



Rozeznáváme tři základní složky vibrací elektrických strojů točivých

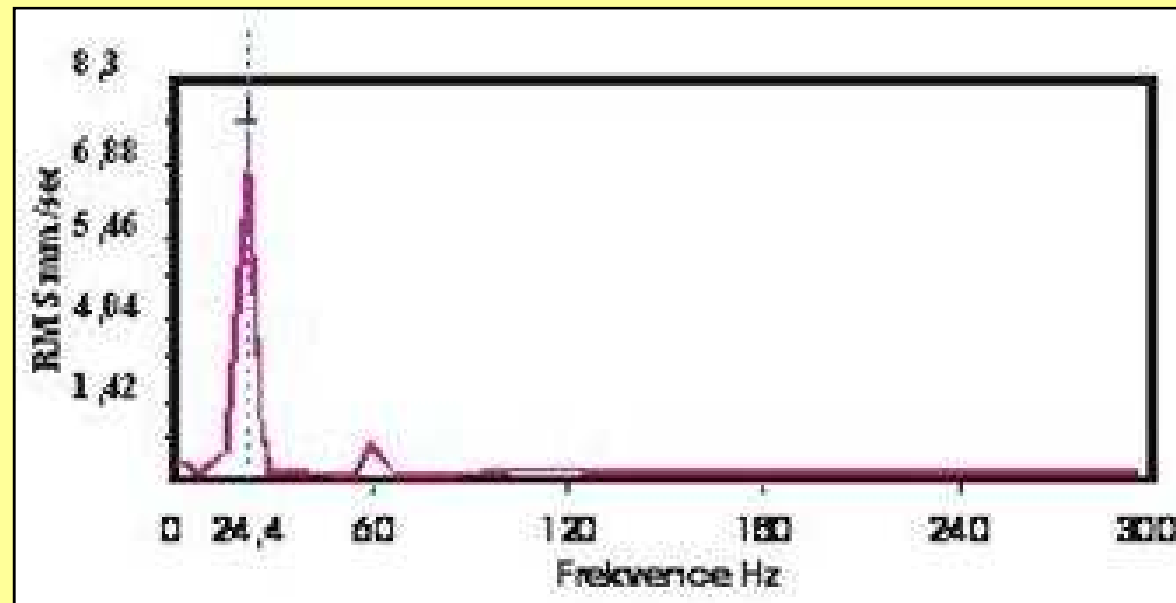
Vibrace elektromagnetického původu

Vibrace mechanického původu

Vibrace - hluk ventilačního původu

Od roku 1985 pozorují fenomén negativního vlivu elektromagnetického pole asynchronního elektromotoru na poháněný mechanismus, který se projevuje tak, že při zatížení asynchronního elektromotoru, na poháněném mechanismu se objeví vibrace na základní harmonické což je nevyváha. Při pokusech o vyvážení, soustavu nelze vyvážit.

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 . Poruchu lze identifikovat při zatížení na první harmonické frekvenčního spektra viz obrázek





Při zjištění tohoto stavu každý diagnostik začne vyvažovat. Nejprve poháněný mechanismus (ventilátor, čerpadlo) 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% . Při tomto zlepšení, soustrojí má nadále vibrace nevyhovující. Následně je provedená 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. Byl jsem pozván jako nezávislý.

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 vyvážku nemá řešení. Tím podstatné pro vyvažování nebylo zjištěno. Vyvažování jsem opakoval 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 vyvážku. Po připevnění vývážku na vyvažovací rovinu výsledek z hlediska snížení chvění byl nulový.

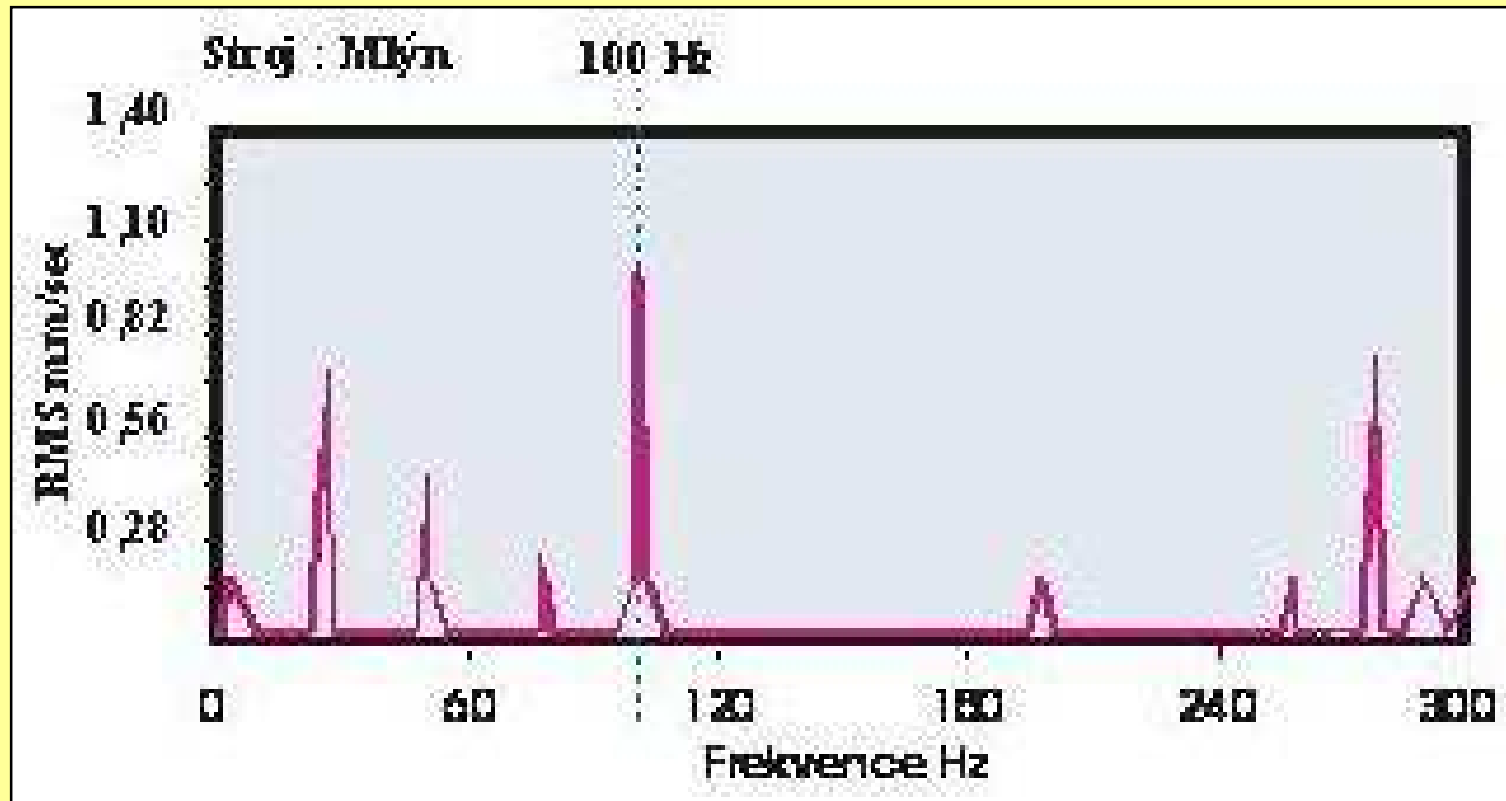


Příčina neúspěchu s moderním vyvažovacím přístrojem byla v tom, že algoritmus vyvažování, přístroj má napevno vypálen do mikroprocesoru a vždy musí určit lehké místo, kde se připojí vyvážek.



Z dřívějších vyvažování pomoci graficko početní metody jsem byl poučen, že v případě kdy při grafickém řešení vyvážku kruhy k_1, k_2, k_3 se nesejdou, je celá soustava nelineární.

Nelinearity v předchozích případech se projevovaly v tom, 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 jsem zjistil, že na dvojnásobku síťové frekvence tj. **100 Hz** je amplituda větší od první harmonické.

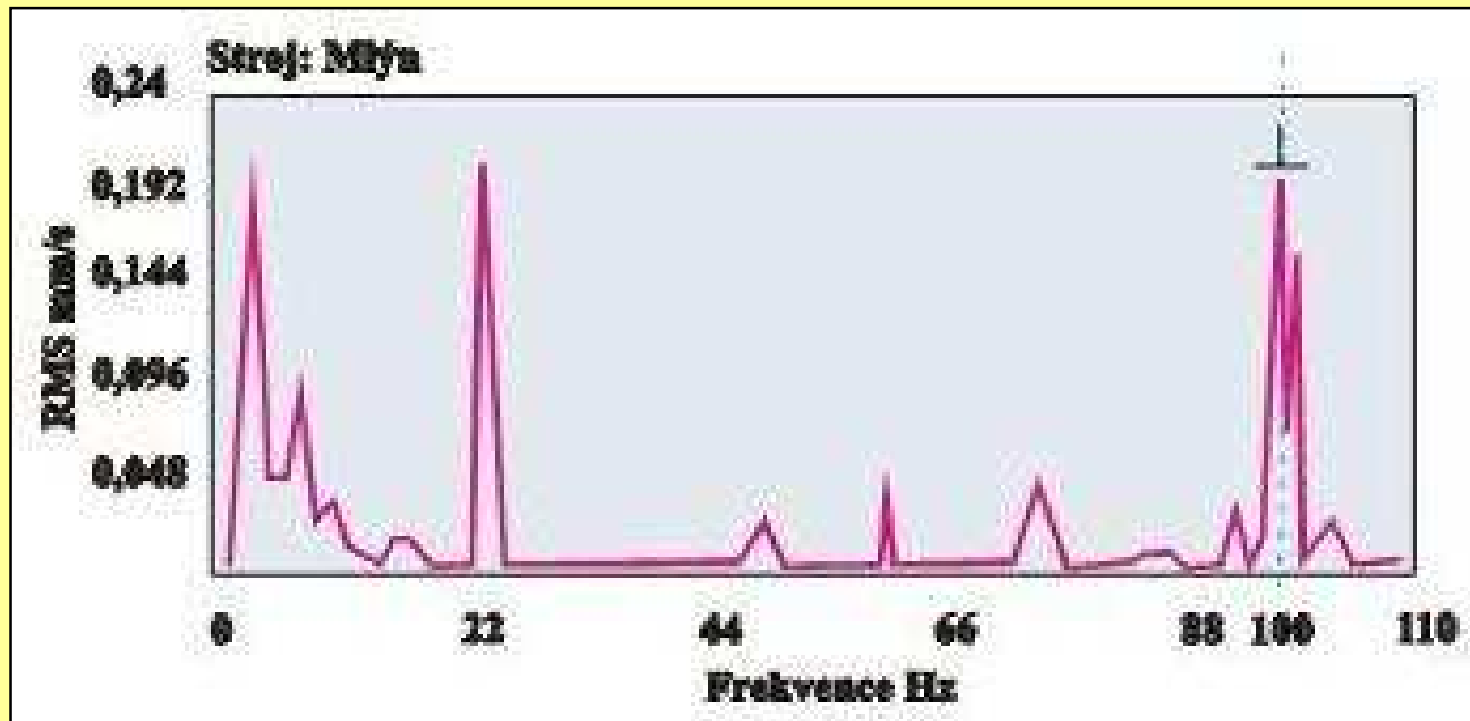




Z dřívějších diagnostických měření jsem věděl, že při této konfiguraci frekvenčního spektra je ve stroji **anomálie** a stroj nutno zastavit a opravit. Dále jsem věděl, že na této harmonické se u elektromotorů vyskytují závady elektromagnetického pole. Nechal jsem elektromotor vyměnit i při značných protestech provozních pracovníků, protože výměna elektromotoru byla značně obtížná. Po výměně elektromotoru vibrace celého stroje byly na mezní hodnotě dobré. **Tímto prvním náhodným pokusem** jsem začal tento postup používat jako **standardní** při problémech na strojích jak je uvedeno výše.

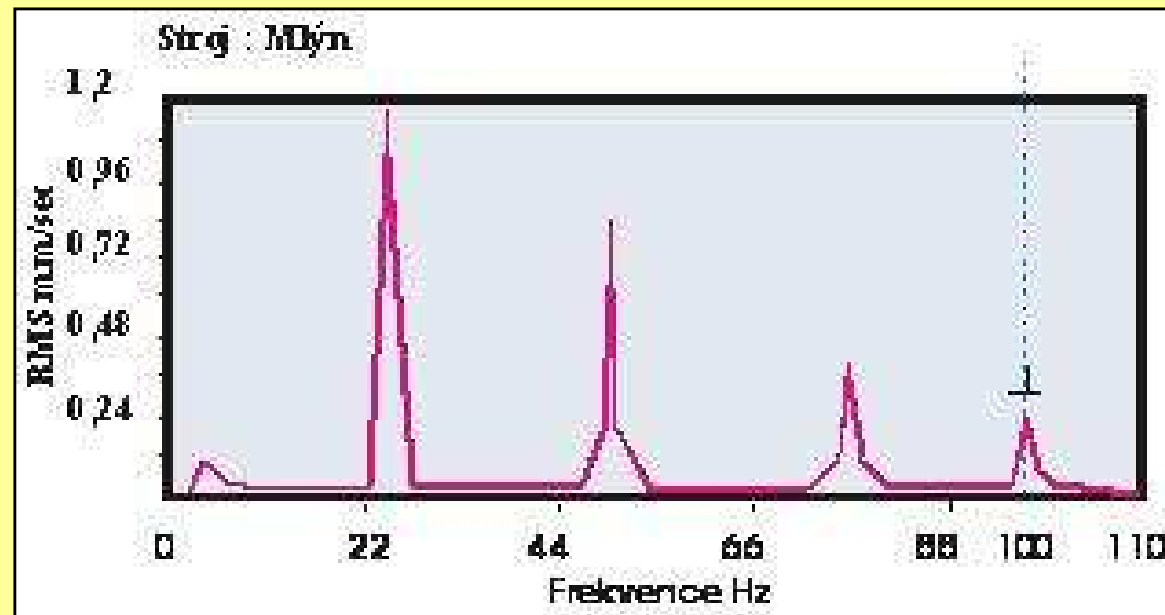


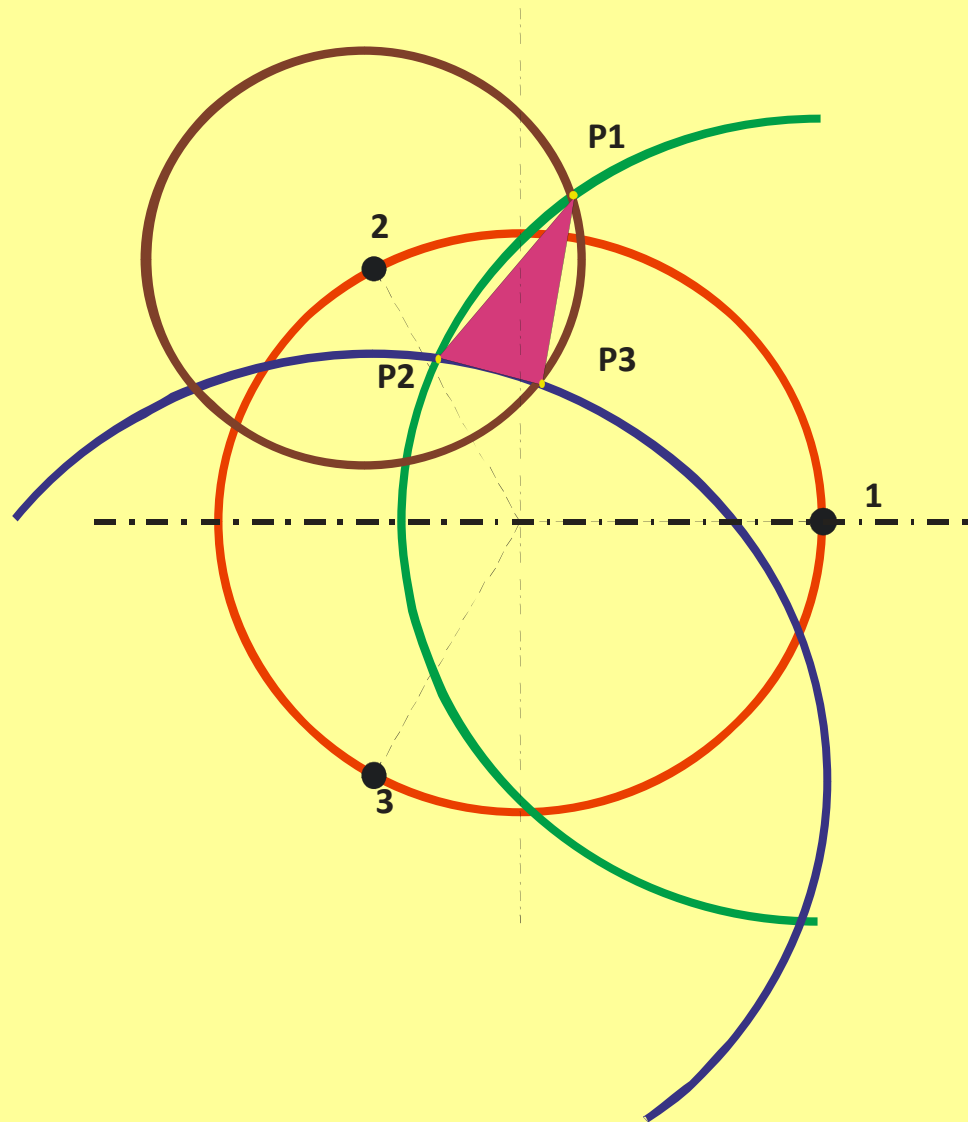
Níže na obrázku je uvedeno spektrum vibrací náhradního elektromotoru, který byl zkoušen na zkušebně za účelem zjištění jeho technického stavu. Po provedeném měření jsem jednoznačně určil, že elektromotor je vadný. Příčinou tohoto tvrzení byla frekvenční analýza spektra vibrací, kde na dvojnásobku síťové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

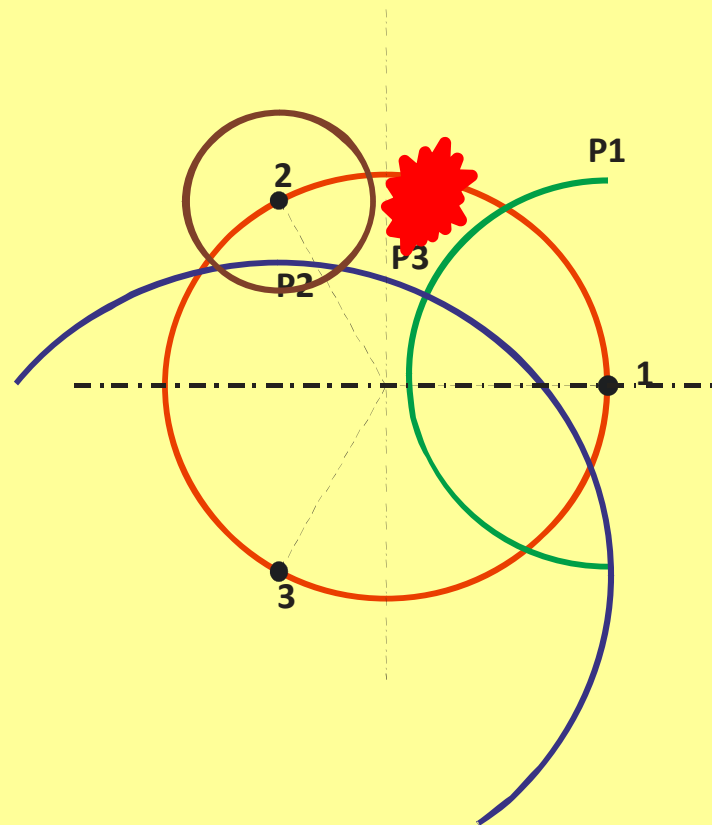


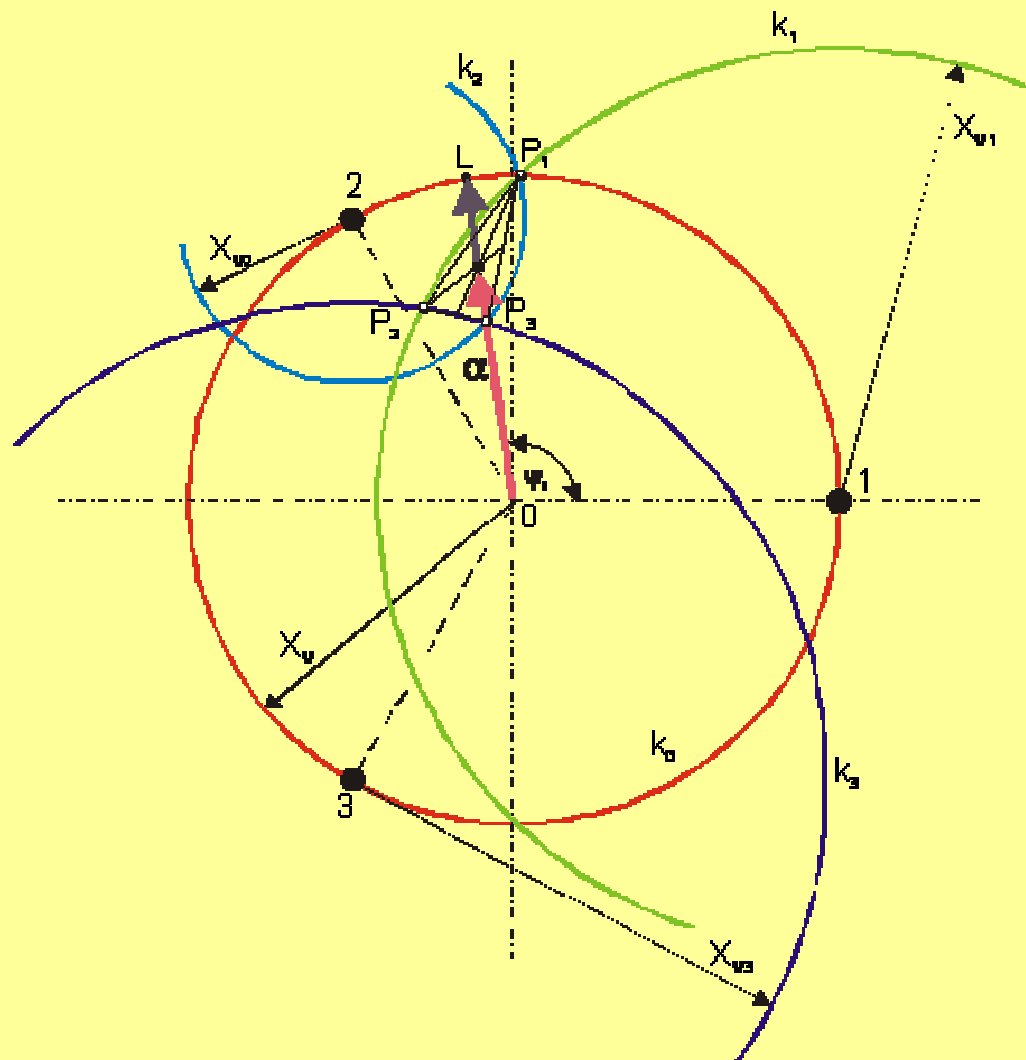


Níže na obrázku je uvedeno spektrum dalšího elektromotoru téhož typu a parametrů. Elektromotor byl označen jako dobrý a mohl být použit v provozu. Spektrum vibrací tohoto elektromotoru je možno označit jako školní příklad. Každý dobrý stroj má spektrum o takovémto průběhu.











Tato pozorování byla potvrzena asi v 23 případech na zkušebnách výrobců při převímkách nových elektromotorů a také u provozovaných elektromotorů přímo ve výrobním procesu.

Na základě dlouhodobého sledování výše uvedeného fenoménu elektromagnetického pole asynchronních elektromotorů a kladných analýz,

které byly potvrzeny v technické praxi a především poslední technická výpomoc jisté teplárně při investici nových čerpadel a jejich uvádění do trvalého provozu jednoznačně tvrdím, že za určitých okolností elektromagnetické pole asynchronního elektromotoru je příčinu nevyváhy pohaněného mechanismu.

Popis technické vypomoci

Firma HUDECZEK SERVICE, s. r. o. byla požádána o technickou pomoc při zjištění příčin kmitání na soustrojí oběžného čerpadla OČ5, které provozuje jedna z tepláren ve Slezsku. Na základě měření vibrací na uvedeném soustrojí byla zjištěna odborníky firmy nesymetrie elektromagnetického pole elektromotoru a taktéž nedostatečná tuhost základového rámu. Zákazníkovi proto bylo v prvním kole doporučeno provést úpravu základového rámu. V případě, že úprava základového rámu nepřinese požadované snížení nadměrných vibrací bude muset být vyměněn elektromotor za nový.

Činností prováděné dodavatelskou a montážní organizací

6/2003 zahájení montáže

9/2003 uvedení čerpadla do provozu – čerpadlo **nebylo** provozem uvedeno do trvalého provozu – **nadměrné vibrace** podle smlouvy

2/2004 poškozená ucpávka na čerpadle

12/2004 poškozená ucpávka na čerpadle včetně ložisek

3/2005 generální oprava čerpadla u výrobce

3/2005 výměna ložisek na elektromotoru

6/2005 vypálená svorkovnice na elektromotoru

11/2005 výměna čerpadla za nové

8/2006 nástup firmy Hudeczek a zjištění nedostatečné tuhosti základového rámu a nesymetrie elektromagnetického pole elektromotoru

**3/2007 vyztužení základového rámu a výměna elektromotoru
za nový**

5//2007 uvedení čerpadla do trvalého provozu

**Vibrace celého soustrojí čerpadla OČ5
jsou na úrovni vibrací sjednaných ve
smlouvě mezi dodavatelem a
odběratelem. Čerpadlo je provozováno
jeden rok bez sebemenších poruch.**



Popis	Faktura-práce	cena bez DPH	Termín
Poškozená ucpávka OČ: demontáž, servis, montáž, ustavení, najetí		15000	měsíc 7 2004
Poškozená ucpávka OČ, zničené ložiska, poškozený lož Domek (výměna ložisek a loždomku), demontáž, ustavení, najetí		15000	měsíc 12/2004
Čerpadlo stále chvěje demontáž čerpadla odvoz do servisní dílny výměna ložisek za ložiska z vyšší přesností		15000	měsíc 3/2005
Výměna ložisek motoru		30000	měsíc 3/2005
" Vypálená svorkovnice motoru		14000	měsíc 6/2005
Zjišťování příčiny chvění úprava čerpadla		39550	měsíc 5/2005
Poškozený ložiskový domek demontáž čerpadla dodávka nového čerpadla, zkoušky - výměna pozic OČ4 x OČ5, měření chvění montáž OČ4 a OČ5 zpět na pozice, ustavení, uvedení do provozu		41040 9065	měsíc 11/2005
Měření chvění a analýza měření zjištění závady na motoru měření chvění ve výrobním závodě () Úprava a vyztužení základů pro možnost použití s původním motorem Nákup nového elektromotoru		25900 61460 540 000	od 1.5. do 31.8.2006 od 1.5.do 6.6.2006
Výroba a montáž nového základového rámu pro ukotvení nového motoru nová kabeláž pro připojení nového motoru napojení termistorů do systému řízení vč dodávky nových převodníků montáž a ustavení OČ5 (optalině), měření chvění analýza, technická zpráva		166100	od 1.3. do 11.5.2007
Nová spojka k novému motoru (jiný rozměr hřídel) Ostatní náklady		4467 83 000	měsíc 3 2007
CELKOVÁ SUMA VÍCENÁKLADŮ ZPŮSOBENÝCH VADOU MOTORU		1059582	



V průběhu čtyřech let se na předmětné teplárně vystřídaly různé odborné organizace, které prováděly diagnostická měření. Níže uvádím některé závěry z protokolů.

Žádná z těchto organizací neuvedla ve svém závěru jako příčinu chvění Čerpadla elektromagnetické pole elektromotoru.

-ve spektru vibrací na čerpadle je patrná pouze složka otáčkové frekvence, amplituda na této frekvenci byla 3,7 mm/s při otáčkách 48,6 Hz,

-skladba vibrací je naprosto odlišná od spektra zjištěného na zkušebně, při měření zde je složka na otáčkové frekvenci minimální,



-z těchto důvodů a s přihlédnutím ke zjištěné hodnotě vlastní frekvence je možno konstatovat, že jde opět o problém vybuzené rezonance.

-charakter vibrací zjišťovaný při měření čerpadla na stavbě nesouvisí přímo s jeho stavem (kvalitou výrobního provedení), ale je výrazně ovlivněn vlastnostmi celého dynamického systému,



**-příčina vibrací svorkovnice
elektromotoru v místě blízkém kabelové
vývodky je opět vybuzená rezonance,
samovybuzení je způsobeno dvoj-
násobkem frekvence otáčení motoru.**

**Vysvětlení příčin nevyváhy
čerpadla,
v důsledku nesymetrie
elektromagnetického pole
dvojpólového asynchronního
elektromotoru.**

Podle Maxwella působí v každém místě vzduchové mezery radiální síla, kterou je možné vyjádřit na jednotku plochy vztahem

$$p_r = \frac{B^2 - (\alpha, t)}{2\mu_0} \quad [Pa, T, Hm^{-1}]$$

p_r .. je radiální síla ve vzduchové mezeře vztažená na jednotku plochy (radiální tlak);

$B(a,t)$.. je okamžitá hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře v místě vzdáleném o obvodový úhel a od vytčené osy a v čase t .



Při obecném prostorovém rozložení časové proměnlivé magnetické indukce vzniknou mezi statorem a rotorem časové proměnlivé síly, které jsou rovněž určitým způsobem prostorově rozloženy. Tyto síly mohou za jistých podmínek rozvibrovat jednotlivé části stroje.

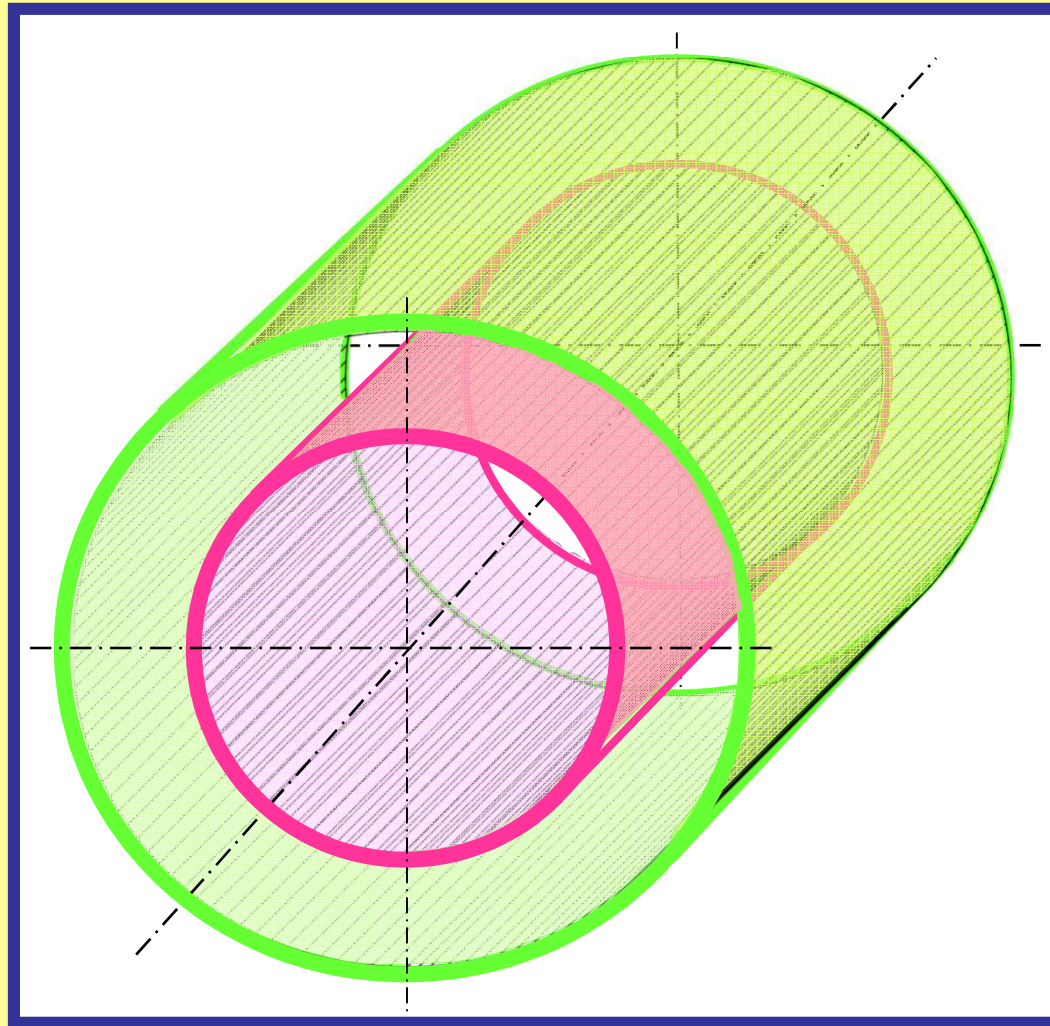


Je možné si z mechanického hlediska představit rotor jako masivní válec a je tedy zřejmé, že pro vznik vibrací je rozhodující chvění aktivního železa statoru, který je možné znázornit zjednodušeně jako relativně tenkostěnný dutý válec namáhaný zevnitř časově proměnlivým silami, které mají určité prostorové uspořádání.



HUDECZEK

HUDECZEK SERVICE, s.r.o., Stonavská 287, 73543 Albrechtice



**Pro obecně platné rozložení sil,
působících radiálně mezi statorem a
rotorem , je nutné určit časový a
prostorový průběh okamžitých
hodnot magnetické indukce ve
vzduchové mezeře.**

Mezi statorem a rotorem mohou tedy vznikat radiální časově proměnné síly, které mají různý počet prostorových vln – sil různého řádu. Prostorové vlny mají obecný tvar:

$$p_r = A_r \cos(r\alpha - \Omega t)$$

$r = 0, 1, 2$, libovolné číslo

A_r amplituda působící síly

Ωr úhlový kmitočet síly řádu r

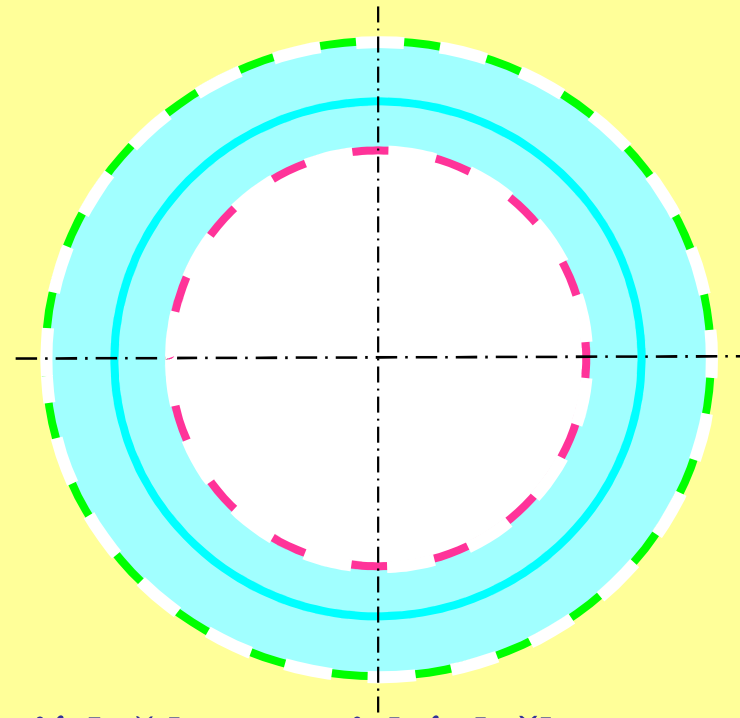
**Pro vibrace jsou důležité
případy, kdy počet
deformačních vln po
obvodu stroje
 $r = 0; 1; 2; 3; 4.$**

Případ kdy $r = 0$

r – počet deformačních vln po obvodě stroje

Příslušná složky síly má tvar

$p_0 = A_0 \cos \Omega t$, která je po obvodu rovnoměrně rozložena a v čase se periodicky mění , čímž způsobuje ve všech směrech **konfázní radiální kmitání** statorového prstence.



Složka p_0 vznikne tehdy, jestliže se skládají dvě harmonické složky magnetomotorického napětí, které mají stejný počet pólových dvojic ξ , avšak různý úhlový kmitočet ω_ξ , tj. **při interferenci dvou vln stejné vlnové délky, ale různé rychlosti.**

Obrázek znázorňuje tzv. dýchání stroje působením sil nultého řádu. Tento případ je analogický případu válcové nádoby s časově proměnlivým vnitřním přetlakem.



Případ kdy $r = 1$

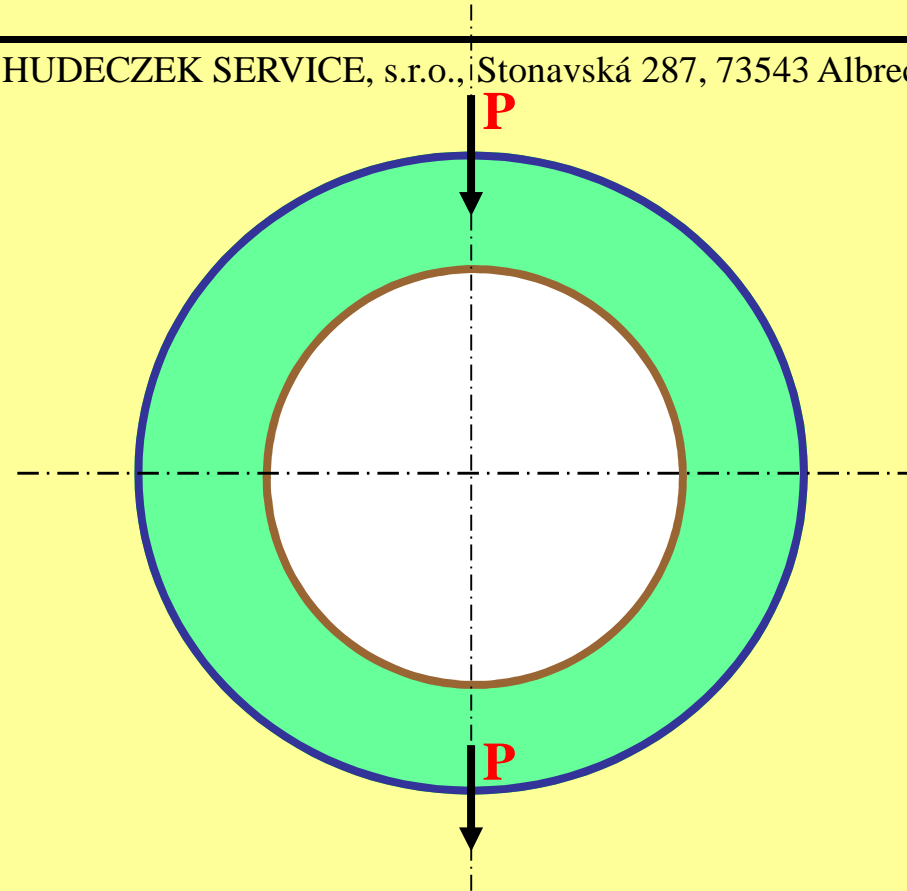
r – počet deformačních vln po obvodě stroje

Příslušná složka síly má tvar,

$$p_1 = A_1 \cos(\alpha - \Omega_1 t)$$

která představuje jednostranný tah, který obíhá s úhlovou rychlostí Ω_1 a při rezonanci s vlastním kmitočtem stroje vyvolá silné vibrace.

Tato složka vznikne, jestliže interferují dvě harmonické indukce, u nichž se počet pólových dvojic liší o jednu.





Případ kdy $r = 2, 3, 4$

r – počet deformačních vln po obvodě stroje

V těchto případech **radiální síly způsobují průhyby statorového prstence.**

V tomto případě jde o složky:

$$p_r' = P_\xi \cos(\zeta\alpha - \omega_\zeta + \varphi_\zeta) \quad (1)$$

$$p_r'' = P_{\xi\xi} \cos [(\zeta - \xi)\alpha - (\omega_\zeta - \omega_\xi)t + (\varphi_\zeta - \varphi_\xi)] \quad (2)$$

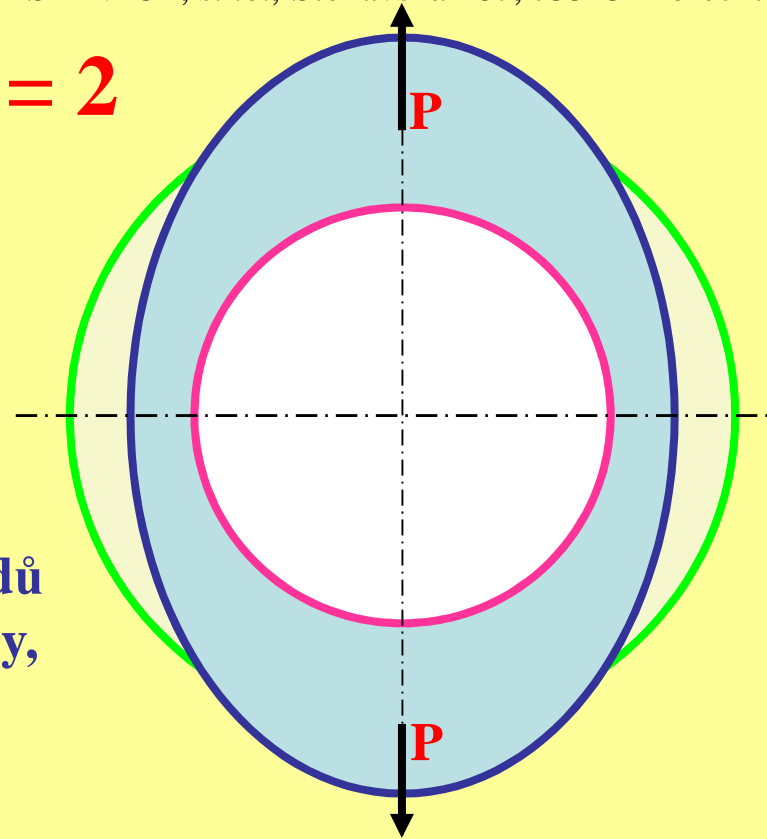
Podle rovnic (1) a (2) vznikají síly nízkých řádů tj. síly s malým počtem prostorových vln tehdy, platí – li v prvním případě rovnice (1).

$|\zeta| = r$ (3) a v druhém případě rovnice (2)

$|\zeta - \xi| = r$, (4) kde r je malé celé číslo včetně nuly.

Nemají-li stroj nadměrně vibrovat, je nutné, aby se pokud možno nevyvinuly harmonické jejich řád vyhovuje rovnicím (3) a (4).

$r = 2$

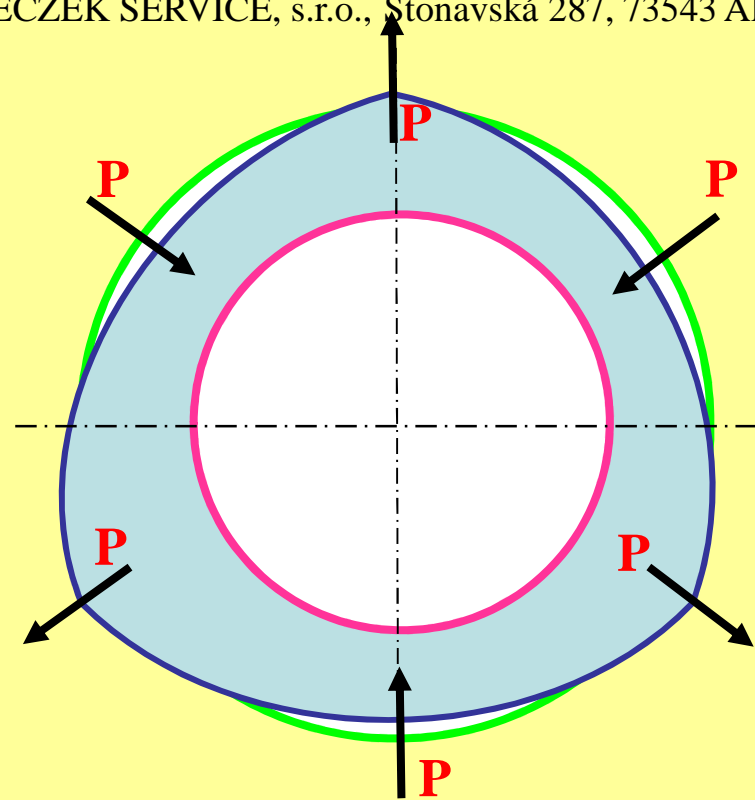




Případ kdy $r = 3$

r – počet deformačních vln po obvodě stroje

Z uvedeného rozboru vyplývá, že elektromagnetickými příčinami vibrací jsou časově proměnné radiální síly, způsobené interferencí pracovní a vyšších harmonických magnetické indukce ve vzduchové mezeře a tudíž vyššími harmonickými magnetomotorickými napětí a vodivosti vzduchové mezery.





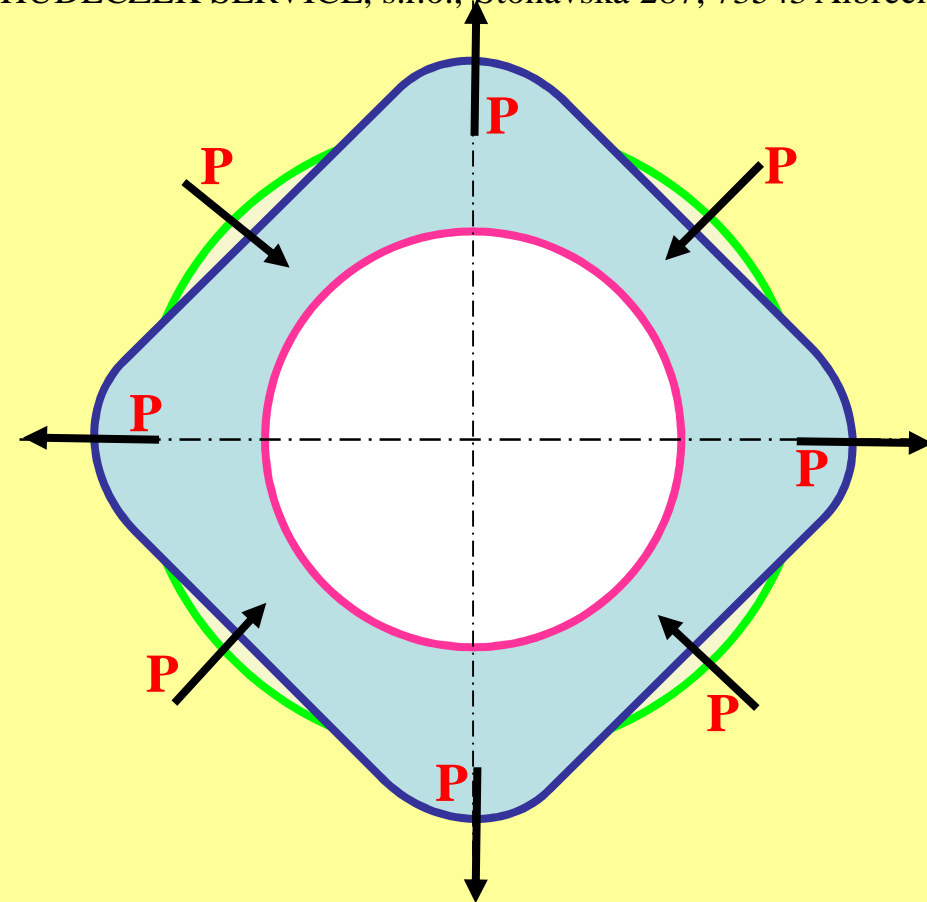
Případ kdy $r = 4$

r – počet deformačních vln po obvodě stroje

Pro úplnost o vlivu pracovní harmonické řádu p na vibraci stroje. Působením této nejsilnější harmonické magnetomotorického napětí vzniká při rovnoměrné vzduchové mezeře pro $\nu = \mu = p$

síla

$$p_p = F_p^2 \frac{A_o^2}{2\mu} \cos 2(p\alpha + \omega t).$$



Tato síla s dvojnásobným síťovým kruhovým kmitočtem může způsobit deformace statorového jha u dvoupólových asynchronních strojů.

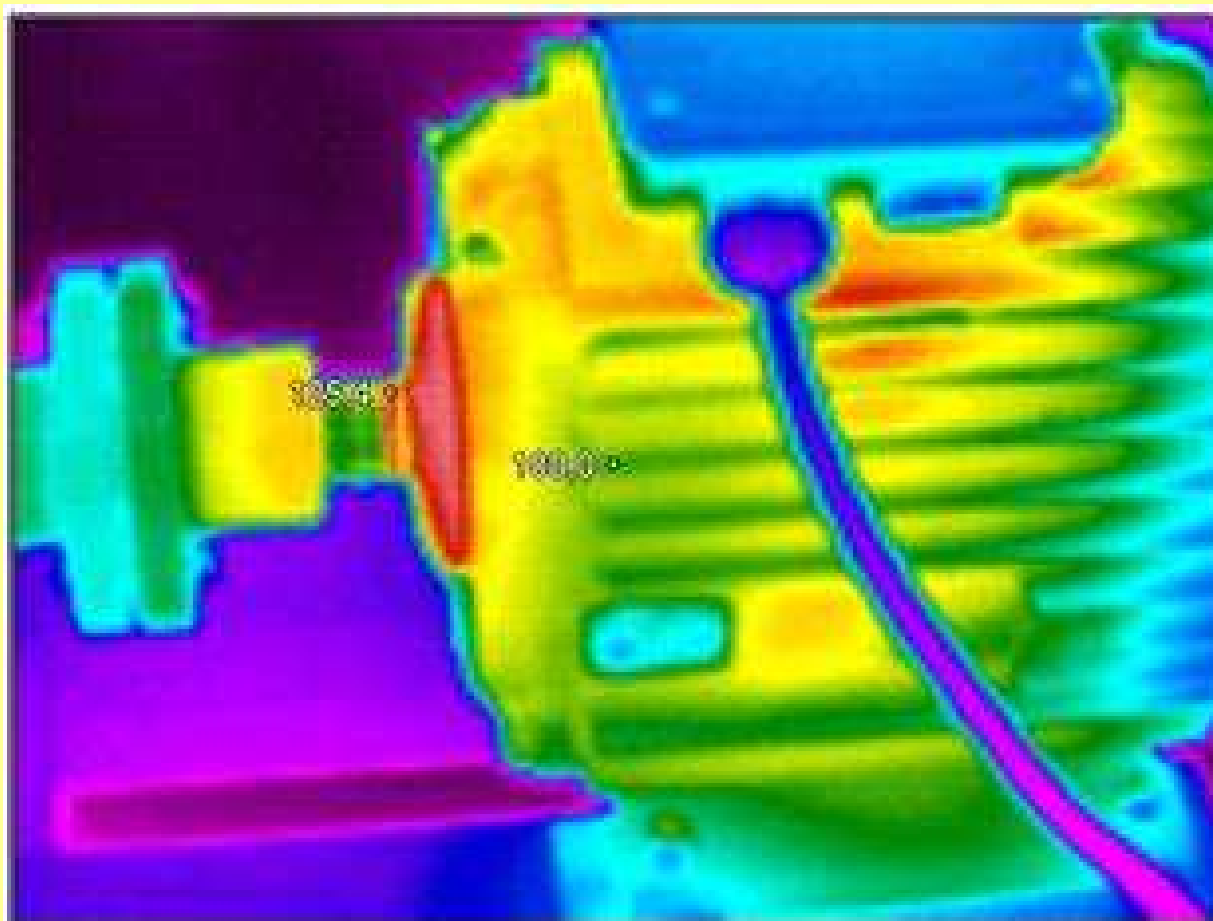


HUDECZEK

HUDECZEK SERVICE, s.r.o., Stonavská 287, 73543 Albrechtice



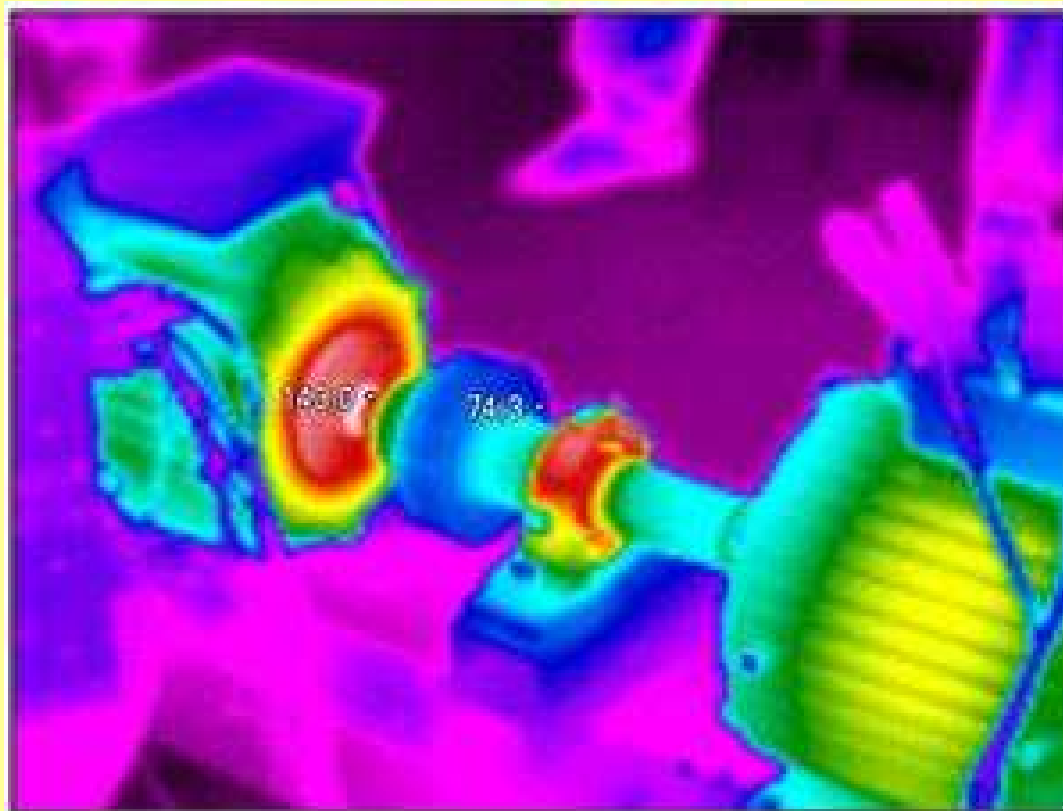






HUDECZEK

HUDECZEK SERVICE, s.r.o., Stonavská 287, 73543 Albrechtice



**DĚKUJI
ZA POZORNOST**