

IDENTIFIKACE PORUCH ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE U MOTORŮ 6 kV

Ing. Mečislav Hudeczek, Ph.D., Stonavská 287, 735 43 Albrechtice
mecislav.hudeczek@hudeczek.cz, www.hudeczek.cz

1. Úvod

V mnoha publikacích jsou popsány příčiny vzniku nesymetrie elektromagnetického pole elektromotoru. Patří mezi ně např.: nesymetrie vzduchové mezery, přesycování zubů statoru a rotoru, nevhodný poměr počtu statorových a rotorových drážek, nevhodné natočení drážek rotoru, excentricita rotoru, vliv uspořádání vinutí s několika paralelními větvemi u větších strojů s napětím $U < 1000V$, vliv neharmonického napájení atd. V průběhu diagnostických měření po dobu posledních třinácti let na kombajnových elektromotorech a motorech hlavních důlních čerpadel v důlních provozech a provozech tepláren a elektráren na elektromotorech čerpadel a ventilátorů a taktéž přejímek nových elektromotorů pro Teplárny Karviná, a. s. přímo u výrobce byly zjištěny dvě nové příčiny vzniku nesymetrie elektromagnetického pole:

- K poškození magnetického obvodu statoru elektromotoru a následně k nesymetrii elektromagnetického pole dochází také v důsledku tzv. bourání vinutí. Stator musí být vhodnou metodou zahřátý na teplotu měknutí impregnačního laku vinutí a následně vinutí vytáhnuto. Tyto teploty se pohybují v těsné blízkosti teploty kdy statorové plechy ztrácejí své zaručované magnetické vlastnosti. Pokud rozehrívání statoru elektromotoru je prováděno nevhodnou metodou např. plynovými hořáky, které svůj plamen přímo směřují na statorové plechy, dochází k lokálnímu nevhodnému prohrátí statorových plechů. Lokálně nadměrně oteplený stator má větší magnetické ztráty a menší moment.
- Při nákupu dynamových plechů pro výrobu statorových a rotorových plechů ne vždy jsou vybaveny atestem kvality z hlediska magnetických vlastností. Nekvalitní tabule dynamových plechů ne vždy mají po celé ploše přesně stejnou tloušťku. Při prostřihávání a následném skládání jednotlivých plechů délka je nestejnorodá a způsobuje nesymetrii elektromagnetického pole.

Při provádění bezdemontážní technické diagnostiky na teplárnách a elektrárnách a taktéž hornictví jsem tento vliv experimentálně ověřil přímo na provozovaných strojích a následně stanovil metodiku měření a taktéž vyhodnocování naměřených hodnot. Přímo v provozních podmínkách jsem zjistil 13 x nesymetrii elektromagnetického pole elektromotoru a jeho negativní působení na poháněný mechanismus.

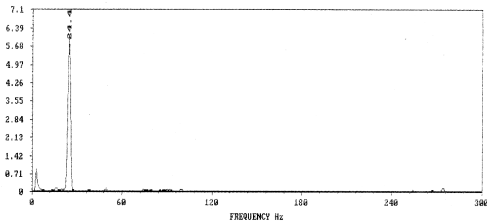
2. Identifikace poruchy elektromotoru zapříčiněné nesymetrii elektromagnetického pole a jeho vliv na poháněný mechanismus

Ve všech doposud zjištěných případech poruchy elektromotoru zapříčiněných nesymetrií elektromagnetického pole se projevují na poháněném mechanismu i na samotném elektromotoru vibracemi a to v oblasti hodnocení mezních stavů jako ještě přípustný nebo nepřípustný podle VDI 2056. Poruchu lze identifikovat při zatížení na první harmonické frekvenčního spektra viz obrázek č. 1. Chvění na první harmonické odpovídá nevyváženosti rotujících hmot. Hodnoty chvění jsou na elektromotoru o 15 % větší od hodnot chvění na poháněném mechanismu v některých případech jsou stejné. Při zjištění tohoto stavu každý diagnostik začne vyvažovat. Nejprve poháněný mechanismus (ventilátor) ve dvou rovinách. Následně na ventilátoru elektromotoru jeho rotor. Po spojení spojky, výsledky se zlepší o zbytkovou nevyváženost za předpokladu stavu, že soustrojí bylo dobré. Hodnoty chvění po těchto opatřeních se zlepší cca o 20% I_p . Při tomto zlepšení, soustrojí má nadále vibrace nevyhovující. Následně je provedena demontáž elektromotoru a vyvážen na vyvažovací stoličce jeho rotor. Po montáži elektromotoru a proměření vibrací je stav stejný. Tento proces probíhá několik dnů. Zde popisují skutečný případ, který se stal v jedné organizaci, kde po dvou týdnech pokusů se snížením vibrací na ventilátoru jsem byl pozván abych se k danému problému vyjádřil.

Tak jako předchůdci jsem začal vyvažovat, s tím rozdílem, že pro vyvažování jsem použil starou graficko-početní tříbodovou metodu. Z moderní techniky jsem použil pouze data kolektor pro přesné měření první harmonické vibrací na dané vyvažovací rovině. Důvodem použití staré graficko-početní tříbodové metody vyvažování byla skutečnost, že sonda pro měření fáze při předchozím vyvažování na jiném stroji byla mechanicky zničená. Při třetím vyvažovacím běhu jsem zjistil, že grafické zjišťování místa a hmotnosti vyvážky nemá řešení. Tím podstatné pro vyvažování nebylo zjištěno. Vyvažování jsem opakovl několikrát se stejným výsledkem. Kolegové vyvažovali na moderním vyvažovacím přístroji firmy Schenck. Tento přístroj pro vyvažování automaticky vedl celý vyvažovací proces a taktéž vždy určil místo a hmotnost vyvážky. Po přípevnění vyvážky na vyvažovací rovinu výsledek z hlediska snížení chvění byl nulový.

SINGLE SPECTRUM PLOT

SET: KOTEL C.13 TYPE: FFT DATE: 16-SEP-92 17:50:15
 POINT ID: MLYN.VEN.131 MX1 13 DESC: Elektrarna Trebovice Kotel .13
 WINDOW: HANNING LINES: 1600 AVER: 6 FREQ: 0 - 1500 Hz
 DETECT: RMS RPM: 1450 THRESHOLD: 8.0000 UNITS: mm/sec
 FREQ: 300.00 AMP: 0.0257 ORDER: 12.414 DEG: ---

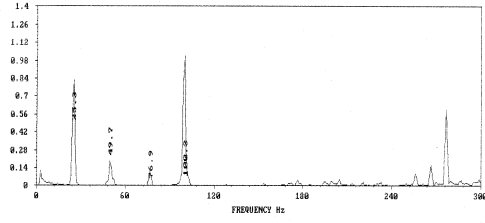


IDENTIFICATION OF SPECTRAL PEAKS ABOVE THRESHOLD						
NO.	AMP.	FREQ.	ORDER	NO.	AMP.	FREQ.
* 1.	6.0634	24.4	1.009			
SPECTRAL ENERGY SUMMARY						
OVERALL	SYNC	SUBSYNC	NONSYNC			
6.779	6.569	0.8865	1.42			

Obrázek č. 1

SINGLE SPECTRUM PLOT

SET: KOTEL C.13 TYPE: FFT DATE: 17-SEP-92 15:21:51
 POINT ID: MLYN.VEN.131 MY1 13 DESC: Elektrarna Trebovice Kotel .13
 WINDOW: HANNING LINES: 1600 AVER: 6 FREQ: 0 - 1500 Hz
 DETECT: RMS RPM: 1499 THRESHOLD: 1.6000 UNITS: mm/sec
 FREQ: 0.00 AMP: 0 ORDER: 0.000 DEG: ---



IDENTIFICATION OF SPECTRAL PEAKS ABOVE THRESHOLD						
NO.	AMP.	FREQ.	ORDER	NO.	AMP.	FREQ.
* 1.	1.745	1.49	0.1274			
SPECTRAL ENERGY SUMMARY						
OVERALL	SYNC	SUBSYNC	NONSYNC			
1.745	1.49	0.1274	0.9007			

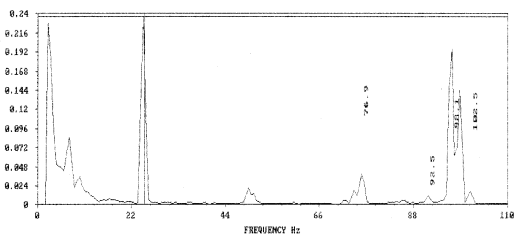
Obrázek č. 2

Příčina neúspěchu s moderním vyvažovacím přístrojem byla v tom, že algoritmus vyvažování má přístroj napevno vypálen do mikroprocesoru a vždy musí určit lehké místo kde se připojí vyvážek.

Z dřívějších vyvažování pomocí graficko početní metody jsem byl poučen, že v případě kdy při grafickém řešení vyvážku kruhy k_1, k_2, k_3 se nesejdou viz obrázek č. 6 je celá soustava nelineární. Nelinearity v předchozích případech se projevovaly v tím, že byly uvolněné svorníky v základech, které kotvily konstrukci stroje. Dále nelinearita se projevovala když byly značně měkké nosné konstrukce rámu stroje atd. Při vyvažování ventilátoru jsem nezjistil konstrukční závady, které by způsobovaly nelinearitu. Po dalších úvahách jsem nechal rozpojit spojku a proměřil vibrace elektromotoru bez zatížení. Celková efektivní hodnota vibrací elektromotoru při chodu naprázdno byla na úrovni stavu dobrého což by nasvědčovalo, že elektromotor je dobrý. Frekvenční analýzou viz. obrázek č. 2 jsem zjistil, že na dvojnásobku síťové frekvence tj. 100 Hz je amplituda větší od první harmonické. Z dřívějších diagnostických měření jsem věděl, že při této konfiguraci frekvenčního spektra je ve stroji anomálie a stroj nutno zastavit a opravit. Dále jsem věděl, že na této harmonické se u elektromotorů vyskytují závady elektromagnetického pole. Nechal jsem elektromotor vyměnit i při značných protestech provozních pracovníků, protože výměna elektromotoru byla značně obtížná. Po výměně elektromotoru vibrace celého stroje byly na mezní hodnotě dobré.

SINGLE SPECTRUM PLOT

SET: KOTEL C.4 TYPE: FFT DATE: 29-JUL-92 11:39:18
 POINT ID: MLYN.VEN.142 MX1 13 DESC: Elektrarna Trebovice Kotel .4
 WINDOW: HANNING LINES: 400 AVER: 6 FREQ: 0 - 250 Hz
 DETECT: RMS RPM: 1499 THRESHOLD: 0.4000 UNITS: mm/sec
 FREQ: 25.00 AMP: 0.2352 ORDER: 1.001 DEG: ---



IDENTIFICATION OF SPECTRAL PEAKS ABOVE THRESHOLD						
NO.	AMP.	FREQ.	ORDER	NO.	AMP.	FREQ.
* 1.	0.2352	25.0	1.001			
* 2.	0.2283	2.5	0.100			
* 3.	0.1961	98.1	3.927			
SPECTRAL ENERGY SUMMARY						
OVERALL	SYNC	SUBSYNC	NONSYNC			
0.4548	0.2779	0.2877	0.2169			

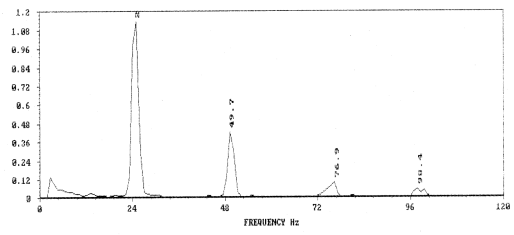
Obrázek č. 3

Na obrázku č. 3 je uvedeno spektrum vibrací náhradního elektromotoru, který byl zkušebně za účelem zjištění jeho technického stavu. Po provedeném měření jsem jednoznačně určil, že elektromotor je vadný. Příčinou tohoto tvrzení byla frekvenční analýza spektra vibrací, kde na dvojnásobku síťové frekvence je amplituda o velikosti 2/3 základní harmonické a navíc má postranní pásma.

Na obrázku č. 4 je uvedeno spektrum dalšího elektromotoru téhož typu a parametrů. Elektromotor byl označen jako dobrý a mohl být použit v provozu. Spektrum vibrací tohoto elektromotoru je možno označit jako školní příklad. Každý dobrý stroj má spektrum o takovémto průběhu.

SINGLE SPECTRUM PLOT

SET: ZKUSEBNA TREBOVICE TYPE: FFT DATE: 30-JUL-92 07:07:33
 POINT ID: MOTOR .1 MY1 13 DESC: Motor na zkusební před nasazením
 WINDOW: HANNING LINES: 1600 AVER: 6 FREQ: 0 - 1500 Hz
 DETECT: RMS RPM: 1450 THRESHOLD: 1.6000 UNITS: mm/sec
 FREQ: 120.00 AMP: 0.0023 ORDER: 4.966 DEG: ---



IDENTIFICATION OF SPECTRAL PEAKS ABOVE THRESHOLD						
NO.	AMP.	FREQ.	ORDER	NO.	AMP.	FREQ.
* 1.	1.1346	25.3	1.047			
SPECTRAL ENERGY SUMMARY						
OVERALL	SYNC	SUBSYNC	NONSYNC			
1.361	1.284	0.1784	0.4152			

Obrázek č. 4

3. Metoda vyvažování nelineárních soustav

Třípolohová metoda je známa a je nejvýhodnější pro vyvažování v provozních podmínkách a taktéž na vyvažovacích stolicích staršího typu, které mají dobrý technický stav mechanické části stolice ale mechanické nebo elektronické zařízení pro určení místa a hmotnosti vyvážku je neopravitelné. Výhodnost metody spočívá v tom, že při relativně malém počtu běhů lze i bez měření fáze určit polohu vyvážku. Největší přínos této metody je v tom, že při její pravidelné aplikaci jsem zjistil, že lze pomocí ní rozpoznat zda vyvažovaný stroj je nebo není lineární. Nelineární stroj se nedá vyvážit žádnou vyvažovací metodou ani přístrojem. Třípolohovou metodu používám třináctý rok.

Postup vyvažování:

- Vyvažovaný stroj např. ventilátor viz obrázek č. 7 se připojí pod napětí a když otáčky stroje se ustálí na jmenovitých otáčkách (u vyvažovacích stolic stačí otáčky 750 ot/min^{-1} , otáčky při všech bězích musí být stejné) je možné zahájit měření vibrací. Měření vibrací provádíme vždy v jednom bodě a to záleží, kterou vyvažovací rovinu chceme vyvažovat. Měřicí bod L4V viz obrázek č. 7 musí být vyznačen tak aby byla kdykoliv zachována opakovatelnost měření. V tomto bodě L4V se změří vibrace, pokud chceme vyvažovat oběžné kolo ventilátoru, přístrojem, který dovede jako výsledek uvést frekvenční spektrum alespoň v rozsahu od 0 do 200Hz v efektivní hodnotě, v lineárních souřadnicích a mohutnost kmitání v rychlosti v $[\text{mms}^{-1}]$. Na první harmonické odečteme hodnotu amplitudy X_v v rychlosti v $[\text{mms}^{-1}]$. Na výkrese sestrojíme kružnici k_0 o poloměru rovném hodnotě X_v . Někdy je nutné kreslit v měřítku pro lepší rozlišitelnost. Stroj zastavíme a tím je ukončen první běh.

- Při zastaveném a zajištěném stroji proti nahodilému zapnutí rozdělíme oběžné kolo na tři části vzájemně posunutě o 120° . Na každé části vyznačíme bod na stejném poloměru a označíme je čísly 1, 2, 3. Do těchto bodů budou postupně připevňovány pomocné vyvážky W a při stejných otáčkách budou proměřeny vibrace v bodě L4V a odečteny hodnoty amplitud X_{v1} , X_{v2} , X_{v3} . Po změření těchto amplitud je ukončen druhý, třetí a čtvrtý běh. Hmotnost pomocného vyvážku se volí podle empirického vztahu $m_w = \frac{X_v M}{r_w} [\text{kg} \cdot 10^{-3}]$, kde X_v je hodnota amplitudy změřená při prvním běhu v bodě

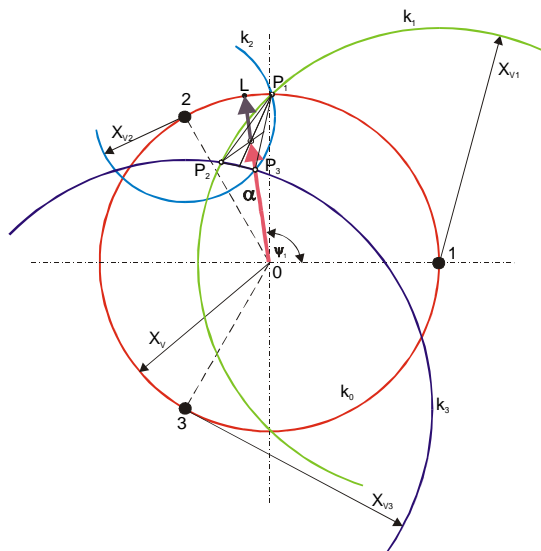
L4V, M je hmotnost rotujících částí (oběžné kolo, hřídel, spojka), r_w je poloměr pomocného vyvážku udávajícího vzdálenost jeho těžiště od osy rotace. Tímto vztahem se lze dobře řídit při určování pomocného vyvážku avšak je nutná velká zkušenost při vyvažování.

- Z naměřených hodnot se graficky určí příčinkový činitel α , potřebný pro výpočet hmotnosti m_v hledaného vyvážku (obr. 5), takto:

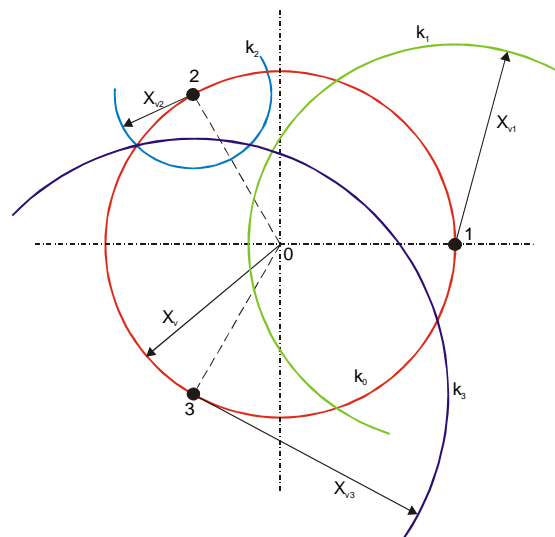
- kolem zvoleného počátku O se opíše kružnice k_0 poloměrem rovným X_v ;
- na kružnici k_0 se vyznačí body 1, 2, 3 odpovídající místům připojování pomocného vyvážku W;
- kolem bodu 1 se opíše kružnice k_1 poloměrem X_{v1} , kolem bodu 2 kružnice k_2 poloměrem X_{v2} a kolem bodu 3 kružnice k_3 poloměrem X_{v3} ; všechny tři kružnice by se teoreticky měly protnout v jednom bodě P. Vlivem nelineárních vlastností měřené soustavy a vlivem určitých nepřesností měření se dostanou obvykle tři průsečíky P_1 , P_2 , P_3 ; jejich spojením vznikne trojúhelník, jehož plocha je určitou mírou nelinearity soustavy, popřípadě nepřesností měření;
- spojnice těžiště $\Delta P_1 P_2 P_3$ s bodem O je příčinkový činitel α ; jeho směr určuje tentokrát rovinu nevyváženosti zcela jednoznačně, přičemž průsečík α s k_0 udává „lehké místo“ L;

hmotnost m_v hledaného vyvážku V se určí ze vztahu $m_v = \frac{X_v}{\alpha} m_w \frac{r_w}{r_v} [\text{kg} \cdot 10^{-3}]$

- vypočtený vyvážek o hmotnosti m_v se připojí do místa L a při stejných otáčkách jako dříve se změří amplituda X_v^* což reprezentuje pátý běh;
- nedosáhne-li se tímto vyvažovacím krokem žádaného stupně vyvážení, je třeba celý postup opakovat; pomocný vyvážek se volí úměrně hodnotě X_v^* .



Obrázek č. 5



Obrázek č. 6

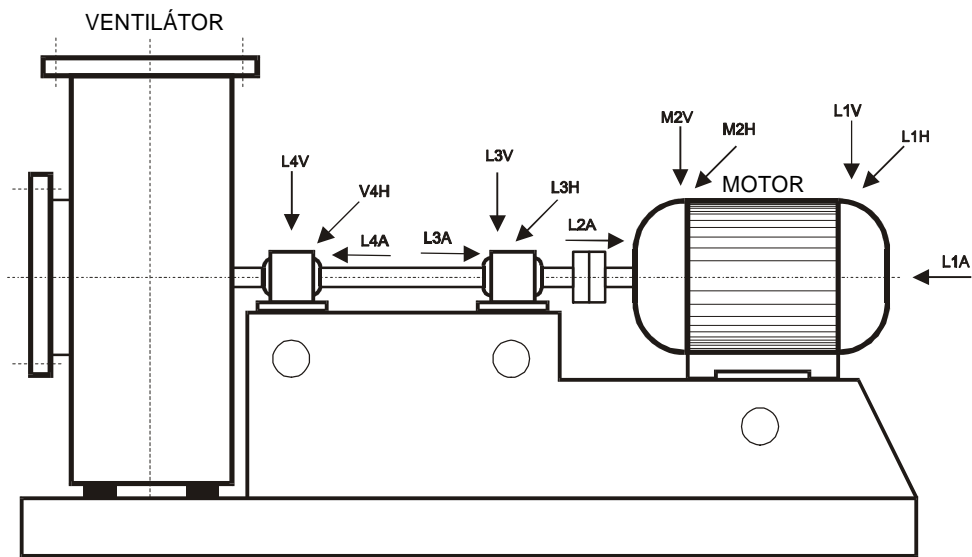
Při tomto vyvažování nutno dbát na bezpečnost a to z hlediska protipožárního při svařování jednotlivých pomocných vývažků do jednotlivých bodů a taktéž z hlediska zajištění stroje proti nahodilému zapnutí. U elektromotorů je nutné dodržet výrobcem stanovenou čekací dobu mezi jednotlivými zkušebními běhy. Nedodržetím čekací doby hrozí tepelné poškození vinutí elektromotoru a následný elektrický zkrat.

Pokud se všechny tři kružnice neprotknou vlivem nelineárních vlastností měřené soustavy a nevytvoří tři průsečíky P_1 , P_2 , P_3 viz obrázek č. 6 měření je nutno zopakovat a pokud další výsledek je stejný soustava je jednoznačně nelineární. Nelinearitu je nutno hledat v prasklém základovém rámu, měkké nosné konstrukci ventilátoru, uvolnění oběžného kola v náboji atd. Pokud závada není nalezená v konstrukčně mechanické části soustrojí, je nutné rozpojit spojku a elektromotor proměřit při chodu bez zatížení v měřících bodech viz obrázek č. 7. Pokud naměřená spektra budou podobná frekvenčním spektrům na obrázcích č. 3 a č. 4 elektromotor nutno vyměnit za nový. Elektromotor, který vykazuje takováto frekvenční spektra má poškozené elektromagnetické pole. Ve většině případů se motor nedá opravit. Závada je konstrukčně výrobního charakteru. Náklady na opravu převyšují pořizovací náklady na nový elektromotor. Na Teplárně Karviná byl proveden pokus na elektromotoru, který jsem určil jako elektromotor s poškozeným elektromagnetickým polem. Elektromotor byl poslán do NH Ostrava na elektrickou brzdu. Při zatížení elektromotoru na jmenovitý proud, v elektromotoru nastal tepelný průraz ve vinutí s následným zkratem. V provozních podmínkách tento motor pracoval se zvětšenými vibracemi a nedošlo k tepelnému poškození vinutí protože nebyl zatížen na jmenovitý výkon. Na základě tohoto Teplárny Karviná vystavila objednávku na stanovení mezních hodnot pro nákup nových elektromotorů.

Přejímky takto vyrobených elektromotorů jsou u výrobce prováděny na základě výsledků měření vibrací při požadavku dodržení mezních hodnot, které jsem stanovil. Takto nakoupených elektromotorů o výkonu od 0,2 MW do 1,2 MW je provozováno v současné době na Teplárně Karviná sedm. Některé z těchto elektromotorů jsou v provozu již paty rok bez jakýchkoliv problémů a poruch.

4. Závěr

Výše uvedeným bylo jednoznačně prokázáno, že poruchy elektromagnetického pole v elektromotorech mají zásadní vliv na poháněný mechanismus. Při zatížení elektromotoru poháněným mechanismem se značné vibrace projevují na první harmonické frekvenčního spektra vibrací. Při chodu naprázdno hodnota vibrací je malá a projevuje se především ve spektru vibrací na frekvenci odpovídající dvojnásobku frekvence sítě. Pro identifikaci poruchy elektromagnetického pole elektromotoru je nejlépe použít grafickou početní tříbodovou metodu vyvažování.



Obrázek č. 7