Bohužel je nutno konstatovat, že se ložiskové proudy často vykazují jako jediná příčina všech poruch ložisek, i když ve skutečnosti tvoří jen jejich zlomek. Příčin tohoto jevu je více, jednak jsou ložiskové proudy „módní“ problém, jednak je často technický personál tlačěn k tomu, aby v případě poruchy rychle označil její příčinu, a tady se ložiskové proudy vzhledem k relativně obtížné prokazatelnosti přímo nabízejí.

## Cesty ložiskových proudů

Proudy v konstrukčních částech stroje se mohou uzavírat mnoha způsoby (obr. 8). Při napájení stroje ze sítě se uvažují jen cesty galvanické a kapacitní vazby se mohou zanedbat. Vysokofrekvenční proudy z měniče frekvence se však mohou uzavírat právě těmito kapacitními vazbami a dokonce mohou nad galvanickými (nízkofrekvenčními) proudy převládat.



Obr. 8 Cesty proudů v konstrukčních částech asynchronního motoru.

## 6. Změněné mechanismy vzniku ztrát

Kromě výše uvedených problémů vyplývajících ze změny napájení je nutné do úvah o situaci ve stroji a především v soustavě měnič-motor zahrnout i další mechanismy vzniku ztrát, na které bude mít tato změna výrazný vliv. Z hlediska možné míry degradačních účinků jsou významné jen ty, u nichž lze předpokládat výraznější účinek na výsledné oteplení stroje jako celku či některé z jeho součástí. Nejvýznamnější jsou proto změna rozložení proudové hustoty v průřezu vodiče (vliv skin efektu a jevu blízkosti) a ztráty v železe (vířivé proudy, přemagnetizace – hysterezní ztráty) související s přítomností vyšších frekvencí v napájení.

Tyto změněné mechanismy se netýkají jen stroje samotného (jeho aktivních částí), ale také přívodů, filtru (pokud je použit) a konstrukčních částí (viz např. oteplení kostry či svorníků – termovizní snímek v kapitole 9.5.2 v disertační práci). Kromě vlivu na snížení účinnosti soustavy je nutno uvažovat i možný degradační účinek na jednotlivé součásti. S vlivem vyšších frekvencí na elektrické a magnetické vlastnosti se navíc dříve uvažovalo

až u velkých strojů (profilové vodiče velkých průřezů, optimalizace účinnosti). Při použití s měničem jsou však významné i u malých strojů (kolem jednotek kW).

## **6.1. Změna rozložení proudové hustoty v průřezu vodičů vinutí**

Proud teče celým průřezem vodiče jen za splnění určitých podmínek (osamocený vodič malého průřezu, stejnosměrný proud...). V reálném prostředí a u střídavého proudu je nutné uvažovat jevy, které ovlivňují rozložení proudové hustoty v průřezu vodiče. Nejznámější je skinefekt, který způsobuje „vytlačení“ proudu ve vodiči směrem k jeho povrchu. Při napájení z měniče může tato změna podmínek vést ke zvýšení oteplení stroje jako celku s dodatečnými degradačními účinky (teplotní dilatace impregnace a celého izolačního systému drážky, nerovnoměrné stárnutí izolace).

## **6.2. Ztráty v železe**

Rozložení ztrát mezi jednotlivé mechanismy jejich vzniku se mění i v magnetickém obvodu. Kromě magnetizačních ztrát a ztrát vířivými proudy se uplatní i změna rozložení magnetického toku v průřezu jednotlivých součástí magnetického obvodu (magnetický skinefekt) a ztráty v konstrukčních součástech, zasažených pracovním i rozptylovým polem. Všechny složky magnetizačních ztrát jsou výrazně frekvenčně závislé.

# **7. Úpravy AM pro napájení z měniče**

Shrneme-li výše uvedené vlivy změněného napájení na jednotlivé části a uzly AM, vyplynou z nich jednak všechny příčiny možných poruch, jednak možné konstrukční úpravy, které budou tyto příčiny úplně či alespoň částečně eliminovat. Pokud se nejedná přímo o hybridní motor (motor s vestavěným měničem), používají se tyto úpravy obecně pro všechny motory (vzhledem ke stále vyššímu využití měničů lze předpokládat vysokou pravděpodobnost spolupráce s měničem u každého vyrobeného motoru obecného použití). Možné jsou tyto konstrukční úpravy:

### **Úprava vinutí a izolačního systému:**

- Zesílení izolace (závitové, mezifázové i drážkové) – respektování přepětových špiček v napájení stroje
- Zesílení izolace vstupní cívky vinutí – respektování změny rozložení napětí
- Použití nevodivých bandáží – zamezení ohřevu indukovanými proudy
- Použití polovodivých laků na impregnaci – zabránění povrchovým a klouzavým výbojům
- Vinutí paralelními vodiči a rozložení do paralelních větví – respektování zvýšeného vlivu skinefektu
- Změna schématu vinutí – lepší potlačení harmonických

### **Úprava ložiskového uzlu:**

- Použití izolovaného ložiska – zamezení nízkofrekvenčním ložiskovým proudům
- Použití hybridního nebo keramického ložiska – zamezení vlivu ložiskových proudů na ložisko
- Instalace kartáčů u ložisek a udržování dokonalého styku kartáče s hřídelí – omezení vlivu hřídelového napětí a napětí na hřídeli na ložiska
- Obecně vložení izolace do každé předpokládané cesty proudu

### **Další možné úpravy:**

- Izolace konstrukčních částí motoru – zamezení nekontrolovaného toku proudu od indukovaných napětí
- Cizí ventilace – zlepšení chlazení stroje při větší hloubce regulace
- Počet drážek na pól volený jako celé číslo a drážky natočeny o jednu drážkovou rozteč – potlačení konstrukčních harmonických a indukce hřídelového napětí a jím generovaného proudu ložisky
- Všechny součásti navržené a vyrobené s maximálně možnou symetrií
- Dodržení tolerance vzduchové mezery  $\pm 10\%$

Ne všechny konstrukční úpravy ale vedou k očekávanému výsledku a často se na jejich funkci výrobci příliš spoléhají. Tlačí je k tomu především ekonomické požadavky (co nejnižší cena stroje). Z hlediska omezení vlivu měniče se jeví jako nejvýznamnější úpravy izolačního systému vinutí a snaha o maximální výrobní symetrii elektrickou, magnetickou i konstrukční. Efektivnější je vždy potlačení příčin (zdrojů potenciálních problémů) než potlačení příznaků (následků). Jinou kapitolou je omezení vlivu měniče úpravou výstupního průběhu napětí (použití filtru, úprava algoritmu spínání, použití „měkkého“ spínání).

## **8. Diagnostika a měření AM napájeného z měniče frekvence**

V průběhu historického vývoje asynchronních strojů byly pro tyto stroje vyvinuty a aplikovány desítky metod funkční i provozní diagnostiky, zaměřené na diagnostiku jednotlivých uzlů stroje. Tyto metody jsou ať už samostatně či ve vhodně vybraném souboru schopny zjistit aktuální stav těchto uzlů a na základě znalosti časového vývoje diagnostických parametrů po dobu života stroje a v závislosti na dalších údajích (např. způsobu provozu, záznamu o vzniklých poruchách a způsobu jejich opravy atd.) a v některých případech umožnit i prognózu dalšího vývoje jejich technických a fyzikálních parametrů.

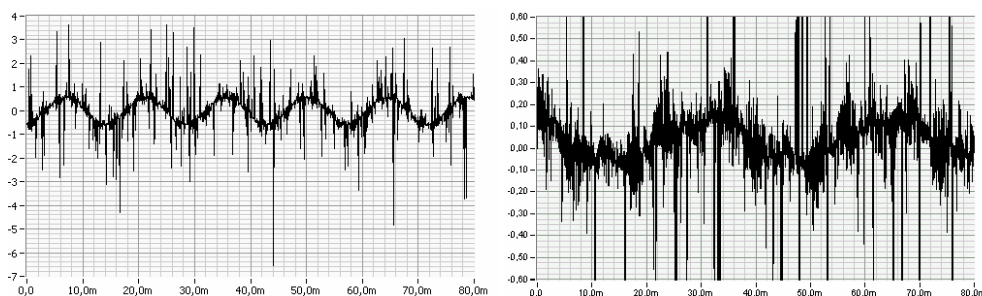
Z hlediska mnou zkoumaných negativních vlivů měniče na asynchronní stroj mají význam měřicí a diagnostické metody pro identifikaci vad (zjišťování stavu) vinutí a ložisek, k nimž patří především:

- měření izolačního stavu
- kontrola vinutí rázovou vlnou nebo dvojitou rázovou vlnou
- měření částečných výbojů
- měření oteplení a skutečných teplot jednotlivých částí a uzlů stroje
- měření vibrací
- měření hřídelového napětí
- měření napětí na ložisku
- měření proudu ložiskem a proudu pomocných vodivých drah přes ložisko
- měření napětí na konstrukčních částech stroje (na kostře, stojanech, soustrojí)
- měření a analýza napájecího proudu stroje
- měření rozptylového elektromagnetického pole.

Kromě provozní a testovací diagnostiky, dávající informace o aktuálním stavu zařízení, je důležitá i následná diagnostika („post mortem“). Přesné určení prvotní příčiny jakékoliv závažnější poruchy je nutnou podmínkou efektivní údržby a předpokladem kvalifikovaného tlaku na konstrukční úpravy při jeho výrobě.

## 9. Vybrané diagnostické metody pro asynchronní motor

Z omezení vyplývajících ze změněného způsobu napájení stroje vyplývá nutnost výběru těch diagnostických metod, u nichž bude vliv změněného napájení na diagnostickou veličinu malý nebo nějakým způsobem eliminovatelný. U metod funkční diagnostiky lze vliv napájení na způsob získání diagnostické veličiny prakticky vyloučit (stroj je v okamžiku měření odstaven a bez napájení), odlišnosti se mohou vyskytnout jen ve vyhodnocení naměřených parametrů (jiné mezní hodnoty či metodika). Pro většinu metod provozní diagnostiky však napájení z měniče představuje závažnou změnu. Nejvýraznější je přítomnost časových harmonických už v samotném napájení a tím i ve všech elektrických veličinách v soustavě měnič – motor.



Obr. 9 Typické projevy rušení měřené veličiny (proud asynchronního motoru).

Odfiltrování rušení (obr. 9) není triviální záležitostí. Digitální filtrace (aplikací matematických metod na matici naměřených hodnot) sice umožňuje na první pohled

účinné odstranění špiček s výsledným „úhledným“ průběhem i z na první pohled velmi chaotického signálu, je však použitelná spíše tam, kde nás zajímá např. střední či efektivní hodnota měřeného signálu. Zkreslení, které tento způsob filtrace do signálu vnáší, však znemožňuje jeho další věrohodnou analýzu, především analýzu frekvenčního spektra. Je proto nutné upravit měření tak, aby rušení bylo odstraněno už před A/D převodem v měřicím řetězci.

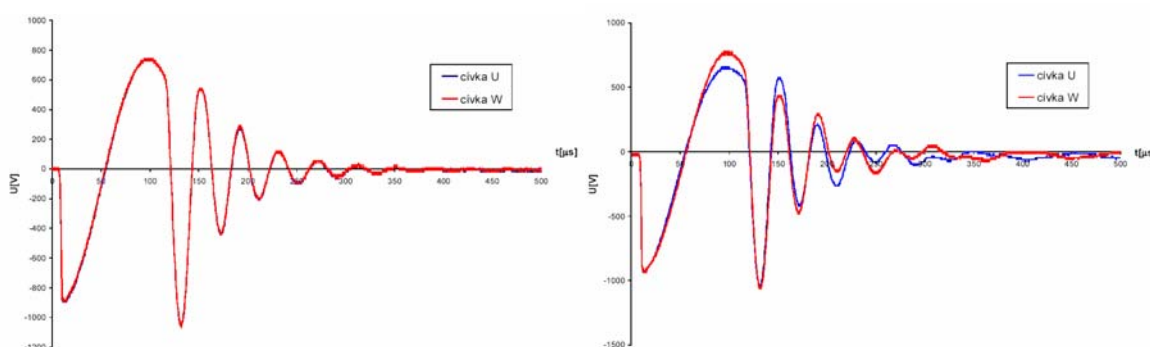
## 9.1. Měření izolačního stavu

Měření izolačního stavu je základní diagnostickou zkouškou funkční diagnostiky. Izolační stav stroje lze hlídat i pomocí nepřetržitého sledování (měření unikajících proudů a svodů je mj. jedním z autodiagnostických prvků měničů frekvence). Postup a vyhodnocení měření jsou normalizovány (ČSN 35 0010, ČSN IEC 93).

**Zhodnocení metody** – měření izolačního stavu je základní metodou diagnostiky funkčních vlastností každého elektrického zařízení. Měření se provádí na odstaveném stroji, takže je principiálně nezávislé na způsobu napájení. Izolační stav za provozu lze měřit jen nepřímou – měřením unikajícího proudu. Tato metoda je v soustavě měnič – motor použitelná jen omezeně a s malou citlivostí. Hlídače izolačního stavu indikují jen vážnou poruchu izolace, neumožňují varování s dostatečným předstihem.

## 9.2. Kontrola vinutí rázovou vlnou

Zkouška rázovou vlnou (dvojitou rázovou vlnou) je založena na principu vybíjení kondenzátoru (dvojice identických kondenzátorů) do zátěže (dvojice zátěží), kterou u asynchronního motoru představuje vinutí statoru. Vybitím kondenzátoru vznikne strmá rázová vlna, která v připojeném vinutí vybudí tlumený rezonanční děj (obr. 10). Průběh tohoto děje je zachycen pomocí dvoukanálového osciloskopu a vyhodnocen vizuálně nebo pomocí matematických metod.



Obr. 10 Naměřené průběhy odezvy rázové vlny na vinutí asynchronního motoru v bezporuchovém stavu a s mezizávitovým zkratem jedné fáze.

**Zhodnocení metody** – diagnostika vinutí rázovou vlnou je perspektivní zkouškou z oblasti testovací diagnostiky použitelná bez omezení i pro malé stroje a nezávislá na způsobu jejich napájení. Nevýhodou je nutnost přítomnosti srovnávacího objektu stejných vlastností (tj. u asynchronního motoru předpoklad identičnosti jednotlivých fází vinutí

v bezchybném stavu) a obtížné přiřazení vyskytnuvších se změn na křivkách konkrétnímu typu a místu poruchy. Subjektivitu vyhodnocení naměřených průběhů lze do jisté míry eliminovat použitím matematických metod nebo expertního systému, výhodná je i možnost archivace dat a sledování trendů.

### 9.3. Měření částečných výbojů

Částečný výboj je lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostňuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. Částečné výboje jsou obvykle důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci nebo na povrchu izolace a vytvářejí proudové (napětové) impulsy s dobou trvání mnohem menší než 1 ms.

Detekce částečných výbojů a jejich měření zahrnuje metody elektrické (galvanické měření, elektromagnetické sondy v různém provedení a uspořádání) a neelektrické (akustická detekce – ultrazvuková emise, optická ultrafialová detekce a chemická detekce).

Základní metodou pro nepřímé (neelektrické) měření č.v. je detekce akustických signálů (mechanických kmitů) emitovaných částečnými výboji. Tyto mechanické impulsy vyvolávají akustické vlny, které se šíří okolním prostředím a lze je zachytit pomocí selektivních směrových mikrofónů nebo dalších akustických detektorů v kombinaci se zesilovači a vhodnými zobrazovacími jednotkami. Akustické (ultrazvukové) metody jsou vhodné především pro určení místa vzniku (lokalizaci) částečných výbojů a mohou být použity i v režimu on-line. Na rozdíl od elektrických metod neumožňují globální měření stavu izolace celého stroje a lze je použít jen u otevřených strojů.

**Zhodnocení metody** – elektrické metody měření částečných výbojů u strojů nn při napájení z měniče částečně selhávají. Dostupnými prostředky na straně měřicího řetězce i na straně vyhodnocování nelze s dostatečnou přesností a spolehlivostí izolovat diagnostickou veličinu z měřeného signálu. Pro základní diagnostiku je tak k dispozici většinou jen údaj o přítomnosti či nepřítomnosti výbojů. Využití neelektrického způsobu detekce č.v. pomocí akustické emise je u malých AM za provozu prakticky nepoužitelné. Přesto je detekce přítomnosti č.v. z hlediska diagnostiky žádoucí a potřebná.

### 9.4. Analýza příměsí v chladicím vzduchu stroje

U strojů chlazených vzduchem je možné přítomnost výbojové činnosti (jako důsledku porušení izolace i jako degradačního činitele) nepřímo indikovat pomocí jeho chemické analýzy. Nejčastěji se provádí test na přítomnost ozónu a některých oxidů dusíku.

Ozón ( $O_3$ ) vzniká jako produkt reakce vzdušného kyslíku s kyslíkovým radikálem ve vysokoenergetických dějích (ionizačních procesech, místní teplotní přetížení). Diagnostický význam má hlavně kvalitativní důkaz přítomnosti ozónu. Existuje několik způsobů měření koncentrace ozónu ve vzduchu, které se liší především způsobem detekce (fyzikální podstatou), citlivostí měření a možnostmi aplikace. Výsledkem měření touto metodou je koncentrace ozónu vyjádřená v ppm (part per milion,  $10^{-4}$  % obj., miliontá část

celku), přepočtená na normálové podmínky. Koncentrace ozónu v chladicím vzduchu elektrického stroje do hodnoty 0,1 ppm ukazuje na provoz bez výbojové činnosti, hodnoty nad 0,5 ppm pak ukazují na silnou výbojovou činnost.

K nesporným výhodám metody patří její jednoduchost, nízké náklady, měření za normálního provozu stroje bez nutnosti odstávky či jiných přípravných prací a její jednoznačnost (vznik ozónu ve statorovém izolačním systému je jednoznačně vázán na působení elektrických výbojů, ionizačních jevů). Měření touto metodou máme ověřeno i ve velmi složitých podmínkách z hlediska EMC (rušení jiných metod měření přítomností regulovaných pohonů a buzení stroje z měniče [I], [II]). Při pravidelném sledování je možno zachytit výbojovou činnost v počátečních stádiích, kdy ještě nedochází k většímu poškození izolace.

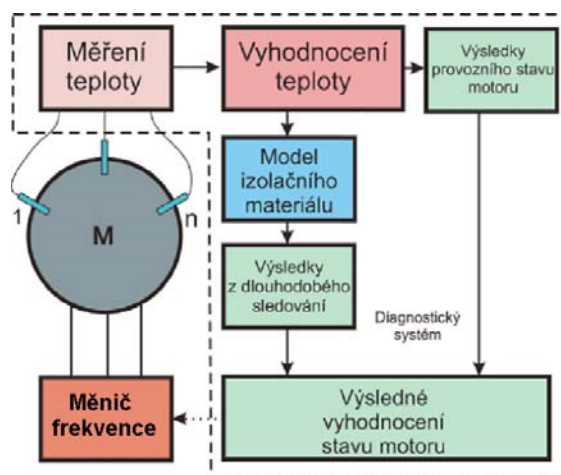
**Zhodnocení metody** – z hlediska rychlé provozní diagnostiky pro indikaci přítomnosti výbojové činnosti je tato metoda velmi perspektivní. Vzhledem k výše uvedeným specifikům je sice kvantifikace velikosti výbojů problematická až nemožná, jako průkaz jejich přítomnosti a upozornění na nutnost použití jiné metody pro jejich stanovení však měření dostačuje. Větší rozšíření metody v provozní praxi zvláště v posledních letech souvisí i s lepší dostupností komerčních měřičů koncentrace ozónu (používají se dnes mj. v klimatologii, sledování jakosti ovzduší, průmyslovém ošetřování vody, lékařství apod.). Pro využití v diagnostice je nutná jen malá úprava (armatura pro připojení sání přístroje či měřicí sondy k výfuku chladicího vzduchu na stroji). Metodu je možné použít jak na malé tak i na velké stroje bez závislosti na způsobu napájení.

## **9.5. Měření oteplení a skutečných teplot jednotlivých částí a uzlů stroje**

Změna způsobu napájení stroje s sebou nese i změnu rozložení oteplení jeho jednotlivých součástí (mění se místa vzniku oteplení a jeho intenzita). Z hlediska diagnostiky stroje je důležitá jak znalost okamžitých hodnot oteplení jednotlivých součástí tak i jejich případná skoková (vznik poruchy uzlu) či plynulá (degradace vlastností uzlu) změna. Většina poruch stroje vedoucí k jeho odstavení je vázaná na oteplení buď jako příčinu (degradační činitel) nebo důsledek (příznak poruchy). Oteplení (okamžité teploty) lze měřit buď pomocí čidel vestavěných ve sledovaných uzlech stroje nebo pomocí zobrazení teplotního pole na povrchu (či částečně i uvnitř) stroje – termovizí.

### **Přímé měření teploty**

Měření oteplení u stroje napájeného z měniče frekvence není triviální záležitost. Pro měření máme k dispozici řadu prostředků pracujících na některém ze tří základních principů – odporové teploměry (využívající teplotní závislosti vodivosti kovových materiálů – např. platinového drátku), termočlánky (teplotní závislost termoelektrického napětí v místě styku dvou kovů) a polovodičová čidla (teplotní závislost vodivosti polovodičového přechodu).



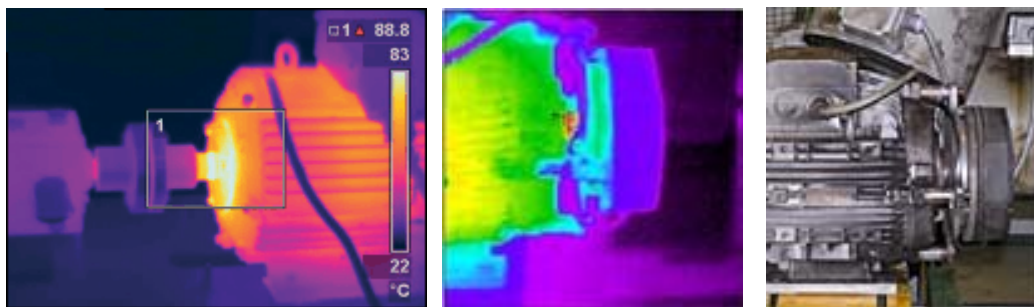
Obr. 11 Diagnostika asynchronního motoru pomocí měření oteplení.

Samotná teplota daného uzlu jako výsledek konkrétního měření je z hlediska diagnostiky téměř bezcenný údaj. Srovnávací diagnostika je také použitelná jen ve velmi specifických případech (soustavy identických strojů, pracujících za stejných podmínek, např. pohon válečků válcovací tratě). Vyhodnocení naměřených údajů je proto nutné navázat např. na matematický model sledovaného uzlu (nejčastěji vinutí) nebo na expertní systém (s neuronovou sítí) – viz. obr. 11 [3].

### Nepřímé měření teploty

Použití metod přímého měření teploty a oteplení stroje je vázáno na jeho konstrukční úpravy (zabudování čidel do sledovaných částí). Nepřímé měření teploty je založeno na sledování infračervené emise sledovaného objektu nebo jeho součástí, měření tedy probíhá bez přímého kontaktu měřidla se sledovaným objektem (na dálku). Podobně jako světelná energie je tepelná radiace záležitostí fotonů v elektromagnetickém spektru. Měření tepelné infračervené radiace tvoří základ bezkontaktního měření teploty a infračervené (IR) termografie. Termovizní systémy pracují na principu zobrazování teplotního pole (infračervené radiace) měřeného objektu jako celku formou reálného obrazu, ve kterém jsou jednotlivé teploty zobrazovány formou přiřazení odpovídající barvy každému z bodů. Bezkontaktní teploměry (pyrometry) využívají stejného principu (infračervené záření) ke snímání teploty jako termovizní systémy, odlišují se tím, že snímají pouze jeden měřený bod, jehož velikost je závislá na optických vlastnostech daného pyrometru.

Stejně jako u přímého měření teploty je ale vyhodnocení naměřených teplot v jednotlivých bodech nebo teplotního pole záležitostí obtížnou. Oproti vestavěným čidlům je navíc diagnostika vnitřních vad ztížena měřením teploty pouze na povrchu stroje. Pokud je tedy propagace projevu poruchy (zřídla oteplení) přes aktivní a konstrukční součásti až na povrch stroje malá, nelze poruchu tímto způsobem detekovat. Stejná situace nastává v případě, že je měřená součást odstíněna (kryt) či zacloněna (další předmět, nevhodný úhel pohledu - obr. 12).



Obr. 12 Termovizní snímky motorů se zobrazením teplotního projevu mechanické poruchy ložiska.

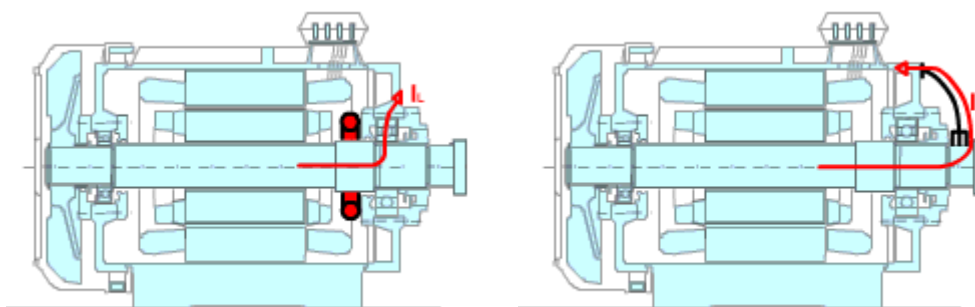
Vzhledem k výše uvedeným omezením je termovizní zobrazování vhodné především pro srovnávací diagnostiku. Pro diagnostiku malých vad uvnitř stroje a diagnostiku vinutí je metoda vhodná jen částečně nebo vůbec, tepelný projev na povrchu může být v tomto případě malý či nezřetelný.

**Zhodnocení metody** – měření teplot a teplotních polí je perspektivní diagnostickou metodou, umožňující rychlé odhalení vznikající poruchy elektrické i konstrukční části stroje, především při kontinuálním (on-line) sledování. Kontaktní metody měření pomocí vestavěných čidel jsou sice přesnější, jsou však náročnější jak z hlediska zavedení (konstrukční úpravy a z toho vyplývající omezená vhodnost pro malé stroje) tak z hlediska nutného odstranění rušení pronikajícího do měřicího řetězce z napájení stroje.

## 9.6. Měření ložiskových proudů a hřídelových napětí

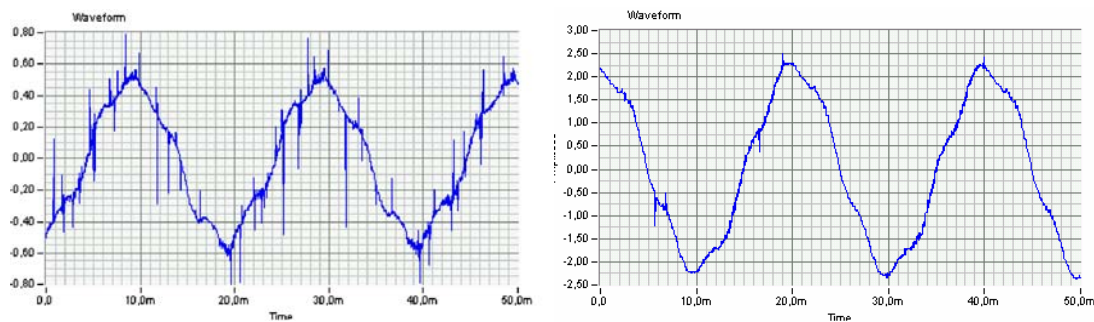
Z mechanických uzlů stroje je při změně napájení nejohroženější ložisko. Proudění tekoucí z různých příčin cestou, která se uzavře přes ložisko, způsobují jeho zrychlené opotřebení až havárii. Pro zhodnocení tohoto vlivu je nutné znát hodnoty a průběhy napětí na ložisku a proudu, který jím teče [VII], [VIII], [X].

Měření ložiskových proudů na reálném stroji je velmi obtížné. Důvody nejsou ani tak v jejich velikosti či průběhu, jako v možnosti umístění vhodných proudových čidel do obvodu procházejícího proudu. Přímé měření se tak nahrazuje měřením proudu v hřídeli v místě těsně před ložiskem nebo převedením proudu vně ložiska (obr. 13):



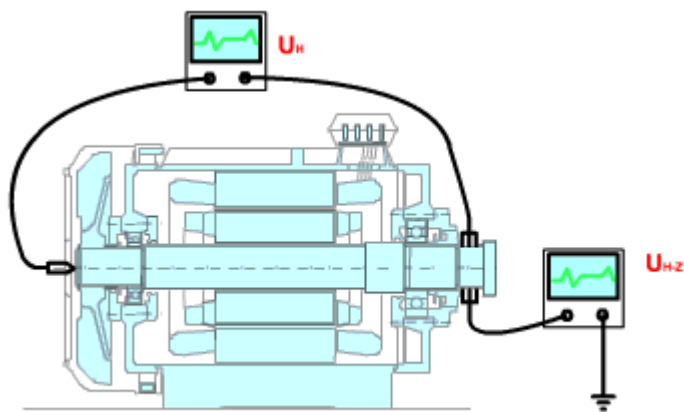
Obr. 13 Vložení čidla proudu do motoru a převedení proudu ložiskem vně motoru.

Jako čidlo je možno použít Rogovského cívku nebo axiálně vinutou vzduchovou cívku. Nutná je úprava motoru (upevnění cívky, vývod měřeného signálu) a pro instalaci čidla i jeho demontáž. U malých strojů tento způsob většinou nelze použít z důvodu malého prostoru mezi rotorovým paketem a štítem. Praktické zkušenosti navíc ukazují menší věrohodnost takto naměřených údajů proudu – do signálu od čidla i čidla samotného se přenáší rušení (kapacitní i induktivní vazbou) v jehož důsledku nelze odlišit tu složku napětí na výstupu čidla, která odpovídá čistě indukci proudem procházejícím hřídelí.



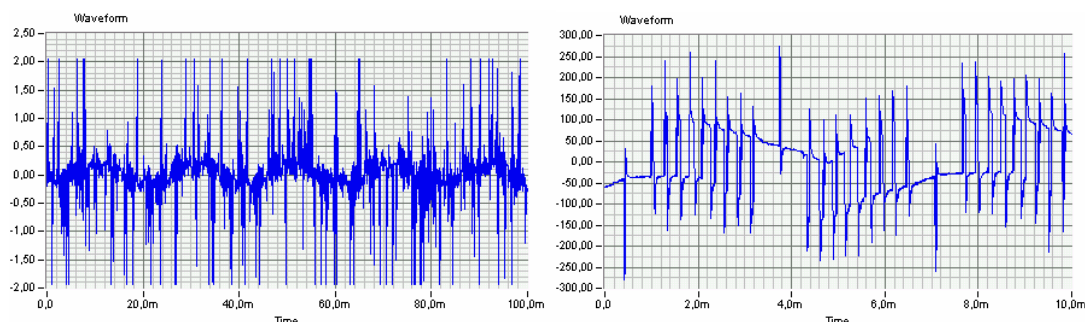
Obr. 14 Měření proudu ložiskem Rogovského cívku uvnitř a LEM čidlem vně stroje.

Lepší výsledky dává měření proudu ve vodiči přemostňujícím ložisko (obr. 14). Je-li zajištěn kovový styk přemostňujícího vodiče (masivní měděný kartáč na očištěné hřídeli) a krátký vodič k ložiskovému štítu či domku, je vytvořena paralelní vodivá cesta s lepšími elektrickými parametry a lze předpokládat, že větší část ložiskového proudu nebo dokonce celý proud poteče tímto vodičem.



Obr. 15 Měření hřídelového napětí a napětí na hřídeli.

Obdobná situace je při měření hřídelového napětí a napětí na hřídeli (obr. 15). Jejich měření komplikuje svod v ložisku (ložiskách), který obvod napětí zkratuje (viz cesty ložiskových proudů výše).



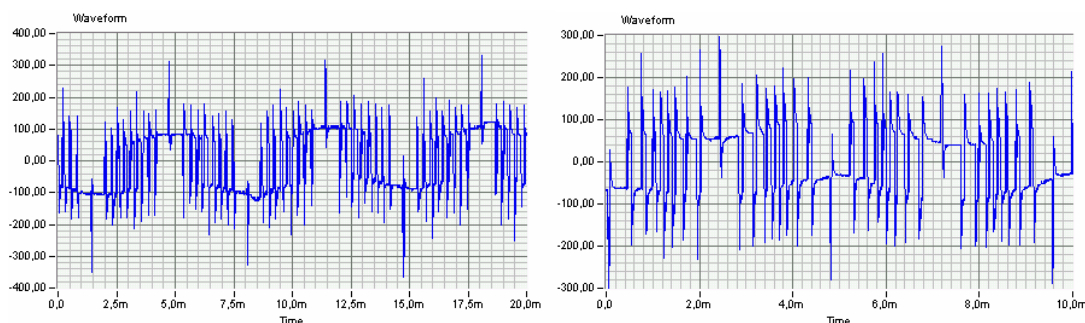
Obr. 16 Hřídelové napětí a napětí na hřídeli (hřídel – zem).

Z hlediska diagnostiky je důležitou hodnotou jen skutečná velikost napětí přímo na ložisku (prakticky mezi vnějším a vnitřním kroužkem u valivého ložiska a mezi hřídelí a pávní u ložiska kluzného). Vlastní měření se provádí pomocí přiložených kluzných kontaktů na koncích hřídele (obr. 15 a 16).

**Zhodnocení metody** – měření hřídelových napětí a ložiskových proudů je důležitou součástí diagnostiky AM napájených z měniče, neboť ložisko je u nich nejhroženější strojní součástí. Při dodržení pravidel měření v zaručeném prostředí jsou výsledkem průběhy a hodnoty napětí a proudů na ložisku, na jejichž základě lze vyloučit nebo potvrdit a zhodnotit jejich vliv na možnou elektrickou degradaci až poškození ložiska.

## 9.7. Měření napětí na konstrukčních částech stroje

Z hlediska diagnostiky stavu stroje jako celku je mezi diagnostické metody vhodné zahrnout i měření napětí na ostatních konstrukčních částech stroje. Především v situaci, kdy je stroj či jeho části montován izolovaně vůči svému okolí i poháněným strojním zařízením může měření napětí sloužit k provozní diagnostice funkčnosti této izolace.



Obr. 17 Napětí kostra – zem a napětí kostra – štít motoru napájeného z měniče.

Konfigurace pro měření může být různá, u izolovaných strojů se nejčastěji měří napětí na určené části vůči vztažnému bodu, kterým je ve většině případů uzemnění (uzel sítě). V případě zjišťování stavu konkrétní části izolačního systému strojních součástí lze měřit napětí přímo mezi izolovanými částmi (obr. 17).

**Zhodnocení metody** – při dodržení zásad měření lze z hodnot a průběhu napětí na konstrukčních částech posoudit především stav jejich izolace. Z hlediska možných účinků těchto napětí má vyšší vypovídací schopnost sledování změn v řadě po sobě jdoucích

měření (sledování trendů). Situaci ale komplikuje opakovatelnost měření při stejných podmínkách. Hodnoty napětí jsou závislé na mnoha faktorech, kromě strmosti impulsů z měniče i na elektrické symetrii stroje, jeho okamžitém zatížení a stavu jeho pracovní izolace (izolačního systému vinutí). V případě překročení mezních hodnot napětí je nutné podniknout kroky k jeho omezení.

## 9.8. Frekvenční analýza charakteristických veličin stroje

Asynchronní motor je za provozu zdrojem mnoha přirozených frekvencí. Přesný rozbor komplikují komplexní vlastnosti stroje, který je soustavou s transformační funkcí, skluzem, prostorovou a časovou vlnou proudové vrstvy, drážkování statoru a rotoru, nasycení magnetického obvodu, nelineárních vlastností použitých materiálů a také velkému množství konstrukčních variant. Při napájení z měniče frekvence navíc k charakteristickým frekvencím přibývají časové harmonické a jejich modulační produkty. Frekvenční vlastnosti stroje jsou závislé i na jeho aktuálním stavu a tudíž využitelné pro diagnostiku.

**Zhodnocení metody** – frekvenční analýza veličin stroje je základem několika diagnostických metod, založených na měření vstupních i výstupních veličin stroje za provozu. Všechny přídatné nesymetrie ve stroji způsobují modulaci pole i proudu a analýzou této modulace umožňují zpětné zjištění příčiny poruchy. Modulace elektromagnetických veličin se projeví i nepřímo v hlukovém poli v okolí stroje a generováním vibrací (dodatečných frekvencí ve vibračních spektrech), které nemají čistě mechanický původ. Pomocí frekvenční analýzy je navíc možné měřit i okamžitou frekvenci napájení a z otáčkové frekvence nepřímo určit i skutečné otáčky stroje.

## 9.9. Měření vibrací

Měření vibrací – vibrodiagnostika je svébytný diagnostický obor a vědní disciplína. Diagnostickou veličinou je několik parametrů vibrací (hladina, směrové působení, časové a frekvenční průběhy, dlouhodobé trendy). Vibrace jsou obrazem technického stavu stroje (komplexně celého soustrojí) a nesou v sobě informaci o funkčnosti a případných poruchách mechanické a částečně i elektrické části. Nejčastější (a taky nejznámější) je u AM použití vibrodiagnostiky v diagnostice stavu ložisek.

Vyhodnocení naměřených vibrací je komplexní úloha, zahrnující celou řadu vyhodnocovacích algoritmů a vyžadující mimo jiné i vysokou kvalifikaci obsluhy. V současnosti je komerčně dostupná celá řada měřičů a měřicích systémů s vestavěným vyhodnocením pomocí expertního systému (i s možností učení). U stroje napájeného z měniče je nutné kromě možného rušení měřicího řetězce počítat také s vibracemi, které souvisí s nesinusovým napájením (přídavné a parazitní momenty na hřídeli i konstrukčních částech stroje).

**Zhodnocení metody** – vibrodiagnostika je rutinně používanou a velmi propracovanou metodou pro diagnostiku AM bez ohledu na způsob napájení. Pokud se

zohlední vliv napájení na naměřené hodnoty pro posuzování vibrací, dokáže tato metoda poměrně citlivě diagnostikovat jak mechanické tak i některé elektrické vady (nesymetrie). Při použití metody na stroji v soustavě měnič – motor může být problémem výskyt elektrického rušení, pro jeho odstranění je nutná úprava měřicího řetězce (např. autonomní čidla s optickým výstupem).

## **9.10. Měření hluku, hluková analýza**

Každý elektrický stroj produkuje část parazitní energie ve formě zvuku. Zdrojů zvuku ve stroji je celá řada, zvuk generují vibrace všech součástí, buzené proměnným elektromagnetickým polem, elektrostatické i částečné výboje, přítomnost vnitřních, prostorových i časových harmonických ve všech veličinách stroje, uplatňuje se i magnetostrickce. Významným zdrojem zvuku je i samotný pohyb rotoru, aerodynamický hluk tělesa rotoru, ventilátoru i ostatních rotujících součástí. Složitou vnitřní i vnější superpozicí vznikne ze stroje a poháněného mechanismu komplexní zdroj zvuku, který vytvoří ve svém okolí zvukové (hlukové) pole. Analýzou tohoto pole především z hlediska jeho spektrálního složení lze usuzovat na stav stroje.

**Zhodnocení metody** – až na zdůvodněné výjimky lze hlukovou analýzu u stroje napájeného z měniče použít jen jako doplňkovou metodu a jen pro sledování trendů. Lepší průkaznost naměřených údajů se jeví v případě použití hlukové analýzy pro měření za účelem lokalizace zdroje zvuku konkrétních parametrů.

## **9.11. Měření a analýza napájecího proudu stroje**

Měřením a analýzou napájecího proudu stroje lze získat přesný obraz o jeho stavu i poháněného mechanismu. Jakákoliv porucha nebo i závada v elektrickém nebo i magnetickém obvodu stroje způsobí vznik přídatných magnetických polí ve vzduchové mezeře, jejichž rychlost otáčení se liší od synchronní rychlosti. Přídatná pole deformují pole v mezeře, které je „prostředníkem“ dominantní přeměny energie v motoru. Tato deformace se zpětně promítne do dodatečné modulace průběhu napájecího proudu. Analýzou proudu můžeme zpětně dojít až k příčině deformace – příčině nesymetrie a identifikovat tak konkrétní závadu. Metoda patří do skupiny metod provozní diagnostiky, měřené přímo při provozu stroje a je vhodná i pro použití on-line.

Druhů závad asynchronního motoru, které se mohou projevit jako příčina deformace pole je více a mohou se vyskytnout jak v elektrickém tak i magnetickém obvodu či poháněném mechanismu:

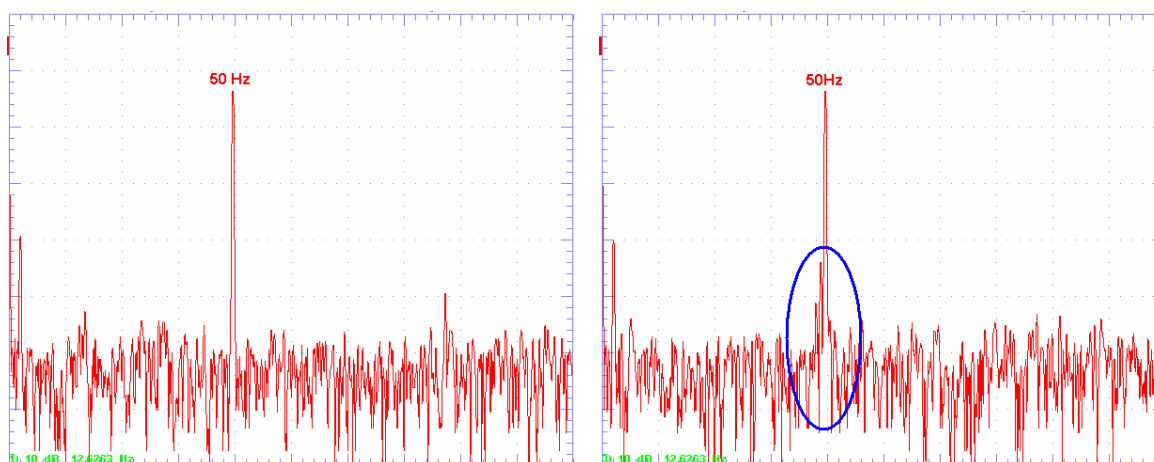
- elektrická nesymetrie rotorového vinutí (přerušené tyče či kruhy klece, zkrat u vinutého rotoru).
- elektrická nesymetrie statorového vinutí (přerušení či zkrat v různé konfiguraci)
- magnetická nesymetrie (statická a dynamická excentricita rotoru, přesycení)

- mechanické příčiny (špatné ustavení, nevyvážení rotoru, rázy z poháněného mechanismu)

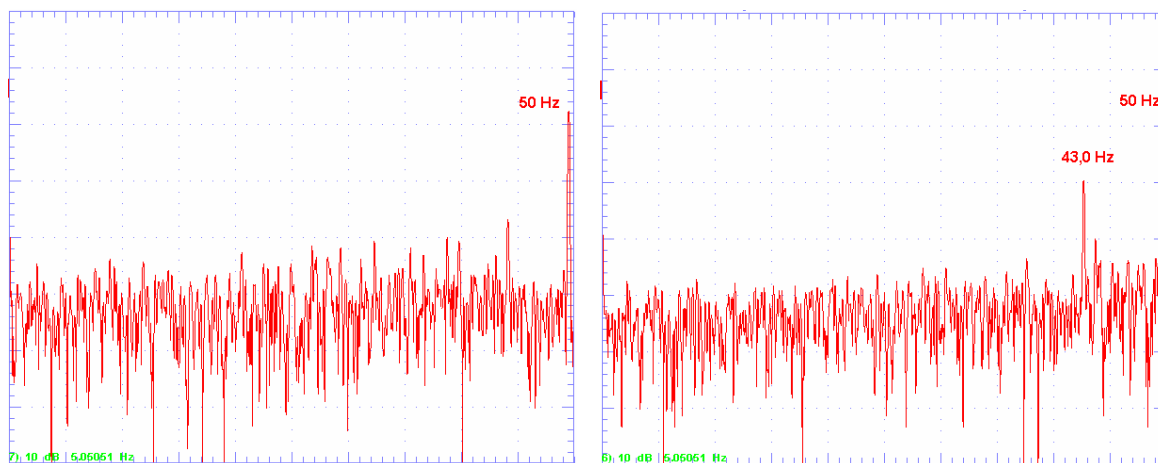
### 9.11.1. Měření a vyhodnocení napájecího proudu

Diagnostickou veličinu – proud stroje získáme jeho měřením přímo za chodu stroje. Měření se provádí bezkontaktně bez nutnosti zásahu do napájecího obvodu stroje pomocí klešťových MTP či proudových čidel LEM. U velkých strojů a vn strojů je možné i měření v sekundárních obvodech zabudovaných MTP pro ochrany. Rozsah frekvencí pro analýzu se pohybuje od nuly do max. dvacetinásobku frekvence první harmonické napájení, z hlediska přenosu a možného frekvenčního zkreslení tak vyhoví většina komerčně dodávaných čidel proudu.

Výsledkem měření je frekvenční spektrum proudu v požadovaném rozsahu frekvencí (podle charakteru diagnostikovaných vad postačuje zpravidla spektrum od nuly po pátou harmonickou a detail – okno v okolí první harmonické). Vyhodnocení naměřeného spektra je vázáno na znalost dalších údajů o měřeném AM, především počtu pólů, zatížení a skutečných otáček při měření (lze obejít zpětným výpočtem otáček z otáčkové frekvence, odečtené ze spektra).



Obr. 18 Spektrum napájecího proudu motoru bez závad a motoru s typickým obrazem elektrické nesymetrie v rotoru.

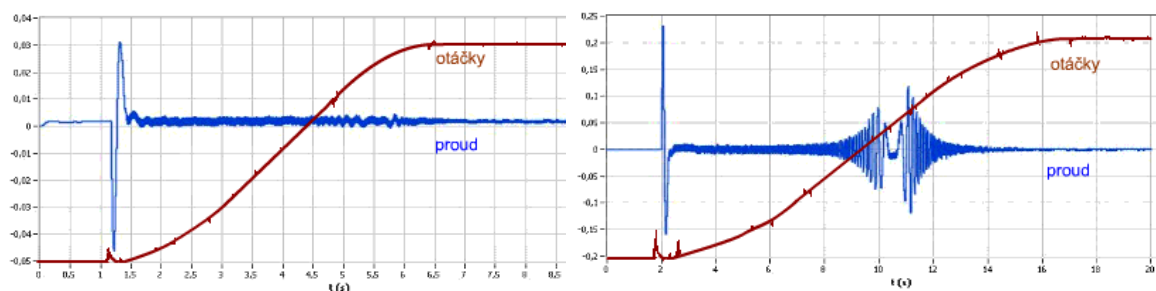


Obr. 19 Detail dolní části spektra od nuly po první harmonickou u dobrého motoru a motoru s rotorovou nesymetrií při napájení z měniče frekvence v zatíženém stavu.

Prakticky provedená měření (obr. 18 a 19) potvrzují použitelnost této metody i v soustavě motoru s měničem. Díky přítomnosti rušení je při vyhodnocování nutno brát ohled na menší odstup jednotlivých charakteristických frekvenčních čar a rušivého pozadí, ve kterém zcela zanikají méně výrazné frekvence (např. otáčková a její násobky). Spektra na předchozích obrázcích byla získána přímým měřením bez dodatečné filtrace rušivých špiček právě za účelem ověření citlivosti metody a její vhodnosti pro provozní měření s využitím běžně dostupných měřicích přístrojů (v tomto případě osciloskopu s možností frekvenční analýzy FFT).

### 9.11.2. Rozběhová metoda

Kromě frekvenční analýzy a rozboru obrazu frekvenčního spektra lze některé poruchy, především rotorovou elektrickou nesymetrii odhalit i pomocí rozběhové metody. Během rozběhu stroje se provede záznam proudu, ze kterého se odfiltruje první harmonická (běžně frekvence nad cca  $\frac{1}{2}$  frekvence napájecí). Vyskytuje-li se v rotoru nesymetrie, pak je v průběhu magnetického pole ve stroji také složka  $f_x = f_1(1 - 2s)$ . Během rozběhu se objeví dvakrát, a to při  $n = 0,4n_1$  a  $n = 0,6n_1$ . Při  $n = 0,5n_1$  bude nulová. Změna pole ve stroji moduluje napájecí proud, na jeho filtrovaném průběhu se pak objeví zákmity před a po dosažení  $\frac{1}{2}$  otáček (obr. 20) - [III], [X].



Obr. 20 Srovnání filtrovaného záznamu proudu u dobrého motoru a u motoru s rotorovou nesymetrií.

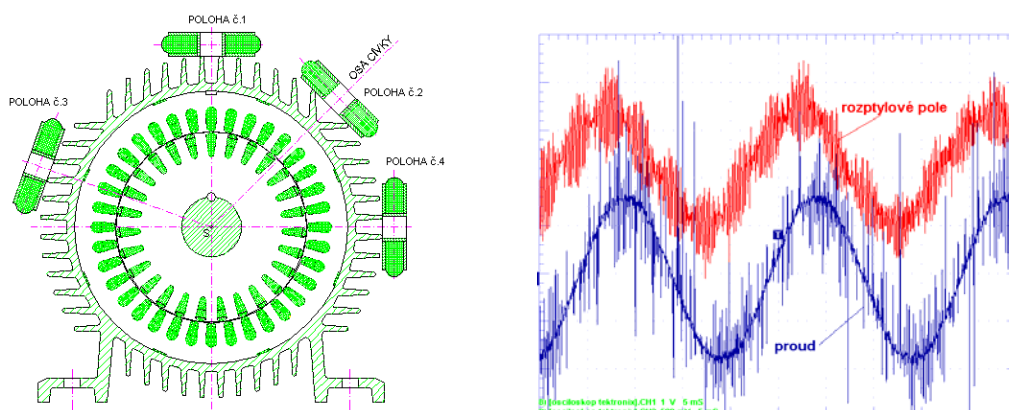
U motoru s měničem je tento způsob vyhodnocení napájecího proudu bohužel prakticky nepoužitelný právě proto, že se jedná o skluzovou metodu. Motor v soustavě s měničem je rozbíhán změnou výstupní frekvence střídače, skluz je během rozběhu udržován blízký nule a kolísá v závislosti na rychlosti změny frekvence a velikosti zátěžného momentu. Dodatečná modulace napájecího proudu poruchovou frekvenční složkou a výsledné zákmity na filtrovaném průběhu proudu se tak nemohou projevit.

**Zhodnocení metody** – měření a analýza napájecího proudu asynchronního motoru je jednou ze základních metod provozní diagnostiky umožňující detekci poměrně širokého spektra závad. Díky změně poměrů v soustavě měnič – motor je nutno zachovat podmínky pro měření v zarušeném prostředí, v opačném případě se snižuje citlivost metody. Při vyhodnocování je navíc potřeba počítat s intermodulačními produkty spínací frekvence měniče, které mohou maskovat charakteristické harmonické vázané na přítomnost určité závady. Díky změněnému způsobu řízení otáček a plynulé změně frekvence napájení při rozběhu nelze použít rozběhovou metodu pro detekci rotorové nesymetrie, lze ji ale nahradit rozbořem postranních pásem pomocí frekvenční analýzy v okolí první harmonické napájení při chodu stroje.

## 9.12. Měření rozptylového elektromagnetického pole

Měření rozptylového elektromagnetického pole stroje patří mezi nepřímé elektrické metody pro diagnostiku AM [I], [VIII]. Rozsah diagnostiky se shoduje s možnostmi diagnostiky měřením a analýzou napájecího proudu stroje (magnetické pole stroje a tím i jeho rozptylová složka jsou „obrazem“ proudu ve vinutí).

Pro vlastní měření se používá čidlo ve formě vzduchové cívky nebo Hallovy sondy. Čidlo se umístí na určité místo na povrchu stroje nebo v jeho bezprostřední blízkosti (pro srovnávací diagnostiku je vhodné definované stabilní umístění např. na kotevním šroubu apod. obr. 21). Z hlediska omezení parazitních vlivů je vhodnější pevné umístění, vylučující indukci přídatného signálu při pohybu (vibracích) sondy.

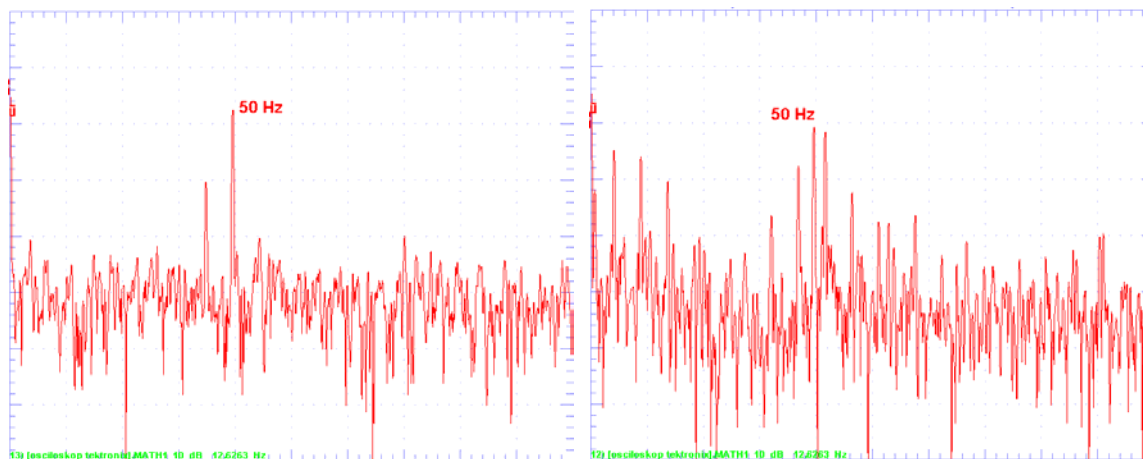


Obr. 21 Příklady umístění měřicí cívky na kostře motoru a srovnání časového průběhu elektromagnetického pole na povrchu motoru měřeného indukční cívkou s průběhem napájecího proudu stroje měřeného MTP.

U stroje napájeného z měniče se v blízkosti stroje nachází kromě měřené elektromagnetické složky i poměrně intenzivní složka elektrostatická, která tvoří s ostatním parazitním vyzařováním komplexní pole. Pro správnou detekci je nutné odstínění čidla od této rušivé složky a zabránění průniku rušení jak do měřicí cívky či sondy tak i do přívodu k záznamovému a vyhodnocujícímu přístroji [11], [58]. Pro ověření možností této metody bylo provedeno srovnání naměřených diagnostických parametrů a jejich vazby na skutečný stav stroje s metodou měření napájecího proudu stroje. Na následujícím obrázku (obr. 22) je srovnání frekvenční analýzy napájecího proudu a rozptylového pole u zatíženého asynchronního motoru bez poruchy. Motor je napájen z měniče frekvence, výstupní frekvence 50 Hz. Charakter spekter je obdobný.

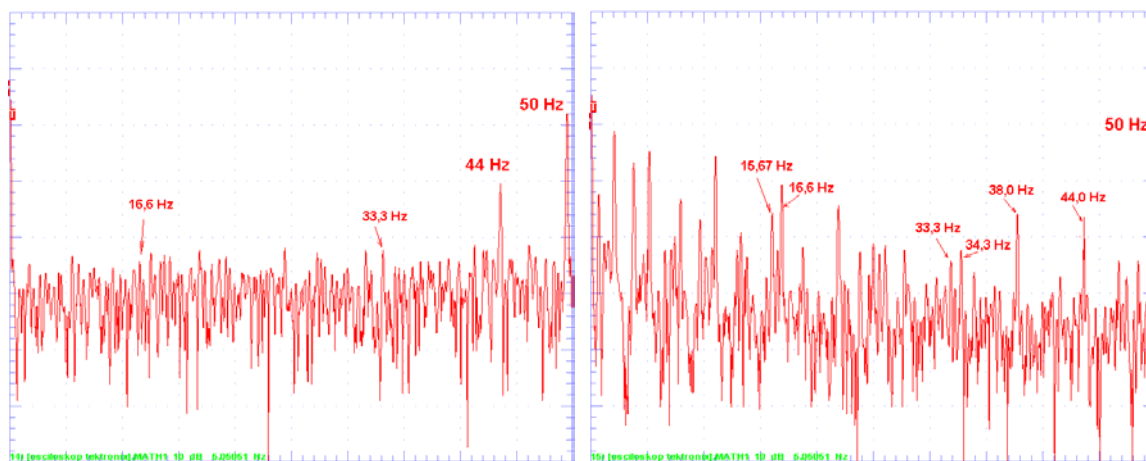


Obr. 22 Srovnání frekvenční analýzy napájecího proudu a mg. pole u dobrého motoru.



Obr. 23 Srovnání frekvenční analýzy napájecího proudu a mg. pole u motoru s elektrickou nesymetrií v rotoru.

U motoru s nesymetrií v rotoru je patrný ve spektrech (obr. 23) určitý rozdíl. Z hlediska diagnostiky této vady by se měly ve spektru objevit frekvence skluzová, otáčková a frekvence postranních pásem. Všechny tyto frekvence lze nalézt na detailu uvedených spekter (obr. 24):



Obr. 24 Detail dolní části spektra proudu a mg. pole po první harmonické.

Frekvence charakteristické pro rotorovou nesymetrii jsou v obou spektrech dobře vyjádřené a čitelné.

**Zhodnocení metody** – měření rozptylového mg. pole je metoda nenáročná na vybavení, umožňující detekci vad jak v mechanické (ustavení, excentricity) tak elektrické části stroje (vinutí). Samotné měření je citlivé na rušení, to však lze úpravami měřicího řetězce (stínění, konstrukční úpravy čidla, oddělené napájení měřicího řetězce) a vyhodnocovacího algoritmu (filtrace rušení na spínací frekvenci) částečně odstranit. Hlavní výhodou metody je bezkontaktní měření bez nutnosti instalace čidel v elektrické části soustavy měnič – motor, metodu tak lze použít i v problematickém prostředí (např. výbušném). Díky výraznému zobrazení frekvenčních čar odpovídajících násobkům otáčkové frekvence lze metodu použít i k bezkontaktnímu měření okamžitých otáček motoru.

## Závěr

V disertační práci jsou podrobně popsány vzájemné vztahy a změny jednotlivých veličin v soustavě měnič – motor a jejich vliv na možnou degradaci funkčních vlastností jednotlivých uzlů asynchronního motoru. Přestože je tato problematika sledována po celou dobu používání regulovaných pohonů s frekvenčním měničem a asynchronními motory, stále se objevuje celá řada nových a dosud nevyřešených problémů, které vnášejí do této oblasti mnoho otázek o efektivním využití, bezpečnosti a spolehlivosti takto koncipovaných technických soustav. Při nepřetržitém procesu vývoje měničů frekvence se navíc některé problémy, které byly považovány za vyřešené, vracejí v nových souvislostech. Cílem první části práce (kapitoly 1 až 6) bylo uceleně popsat ty problémy, které mají na asynchronní motor (jeho jednotlivé součásti) významný vliv, teoreticky i experimentálně ověřit účinnost dosud používaných opatření k eliminaci či omezení nežádoucích jevů a navrhnout jejich zdokonalení (kapitola 7). Všechna navržená opatření směřují k potlačení následků a příznaků, nikoliv k řešení příčiny většiny nežádoucích jevů – neharmonického napájení, strmých hran napájecích impulsů a přítomnosti přepětí. Jednou z možností úplného odstranění většiny nežádoucích vlivů je změna způsobu řízení veličin měniče použitím tzv. „měkkého“ spínání. Tyto měniče jsou v současné době předmětem intenzivního výzkumu [19], [20], [21], [40].

Na rozbor vlivu měniče na motor navazuje druhá část práce (kapitoly 8 a 9) zabývající se možnostmi diagnostiky asynchronního motoru s ohledem na skutečnost jeho napájení z měniče frekvence. Cílem této části práce bylo vybrat relevantní metody pro diagnostiku motoru jako celku i jeho vybraných součástí, prakticky ověřit jejich použití u takto napájeného motoru a navrhnout jejich zdokonalení, úpravu či změnu získávání diagnostické veličiny nebo vyhodnocovacího algoritmu. Hlavním přínosem této části práce je praktické ověření vybraných metod jak ve sterilních podmínkách elektrotechnické laboratoře elektrických strojů tak i přímo při provozních měřeních na malých i velkých strojích v hutních, elektrárenských, teplárenských a důlních podnicích. Část praktických výsledků je uvedena v textu práce, možnosti použití jednotlivých metod jsou pak popsány v dílčích závěrech jednotlivých kapitol a shrnuty do přehledné tabulky v příloze.

Pokračováním práce by mělo být využití prvků umělé inteligence a zapojení expertních či adaptivních systémů v procesu vyhodnocení diagnostických veličin. S jejich pomocí by mělo být možné odstranit subjektivní prvek v rozhodování o diagnóze jako výsledku diagnostiky. Jejich většímu využití zatím brání nedostatek úplných diagnostických dat, zachycujících řetěz příčin, následků a jejich odezvy v diagnostických veličinách, získaný na reálných strojích. Bez těchto údajů je vytvoření kvalitního expertního či neuronového systému nemyslitelné, k jejich získávání by měly napomoci i dílčí závěry této práce.

Stanovené úkoly i cíle byly splněny v dostatečném rozsahu. Vlastním přínosem práce je komplexní zhodnocení změn v asynchronním motoru při změně napájení, jejich vazba na diagnostiku motoru v soustavě, teoretický rozbor vlivu harmonických z napájení na měření i vyhodnocení vybraných metod a praktické ověření navržených úprav. Celá práce je koncipována tak, aby byla přínosem pro obor a její části byly použitelné jak ve výuce tak i v provozní praxi. Problematika diagnostiky motoru s měničem je nová a nebyla dosud souhrnně publikována. Vzhledem ke značnému rozšíření měničů frekvence s napěťovým meziobvodem v oblasti regulovaných pohonů a jejich masivnímu nasazení právě u nízkonapěťových pohonů malých a středních výkonů je řešená problematika velmi aktuální. Znalost příčinné souvislosti jevů v soustavě měnič – motor a možných závad motoru zabraňuje jejich možné dezinterpretaci a je nutným předpokladem efektivní údržby strojů i pohonů. Některé závěry mohou sloužit i k podpoře požadavků na konstrukční úpravy nově vyráběných a omezeně i stávajících asynchronních motorů.

## 10. Literatura

- [1] ABB - Technical Guide No. 5 - *Bearing Currents in Modern AC Drive Systems*
- [2] ABB - *Grounding and cabling of the drive system*, 3AFY 61201998 R0125 r.A, 1998
- [3] Beran, L., Václavík, J.: Diagnostic of induction motors. Sborník konference *ECMS 2003*. Technical University of Liberec, 2003
- [4] Beran, L.: Návrh motoru pro experimentální diagnostiku. Sborník konference *EPVE 2003 - Elektrické pohony a výkonová elektronika*. VUT Brno, 2003
- [5] Brandštetter, P., Búbela, T.: Induction Motor Drive with Voltage Space Vector Modulation If Frequency Inverter, Conference proceeding *VII Sympozjum Podstawowe problemy energoelektroniki i lektromechaniki*, Gliwice – Ustorn, Poland, 1995
- [6] Brandštetter, P.: *Střídavé regulační pohony, moderní způsoby řízení*. VŠB-TUO, 1999
- [7] Búbela, T.: *Aktivní výkonové filtry*, Doktorská disertační práce, VŠB-TUO, 1997
- [8] Collombet, C.: Lupin, J-M., Schonek, J.: Harmonic Disturbances in Networks and Their Treatment. *Cahier Technique Merlin Gerin*, No. 152, 1999
- [9] Čermák, T.: *Elektrické regulační pohony*, Skriptum VŠB-TUO, 1987
- [10] ČSN IEC 50: *Mezinárodní elektrotechnický slovník*, 1993
- [11] ČSN EN 61000-4: Elektromagnetická kompatibilita, část 4: *Zkušební a měřicí techniky*.
- [12] Draxler, K., Kašpar, P., Ripka, P.: *Magnetické prvky a měření*. Skriptum ČVUT Praha, 1999
- [13] Fiorina, J. N.: *Inverters and Harmonics*. Cahier Technique Merlin Gerin, No. 159, 1993
- [14] Hamata, V.: *Hluk elektrických strojů*, ACADEMIA Praha, 1987
- [15] Heller, B. - Hamata, V.: *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*, Československá akademie věd Praha, 1961
- [16] Hora, O., Navrátil, J.: *Regulace elektrických strojů*, SNTL Praha, 1976
- [17] Hrbáč, P.: *Elektrické stroje III*. Skripta VŠB-TUO, 2005
- [18] Chapman, D.: Kvalita elektrické energie – průvodce. Část 3.1. Harmonické – příčiny a účinky. *Elektrotechnika v praxi*, 3/2003
- [19] Chlebiš, P.: *Rezonanční měniče pro střídavé elektrické pohony*. Habilitační práce VŠB-TUO, 1999
- [20] Chlebiš, P., Sládeček, V.: Kvazirezonanční střídač s pomocnými póly. In: *SYMEP'2000 - Mezinárodní sympozium učitelů elektrických pohonů*, TU Košice, červen, 2000
- [21] Chlebiš, P., Sládeček, V.: Three Phase Soft Commutation Auxiliary Resonant Pole Inverter. In: *International Conference on Electrical Drives and Power Electronics EDPE 2001*, The High Tatras Slovakia
- [22] Chmelík, K., Čech, V., Bernat, P.: *Namáhání asynchronních motorů při napájení ze statických měničů*. Závěrečná zpráva k úkolu GAČR r.č. 102/96/0815, Ostrava, 1998
- [23] Chmelík, K.: *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*, Skriptum VŠB –TU, Ostrava 2002

- [24] Chmelík, K., Čech, V., Foldyna, J.: Vliv ložiskových proudů na ložiska. *Technická diagnostika 1/2006*
- [25] Chmelík, K., Pospíšilík, J.: *Elektrické stroje v energetice*. Skripta VŠB-TUO, 2003
- [26] Chmelík, K., Pospíšilík, J.: Možnosti omezení průchodu proudu ložiskem elektromotoru, Sborník konference *ELEKTRO 2004*, Žilina
- [27] Chmelík, K., Pospíšilík, J.: Způsoby poškození ložisek elektrickým proudem, Sborník konference *Kvalita a spolehlivost strojov*, Nitra 2004
- [28] IEC 60034-25: *Rotating electrical machines - Part 25: Guide for the design and performance of cage induction motors for converter supply*
- [29] Kopylov, L. P.: *Stavba elektrických strojů*, SNTL Praha 1988
- [30] Kreidl, M. a kol.: *Diagnosticke systémy*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2001
- [31] Krumpolc, E.: Hřidelová napětí a ložiskové proudy u asynchronních strojů, *Technika elektrických strojů – teoretické číslo 1983*, VÚES Brno
- [32] Kůs, V.: Harmonické polovodičových měničů, *Automatizace 3/1999*
- [33] Kůs, V.: Vznik vyšších napětí v soustavě měnič – motor – kabel. Sborník konference *Diagnostika 95*, Plzeň 1995
- [34] Kůs, V.: Napětové namáhání vinutí asynchronních motorů při napájení z měničů kmitočtu. Sborník konference *Diagnostika '97*, Plzeň 1997
- [35] Leitl, R.: *Spolehlivost elektrotechnických systémů*, SNTL Praha, 1990
- [36] Měřička, J., Zoubek, Z.: *Obecná teorie elektrického stroje*, SNTL Praha, 1973
- [37] Neborák, I., Sládeček, V.: *Oteplovací charakteristiky motoru při napájení z různých typů měničů kmitočtu*. Sborník semináře Elektrické pohony Drive '97, Ostrava, 1997
- [38] Palacký, P.: *Střídavý regulační pohon s asynchronním motorem a identifikací rotorové časové konstanty*. Doktorská disertační práce, VŠB-TUO, 1999
- [39] Palacký, P.: *Metody řízení střídavých regulačních pohonů s asynchronními motory*. Habilitační práce, VŠB-TUO, 2004
- [40] Pavelek, T., Sládeček, V.: Varianty a způsoby řešení měkkého spínání, používané u kvazirezonančních měničů. Sborník konference *SYMEP 2002, XIX Mezinárodní sympozium učitelů elektrických pohonů*. Liberec, 24. – 26.6. 2002
- [41] Pavelka, J., Čerovský, Z.: *Výkonová elektronika*, ČVUT Praha, 2000
- [42] Pavlata, V.: Základní konstrukční zásady měničů frekvence. *Elektro 11/2001*
- [43] Peroutka, Z.: Přepětové jevy vznikající při napájení asynchronního motoru z frekvenčního měniče. Sborník konference *Elektroenergetika a silnoprúdová elektrotechnika 2000*, VŠB-TUO, 2000
- [44] Peroutka, Z.: Namáhání izolace motorů, napájených z napětových střídačů. *Sborník konference Diagnostika '01*, Plzeň 2001
- [45] Pospíšilík, J.: Hřidelové napětí a ložiskové proudy. Sborník konference *Ph.D. workshop Wofex 2003*. Ed. Václav Snášel, VŠB-TU Ostrava, 2003
- [46] Rockwell Automation Mequon: *Straight Talk About PWM AC Drive Harmonic Problem and Solutions*

- [47] Ruppert, M.: Analýza proudů odebíraných polovodičovými měniči za reálných podmínek, *XXVI Konference o elektrických pohonech Plzeň 2001*
- [48] Sládeček, V.: *Harmonická analýza výstupního napětí měniče*. VŠB-TUO 2005
- [49] Sládeček, V.: Třífázový střídač s měkkým spínáním s pomocnými rezonančními póly. In: *WOFEX 2004 Ostrava*, VŠB-Technical University of Ostrava, 2004.
- [50] Vaculíková, P., Vaculík, E.: *EMC elektrotechnických systémů*. Grada 1998
- [51] Valouch, V.: Způsoby řízení pohonu s asynchronním strojem a střídačem napětí. *Elektrotechnický obzor* 74 (1985), č.3, str. 150-159.
- [52] Whitaker, J. C.: *AC Power systems handbook*, CRC Press Inc., USA,
- [53] Záliš, K.: *Částečné výboje na elektrických strojích točivých*. Habilitační práce. ČVUT FEL v Praze, Praha 1997
- [54] Záliš, K.: Vývoj vyhodnocovacího systému pro měření částečných výbojů on-line. Sborník mezinárodní konference *Diagnostika '01, Plzeň 2001*
- [55] Záliš, K., Beranová, L.: Druhy rušení, ovlivňující měření částečných výbojů a jejich eliminace. Sborník mezinárodní konference *Diagnostika '01, Plzeň 2001*
- [56] Záliš, K.: Vyhodnocování diagnostických měření izolačních systémů elektrických strojů pomocí prvků umělé inteligence. *Technická diagnostika* 1/2006
- [57] Zoubek, Z., Měřička, J.: *Elektrické stroje*, ČVUT Praha, 1983
- [58] Žáček, J.: Elektromagnetická kompatibilita a projektování elektrotechnických systémů. *Automatizace* 41, 1998

## 11. Internetové zdroje

- [59] [www.atd.cz](http://www.atd.cz) - *Asociace technických diagnostiků*
- [60] [www.fe.i.vsb.cz/wofex/](http://www.fe.i.vsb.cz/wofex/) - *workshop doktorandů FEI VŠB-TUO*
- [61] [www.keelynet.com/tesla/](http://www.keelynet.com/tesla/) - *Teslovy patenty*
- [62] [www.newport.cz](http://www.newport.cz) - *Měřicí přístroje, analyzátoři ozónu*
- [63] [www.termovize.com](http://www.termovize.com) - *termovizní měření a principy*
- [64] [www.tmvcs.cz](http://www.tmvcs.cz) - *infračervené zobrazovací metody teplotních polí*

## 12. Publikace

### **Vybrané publikace související s problematikou disertační práce:**

- I. Bernat, P., Koval, L.: *On-line diagnostika elektrických strojů točivých*, Sborník semináře Elektrické pohony - DRIVE '98, Ostrava, 1998, ISBN 80-7078-544-6
- II. Bernat, P.: *On-line diagnostika elektrických strojů točivých*, Zborník prednášok II. vedeckej a odbornej konferencie Nové smery v diagnostike a opravách elektrických strojov a zariadení, Žilina, 1998, ISBN 80-7100-489-8
- III. Chmelík, K., Bernat, P.: Použitelné diagnostické metody pro zjišťování poruch asynchronních motorů, sborník *TRANSFER* 99, Brno, ISBN 80-214-1341-7
- IV. Bernat, P.: Diagnostická měření v soustavě měnič - motor, *Vybrané problémy elektrických strojů a pohonů*, 1999, Svratka
- V. Bernat, P.: Vybrané problémy provozní diagnostiky elektrických strojů, *DIAGNOSTIKA '99*, Plzeň, ISBN 80-7082-544-8
- VI. Bernat, P.: Negativní vliv napájení z měniče frekvence na jednotlivé části asynchronního motoru, *DIAGNOSTIKA '01*, Plzeň, ISBN 80-7082-742-4
- VII. Bernat, P.: Měření ložiskových proudů při napájení motoru z měniče frekvence, sborník konference *DIAGNOSTIKA '03*, Plzeň, ISBN 80-7082-952-4
- VIII. Chmelík, K., Bernat, P., Pospíšilík, J., Čech, V.: Shaft voltages and bearing Currents, *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava*, Řada elektrotechnická, Ostrava 2003, ISBN 80-248-0223-6
- IX. Chmelík, K., Bernat, P.: Vliv měničů frekvence na ložiskové proudy asynchronních motorů, Sborník *XXVIII. celostátní konference o el. pohonech*, Česká elektrotechnická společnost, 2003, ISBN 80-02-1563-0
- X. Bernat, P., Chmelík, K.: Diagnostika asynchronního motoru, *DIS 2004*, Košice, ISBN 80-232-0237-5
- XI. Sládeček, V., Hlisnikovský, P., Bernat, P., Schindler, I.: Rekonstrukce regulovaných pohonů válcovací linky tandem na VŠB-TU FMMI Ostrava, *XXIX. konference Elektrické pohony Plzeň 2005*, ISBN 80-02-01733-1
- XII. Bernat, P.: Možnosti diagnostiky asynchronního motoru napájeného z měniče frekvence, sborník konference *DIAGNOSTIKA '05*, Plzeň, ISBN 80-7043-368-X

(Další publikace na <http://home.vsb.cz/petr.bernat>)

## Příloha

# Souhrn metod vhodných pro diagnostiku asynchronního motoru napájeného z měniče frekvence

Diagnostická metoda	Diagnostikovaná část stroje nebo závada	Měřený parametr	Použitelnost metody při napájení stroje ze sítě / měniče	Možnost měření za chodu nebo on-line	Dodatečné podmínky či omezení
Měření izolačního stavu	Izolační systém – izolace vinutí vůči kostře a mezi fázemi navzájem	Izolační odpor, polarizační index	Ano/ano	Ne/ne	Odpojení stroje, odpojení přívodního kabelu, měření při provozní teplotě stroje
Měření izolačního stavu pomocí unikajícího proudu	Izolační systém – izolace vinutí vůči kostře	Rozdílový proud v pracovních vodičích	Ano/ano s omezením	Ano/ano	Instalace rozdílového transformátoru, odrušení, malá citlivost
Kontrola vinutí rázovou vlnou	Izolační systém vinutí, zkratů, svody	Rezonanční odezva na napěťový ráz	Ano/ano	Ne/ne	Odpojení stroje, jen srovnávací metoda
Zkoušky přiloženým napětím	Izolační systém	Izolační odpor, proud izolací, průrazné napětí	Ano/ano	Ne/ne	Měření může být destruktivní
Vizuální kontrola	Stroj komplexně	Utahovací momenty, technický stav všech uzlů stroje	Ano/ano	Ne/ne	Demontáž stroje, některé parametry nelze vyhodnotit objektivně
Chemická a strukturní analýza	Izolační systém, chladiva, maziva, ložiska a pohyblivé součásti	Diferenční termická analýza, chromatografie, elektronová mikroskopie	Ano/ano	Ne/ne	Demontáž stroje, odběr vzorků je částečně nebo plně destruktivní, omezená vhodnost pro malé stroje
Měření oteplení (přímé)	Izolační systém, konstrukční součásti, ložiska	Teplota (lokální v místě umístění čidla)	Ano/ano s omezením	Ano/ano	Vestavěná čidla teploty, odrušení
Měření oteplení (nepřímé - termovize)	Izolační systém, konstrukční součásti, ložiska	Teplota komplexně	Ano/ano	Ano/ano	Měří jen na „viditelných“ částech stroje

Diagnostická metoda	Diagnostikovaná část stroje nebo závada	Měřený parametr	Použitelnost metody při napájení stroje ze sítě / měniče	Možnost měření za chodu nebo on-line	Dodatečné podmínky či omezení
Měření vibrací	Mechanické součásti, ustavení, ložiska, elektrické a magnetické nesymetrie a excentricita	Hladina vibrací, zrychlení, směrové rozložení	Ano/ano	Ano/ano	Instalace čidel nebo měřicích bodů, odrušení
Měření hřídelových napětí	Elektromagnetická nesymetrie, ložiska	Napětí na hřídeli a hřídelové napětí	Ano/ano	Ano/ano s omezením	Přístupné oba konce hřídele pro přiložení snímacího kartáče
Měření napětí na ložisku	Ložiskový uzel, možné ohrožení ložiska ložiskovými proudy	Napětí mezi jednotlivými částmi ložiska	Ano/ano	Ano/ano s omezením	Přístupný konec hřídele pro přiložení snímacího kartáče, možnost rozpojení pomocného uzemnění
Měření proudu ložiskem a pomocnými drahami	Ložiskový uzel, možné ohrožení ložiska ložiskovými proudy	Proud ložiskem nebo pomocným přemostěním či uzemněním	Ano/ano	Ano/ano s omezením	Přístupný konec hřídele pro přiložení snímacího kartáče, instalovaný pomocný kartáč
Měření napětí na konstrukčních částech stroje	Ložiskový uzel, pracovní a pomocné izolace	Napětí mezi částmi stroje navzájem a mezi zemí, napětí na zkoumané části izolace	Ano/ano	Ano/ano	Znalost konfigurace pomocných izolací, možnost odpojení či demontáže příslušenství
Analýza napájecího proudu	Elektrické a magnetické nesymetrie, excentricita, mechanické vady, ustavení	Napájecí proud stroje, frekvenční spektrum	Ano/ano	Ano/ano	Odrůšení měření a vyhodnocení při napájení z měniče
Rozběhová metoda	Elektrická nesymetrie rotorového vinutí	Napájecí proud stroje nebo rozptylové elektromagnetické pole během rozběhu motoru	Ano/ne	Ano/ano	Rozběh delší než 2 s s přímým připojením na síť, u napájení z měniče nelze použít.
Měření rozptylového pole	Elektrické a magnetické nesymetrie, excentricita, mechanické vady, ustavení	Rozptylové elektromagnetické pole, frekvenční spektrum	Ano/ano	Ano/ano	Odrůšení měření a vyhodnocení při napájení z měniče

Diagnostická metoda	Diagnostikovaná část stroje nebo závada	Měřený parametr	Použitelnost metody při napájení stroje ze sítě / měniče	Možnost měření za chodu nebo on-line	Dodatečné podmínky či omezení
<b>Měření částečných výbojů</b>	Izolační systém vinutí, globální stav a lokalizace vad	Četnost a intenzita č.v.	Ano/ano s omezením	Ano/ano s omezením	Eliminace spínacího rušení ve vyhodnocovacím algoritmu, použití bezkontaktního měření (ultrazvuková sonda)
<b>Měření hluku a akustické emise</b>	Mechanické součásti, excentricity a nesymetrie, ustavení, výbojová činnost	Akustická emise, frekvenční spektrum	Ano/ano s omezením	Ano/ano s omezením	Globální měření je málo průkazné, lepší výsledky v lokalizaci závad
<b>Měření koncentrace ozónu</b>	Izolační systém vinutí, nepřímá detekce částečných výbojů	Koncentrace O <sub>3</sub> a NO <sub>x</sub>	Ano/ano	Ano/ano	Vzduchem chlazený stroj s průtočným chlazením, možnost odběru vzduchu v bezprostřední blízkosti vinutí

