

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA A SPOLEHLIVOST III

USTAVOVÁNÍ STROJŮ

Ladislav Hrabec
František Helebrant
Jana Mazalová

Ostrava 2006

Recenzent: doc. Dr. Ing. Pavel Němeček, Technická univerzita v Liberci

© Ladislav Hrabec, František Helebrant, Jana Mazalová, 2006

ISBN

Obsah

Předmluva	5
1 Úvod	6
1.1 Význam a přínos ustavení hřídelů do osy	6
1.2 Historie ustavování do osy [8]	8
2 Základy ustavování	11
2.1 Definice ustavení a základní pojmy	11
2.2 Druhy nesouososti	11
2.2.1 Základní typy nesouososti	11
2.2.2 Hřídelová a spojková nesouosost	15
2.3 Základy, základové rámy	20
2.4 Spojky pružné a tuhé	21
2.5 Postup a přístup k ustavování	21
2.6 Přehled metod k ustavování	23
2.7 Tolerance ustavování	24
3 Metody ustavování	27
3.1 Předběžná kontrola ustavení a předustavovací procedury	27
3.2 Hrubé ustavení	31
3.3 Mechanické metody	33
3.3.1 Příklady použití	34
3.4 Metody používající číselníkové úchylkoměry	35
3.4.1 Základy ustavení pomocí číselníkových úchylkoměrů	35
3.4.2 Čelně obvodová ustavovací metoda	37
3.4.3 Reverzní obvodová ustavovací metoda	42
3.4.4 Příklady použití	46
3.5 Laserové systémy	51
3.5.1 Historie a možnosti použití laserů	51
3.5.2 Druhy laseru a jejich klasifikace	54
3.5.3 Základní vlastnosti laserového záření	58
3.5.4 Laserové ustavovací systémy	60
3.5.4.1 Obecné základy laserových ustavovacích systémů	60
3.5.4.2 Ustavování horizontálních hřídelů	61
3.5.4.3 Ustavování vertikálních hřídelů	62
3.5.5 Příklady použití	64
4 Kompenzace provozních vlivů	68
4.1 Teplotní vlivy	68

4.2	Mechanické vlivy	70
4.3	Měřicí metody	71
5	Provozní zjištění nesouososti a provozní spolehlivost částí strojních systémů	74
5.1	Měření vibrací	74
5.2	Termografická měření	81
5.3	Nesouosost a energetická náročnost	85
5.4	Nesouosost a opotřebení částí strojních systémů	87
6	Závěr	90
	Použitá literatura	91

Předmluva

Ve vydávané ucelené řadě skript „Technická diagnostika a spolehlivost“ po již vydaných částech I. TRIBODIAGNOSTIKA, II. VIBRODIAGNOSTIKA, je nyní předkládán další díl s podtitulem III. USTAVOVÁNÍ STROJŮ.

Skripta jsou určena především pro studijní obor a studijní zaměření „Technické diagnostika, opravy a udržování“, ale samozřejmě využitelná také v dalších studijních oborech, a to nejen v předmětu „Technická diagnostika a spolehlivost“, neboť je naprosto neúnosné být zodpovědný za klíčová zařízení jakéhokoliv provozu, a tím určitě jsou rotující pohonné jednotky, a přitom nemít dostatečné znalosti o provozu daného zařízení, resp. o problémech rotujících strojů týkajících se nesouososti.

Autoři musí velmi poděkovat za poskytnutí celé řady podkladů následujícím osobám, bez nichž by tato skripta nikdy nevznikla:

- ✓ Ing.Tadeáš LIPUS, Ing.Jiří PECH, fa SKF Ložiska, a.s., Praha
- ✓ Ing.Ladislav ŠEREMETA, fa LAMI KAPPA s.r.o., Teplice

Je možno jednoznačně konstatovat, že uvedené osoby se svým způsobem podílely autorsky na zpracování částí některých kapitol.

Autoři

1 Úvod

Je určitě naprosto zřejmé, že nejzákladnější požadavek na každý rotující systém, re-spektive pohonnou jednotku, je dán požadavkem na maximální spolehlivost, což se dá vyjádřit ve spojení s ekonomikou provozu také jako dlouhodobá životnost. Je také naprostou pravdou, že s existencí rotujících pohonných jednotek existuje problém nesouososti, což by mělo znamenat, že pracovníci a údržbáři pracující v této oblasti budou o dané problematice řádně informováni. Skutečnost, že opak bývá často pravdou, lze dokázat na úplně základním faktu „Co patří k nejčastějším příčinám zvýšených vibrací?“. Je naprosto nezodpovědné, je-li nový rotující systém zabudován doslova tak, že je připevněn k zemi, aniž by se někdo věnoval správnému ustavení a umožnil tak relativně bezproblémový chod.

1.1 Význam a přínos ustavení hřídelů do osy

V [8] je uvedeno „S překvapením můžeme tvrdit, že 99% strojů pracuje s vyosením. Může se to zdát přehnané tvrzení, avšak dokonalé ustavení není možné“. Je nutné si plně uvědomit, že ve skutečnosti malá nesouosost a tím i nízké vibrace jsou nutné, aby bylo funkční mazání, které je dnes prováděno většinou tzv. hydrodynamicky.

Při řešení problematiky ustavení v celé své komplexnosti si také musíme dále uvědomit, že při rotaci působí celá řada vlivů, teplo od tření v ložiscích a od ohřívání maziva, pohyb základu stroje a podobně, tedy jevy, které pohybují rotujícím systémem všemi možnými směry, takže je nutné počítat s rozdílem polohy rotujícího systému za klidu a za rotace, to znamená v provozním stavu.

Jak už byla zmínka, hlavním cílem ustavení je maximalizace provozní spolehlivosti, a tím prodloužení životnosti strojů a zařízení. Přesným ustavením [8] se pak dosáhne:

- snížení nadměrných axiálních a radiálních sil v ložisku, tím se zvýší jejich životnost a dynamická stabilita rotoru,
- vyloučení možnosti poškození hřídele vlivem únavy materiálu způsobené cyklickými silami,
- minimalizace opotřebení části spojky,
- minimalizace průhybu hřídele mezi místem přenosu výkonu (u spojky) a koncovým ložiskem, udržuje rotorové vůle,
- snížení spotřeby energie (doložené příklady ukazují na úsporu 2÷17%),
- snížení úrovně vibrací krytů strojů, ložiskových stojanů a rotorů.

Obr.1 [8] ukazuje grafické znázornění poruchovosti v závislosti na vyosení a je získán z velkého počtu měření nesouososti.

Na rotujícím systému v provozu není jednoduché změřit vyosení. Radiální síly přenášené z hřídele na hřídel jsou statické, což způsobuje, že vnější měření je složité (umístění snímačů na kryty, resp. povrch stroje nepřináší daný efekt měření), takže se sledují sekundární projevy těchto sil, které způsobují následující symptomy [8]:

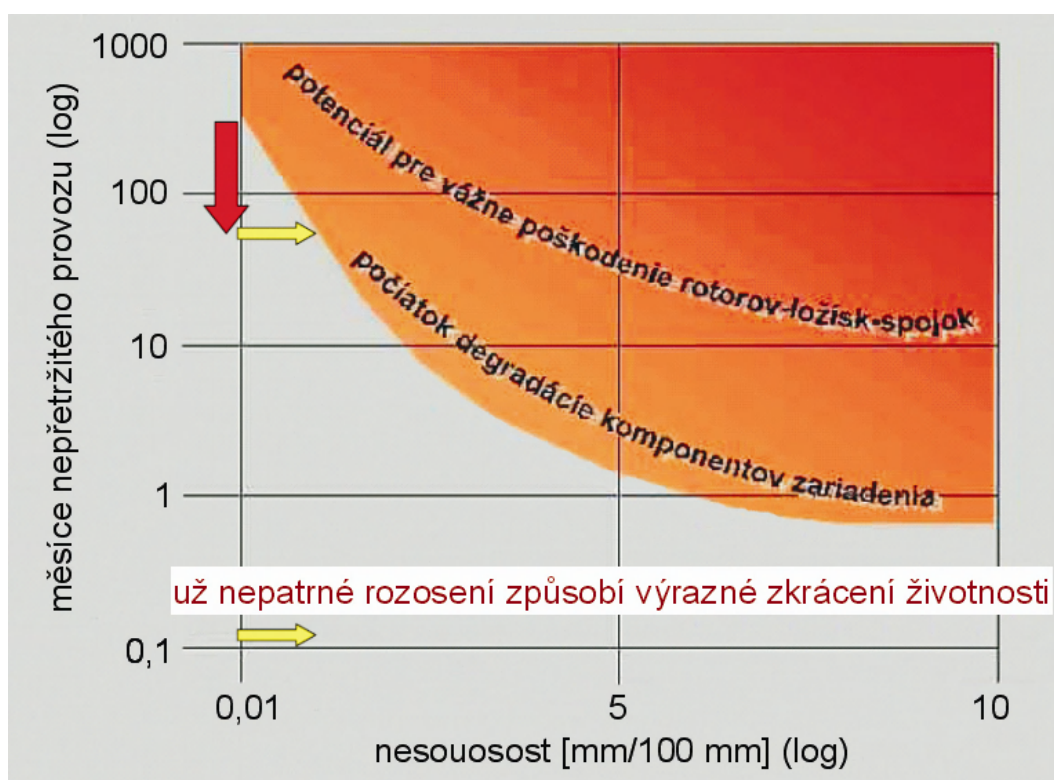
- předčasné poškození ložiska, těsnění, hřídele nebo spojky
- nadměrné radiální a axiální vibrace (testy ukázaly, že rozdílné provedení spojky způsobí odlišné chování ve vibrační oblasti),
- vysoká teplota ložiska nebo jeho okolí nebo vysoká teplota oleje,
- únik oleje přes těsnění ložiska,

- poškození základových šroubů,
- ztráta nebo zlomení spojkových čepů,
- zahřívání spojky za běhu, ihned po zastavení teplota klesá (u pružné spojky se objevuje prach pružného elementu),
- po určité době provozu narůstá házivost hřídele,
- narůstá poruchovost spojek a zrychluje se opotřebení,
- hřídele se lámou nebo praskají blízko spojkového ložiska nebo hlavy spojky,
- nadměrné množství plastického maziva nebo oleje na vnitřní straně bezpečnostního krytu spojky,

což v [1] a [9] je shrnuto v následující podobě.

Nesouosost se projevuje pěti vzájemně souvisejícími problémy:

- zvýšenými vibracemi,
- nárůstem energetických ztrát,
- zvýšeným zatížením ložisek, těsnění a jiných mechanických součástí,
- snížením výrobní kapacity,
- sníženou výrobní kvalitou.



Obr.1 Životnost rotujících systémů v závislosti na velikosti vyosení

Dokonce i ty nejopatrnější průzkumy uskutečněné v širokém spektru průmyslových odvětví v posledních pěti letech ukazují, že 50% havárií strojů bylo zapříčiněno špatným

ustavením (nesouosostí). Některé průzkumy však tvrdí, že až 90% strojů je provozováno s nedodržením předepsaných tolerancí.

Není překvapením, že nadměrné vibrace, selhání ložisek, poškození těsnění, selhání spojek, zkrácení doby provozu stroje a zvýšené účty za energii jsou přijímány za nedílné součásti údržby strojů. Často teprve velmi zhoršený stav, jako je riziko úrazu a havárie zařízení, neplánované výluky ve výrobě nebo snížená kvalita výrobků, nás přinutí zaměřit se na tyto zásadní problémy a věnovat jim svou pozornost - konec citace.

1.2 Historie ustavování do osy [8]

Určitě je zřejmé, že problematika ustavování (souosování) je spojena s vývojem rotujících strojů a zařízení, takže jsme v oblasti měření mechanických veličin, matematiky, statiky a dynamiky, optiky, a tak dále. Řekneme-li, že ustavování je staré jako lidstvo samo a vyvíjí se s rozvojem lidské společnosti, tak mluvíme naprostou pravdu.

V [8] najdeme podobně popsany vývoj, ze kterého vybíráme:

- 1000 ÷ -900 Čínská učebnice matematiky uvádí principy planimetrie, úměry, aritmetiky, geometrie, rovnic a teorie pohybu.
- 323 Euklides napsal první knihu o geometrii nazvanou Elementy.
- 300 ÷ -200 Ctesibius z Alexandrie vynalézá pístovou pumpu a Archimédes ze Syracus vynalézá šroubovou pumpu. Objevení převodů vedlo k rozvoji vodních kol pro zavlažování, jež byly poháněny dobyt看em.
- 285 Pappus z Alexandrie popisuje práci základních strojů: ozubené kolo, páka, kladka, kladkostroj, šroub a klín.
- 1305 Edward I vydal v Anglii dekret o mírách. Stanovil délku jednoho palce jako délku tří ječmenných suchých a kulatých zrnků, 12“ je stopa, 3 stopy je ulna, 5,5 ulen je míra, 40 měř x 4 míry je akr.
- 1510 Leonardo da Vinci zkonstruoval horizontální vodní kolo a navrhl plynovou turbínu, jež využívá horkého plynu stoupajícího z ohniště a pohání vertikální hřídel, na kterém jsou připevněny lopatky. Tento přístroj později patentoval Angličan John Dumbell.
- 1550 Ital Jerome Carda, fyzik, matematik a přítel da Vinciho je znám jako tvůrce universálního spojení (Kardanův hřídel). Georgius Agricola (Georg Bauer) píše knihu De Re Metalica. Skládá se z 10 svazků. Pojednává o chemickém a důlním dobývání rudy, o teorii vzniku minerálních vrstev, o mapování, nástrojích, strojích, pumpách, výtazích, vodní síle, přípravě rudy, tavení, výrobě soli, hliníku, skalice, síry, bitumenu a skla. Tyto pracovní postupy byly později přeloženy do angličtiny americkým prezidentem Herbertem Hoovemem.
- 1600 Dánský optik Johan Lippersley vynalézá dalekohled, který o rok později Galileo Galilej upravil pro astronomická pozorování. Byl velice žádaný amatérskými astronomy. Galileo byl také znám vynálezem teploměru, zavedl termín „momentů jako účinek síly, založil vědu o pevnosti materiálu, vyšetřováním kývání kyvadla a padajícího tělesa položil základy nauky o gravitaci a zrychlení.
- 1631 Pierre Verner vynalézá posuvné měřítko.
- 1702 Alain Manesson Mallet vynalézá nivelační přístroj s pevným dalekohledem.

- 1720 Sisson Benjamin Cole vyrobil v Londýně první teodolit vybavený dvěma lihovými libelami.
- 1764 James Watt navrhuje parní kondenzátor jako podstatné zlepšení parních strojů. Patentováno v roce 1769. Druhý patent v roce 1781 se týká planetového převodu a setrvačnicku. Patent z roku 1782 popisuje dvojnásobný účinek páry při vstupu na jednu stranu pístu, při vakuu na druhé straně pístu.
- 1768 Narodil se francouzský matematik a fyzik Jean Baptiste Fourier. Zasloužil se o rozvoj tzv. Fourierovy transformace, jež se užívá ve vibrační analýze.
- 1770 Leonard Rulet publikuje „Úvod do algebry“. O dva roky později vydává knihy o mechanice, optice, akustice a astronomii.
- 1790 Členové francouzského národního měřičského výboru zavedli definici metru jako jednu desetimiliontinu délky jedné čtvrtiny zemského poledníku. V roce 1799 je zaveden normál platino-iridiový metr jako hlavní světový etalon délky. Tato definice je zatížena chybou určení délky zemského poledníku. Od roku 1983 je jeden metr definován jako vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za $1 / 299\,792\,458$ sekundy.
- 1863 Williamsův patent souosování hřídelů
- 1869 W. J. Rankine publikuje v periodickém tisku Engineer pojednání „O odstředivých silách rotujících hřídelů“.
- 1883 John Logan patentuje US patent na číselníkové indikátor.
- 1893 Campbellův přístroj pro měření přímosti hřídelů.
- 1894 Isgrigův přístroj pro měření přímosti hřídelů.
- 1901 Kinkeadův přístroj pro měření přímosti hřídelů.
- 1894 S. Dunkerley publikuje článek „O rotaci a vibraci hřídelů“.
- 1904 C. Chree publikuje článek „Otáčkové a příčné vibrace rotujících hřídelů“. Britský elektroinženýr John Fleming vytváří přímožhavenou diodu.
- 1908 Ferrisův souosovací patent.
- 1924 B. L. Newkirk publikuje článek na téma „Házivost hřídele“, popisující problém kritických otáček.
- 1946 Joseph Christian (US) patentuje souosovací metodu čelo-čelo.
- 1949 Robert Voss (US) patentuje souosovací metodu čelo-obvod.
- 1953 John Callahan (US) patentuje dvojitou souosovací metodu.
- 1957 Gordon Gould popisuje laser pracující v oboru viditelného záření. Poprvé zavedl termín „laser“.
- 1972 V. Ray Dodd patentuje měření souosování pomocí bezdotykových sond. Touto metodou lze měřit změnu polohy soustrojí v klidu a v chodu. Malcolm Murray patentuje souosovací mřížkový kalkulátor.
- 1973 Malcolm Murray patentuje ustavovací pozicionér.
- 1976 Donald Bentley patentuje systém bezdotykového měření souososti.
- 1983 Malcolm Murray patentuje souosovací svorníky, jež slouží k souosování pomocí reverzní indikátorové metody.
- 1984 John Zatezalo patentuje souosovací kalkulátor.

- 1986 John Zatezalo patentuje metody určování nesouososti hřídelů.
- 1987 Heinrich Lysen patentuje souosovací systém laser - detektor. Brian Morrissey patentuje polohovací zařízení pro horizontální stroje.
- 1990 Malcolm Murray patentuje stroboskopickou metodu pro měření změny polohy hřídele v klidu a v běhu.
- 1991 Dieter Bush patentuje systém laser - detektor pro měření změny polohy hřídele v klidu a v běhu. Paul Saunders patentuje elektronický souosovací systém na principu optického kodéru.

Jak je patrné a určitě bude úplně zřejmé po prostudování [8], tak většinu patentů týkajících se souosování a ustavování z let 1860 ÷ 1946 je možné rozdělit na - souosování hřídelů pomocí libel, ustavování soustruhů a souosování válcových děr strojů metodou „tenkého drátu“. Lze tedy říci, že souosování a ustavování, tak jak jej známe dnes, se objevuje až ve 40 ÷ 50 letech minulého století.

2 Základy ustavování

Každý výrobní proces vyžaduje přenos energie do výrobního stroje, respektive přenos točivého momentu z hnacího na hnaný stroj. Vždy platí, že k nejúčinnějšímu přenosu dochází při souosém uložení hřídelů, když se chovají, jako by tvořily jeden celek. Neustále stoupající výrobní rychlosti, nároky na výkonnost a provozní spolehlivost strojů, produktivnost a další vedly od počátku osmdesátých let minulého století k prudkému nárůstu zájmů o uplatnění ustavování.

2.1 Definice ustavení a základní pojmy

Při ustavení jakéhokoliv rotujícího strojního systému (pohonné jednotky) je obvykle vždy hnaný stroj stacionární a hnací stroj pohyblivý, takže chyba v souososti (špatné ustavení) je dána definováním polohy pohyblivého stroje vzhledem ke stacionárnímu, tzn. dva nebo více hřídelů není v jedné přímce.

Základní pojmy:

➤ **Střed rotace**

Všechny hřídele, rovné nebo prohnuté, se otáčejí okolo osy, která se nazývá střed rotace. Střed rotace je tvořen přímkou.

➤ **Souosost**

Dva hřídele nazýváme souosými, pokud středy rotace obou hřídelů tvoří jednu přímku.

➤ **Nesouosost**

Hřídele jsou neustavené (nesouosé), když jejich středy rotace nejsou během provozu stroje souosé.

➤ **Stacionární a pohyblivý stroj**

Při ustavování jakýchkoliv dvou strojů je vždy jeden označen jako stacionární a druhý jako pohyblivý.

Střed rotace stacionárního stroje je bod nebo referenční přímka označena jako nula. Určení chyby souososti spočívá v nalezení polohy středu rotace pohyblivého stroje vzhledem ke středu rotace stroje stacionárního, a to ve dvou rovinách, horizontální (X) a vertikální (Y). V souřadnicovém systému je + v horizontální rovině doprava a ve vertikální nahoru.

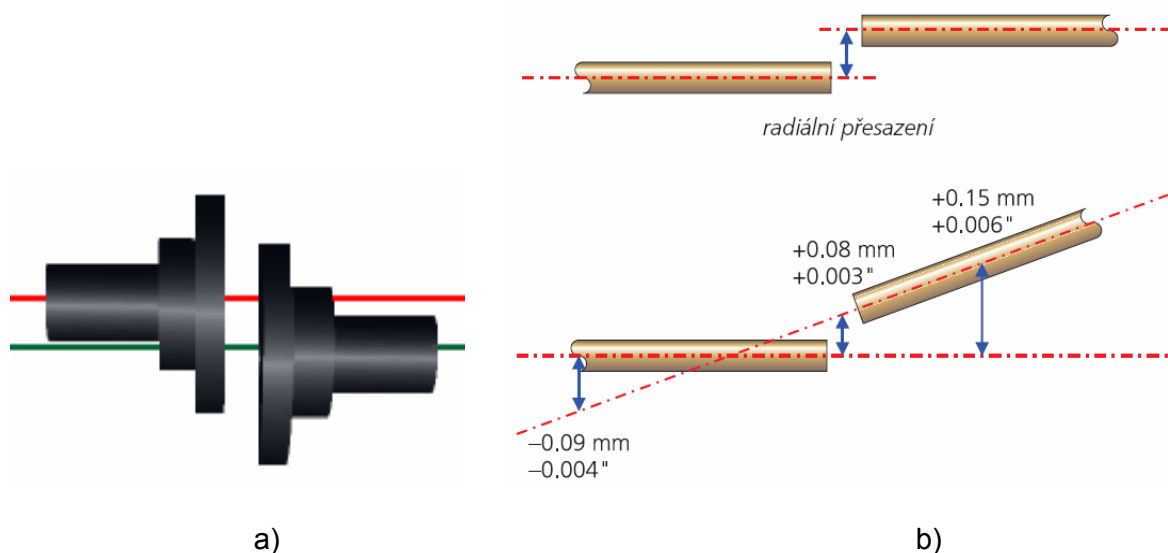
2.2 Druhy nesouososti

2.2.1 Základní typy nesouososti

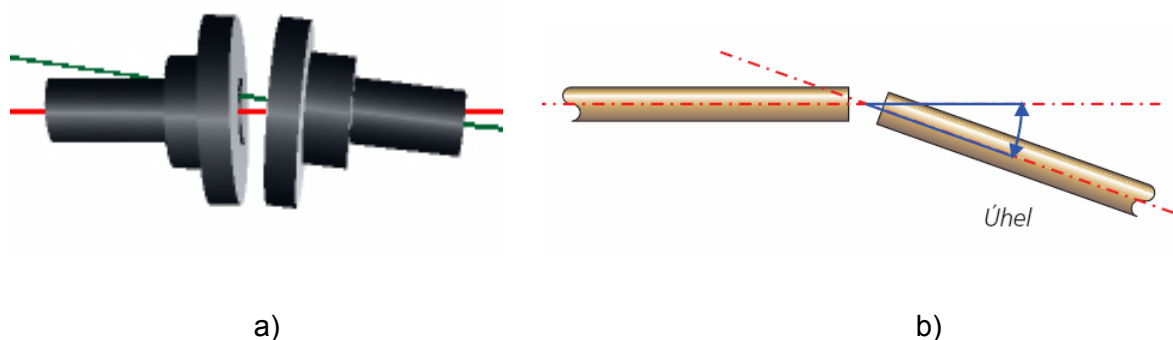
Je možné říci, že dodnes většina diskusí o ustavování začíná definováním nesouososti a určením typu nesouososti. Takže je nutné z pedagogického pohledu v této kapitole poukázat na daný problém tak, aby v budoucnu nevznikl zbytečný šum v komunikaci.

Vydeme-li z [1], [2], [9] a [10], tak najdeme následující. Nesouosost na obr.2a je v literatuře [1], [2], [9] nazývána jako **posunutí** (Ofsset Misalignment) a v [10] jako **radiální přesazení**.

Obdobně je to při definování dalšího základního druhu nesouososti - tzv. **úhlová nesouosost** (Angular Misalignment) na obr.3a dle [1], [2] a [9], respektive **axiální přesazení** dle [10] - obr.3b.



Obr.2 Radiální přesazení (posunutí)

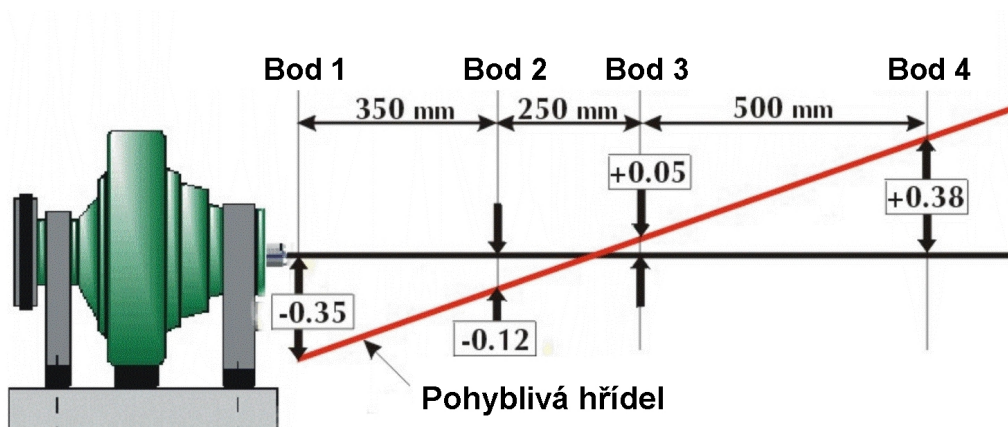


Obr.3 Axiální přesazení (úhlová nesouosost)

Každopádně jednoznačné je, že:

- **radiální přesazení** - znamená vzdálenost mezi osami v daném bodě (obr.2a a obr.4), tzn. ustavením chceme dosáhnout stavu, kdy rotační osy ustavovaných strojů budou souosé, což znamená eliminování posunutí ve všech bodech podél hřídele - viz. již zmíněný obr.4, ale také obr.2.b.
- **axiální přesazení** - znamená úhel mezi dvěma osami rotace - obr.2b a obr.5. Jak je patrné, tak hřídel pohyblivého stroje je nakloněn ke hřídeli stacionárního (referenčního) stroje. Sklon je kvantifikován jako rozdíl posunutí v nějakých dvou rovinách (např. 2 a 1), dle [1], [2], [9].

Je určitě zřejmé, že v provozní praxi existuje kombinace obou základních typů nesouososti, proto před další kapitolou uvedeme několik nutných poznámek.

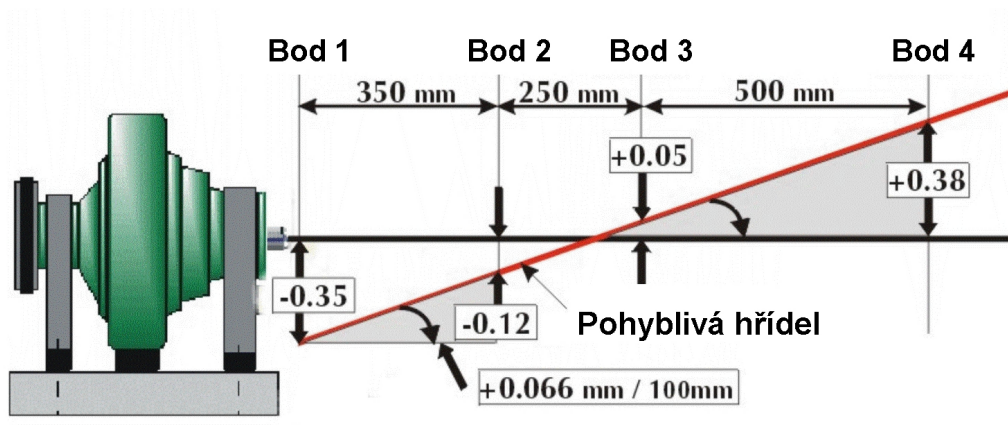


Obr.4 Radiální přesazení (posunutí) hřídele. Odchylky rotační osy jednoho hřídele od osy jiného hřídele v určitých bodech (nebo rovině) podél hřídele.

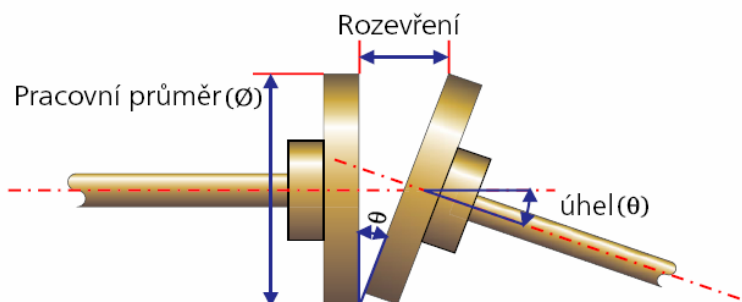
$$\frac{\text{BOD2} - \text{BOD1}}{\text{VZDÁLENOST}} = \frac{-0,12 - (-0,35)}{350} = 0,00066 \text{ mm / mm} ,$$

což v častěji používaném tvaru

$$0,00066 \times 100 / 100 \text{ mm} = 0,066 \text{ mm / 100 mm} .$$



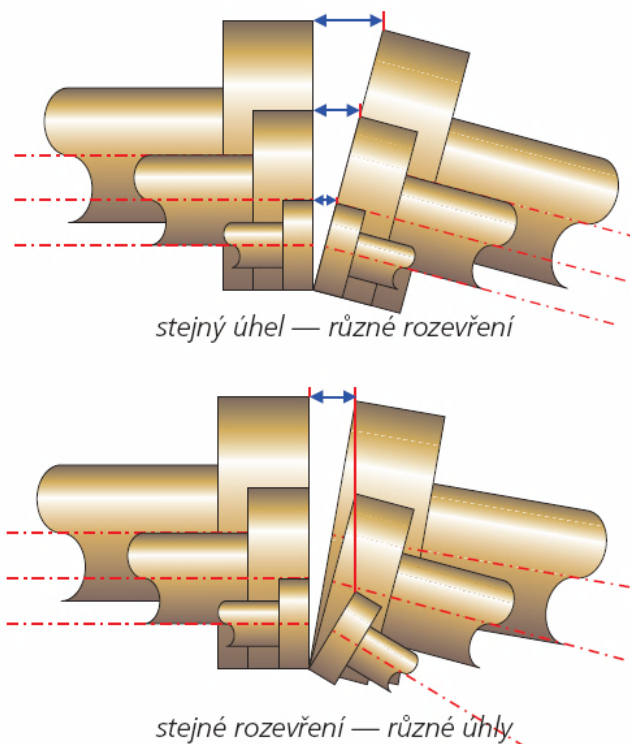
Obr.5 Axiální přesazení (úhlové vychýlení) hřídele. Vzájemný sklon dvou os otáčení.



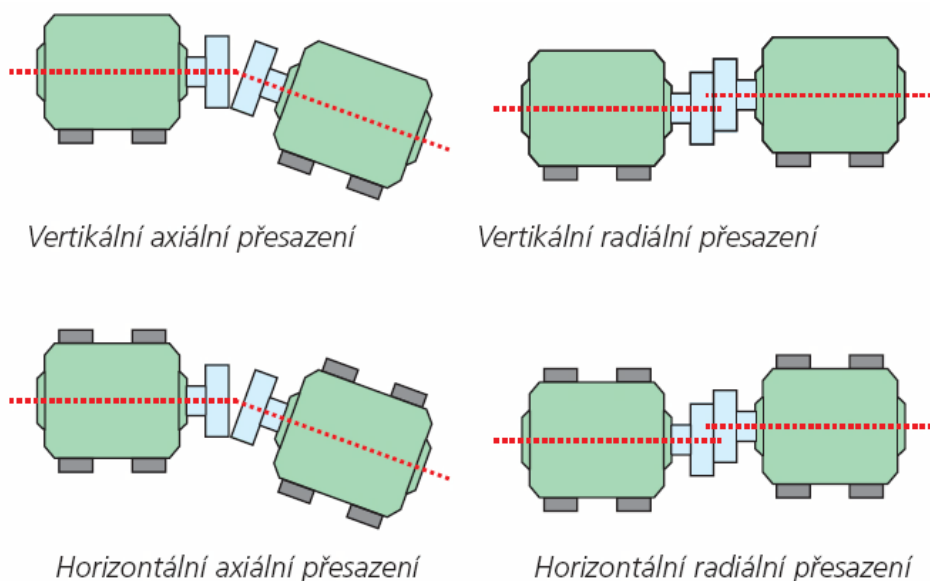
Obr.6 Vztah mezi úhlem, rozevřením a pracovním průměrem spojky

Z literatury [10] citujeme - axiální přesazení (úhlové vybočení) lze vyjádřit ve stupních či v jednotkách [mrad] - konec citace nebo v již uvedených [mm/m]. Další způsob axiálního přesazení je poměr rozevření k průměru spojky - obr.6. Takže například spojka o průměru $\varnothing 152,4$ mm a rozevření 0,127 mm odpovídá úhlu mezi osami 0,83 mrad (1 mrad = 1 mm/m).

Další pohled na vztah mezi úhlem rozevření a průměrem spojky je na obr.7, který není určité nutno vzhledem k popisu dále komentovat a na obr.8 jsou shrnuty možné varianty nesouososti.



Obr.7 Vztah mezi úhlem rozevření spojky a jejím průměrem



Obr.8 Varianty nesouososti

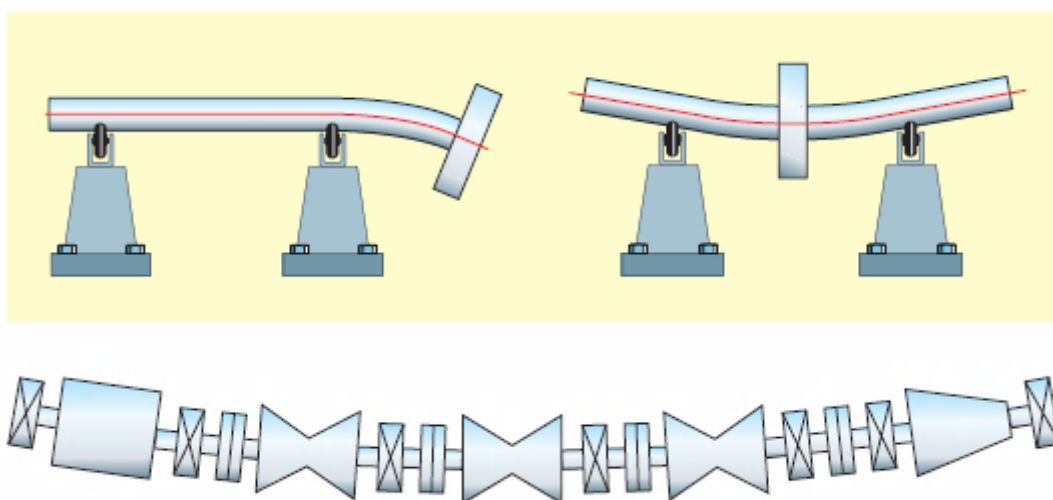
2.2.2 Hřídelová a spojková nesouosost

Určitě je už zřejmé, že ustavení hřídelů znamená naplnit následující [10] - pokud stroj pracuje za běžných provozních podmínek, měly by osy rotace obou hřídelů procházet bodem, ve kterém se výkon přenáší z jednoho hřídele na druhý - konec citace. Důležité je zde „procházet bodem, ve kterém se přenáší výkon“, neboť hřídele vzhledem ke své hmotnosti jsou vždy poněkud prohnuté, takže osa není přímka a potom místo pro posuzování ustavení os hřídelů je opravdu pouze místo, kde se přenáší výkon z jednoho hřídele na druhý.

Nelze zaměňovat „ustavení hřídelů“ a „ustavení spojek“, protože vnější plochy spojky nereprezentují osy rotace hřídelů, tak zvané „háží“ a navíc většinou není známa přesnost nasazení spojky na hřídeli.

Ustavení se mění, pokud je stroj v provozu. K tomu může vést řada důvodů, jako např. teplotní růst, pnutí potrubí, točivý moment, pohyb základu stroje a zatížení (posuv) ložiska. Protože ustavení se zpravidla měří a provádí na studeném stroji, nemusí být ustavení za provozních podmínek ideální. Při měření ustavení by se mělo otáčet hřídelem v tom směru, v jakém rotují při provozu stroje. Většina čerpadel, ventilátorů apod. má šipku, která naznačuje standardní smysl otáčení.

Míra prohnutí závisí na několika faktorech jako jsou tuhost hřídelů, umístění hmoty rotoru - uprostřed nebo letmo, typ ložiska a vzdálenost mezi podporami - ložiskovými stojany (obr.9). U naprosté většiny strojů je takovéto prohnutí nepatrné a pro praktické účely lze ignorovat. U extrémně dlouhých soustrojí, např. turbosoustrojí v elektrárnách nebo u strojů s vloženým hřídelem, např. u ventilátorů chladících věží nebo plynových turbín, se však křivka prohnutí musí brát v úvahu. U vyobrazené parní turbíny jsou hřídele ustaveny s přesností lepší než 0,01 mm, ale střed hřídele prostředního stroje by měl být o 30 mm níže než krajní body hřídelů soustrojí.



Obr.9 Průhyb hřídele od vlastní hmoty

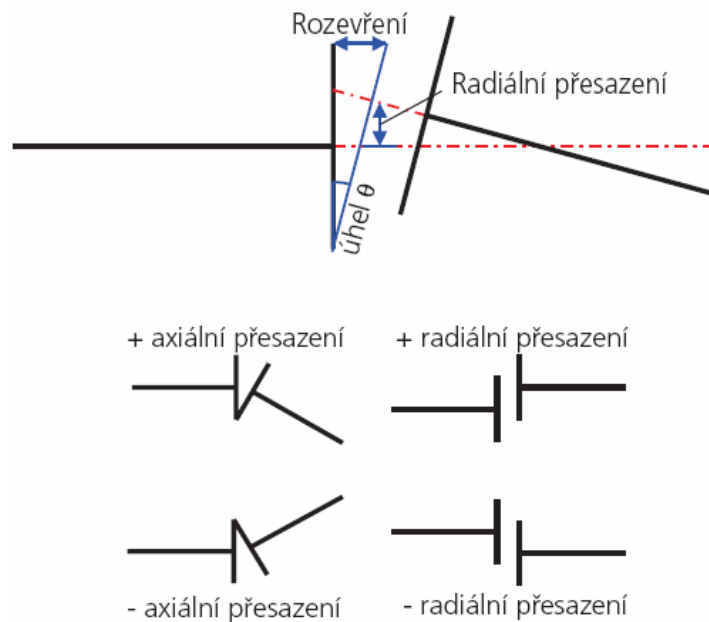
Když velmi dlouhý a pružný hřídel začíná rotovat, prohnutí se snaží narovnat, nicméně hřídel nebude nikdy ideálně přímý. Je důležité porozumět tomu, že osa rotace může být obecně křivka. V situacích, kdy jsou dva nebo více strojů vzájemně spojeny a jeden nebo více hřídelů rotuje ve tvaru “průhybovky”, je důležité ustavit hřídele tak, aby se dodržovala křivka průhybu jako křivka rotace.

Stroje s krátkými pružnými spojkami, které mají střední nebo vysoké otáčky, se musí ustavit velmi přesně, aby se zabránilo přetížení hřídelů, ložisek a těsnění. Protože ustavení v praxi je vždy kombinace axiálního a radiálního přesazení a poloha pohyblivého stroje se upravuje většinou ve vertikální a horizontální rovině, jsou zapotřebí 4 hodnoty, kterými je ustavení popsáno - definováno:

- Axiální přesazení ve vertikální rovině - někdy také úhlové vybočení nebo rozevření.
- Radiální přesazení ve vertikální rovině.
- Axiální přesazení v horizontální rovině - někdy také úhlové vybočení nebo rozevření.
- Radiální přesazení v horizontální rovině.

Na obr.10 jsou znázorněny konvence pro označování a jejich znaménka.

Vložené hřídele se instalují zpravidla tehdy, pokud lze očekávat změny v ustavení během provozu stroje, například vlivem tepelného růstu. Při použití dlouhého vloženého hřídele se projeví malá změna axiálního přesazení i v tom případě, že dojde k velké změně polohy stroje. Přesnost ustavení strojů s vloženým hřídelem s pružnými elementy není tak kritická jako u strojů spojených krátkou pružnou spojkou.

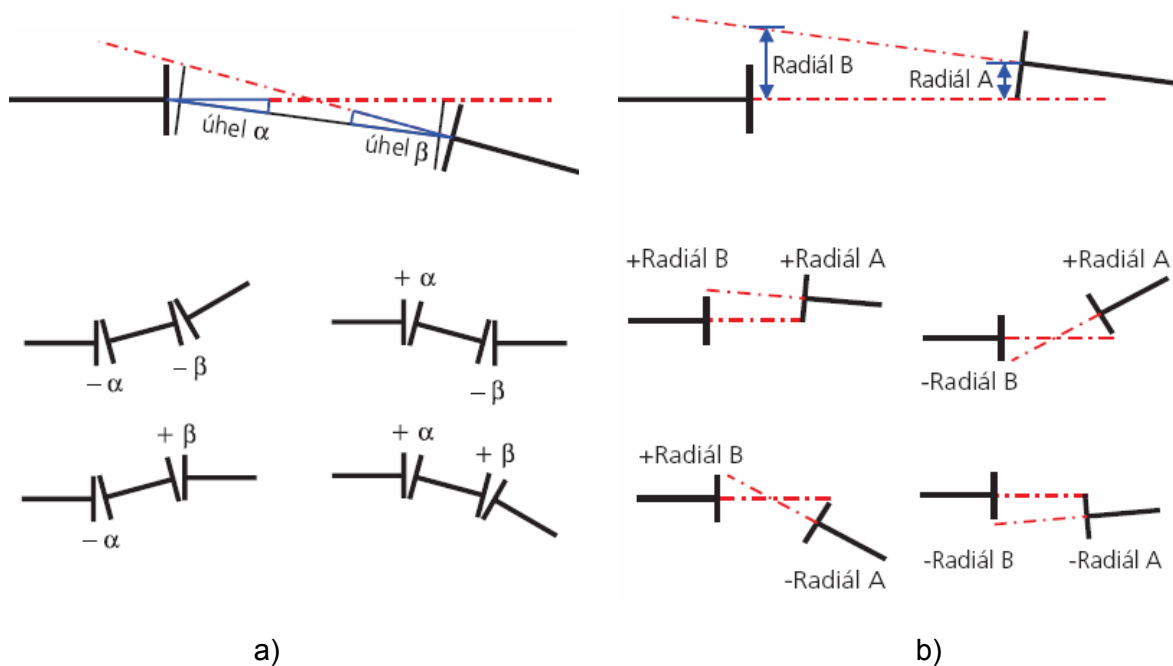


Obr.10 Znaménkové konvence při ustavování

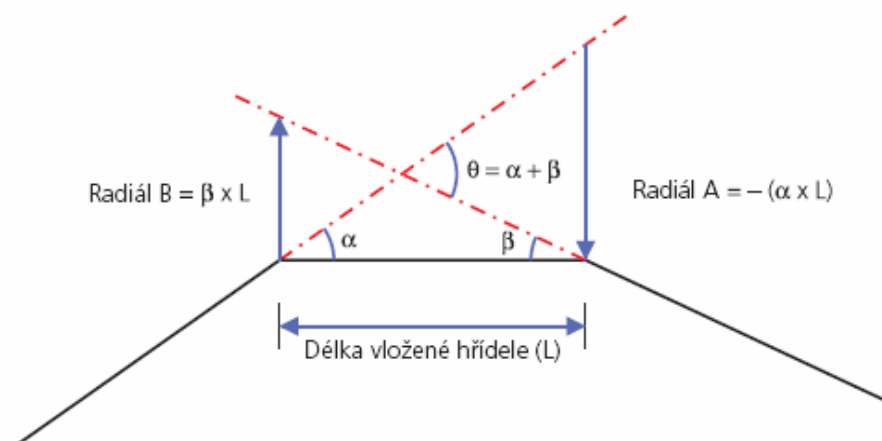
Pro popis ustavení jsou zapotřebí následující 4 hodnoty:

- **Úhel alfa α ve vertikální rovině**
Alternativa - Radiální přesazení ve vertikální rovině B
- **Úhel beta β ve vertikální rovině**
Alternativa - Radiální přesazení ve vertikální rovině A
- **Úhel alfa α v horizontální rovině**
Alternativa - Radiální přesazení v horizontální rovině B
- **Úhel beta β v horizontální rovině**
Alternativa - Radiální přesazení v horizontální rovině A

Úhly se měří mezi osou rotace vloženého hřídele a osou rotace příslušného stroje. Jako alternativu k úhlům **alfa α** a **beta β** jsme použili radiální přesazení, což je jistě patrné z obr.11a a obr.11b a vztahy mezi úhly, radiálním přesazením a délkou vloženého hřídele z obr.12.

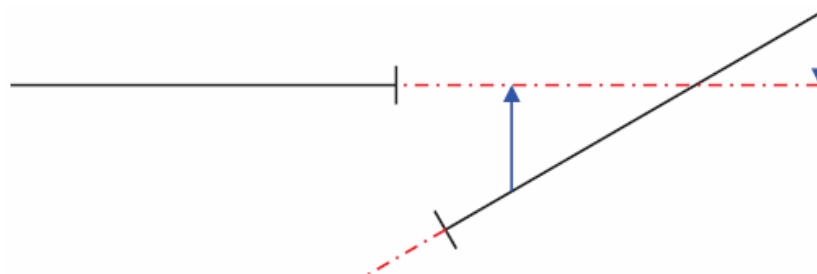


Obr.11 Znaménkové konvence u vložených hřídelů

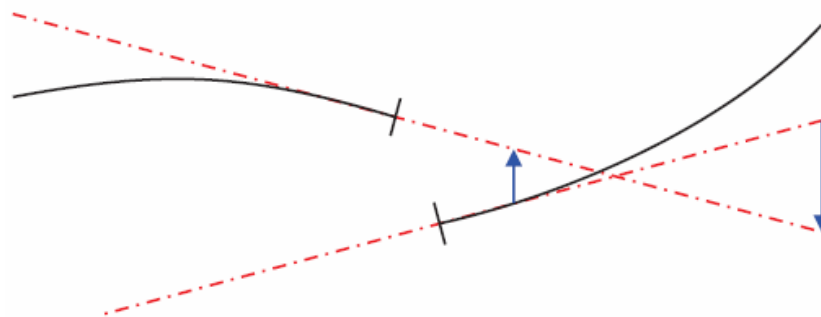


Obr.12 Vztahy mezi úhly, radiálním přesazením a délkou vloženého hřídele

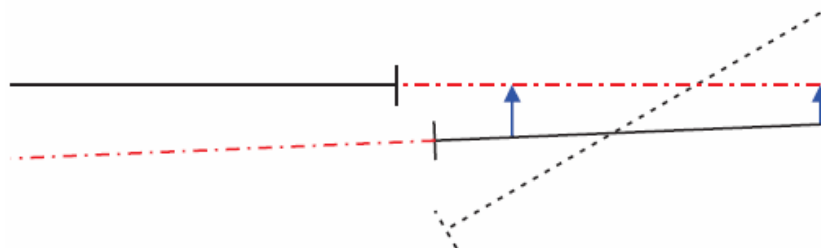
Další důležitý fakt, který si musíme plně uvědomit při měření hřídelové a spojkové nesouososti je, že pokud se měří při neuvolněné spojce, tak jakékoliv pohnutí se strojem zvyšuje napětí na spojce a tím ohnutí hřídele - obr.13.



Toto je stav (nesouosost) u nespojených hřídelů.



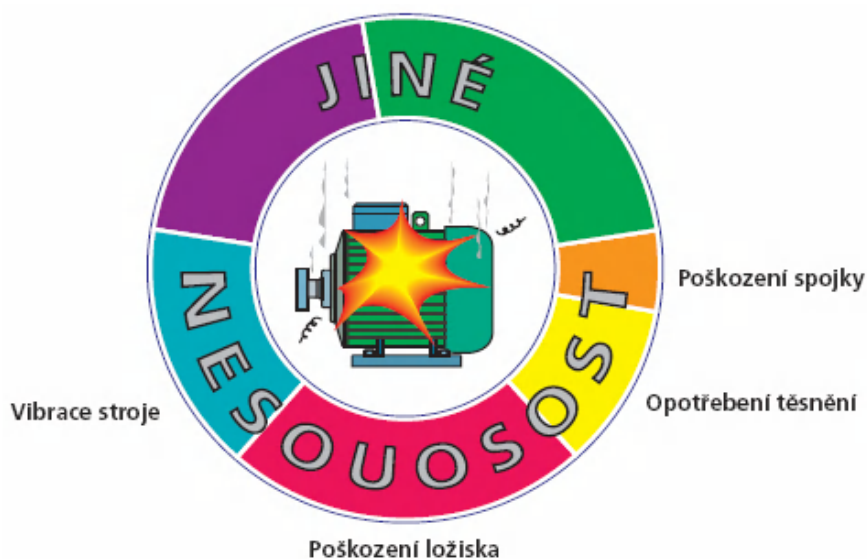
*Toto je stav (nesouosost) po spojení hřídelů.
Předpokládaná poloha os rotace.*



Korekční pohyb podle naměřených hodnot u spojených hřídelů. Spojka je méně namáhána a hřídele budou patrně v dalším kroku ještě lépe ustaveny.

Obr.13 Namáhání spojky a prohnutí hřídele

Dosti často se setkáváme s otázkou „Proč ustavovat stroje, když spojky snesou i velkou nesouosost“, ale zkušenost [10] hovoří o něčem jiném - až u 50% selhání strojů je jako příčina zjištěno - nesprávné ustavení hřídelů (obr.14).



Obr.14 Příčiny selhání strojů

Je pravda, že spojky snesou velkou nesouosost. Dokonce až hodnotu 10 mm radiálního přesazení. Ale zatížení hřídelů, ložisek a těsnění se dramaticky zvyšuje vinou nárůstu střídavých sil (zatížení) při nesouososti hřídelů.

Z obr.14 je také zřejmé, že nesouosost spojek způsobuje další uvedená poškození a selhání. Detekce nesprávného ustavení stroje, který je v provozu, je obtížné. Radiální síly, přenášené z hřídele na hřídel, se měří jen velmi obtížně. V současné době neexistuje dostupný analyzátor nebo senzor, kterým lze po instalaci na těleso stroje změřit síly, působící na ložiska, hřídele nebo spojky. V důsledku toho můžeme pozorovat pouze sekundární účinky těchto sil, které mohou zahrnovat následující příznaky (symptomy), již uvedené v kap.1.1.

Mnoho provozovatelů rotačních strojů považuje konvenční ustavovací metody za plně dostatečné. Avšak v případě dotazu na střední dobu životnosti zařízení mezi jednotlivými poruchami, nejsou schopni uvést přesnější údaje. Z běžné praxe je známo, že tam, kde se používají k ustavování číselníkové úchylkoměry, je tato doba přibližně 9 měsíců [10].

Hlavním důvodem pro přesné ustavení hřídelů je spolehlivý provoz rotačních strojů, zvláště pak jejich součástí s největším výskytem selhání. Součásti, u kterých je pravděpodobnost selhání nejvyšší, jsou ložiska, ucpávky, hřídele, spojky apod. Přesným ustavením strojů lze dosáhnout výsledků vedoucích k maximalizaci provozní spolehlivosti - opět již bylo uvedeno dříve v kap.1.1.

Na závěr této kapitoly je nutno uvést poznámku týkající se otázky „Je hladina (vodováha) a souosost totéž?“. Musíme si uvědomit, že termín vodováha souvisí se zemskou gravitací a tím, že je zemský povrch zakřiven, nemůže být vodováha v rozdílných místech na zeměkouli stejná. Naopak souosost hřídelů nastane při společné ose rotace všech hřídelů a tato osa může a nemusí být kolmá na směr gravitace. Výjimečně se stává, že například válcovací tratě se vyrovnávají do osy a na hladinu a je zřejmé, že další kombinace jsou dány: vyrovnáním do osy a nikoli na hladinu, vyrovnáním na hladinu a nikoli do osy.

2.3 Základy, základové rámy

Vlastní proces ustavování se již podstatně usnadní správnou projekcí (návrh základů a základových rámu, krytů strojů, apod.) a následně správnou montáží (ustavení), včetně provádění nutné péče během provozování. Každá rotující pohonná jednotka (strojní systém) musí být navržena nejen z hlediska únosnosti stavby (konstrukčního uzlu), ale také k zajištění stabilní polohy při provozu (vliv vibrací) a také musí být posouzen vliv provozu (především vibrací) na okolní prostředí. Je nutné si uvědomit, že vibrace působí na stroj nejen od vlastního provozu, ale také od okolních strojů, což už samo o sobě může způsobit vyosení a samozřejmě vysoce náročnou záležitostí je řešení problému rezonance. Přičteme-li k již nastíněnému vlivu provozní teploty, možné posuny základů dlouhodobým provozem, hmotnosti objektu a další vlivy, pak je nade vše pochybnost patrné, proč musíme danému problému věnovat takovou pozornost.

Základy dělíme na **tuhé** a **plovoucí**. Tuhé se používají v průmyslových objektech, plovoucí pak v objektech kancelářských, nemocnicích a podobně.

Tuhé základy jsou ve své podstatě betonové armované základy dělané do zámrazné hloubky oddělené od okolní zeminy izolační vrstvou a mezi stroji zeminou, která je zde svým způsobem tlumičem rázů a také podpěrou tuhých základů. Upevnění strojů k základu je provedeno pomocí kotevních šroubů.

Plovoucí základy nacházíme u rotujících soustrojí v patrech budov a podobně. Rotující soustrojí je připevněno k základové desce, která je pružně uložena vůči desce betonové, tzn. musíme izolovat vibrace od podlahy a stěn budovy, kde je soustrojí uloženo.

Základové rámy se dělí na odlévané a svařované.

K jedním z největších problémů je řešení uložení potrubních systémů mezi soustrojími. Tento problém by vyžadoval samostatné zpracování a to není cílem těchto skript. Další podrobnosti k některým problémům z pohledu ustavování najdeme v literatuře, například [8].

2.4 Spojky pružné a tuhé

Úvodem si dovolíme připomenout, že spojka je jednou z nejdůležitějších komponent pohonné jednotky. A jelikož nikdy není možné zajistit naprosto ideální přímku rotačních os dvou nebo více hřídelů, tak musí spojky vykazovat určitý stupeň ohebnosti, čímž kompenzují statickou a dynamickou nesouosost.

Vlastní spojení je tak vždy lepší nebo horší, což je ale pojem relativní. Hlavním úkolem je provést správné a přesné ustavení, nikoli hledat spojku schopnou kompenzace chyby v ustavení. Při volbě spojky se pak neřídíme jen podle „dovoleného přesazení“, ale musíme rozlišovat toleranci spojky a toleranci ustavení.

Bylo by nošením dříví do lesa, kdybychom nyní vyčerpávajícím způsobem popisovali jednotlivé druhy spojek, proto pouze doslova heslovitě připomínáme, že ke spojkám pružným řadíme například zubové spojky, Bibby spojku, pružnou deskovou spojku, čepovou spojku, Periflex a další, blížeji v [8] a další nespecifikované literatuře.

Dále existují tzv. pevné spojky, tedy dva hřídele spojené pevnou spojkou se chovají jako jeden hřídel a tolerance vyosení hřídelů jsou srovnatelné s házivostí hřídelů.

V literatuře [8] je uvedena celá řada úvah od návrhu spojení hřídelů, definování úkolů a požadavků na spojky, k mazání pružných spojek a další, ale také nepomíjitelný fakt, že po zvolení správného typu spojky je nezbytné zajistit její správnou montáž, neboť doopravdy není nic jednoduššího, než zničit spojku již špatným lícováním, provedením destruktivních montážních postupů a podobně.

2.5 Postup a přístup k ustavování

Vydeme-li z klasické literatury v problematice ustavování [8], tak v přehledu činností při ustavování najdeme:

- zakoupit, vyrobit potřebné nástroje a měřicí zařízení a vyškolit pracovníky,
- získat důležité informace o objektu ustavování,
- zajištění bezpečné práce,
- provedené předběžné kontroly (spojky, základu nebo základového rámu, ložiskové vůle, házivostí hřídele a spojky a podobně,
- provedení přibližného ustavení,
- jestliže není dosaženo tolerancí souososti, tak provést přesné ustavení,
- namontovat nebo provést spojení spojkou,
- za provozu měřit vibrace objektu, vibrace ložisek, teplotu spojky a další.

Použijeme-li literaturu [1] a [9], tak v řešení přístupu k ustavování rozhoduje stanovení cíle:

- **Jedná se o kontrolu souososti?**
- **Jedná se o nápravu (korekci) nesouososti (špatného ustavení)?**

Pokud chceme zjistit a zdokumentovat „stávající stav ustavení“, použijeme postupy pro kontrolu souososti. Tyto postupy se obvykle aplikují:

- když existuje předpoklad, nikoliv však jistota, že stroje jsou špatně ustaveny,
- pro zdokumentování stavu ustavení před odstavením z provozu,
- pro ověření, že parametry ustavení jsou v tolerancích.

Postupy pro nápravu špatného ustavení volíme:

- před uvedením nových nebo rekonstruovaných strojů do provozu,
- pokud je známo, že stroj je mimo tolerance,
- poté, co kontrola ukázala, že neustavení není v toleranci.

❖ **Kontrola souososti**

Postup kontroly souososti:

- připravte zařízení nebo systém pro ustavování,
- změřte neustavení,
- zdokumentujte a uložte stav ustavenosti,
- zhodnoťte stav ustavenosti soustrojí.

❖ **Korekce nesouososti**

Úplný postup přesného ustavení:

- proved'te přípravné kontroly a korekce,
- připravte měřicí pomůcky (přípravky) nebo systém pro ustavování,
- zkontrolujte a opravte měkké patky,
- změřte neustavení,
- zhodnoťte stav ustavení soustrojí,
- proved'te přesné korekce ustavení,
- proved'te opakované měření a stav ustavení zdokumentujte.

Vlastní ustavovací proces je rozdělen do fází uvedených dále.

Tři fáze ustavování

Procesy ustavování se liší v rozsahu od periodické kontroly až po komplexní instalaci stroje. Obvykle, je-li úkolem pouze shromáždit kompletní soubor dat o aktuálním stavu ustavení stroje, není nutné systematicky projít celou komplikovanou procedurou, jejíž provedení je vyžadováno při instalaci nového stroje nebo jeho rekonstrukci či provedené opravě, resp. výměně. Nicméně většinou termín proces ustavení znamená provedení všech tří fází procedury ustavení. Uvádíme pouze stručný popis, neboť více bude v kapitole 3.

1. fáze - Příprava (Pre-Alignment)

V první etapě se provádí rozvržení prací a také předběžné kontroly, které pomohou, aby následující etapy proběhly hladce. Tato přípravná fáze obvykle zahrnuje kontroly teplotního nárůstu, volbu ustavovací metody, odpojení příslušenství, kontrola opotřebování (run-out) hřídele a spojky a další přípravné práce.

2. fáze - Hrubé ustavení (Rough Alignment)

Nyní nastává čas zajistit, aby osy hřídelů strojů byly přibližně v ose (in-the-ballpark). Neexistují žádná pravidla, která by říkala, jak přesné má ustavení hřídelů být, než se přikročí k přesnému ustavení, nebo jakou metodu pro přesné ustavování zvolit. Hodně záleží na strojích samotných a na zkušenostech osoby provádějící ustavení. Je to fáze, ve které chceme dosáhnout toho, aby osy hřídelů byly dostatečně blízko, aby bylo možné zahájit proces přesného ustavení. Obecně se za "hrubé ustavení" považuje stav, kdy posunutí na spojce je okolo 0,050 palce (1,27 mm) a vertikální a horizontální úhlová úchylka je asi 0,010 palce/palec (0,254 mm/mm).

3. fáze - Přesné ustavení (Precision Alignment)

Závěrečnou fází je přesné ustavení. K jeho dosažení jsou obvykle používány metody popsané v kap.3 a jejichž přehled bezprostředně následuje. Naším cílem je, aby na konci této etapy byly hřídele správně ustaveny v rámci specifikovaných tolerancí. Pro definování a provedení korekcí neustavení je nutné velmi spolehlivé a výkonné zařízení.

2.6 Přehled metod k ustavování

Existuje široké spektrum metod pro měření neustavení. K nejběžnějším patří:

❖ Mechanické metody

- **příměrná pravítka** (Straight edge)
- **lístkové spároměrky** (Feeler gauges)
- **kalibrované kužele** (Calibrated cones)

Tyto nástroje se dosud v praxi běžně používají a mají své místo v procesu přesného ustavení jako metoda k dosažení hrubého ustavení. Zmíněné metody závisí na integritě čel spojek a na jejich házení (run-out) vzhledem k ose hřídele. Jsou to jednoduché metody a ku příkladu u spojek s rozdílným průměrem je velmi obtížné provést odečty ve všech čtyřech měřících bodech.

❖ Přehled metod používajících číselníkové úchylkoměry

Existují dvě základní metody pro ustavování hřídelů do osy pracující s číselníkovými úchylkoměry:

- **čelně obvodová metoda**
- **reverzní obvodová metoda**

❖ **Laserové systémy**

- **jeden laser s jedním nebo dvěma cíli**
- **dvojice laserů jako reverzní indikátorová metoda**

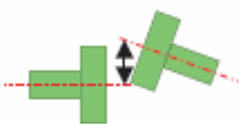
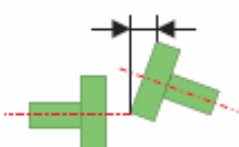
Závěrem této kapitoly uvádíme základní stručné posouzení metod ustavování:

- Ustavování “od oka” průměrným pravítkem bylo (a někde stále ještě je) často používanou metodou. Protože rozlišovací schopnost lidského oka je asi $1/10$ mm, je tím limitována i přesnost ustavení. Korekční hodnoty pro patky stroje jsou obvykle odhadovány a víceméně záleží na zkušenostech ustavujícího pracovníka a jeho znalostech o ustavovaném stroji. Výsledek: stroj se ustavuje několikrát, dokud není více či spíše méně přesně ustaven a přesto ani potom není přesnost ustavení nijak závratná.
- Ustavování pomocí číselníkových úchylkoměrů znamená výrazné zvětšení přesnosti - o řád, tedy na $1/100$ mm. Předpokládá to však patřičně zkušeného a vyškoleného pracovníka, který namontuje vše potřebné a bude při měření správně postupovat. Nezbytnou pomůckou pro výpočet korekčních hodnot pro patky je kalkulačka.
- Laserové přístroje měří s přesností až $1/1000$ mm a řídicí jednotka automaticky po vložení požadovaných rozměrů vypočítá korekční hodnoty pro patky, přesazení v rovině spojky a informuje, zda ustavení je v požadované toleranci.

2.7 Tolerance ustavování

V provozních podmínkách je u rotujících strojů tolerance ustavení závislá na mnoha skutečnostech, jako například na provozních otáčkách, účinnosti, typu spojky, délce vloženého hřídele, charakteru jednotlivých strojů nebo očekávané životnosti soustrojí. Protože není možné a praktické brát v úvahu všechny vlivy, je nutné určité zjednodušení, které bude patrné také z následujících tabulek.

Tab.1 Doporučené hodnoty tolerancí ustavení [10]

	Otáčky RPM	Metricky (mm)		Inch (mils)	
		Přijatelné	Výborné	Přijatelné	Výborné
Krátká pružná spojka Radiální přesazení: 	600			9.0	5.0
	750	0.19	0.09		
	900			6.0	3.0
	1200			4.0	2.5
	1500	0.09	0.06		
	1800			3.0	2.0
	3000	0.06	0.03		
	3600			1.5	1.0
	6000	0.03	0.02		
	7200			1.0	0.5
Axiální přesazení: Hodnoty axiálního přesazení se vztahují na referenční průměr spojky 100 mm, resp. 10 inch 	600			15.0	10.0
	750	0.13	0.09		
	900			10.0	7.0
	1200			8.0	5.0
	1500	0.07	0.05		
	1800			5.0	3.0
	3000	0.04	0.03		
	3600			3.0	2.0
	6000	0.03	0.02		
	7200			2.0	1.0
Vložený hřídel a membránová disková spojka Přesazení se vztahuje na 100 mm, resp. 1 inch délky vložené hřídele 	600			3.0	1.8
	750	0.25	0.15		
	900			2.0	1.2
	1200			1.5	0.9
	1500	0.12	0.07		
	1800			1.0	0.6
	3000	0.07	0.04		
	3600			0.5	0.3
	6000	0.03	0.02		
	7200			0.3	0.2
Volná patka	Všechny	0.06		2	

V metrické soustavě jsou tolerance vztaženy pro stroje napájené s frekvencí 50 Hz a s otáčkami, které jsou násobkem nebo zlomkem 3000 min^{-1} (RPM).

Tab.2 Běžně akceptovatelné tolerance [1], [9]

	Úhlová nesouosost mm/100 mm 		Posunutí mm" 	
min^{-1}	Výborný	Vyhovující	Výborný	Vyhovující
-1000	0.06	0.10	0.07	0.13
-2000	0.05	0.08	0.05	0.10
-3000	0.04	0.07	0.03	0.07
-4000	0.03	0.06	0.02	0.04
-5000	0.02	0.05	0.01	0.03
-6000	0.01	0.04	>0.01	>0.03

Tab.3 Doporučené hodnoty horizontálního náklonu rotujících soustrojí [8]

Typ stroje	Minimální doporučený sklon	Maximální doporučený sklon
Běžné stroje s válivými ložisky	0,01" / stopa 0.254 mm / 304,8 mm	0.03" / stopa 0.762 mm / 304,8 mm
Běžné stroje s kluznými ložisky (do 500 HP)	0.005" / stopa 0.127 mm / 304,8 mm	0.015" / stopa 0.381 mm / 304,8 mm
Výrobní stroje s válivými ložisky (nad 500 HP)	0.005" / stopa 0.127 mm / 304,8 mm	0.020" / stopa 0.508 mm / 304,8 mm
Výrobní stroje s kluznými ložisky (nad 500 HP)	0.002" / stopa 0.051 mm / 304,8 mm	0.008" / stopa 0.203 mm / 304,8 mm
Obráběcí stroje	0.001" / stopa 0.025 mm / 304,8 mm	0.005" / stopa 0.127 mm / 304,8 mm

3 Metody ustavování

Cílem této kapitoly je seznámit se s existujícími metodami a možnostmi v ustavování strojních systémů. Je nutné si uvědomit, že každá z metod má své výhody a nevýhody, resp. neexistuje metoda nebo přístroj, který je naprosto universální a vyřeší všechny možné problémy. Je tudíž nutné řešit také volbu metody ustavování, která je vhodná k řešení ustavení daného objektu. Někdy také musíme řešit problematiku verifikace používané metody na daném objektu, resp. ověření naměřených dat metodou jednou metodou druhou. Rovněž je nutné mít na mysli, že vždy vlastně měříme relativní polohy dvou rotujících hřídelů, řečeno jinými slovy, metody uvedené v této kapitole nám dají návod, jak najít polohy os rotací dvou hřídelů za klidu strojního systému.

3.1 Předběžná kontrola ustavení a předustavovací procedury

Obecně lze říci, že práce před vlastním ustavením se dají definovat do následujících etap:

1. **Příprava** - činnosti prováděné před odchodem na místo měření:

- Které bezpečnosti předpisy bude nutno dodržovat?
- Mám správná pracovní povolení?
- Existuje nějaké časové omezení pro přerušení provozu?
- Je stroj elektricky izolovaný?
- Jaké tolerance ustavení je třeba splnit?
- Existují nějaká posunutí (offsets), která je třeba vzít v úvahu?
- Bude dostatek prostoru pro montáž přípravků (bude potřebný tenký řetěz)?
- Bude možné otáčet hřídelem?
- Jaké velikosti podložek budou potřebné?
- Je přístrojové vybavení pro měření kompletní, jsou nabitě baterie?
- Existují nějaké požadované hodnoty utahovacích momentů pro šrouby?
- Existují nějaké specifikace pro mezeru na spojce?

2. **Vizuální kontroly na místě** - prováděné před zahájením jakékoliv činnosti:

- Je toto správný stroj?
- Ujistěte se, že je stroj vypnutý a, pokud je to možné, zajistěte tuto pozici.
- Jaký je přístup ke stroji? Kolik je tam míst?
- Zkontrolovat stav základů (trhliny a poškození).
- Zkontrolovat stav základové desky (trhliny a rez).
- Zkontrolovat stav šroubů a jak velký rozsah seřízení poskytují?
- Zkontrolovat stávající podložky.
- Zkontrolovat případné netěsnosti kolem těsnění na ložiskových domcích a spojce.

3. Opatření prováděná na místě - zjištění objektivních potřeb prováděných před ustalovacím procesem. Pokud se oprostíme od základních a zřejmých faktů, jako je vyklizení nutného obslužného prostoru pro měření, očištění a odmaštění, tak se jedná o následující úkony a problémy:

❖ **Vhodná teplota stroje pro ustavení**

Před zahájením ustavování je rozumné zkontrolovat teplotu strojů, které budeme ustavovat. Je to nezbytné, pokud budeme muset kompenzovat teplotní nárůst (viz. kap.4 a kap.5). Pokud mají být hodnoty posunutí (offsetu) užitečné, je důležité, aby byl stroj "studený", jelikož hodnoty posunutí jsou často počítány a použity, když má stroj asi 20 ÷ 25°C (65 ÷ 75°F). Pokud ustavíte stroj, když chladne, nikdy nedostanete opakovatelné hodnoty a budete muset celý proces alespoň jednou opakovat. Pomocí teplotního čidla / přístroje změřte teplotu strojů na několika místech. Měření teploty proveďte na plášti i na ložiskových pouzdrech. Rozdíly by neměly být větší 10 ÷ 15%.

❖ **Stav podložek**

Staré a zkorodované podložky je třeba odstranit a nahradit novými z nerezavějící oceli. Vyhněte se "podomácku / na koleně vyrobeným" podložkám z mosazi, mědi a jiného měkkého materiálu.

Nikdy nepoužívejte více než 3 ÷ 4 podložky pod každou patku. Je-li jich více, vyměňte je za nové, silnější. Při použití více podložek vzniká při utahování šroubů pružinový efekt, což určitě bude působit problémy během procesu ustavování.

❖ **Montáž spojky**

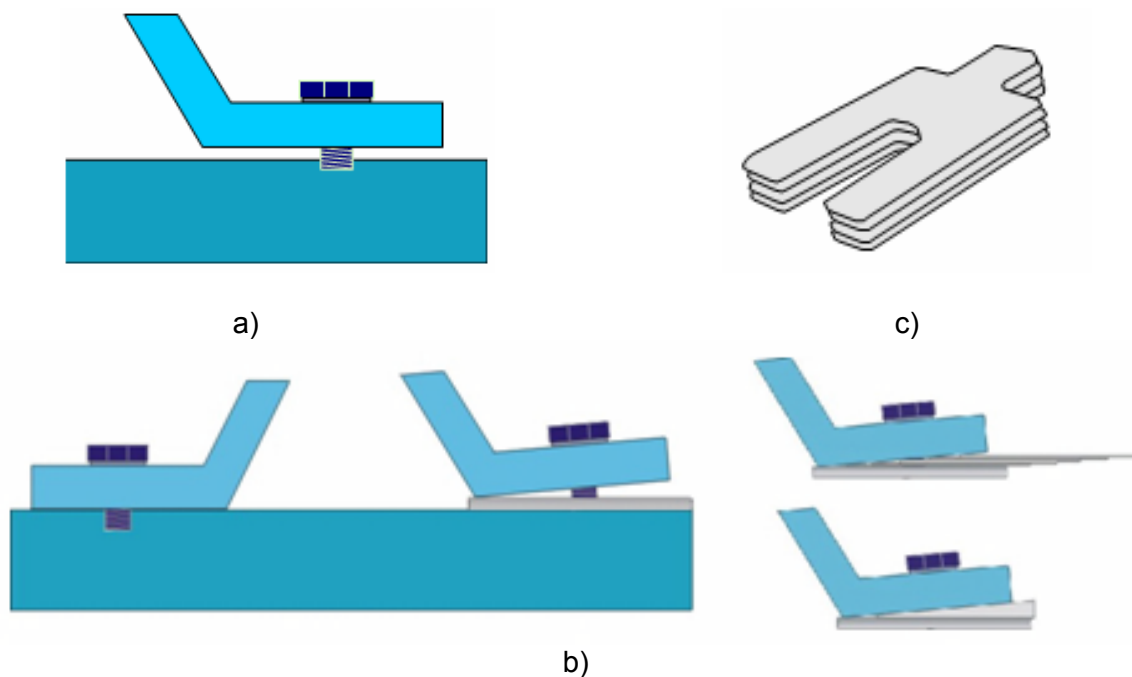
Před zahájením ustavování zkontrolujte, zda je spojka správně sestavena/smontována. Aby spojka pracovala správně, musí být montáž provedena v souladu se specifikací od výrobce. Abyste minimalizovali riziko pnutí, lehce povolte šroub na spojnici. Mohlo by se stát, že jeden ze strojů bude "viset" ve vzduchu, pokud spojka nebude volná. Toto je velice důležité v případě tuhých spojek.

❖ **Kontakt měřeného objektu se základovou deskou (rámem) - měkká patka**

Tak zvaná měkká patka je převažujícím problémem kontaktu objektu (stroje) se základem. Vlivem deformace základu (rámu) nebo i vlastního pláště stroje dochází k nedokonalému styku stroje se základem. Tento problém je častější u svařovaných základových rámu než u litých.

Snažíme-li se provádět ustavení, vzniká v důsledku měkké patky problém, kdy není možné dosáhnout opakovatelnosti hodnot ustavení ve vertikálním směru. Měkká patka způsobuje, že se motor během korekcí posouvá, jelikož zaváděním korekcí se vlastně mění poloha rotační osy. Měkká patka může způsobit též zkroucení pláště motoru při utažení šroubů. Zkroucení pláště motoru může vyústit ve špatné vyrovnaní ložisek, což má značný vliv na jejich životnost.

Nejčastěji se setkáváme s tzv. „krátkou patkou“ neboli „paralelní měkkou patkou“ (obr.15.a) a tzv. „skloněnou patkou“ (obr.15.b). Obr.15.c ukazuje tvar podložek pro ustavování.



Obr.15 Měkká patka

Problém měkké patky vzniká, když je například:

- nerovnoběžnost dosedacích ploch,
- jedna nebo více patek nemá vůbec kontakt,
- nerovnoměrné podkládání patek při ustavování stroje,
- teplotní deformace základů stroje nebo rámu,
- špatná kompatibilita při zabudování nového zařízení ke stávajícím rotačním soustrojím bez úpravy hlavního rámu, krytu stroje nebo připojeného potrubí.

Existuje mnoho způsobů, jak zjistit měkkou patku. Volba metody často závisí na způsobu, jakým se provádí vyrovnaní hřídelů. Zařízení, které se používá pro ustavování, se obvykle rovněž používá ke kontrole měkké patky. Je-li pro vyrovnaní hřídelů použit např. systém Fixturlaser, má zabudovanou i funkci pro kontrolu měkké patky. Během procedury ustavování se zároveň provede i kontrola, zda se rotující hřídele při uvolnění a utažení šroubů na patkách stroje posunují. Pokud ano, znamená to, že se jedná o měkkou patku. Podrobný popis k danému problému viz [1], avšak šířeji v [8].

❖ Mechanické uvolnění a opotřebení

Tato kontrola se provádí pro identifikaci případného uvolnění v ložiscích, převodech nebo jiných mechanických částech stroje, které ovlivňuje výsledek ustavení. Nejjednodušší způsob spočívá v tom, že se číselníkový úchylkoměr umístí na hřídel / spojku a pak se snažíme ručně nebo pomocí páky pootáčet hřídelem, zároveň zaznamenáváme maximální + / - hodnoty odečtené z úchylkoměru. Zároveň provedeme také vizuální kontrolu mechanického opotřebení viditelných součástí rotujícího strojního systému (hřídelů, spojek, těsnění apod.)

❖ Odchytky kruhovitosti a kolmosti

Překročení hodnoty ovalit nejčastěji způsobuje ohnutý (prohnutý) hřídel, excentricita spojky (šišatost), nesprávně vrtaná díra spojkových kotoučů a podobně, tzn. vnějším projevem je házení (vibrace). Ke kontrole se nejčastěji používají číselníkové úchylkoměry a frekvenční analyzátoři. Tab.4 lze použít ke stanovení dovolených odchytek kruhovitosti a určité je patrné, že radiální odchytky vyjadřují odchytky kruhovitosti (ovalitu) a axiální odchytky míru kolmosti.

Tab.4 Doporučené maximální radiální odchytky

Otáčky [min ⁻¹]	Maximální dovolené hodnoty odchylek
0 ÷ 1800	0,005" (0,127 mm)
1800 ÷ 3600	0,002" (0,051 mm)
nad 3600	méně než 0,002" (méně než 0,051 mm)

❖ Kontrola pnutí od potrubí, vedení a další

K pnutí potrubí dochází např. tehdy, když potrubí a čerpadlo jsou následkem špatného vyrovnaní tlačeny proti / k sobě. Stroj připojený k potrubí je pak vystaven působení mnoha sil. Během ustavování se tento problém projevuje tak, že při uvolnění šroubů se "stacionární" stroj pohybuje. Vliv pnutí potrubí lze ověřit číselníkovým úchylkoměrem při uvolnění přírubě.

❖ Zkouška opakovatelnosti

Aby bylo možné snížit počet nutných úkonů, doporučuje se nastavit například systém Fixturlaser pro ustavování hřídelů do osy a provést zkoušku opakovatelnosti. Zkoušku lze snadno provést během několika minut.

Postup zkoušky opakovatelnosti pro systém Fixturlaser:

1. Nainstalujte systém na hřídele postupem, který byl popsán v postupu montáže.
2. Připojte TD jednotky k vyhodnocovací jednotce a zapněte systém.
3. Nasměrujte lasery a zvolte aplikační software TD-M/TS-S.
4. Otáčejte hřídeli až budou TD jednotky v poloze 9.00 hodin a hodnoty vynulujte.
5. Otáčejte hřídelem až do pozice 3.00 hodiny a hodnotu zaznamenejte.
6. Zkontrolujte hodnotu v pozici 12.00 hodin a otočte hřídel zpět na 9.00 hodin.
7. Pokud zkouška opakovatelnosti dopadla dobře, měli byste nyní v pozici 9.00 hodin odečíst nulu.
8. Tento postup zopakujte alespoň třikrát a ověřte, zda se hodnoty v pozicích 9.00, 3.00, 12.00 opakují.

Pokud se hodnoty v každé pozici opakují (jsou v toleranci 10 ÷ 20%), je vše v pořádku. Pokud hodnoty v toleranci nejsou, může se tak dít z několika příčin. Pro snížení počtu

výše uvedených úkonů zkontrolujte položky následujícího seznamu v uvedeném pořadí, abyste zjistili, co je příčinou problému.

- Držáky - zkontrolujte, zda jsou upínací přípravky správně utaženy
- Vnější vlivy - zkontrolujte základy, šrouby, podložky, spojku atd.
- Vnitřní vlivy - zkontrolujte mechanické uvolnění v ložiscích, převodech a prohnutí hřídelů

3.2 Hrubé ustavení

Ve své podstatě jediným důvodem, proč hrubé ustavování provádíme, je rychlé nastavení ustavovaného objektu a měřicího systému do výchozích podmínek a měřicího rozsahu. Vlastní ustavení lze provádět celou řadou metod a nástrojů, ale k nejběžnějším a nej-používanějším patří:

- ❖ Mechanické ustavení pomocí lístkových spároměrek a průměrného pravítka
- ❖ Použití ustavovacího systému na bázi dvojice laserů.

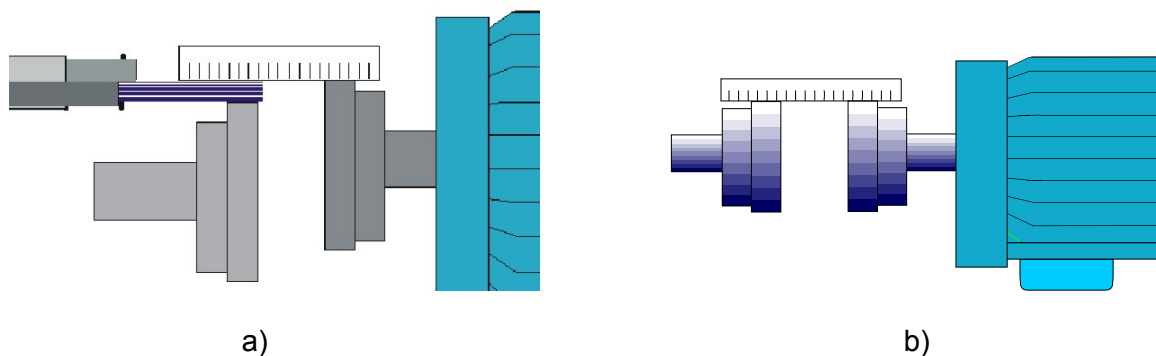
❖ Mechanické ustavení

Mechanická metoda obvykle používá lístkové spároměrky a průměrné pravítko nebo jen průměrné pravítko. Procedura se provádí v následujícím sledu:

- Vyrovnání vertikální úhlové nesouososti
- Vyrovnání vertikálního posunutí (offsetu)
- Vyrovnání horizontální úhlové nesouososti
- Vyrovnání horizontálního posunutí (offsetu)
- Vyrovnání vertikální úhlové nesouososti (obr.16.a):
 1. změříme mezeru v horní a dolní části spojky,
 2. zjistíme rozdíl,
 3. vypočítáme rozdíl mezer = největší mezera - nejmenší mezera,
 4. je-li mezera širší v horní části spojky, opravíme úhlovou nesouosost odstraněním podložek z předních patek nebo přidáním podložek pod zadní patky,
 5. je-li mezera širší v dolní části spojky, opravíme úhlovou nesouosost odstraněním podložek ze zadních patek nebo přidáním podložek pod přední.
- Vyrovnání vertikálního posunutí (offset):
 - ✓ průměrným pravítkem nebo lístkovými spároměrkami změříme vertikální posunutí,
 - ✓ přidáme nebo ubereme podložky na všech čtyřech patkách.

➤ Horizontální vyrovnaní

Zopakujeme postup popsany pro vyrovnaní vertikálního posunutí s tím rozdílem, že měření provedeme pouze v horizontální ose.



Obr.16 Mechanické ustavení

- a) vertikální korekce posunutí
- b) mezera na spojce

❖ **Mezera na spojce (obr.16.b)**

Procedura, kterou se provádí kontrola mezery na spojce, je někdy nazývána axiálním ustavením. Význam mezery na spojce může být u některých aplikací velmi podstatný. V případech, ve kterých se uplatňuje tepelná roztažnost hřídelů nebo se hřídele za chodu axiálně posunují, je mezera na spojce stejně významná jako vyrovnání v ostatních směrech. Nesprávná mezera na spojce je příčinou vzniku nadměrných axiálních sil, následkem nichž dochází ke zvýšenému zatížení ložisek a jejich předčasnému poškození. Může být i příčinou zničení elektrického motoru s kluznými ložisky.

Z těchto důvodů je důležité nastavení správné mezery na spojce v souladu s údajem daným výrobcem:

- ✓ uvolníme šrouby na spojce a zkontrolujeme axiální vůli,
- ✓ pomocí průměrného pravítka, lístkových spároměrek, vnitřního mikrometru změříme mezera mezi dvěma čely spojky,
- ✓ zjištěnou hodnotu porovnáme s požadovanou,
- ✓ korekce na požadovanou hodnotu mezery v axiální rovině provedeme posouváním motoru dozadu nebo dopředu.

Další bližší popis k mechanickému ustavení uvedeme v kap.3.3.

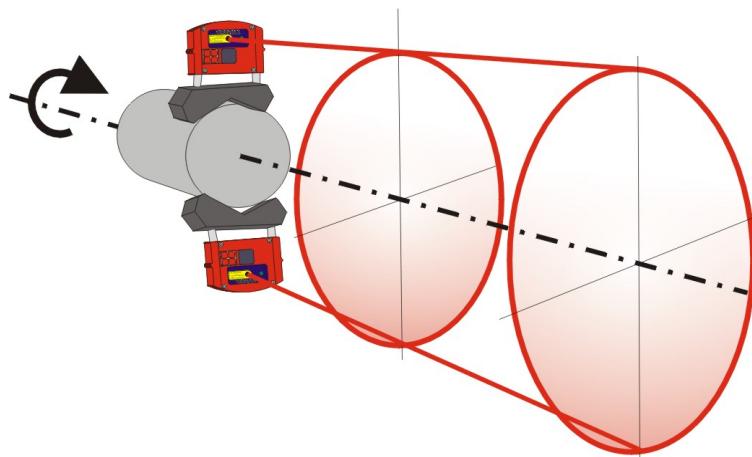
❖ **Hrubé ustavení pomocí systémů se dvěma lasery**

Hrubé ustavení pomocí laserového systému je založeno na témže principu jako přesné ustavení, viz dále kap.3.5, takže pouze stručně k pojmu „coning“.

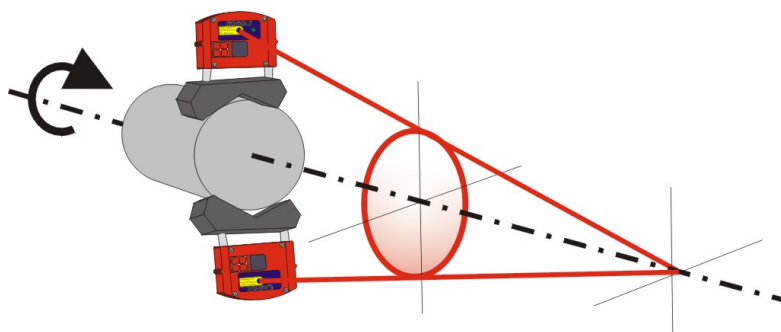
➤ **Coning**

Již jsme se zmínili, že ustavováním hřídelů do přímky usilujeme vlastně o souosé postavení dvou rotujících hřídelů. Slouží k tomu různé metody, které určují polohu rotační osy jednoho stroje a porovnávají ji s polohou osy druhého stroje. V systému pracujícím s dvojicí laserů je k projekci rotační osy používána speciální metoda zvaná „coning“. Světlo laseru vytváří dokonalou přímku bez ohybu, což umožňuje promítnout rotační osu jakéhokoli objektu i na velkou vzdálenost. Nainstalujeme-li laser na hřídel, bude laserový paprsek při

otáčení hřídele opisovat kužel. Promítnutím kužele vytvořeného laserovým paprskem vznikne v této rovině kružnice, jejíž střed bude středem rotace ležícím právě v této rovině. Směr osy rotace se určí promítnutím středu rotace do dvou rovin. Je to v podstatě princip, kterého využívá reverzní obvodová metoda, která bude popsána (kap.3.4) a kterou ilustruje obr.17.a - Coning 1 a obr.17.b - Coning 2.



a) Coning 1



b) Coning 2

Obr.17 Coning

- **Coning 1** - osa rotace prochází středem kružnice, kterou opisuje při rotaci laserový paprsek, což je základem většiny metod ustavování dvou spojených hřídelů (obr.17.a).
- **Coning 2** - osa rotace prochází jediným bodem v jisté vzdálenosti od čela hřídele, což je používáno při hřídelích od sebe vzdálených (např. ustavování kardanových hřídelů - obr.17.b).

Další najdeme v již zmíněné kap.3.5 a samozřejmě v literatuře [1], [2], [9] a další ne-specifikované, včetně softwarových balíčků výrobců měřicí techniky pro ustavování.

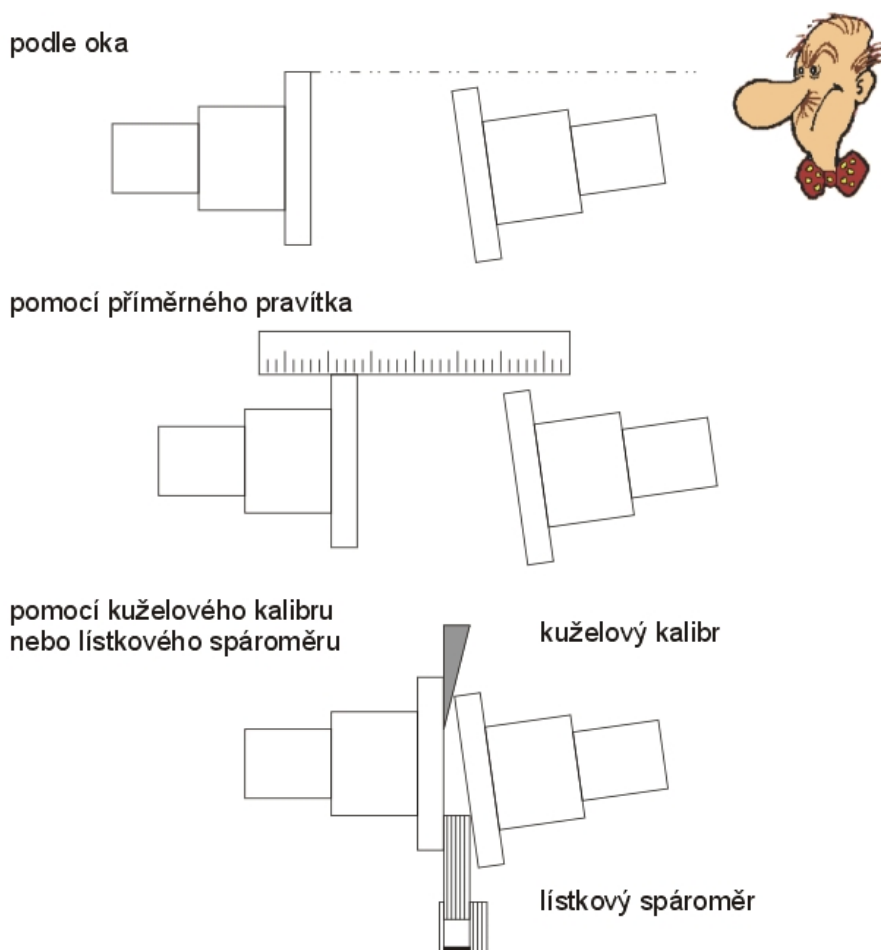
3.3 Mechanické metody

Jak je patrné ze základního přehledu, resp. výčtu metod (kap.2.6), tak se vlastně svým způsobem jedná o měření rozměrů, resp. vzdáleností.

Nejvíce rozšířenými a používanými měřidly jsou tak obyčejný metr (například na měření mezi šrouby patek, apod.), posuvné měřítko (používá se již 400 let), mikrometr (vynalezen 1639, ale použit o 150 let později) a podobně. Další měřidla, která jsou nutná při použití mechanických metod, jsou lístkové spároměrky, což je sada kalibrovaných ocelových plátků sestavených do vějíře a kuželové kalibry, přesně obrobené kovové klíny se stupnicí vyznačenou ve směru délky klínu (stupnice udává tloušťku klínu v daném místě). Lístkové spároměrky se používají například pro měření mezer pod patkami ustavovaného objektu, vzdáleností mezi hřídelem na spojce apod., kuželové kalibry k měření vzdáleností konců hřídelů atd.

3.3.1 Příklady použití

Mechanické metody nacházejí nejširší uplatnění při tzv. hrubém ustavení (kap.3.2). Příklad použití průměrného pravítka a sady lístkových spároměrek pak nalezneme na obr.16.a. Rozdíl mezi šířkou mezery na spojkovém kotouči ve dvou místech, vzdálených od sebe 180° (obr.16.b) je možno využít k určení směru a velikosti relativního sklonu hřídelů. Tuto tzv. úhlovou nesouosost lze také určit lístkovými spároměrkami nebo kuželovými kalibry, posuvným měřítkem a podobně. Pro úplnost jsou pak na obr.18 schématicky naznačeny některé varianty hrubého ustavení včetně variant za pomoci mechanických metod.



Obr.18 Varianty hrubého ustavení

3.4 Metody používající číselníkové úchylkoměry

Třebaže v kapitole 2.6 je uvedeno, že existují dvě základní metody pro ustavování hřídelů do osy pracující s číselníkovými úchylkoměry, dovolíme si v úvodu uvést kapitolu zabývající se základy ustavení pomocí číselníkových úchylkoměrů.

3.4.1 Základy ustavení pomocí číselníkových úchylkoměrů

Číselníkový úchylkoměr je měřicí přístroj (obr.19) k měření relativní polohy. Základní částí je kruhová číselníková stupnice (ciferník), pouzdro a vysouvací tyčka (plunžr), která je opatřena pružinou a lze ji pohybovat do pouzdra a z pouzdra, což způsobuje otáčení ručičky (ukazatele), a to ve směru hodinových ručiček (pohyb do pouzdra, + hodnoty) a proti směru hodinových ručiček (pohyb z pouzdra, - hodnoty). Nula, resp. 12.00 hodin, se nastavuje natočením stupnice na nulu při cca středové poloze plunžru. Úchylkoměr je uchycen svorkou k nosné tyči, která je upnuta do nějakého upínacího přípravku (viz. další kapitoly).



Obr.19 Číselníkový úchylkoměr

Vliv na měření pomocí číselníkových úchylkoměrů má především průhyb nosné tyče (držák, konzola) nebo jedné části překlenující spojky (obr.20) a lze jej snížit pouze na minimum, ale ne úplně eliminovat. Na průhyb mají vliv následující parametry:

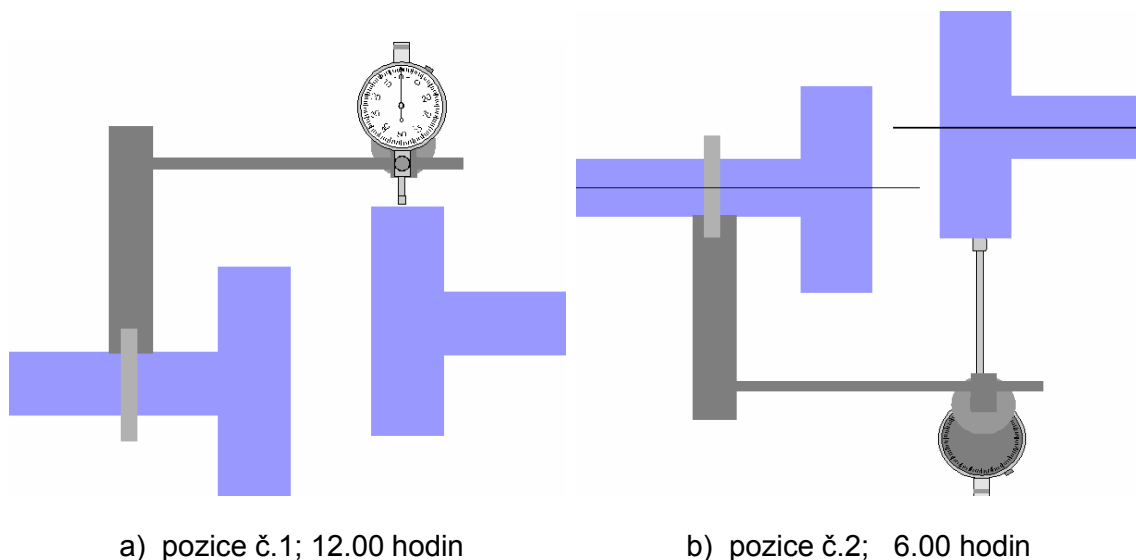
- hmotnost číselníkového úchylkoměru a jiných přechínajících částí,
- výška upínacího zařízení potřebná k překlenutí spojky,
- prohnutí nosné tyče (tyčí) indikátoru,
- tuhost materiálů, ze kterých je upínací zařízení vyrobeno,
- použitá geometrie konstrukce upínacího zařízení.

Vliv průhybů nosné tyče je u všech typů odečtů, ale nejvýraznější je v případě odečtu posunutí ve vertikální rovině, zanedbatelný pak na odečty posunutí v horizontální rovině a odečty úhlových odchylek na čele spojek. Vlastní velikost průhybu nosné tyče se určuje měřením v poloze 12.00 hodin a 6.00 hodin v odmontovaném stavu a po upnutí na tuhý upínací trn. Po určení velikosti průhybu je nutná jeho eliminace - blížeji např. [1], [2], [9], [10].

❖ **Měření posunutí číselníkovými úchylkoměry (obr.20)**

Při měření posunutí je upínací přípravek uchycen k jednomu hřídeli a úchylkoměr na něm je upevněn tak, aby se dotýkal druhého hřídele.

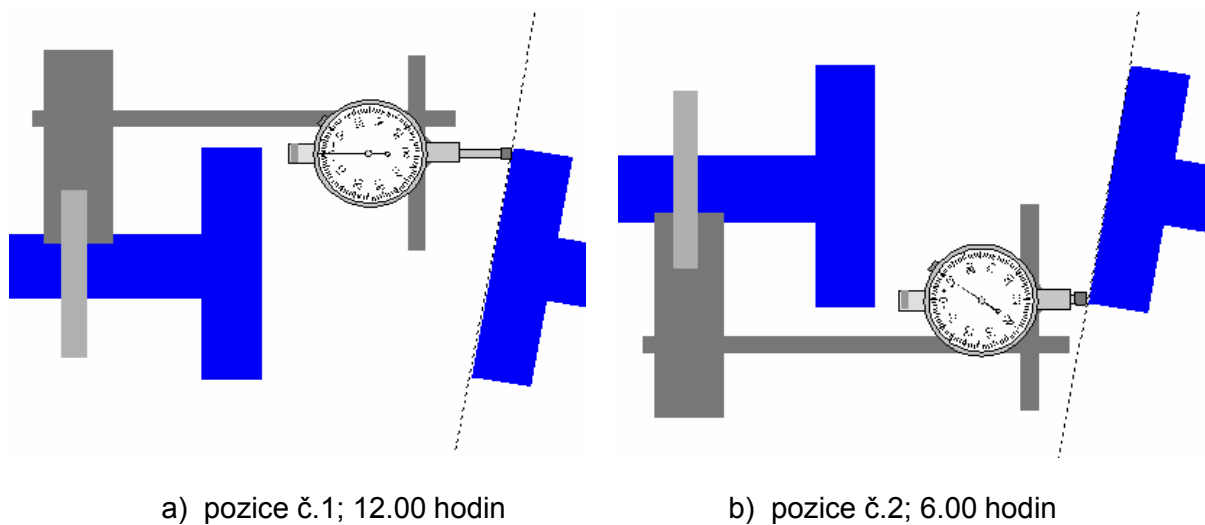
Postup je určitě zřejmý z uvedeného obr.20, takže zbývá pouze upozornit, že **hodnota odečtená z úchylkoměru je dvojnásobkem velikosti hodnoty posunutí [mm]**.



Obr.20 Měření posunutí

❖ **Měření úhlové výchylky úchylkoměry umístěnými na čele (obr.21)**

Při tomto měření je úchylkoměr uchycen tak, aby se dotýkal čelní plochy protější části spojky. V pozici 12.00 hodin musí být indikátor vynulován. **Velikost úhlové výchylky se rovná hodnotě odečtené z úchylkoměru, podělené průměrem kružnice opsané úchylkoměrem [mm/mm]**.



Obr.21 Měření úhlové výchylky

❖ Odečty z číselníkových úchylkoměrů

Přesnost je zde dána odečtem z číselníkového indikátoru a správnou instalací upínacích přípravků. V praxi to tedy znamená:

- odečty provádět přesně v pozicích 12.00, 3.00, 6.00 a 9.00 hodin, neboť vždy většinou existuje nejen vertikální, ale zároveň také horizontální posunutí,
- všechna měření z důvodu eliminace chyb odečtu a zajištění opakovatelnosti provádět dvakrát,
- při otáčení hřídelů sledovat číselníkové indikátory, aby byly správně zaznamenána znaménka měřených hodnot,
- lit. [1], [2], [9] doporučuje provést matematickou kontrolu platnosti odečtů - odečet horní a dolní se rovná odečtu vlevo a vpravo,
- průhyb nosné tyče úchylkoměru musí být vždy změřen před začátkem vlastního měření,
- na přesnost měření mají vliv také následující faktory:
 - vnitřní tření vysouvací tyčky v pouzdře číselníkového úchylkoměru → provést rozpohybování mírným poklepem,
 - vůle v mechanických spojkách → vyzkoušet,
 - sklon číselníkového úchylkoměru → kolmost k měřené ploše
 - axiální vůle hřídelů, pokud se nepoužívají dva úchylkoměry na měření v axiálním směru (na čele spojkového kotouče).

3.4.2 Čelně obvodová ustavovací metoda

Uvedená metoda je ve své podstatě nejstarší uznávanou metodou pro ustavování do osy. Používalo se a dosud používá mnoho obměn této metody, včetně metody s průměrným pravítkem nebo se spároměrkami, s jedním nebo dvěma úchylkoměry, metoda pokusu a omylu a podobně.

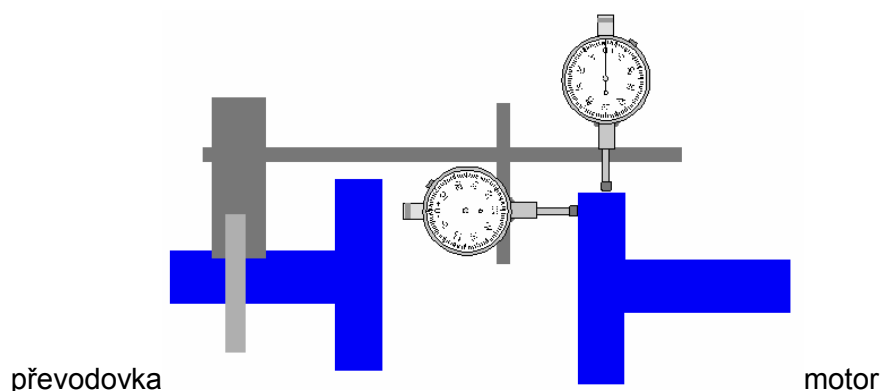
Z předchozí kapitoly (kap.3.4.1) a obr.20 a obr.21 je zřejmý postup měření posunutí a úhlové výchylky (sklon dvou hřídelů) a obr.22 pak ukazuje další možné varianty upevnění úchylkoměru pro čelně obvodovou metodu, které určitě nepotřebují další hlubší komentář.

Vlastní montáž upínacích přípravků je nutno provádět následujícím způsobem, který je ve své podstatě zákonitostí:

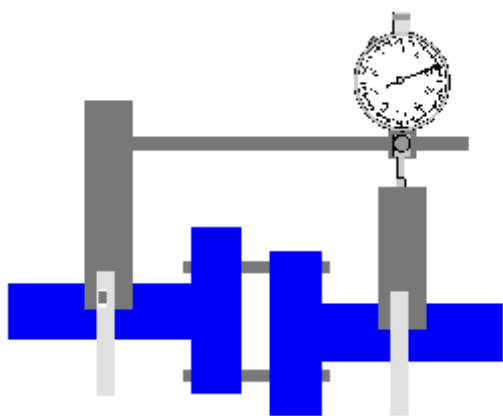
- při zabrzděné spojce namontujeme upínací přípravek (konzolu) na stacionární hřídel nebo na hlavu spojky,
- z namontované konzoly provedeme překlenutí spojky pomocí tyče pro uchycení indikátoru,
- konzolu pootočíme do polohy 12.00 hodin,
- připevníme čelní číselníkový úchylkoměr a plunžr se vycentruje na polovinu výšky zdvihu (aby v kladném i záporném směru měl stejnou možnost pohybu),
- připevníme obvodový číselníkový úchylkoměr a plunžr se vycentruje na polovinu výšky zdvihu,

což je patrné z obr.22.a a je nutno pouze připomenout, že stacionární hřídel je hřídel na straně převodovky a že bez ohledu na použité technické vybavení musím vždy dodržet:

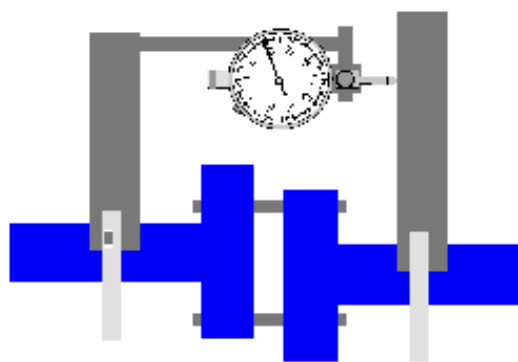
- nikdy se nemontuje přípravek na pohyblivou část spojky,
- snažíme se o dosažení maximální možné dráhy indikátoru s ohledem na geometrii ustavovaného stroje. Pokud se čelní indikátor dotýká přímo čela spojky, zajistíme, aby se plunžr indikátoru dotýkal čela blízko jeho vnějšího okraje,
- přípravky montujeme do polohy dovolující rotaci. Žádoucí je možnost pohybu v rozmezí 360° ,
- před prováděním vlastního měření určíme průhyb tyče nosící obvodový indikátor a zajistíme, aby byly hodnoty naměřené indikátorem platné a opakovatelné.



a) Nepojené spojky



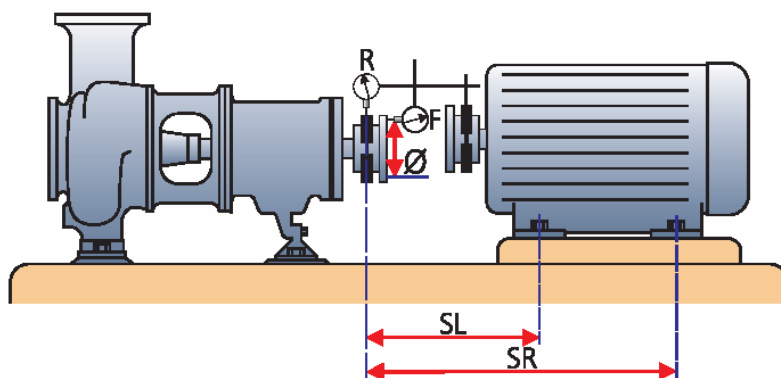
b) Propojené hřídele, obvodový indikátor



c) Propojené hřídele, čelní indikátor

Obr.22 Měření úhlové výchylky

Pro přesné určení polohy ustavení, ať už početně nebo graficky, je nutná znalost určitých rozměrů, viz obr.23 a obr.24.



Obr.23 Rozměry a údaje k čelně obvodové metodě při umístění úchylkoměrů na obvodu a čele spojky

Vlastní odečítání naměřených hodnot je nutno provádět v pozicích 12.00, 3.00, 6.00 a 9.00 hodin a pro případ na obr.23 platí následující vztahy:

$VO = (R6 - R0 - RS) / 2$ - vertikální radiální přesazení

$VA = (F6 - F0 - FS) / \emptyset$ - vertikální axiální přesazení

$HO = (R9 - R3) / 2$ - horizontální radiální přesazení

$HA = (F9 - F3) / \emptyset$ - horizontální axiální přesazení

kde znamená:

R0 hodnota (radiální) odečtená v pozici 12.00 hodin

R3 hodnota (radiální) odečtená v pozici 3.00 hodiny

R6 hodnota (radiální) odečtená v pozici 6.00 hodin

R9 hodnota (radiální) odečtená v pozici 9.00 hodin

F0 hodnota (axiální) odečtená v pozici 12.00 hodin

F3 hodnota (axiální) odečtená v pozici 3.00 hodiny

F6 hodnota (axiální) odečtená v pozici 6.00 hodin

F9 hodnota (axiální) odečtená v pozici 9.00 hodin

$\emptyset$ průměr kružnice opsané číselníkovým úchylkoměrem na čele spojky

RS průhyb u číselníkového úchylkoměru při měření na obvodu

FS průhyb u číselníkového úchylkoměru při měření na čele

- Hodnoty RS a FS mohou být kladné i záporné.
- Pozice (3.00 hodiny, 6.00 hodin, atd.) číselníkových úchylkoměrů se určí při pohledu na spojku od pravého stroje k levému stroji.

Korekce ve vertikální rovině pro patky u pravého stroje lze vypočítat následovně:

- korekce předních patek (u spojky) = $(VA \cdot sL) - VO$

- korekce zadních patek (dále od spojky) = $(VA \cdot sR) - VO$

- Kladná hodnota znamená vkládat podložky, záporná hodnota znamená odstraňovat podložky.
 - pohyb v horizontálním směru předních patek = $(HA \cdot sL) - HO$
 - pohyb v horizontálním směru zadních patek = $(HA \cdot sR) - HO$
- Kladná hodnota znamená pohyb směrem k poloze 3.00 hodiny, záporná hodnota směrem k poloze 9.00 hodin.

Dále platí, že:

sL vzdálenost mezi úchylkoměrem a předními patkami pravého stroje

sR vzdálenost mezi úchylkoměrem a zadními patkami pravého stroje

Pokud jsou číselníkové úchylkoměry vynulovány v pozici 12.00 hodin a hodnoty odečteny v pozici 6.00 hodin, výpočet korekčních hodnot pro ustavení je následující:

- korekce předních patek = $(F6 - FS) \cdot sL / \emptyset - (R6 - RS) / 2$

- korekce zadních patek = $(F6 - FS) \cdot sR / \emptyset - (R6 - RS) / 2$

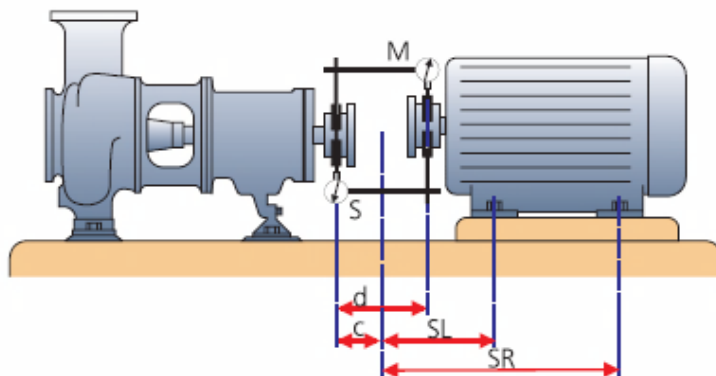
Kladná hodnota znamená vkládat podložky, záporná hodnota znamená odstraňovat podložky.

- Pokud jsou číselníkové úchylkoměry vynulovány v poloze 3.00 hodiny a hodnoty odečteny v poloze 9.00 hodin, pohyb v horizontálním směru se vypočte:
 - pohyb předních patek = $(F9 \cdot sL) / \emptyset - R9 / 2$
 - pohyb zadních patek = $(F9 \cdot sR) / \emptyset - R9 / 2$
- Pozitivní hodnota znamená posun k pozici 3.00 hodiny, negativní hodnota posun k pozici 9.00 hodin.

Jak už byla zmínka v kap.3.4.1, tak hlavním zdrojem chyb při měření je průhyb nosné tyče číselníkového úchylkoměru, proto uvádíme z [10] detailnější popis měření průhybu.

Pro měření průhybu je nutno připevnit celou měřicí sestavu (držáky, tyčky, číselníkové úchylkoměry) na část přímé trubky. Připevnění je nutno provést takovým způsobem, aby držáky byly od sebe vzdáleny tak, jako při instalaci na skutečném stroji. Stejná podmínka platí i pro vlastní umístění číselníkových úchylkoměrů. Mělo by být, pokud možno, stejné jako na skutečném stroji. Vynulujeme stupnice v pozici 12.00 hodin. Potom otáčíme trubkou tak dlouho, až se číselníkové úchylkoměry dostanou do pozice 6.00 hodin. Odečteme a zaznamenáme hodnoty na číselníkových úchylkoměrech (číselníkový úchylkoměr na obvodu bude běžně vykazovat zápornou hodnotu, číselníkový úchylkoměr na čele bude vykazovat kladnou nebo zápornou hodnotu. Měla by však být blízká nule). Naměřené hodnoty průhybu od hodnoty v pozici 6.00 hodin odečteme, čímž kompenzujeme vliv průhybu - viz kap.3.4.4, kde budou uvedeny příklady konkrétních měření.

Další variantou umístění číselníkových úchylkoměrů je na obvodu spojky - obr.24. Jak je z obrázku patrné, jsou v tomto případě číselníkové úchylkoměry vzájemně posunuty o 180°.



Obr.24 Rozměry a údaje k čelně obvodové metodě při umístění úchylkoměrů na obvodu spojky

Pro dané uspořádání pak platí následující vztahy:

$$VO = (S6 - S0 - SS) / 2 - (S6 - S0 - SS + M6 - M0 - MS) \cdot c / 2d$$

$$VA = (S6 - S0 - SS + M6 - M0 - MS) / 2d$$

$$HO = (S9 - S3) / 2 - (S9 - S3 + M9 - M3) \cdot c / 2d$$

$$HA = (S9 - S3 + M9 - M3) / 2d$$

kde znamená:

S0 hodnota odečtená na levé části spojky v pozici 12.00 hodin

S3 hodnota odečtená na levé části spojky v pozici 3.00 hodin

S6 hodnota odečtená na levé části spojky v pozici 6.00 hodin

S9 hodnota odečtená na levé části spojky v pozici 9.00 hodin

M0 hodnota odečtená na pravé části spojky v pozici 12.00 hodin

M3 hodnota odečtená na pravé části spojky v pozici 3.00 hodin

M6 hodnota odečtená na pravé části spojky v pozici 6.00 hodin

M9 hodnota odečtená na pravé části spojky v pozici 9.00 hodin

d vzdálenost mezi číselníkovými úchylkoměry

c vzdálenost mezi levým číselníkovým úchylkoměrem a středem spojky

SS průhyb u úchylkoměru v levé části spojky

MS průhyb u úchylkoměru v pravé části spojky

- Hodnoty SS a MS mohou být kladné i záporné.
- Pozice číselníkových úchylkoměrů se určí při pohledu na spojku od pravého stroje k levému stroji.

Korekce patek u pravého stroje lze vypočítat následovně:

$$\text{- korekce předních patek (u spojky) = (VA \cdot sL) - VO}$$

$$\text{- korekce zadních patek (dále od spojky) = (VA \cdot sR) - VO}$$

- Kladná hodnota znamená vkládat podložky, záporná hodnota znamená odstraňovat podložky.

- pohyb v horizontálním směru předních patek = $(HA \cdot sL) - HO$

- pohyb v horizontálním směru zadních patek = $(HA \cdot sR) - HO$

- Kladná hodnota znamená pohyb směrem k pozici 3.00 hodiny, záporná hodnota směrem k pozici 9.00 hodin.

Dále platí, že:

sL vzdálenost mezi středem spojky a předními patkami pravého stroje

sR vzdálenost mezi středem spojky a zadními patkami pravého stroje

Pokud jsou číselníkové úchylkoměry vynulovány v pozici 12.00 hodin a hodnoty odečteny v pozici 6.00 hodin, výpočet korekčních hodnot pro ustavení je následující:

$$HO = (S9 - S3) / 2 - (S9 - S3 + M9 - M3) \cdot c / 2d$$

$$HA = (S9 - S3 + M9 - M3) \cdot c / 2d$$

$$\text{- korekce předních patek} = (S6 - SS + M6 - MS) \cdot (c + sL) / 2d - (S6 - SS) / 2$$

$$\text{- korekce zadních patek} = (S6 - SS + M6 - MS) \cdot (c + sR) / 2d - (S6 - SS) / 2$$

- Kladná hodnota znamená vkládat podložky, záporná hodnota znamená odstraňovat podložky.

Pokud jsou číselníkové úchylkoměry vynulovány v pozici 3.00 hodiny a hodnoty odečteny v pozici 9.00 hodin, pohyb v horizontálním směru se vypočte:

$$\text{- pohyb předních patek} = (S9 + M9) \cdot (c + sL) / 2d - S9 / 2$$

$$\text{- pohyb zadních patek} = (S9 + M9) \cdot (c + sR) / 2d - S9 / 2$$

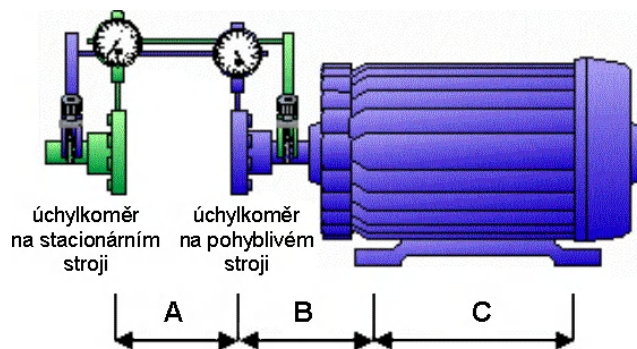
- Kladná hodnota znamená pohyb směrem k pozici 3.00 hodiny, záporná hodnota směrem k pozici 9.00 hodin.

- O průhybu platí, co bylo uvedeno v předchozím případě.

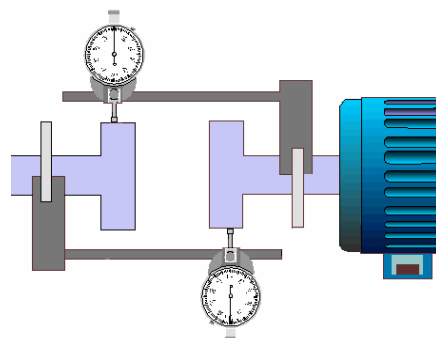
Jak již bylo zmíněno, příklady k této části budou následovat v kapitole 3.4.4.

3.4.3 Reverzní obvodová ustavovací metoda

Je známou a dosti preferovanou metodou ustavování hřídelů do osy. Používá dva úchylkoměry umístěné na obvodu spojky (obr.25) jak stacionárního, tak pohyblivého stroje a měří ve dvou rovinách relativní polohu hřídele pohyblivého stroje k hřídeli stacionárního stroje, kterou určíme následně pomocí výpočtu nebo graficky s využitím dvou měření posunutí. Je zřejmé, že úchylkoměr na stacionárním stroji měří posunutí v rovině podél hřídele stacionárního stroje a úchylkoměr na pohyblivém stroji naopak.



a) rozměry pro reverzní obvodovou metodu
přípravky proti sobě

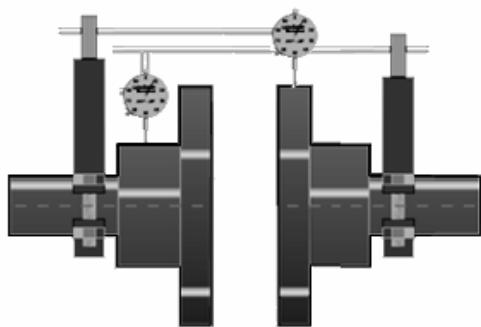


b) namontované upínací
přípravky

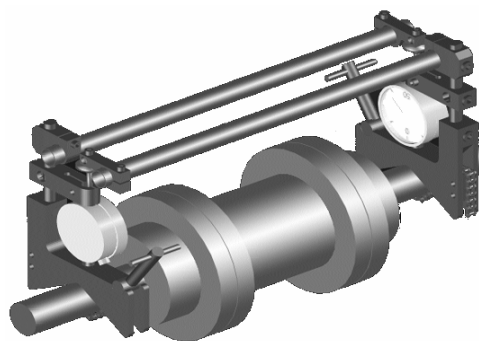
Obr.25 Reverzní obvodová ustavovací metoda

Reverzní obvodová ustavovací metoda tedy nepotřebuje hodnoty odečtené z čela spojky, čímž eliminujeme axiálně plovoucí konce hřídele.

Vlastní konstrukce přípravků k použití a nasazení reverzní obvodové metody jsou konstruovány tak, aby bylo možné ustavení jak nepropojených, tak propojených hřídelů, obr.25.b a obr.26.



a) upínací přípravky, nepropojené hřídele



b) upínací přípravky, propojené hřídele

Obr.26 Montážní upínací přípravky

Při montáži musíme dodržovat následující postup a požadavky.

Postup:

- ✓ při smontované spojce namontujeme upínací přípravky (konzoly) na hřídele nebo obvod spojky,
- ✓ z namontovaných konzol upevníme tyče a provedeme jimi překlenutí spojky,
- ✓ konzoly pootočíme do pozice 12.00,
- ✓ připevníme číselníkové úchylkoměry a plunžry vycentrujeme na polovinu výšky zdvihu (aby v kladném i záporném směru měly stejnou možnost pohybu).

Požadavky:

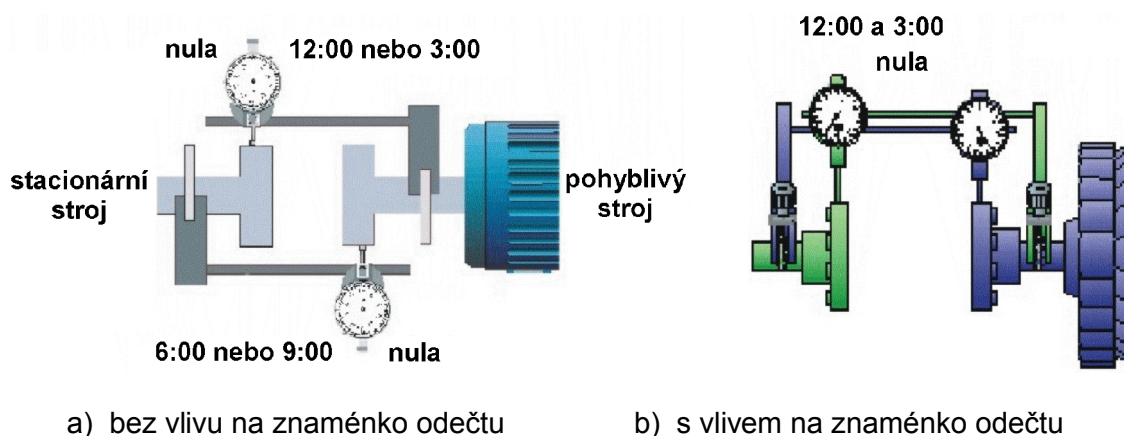
- ✓ nikdy nemontujeme přípravky na pohyblivé části spojek,
- ✓ snažíme se o maximální vzdálenost mezi úchylkoměry, jakou dovoluje geometrie ustavovaného stroje. Obecně platí pravidlo, že plunžry by měly od sebe vzdáleny alespoň 100 mm,
- ✓ přípravky namontujeme do polohy dovolující rotaci. Žádoucí je možnost pohybu v rozmezí 360°,
- ✓ před prováděním vlastního měření určíme průhyb tyčí nesoucí obvodové indikátory a zajistíme, aby byly hodnoty naměřené indikátory platné a opakovatelné.

Požadavky jsou až na drobné detaily stejné jako již uvedené požadavky u obvodové čelní metody (kap.3.4.2).

Také zde je nutné pro přesné určení polohy hřídele pohyblivého stroje, ať počtetně nebo graficky, znát základní rozměry - obr.25.a:

- A vzdálenost mezi plunžry úchylkoměrů,
- B vzdálenost mezi polohou úchylkoměru na pohyblivém stroji a středem šroubu přední patky,
- C vzdálenost mezi středy šroubů předních a zadních patek

a uvědomit si, že různé uspořádání úchylkoměrů má vliv na znaménka odečtů. Takže například uspořádání na obr.27.a nemá vliv na znaménka odečtů číselníkových úchylkoměrů jak u horizontálního, tak vertikálního ustavování.



Obr.27 Uspořádání upínacích přípravků a znaménka odečtů

Naproti tomu u uspořádání na obr.27.b je nutno při vynulování v pozici 12.00 nebo 3.00 hodin změnit znaménko u hodnoty odečtené z úchylkoměru na pohyblivém stroji. Pro výpočet pak platí vztahy, kterými vypočteme polohy předních a zadních patek pohyblivého stroje z posunutí naměřených úchylkoměry DIS a DIM.

Polohu **předních patek** pohyblivého stroje určuje následující rovnice:

Rovnice - přední patky
$$\left(\frac{(M - S)}{A} \cdot (B) \right) + M$$

Polohu **zadních patek** pohyblivého stroje určuje rovnice:

Rovnice - zadní patky
$$\left(\frac{(M - S)}{A} \cdot (B + C) \right) + M$$

kde:

M posunutí v rovině pohyblivého úchylkoměru

S posunutí v rovině stacionárního úchylkoměru

A vzdálenost mezi plunžry úchylkoměrů na stacionárním a pohyblivém stroji

B vzdálenost mezi plunžrem úchylkoměru na pohyblivém stroji a středem šroubu na přední patce pohyblivého stroje

C vzdálenost mezi středy šroubů předních a zadních patek pohyblivého stroje

- Kladná hodnota výsledku znamená, že patka je vysoko (vertikálně) nebo vpravo (horizontálně).
- Záporná hodnota výsledku znamená, že patka je nízko (vertikálně) nebo vlevo (horizontálně).

DIM pohyblivý úchylkoměr

DIS stacionární úchylkoměr

TIR naměřená hodnota na úchylkoměru DIM a DIS

a pro úhlovou výchylku při měření vertikální nesouososti platí (z pozic 12.00 a 6.00 hodin):

$$\text{Úhlová výchylka} = \frac{(\text{Posunutí na stacionární straně} - \text{Posunutí na pohyblivé straně})}{A}$$

a pro úhlovou výchylku při měření horizontální nesouososti platí totéž, ale z pozic 3.00 a 9.00 hodin a je určité zřejmé, že pro správný výpočet platí tyto základní předpoklady:

- ✓ před zahájením výpočtů dbáme na správné odečtení hodnot posunutí ze stacionárního a pohyblivého úchylkoměru,
- ✓ dáváme pozor, ať neuděláme chybu při sčítání čísel s různými znaménky,
- ✓ dáváme pozor na závorky v rovnicích. Nejdříve provedeme početní operace uvnitř závorek,
- ✓ do vzorců dosadíme vždy správné hodnoty.

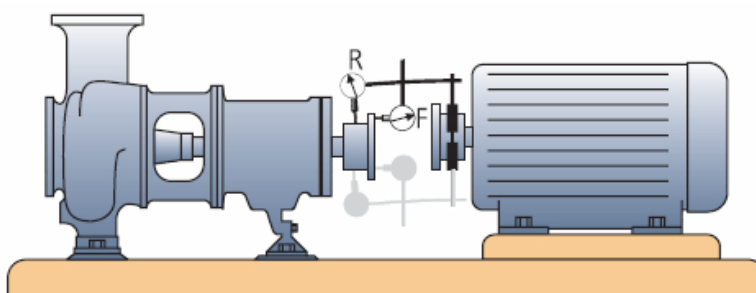
Další k této metodě (některé praktické příklady) bude uvedeno v kap.3.4.4, informace lze samozřejmě čerpat z [1], [2], [9], [10] a další nespecifikované literatury, například návodech k použití měřících přístrojů a podobně.

3.4.4 Příklady použití

Uváděná kapitola navazuje na předchozí uvedením a zpracováním konkrétních výsledků měření, ale je nutno si uvědomit, že ani tato kapitola nemůže vyčerpávajícím způsobem ukázat danou problematiku, to znamená vždy se musíme řídit tím, co je zpracováno v uživatelských příručkách výrobců jednotlivých měřících systémů.

❖ **PROSTÁ METODA - měření na obvodu a čele spojky způsobem pokus - omyl** (obr.28)

Daná metoda neuvažuje ani s průhyby držáků (nosné tyče), ani s pohybem hřídele. Ručně se otáčí pouze jedním hřídelem, měření je tedy ovlivněno házením spojkového kotouče a prohnutím hřídele.



Obr.28 Prostá metoda pokus - omyl

Obr.28 popisuje následující situaci. Číselníkové úchylkoměry měří na čele a na obvodu spojky, která se neotáčí. Hodinky jsou vynulovány v pozici 12.00 hodin. Hřídel pravého stroje se natočí do pozice 6.00 hodin. Velikost vertikální korekce předních patek pravého stroje odpovídá polovině hodnoty naměřené na obvodu spojky. Podložky jsou opakovaně vkládány (nebo odebírány) pod zadní patky do té doby, dokud hodnoty odečítané úchylkoměrem z čela spojky se při otáčení hřídelů nemění.

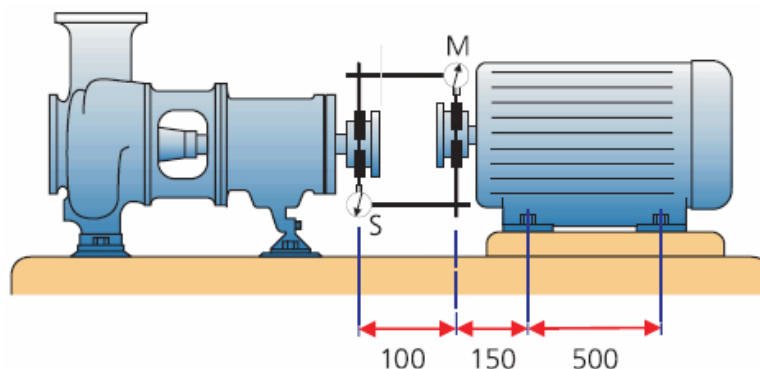
Podobně se postupuje při ustavování v horizontální rovině. Nejdříve se vynulují číselníkové úchylkoměry v pozici 3.00 hodiny a odečtou se hodnoty na číselníkových úchylkoměrech po pootočení hřídele pravého stroje do pozice 9.00 hodin.

Použití tohoto způsobu ustavení se pozná na první pohled. Pod zadními patkami (dále od spojky) je 10 ÷ 30 tenkých podložek, což je důsledek metody pokus - omyl. Rychlá kontrola laserovým přístrojem obvykle stejně odhalí, že soustrojí je i přesto špatně ustavené.

❖ **ČELNĚ OBVODOVÁ USTAVOVACÍ METODA - číselníkové úchylkoměry umístěné na obvodech spojky** (obr.29)

Na rozdíl od měření na obvodu a čele spojky se při měření dvěma číselníkovými úchylkoměry umístěnými na obvodech spojky neměří axiální (úhlové) přesazení přímo. Ke zjištění axiálního přesazení musí být matematicky vypočítán rozdíl mezi hodnotami odečtenými na úchylkoměrech. Také korekční hodnoty pro patky nemohou být přímo odečteny z úchylkoměrů. Matematický výpočet přesazení a korekčních hodnot pro patky může být nahrazen grafickou metodou. Na obr.29 je pro výše popsané měření odpovídající konfigurace držáků úchylkoměrů. Pravý stroj je stroj, se kterým se pohybuje. Oba číselníkové úchl-

koměry jsou vynulovány v pozici 12.00 hodin. Pozice hodin je dána pohledem obsluhy od pravého (pohyblivého) stroje ke stroji stabilnímu.



Obr.29 Čelně obvodová metoda - úchylkoměry umístěné na obvodech spojky

Hřídele se pootočí o 180° ve směru provozních otáček a hodnoty změřené úchylkoměry se zaznamenají. Při pootočení hřídelů do výchozí pozice - 12.00 hodin - by se hodnota na úchylkoměrech měla vrátit na nulu.

Předpokládejme, že byly změřeny následující hodnoty:

- průhyb držáku: -0,1 mm
- úchylkoměr S, pozice 6.00 hodin: +0,6 mm
- úchylkoměr M, pozice 6.00 hodin: -1,5 mm

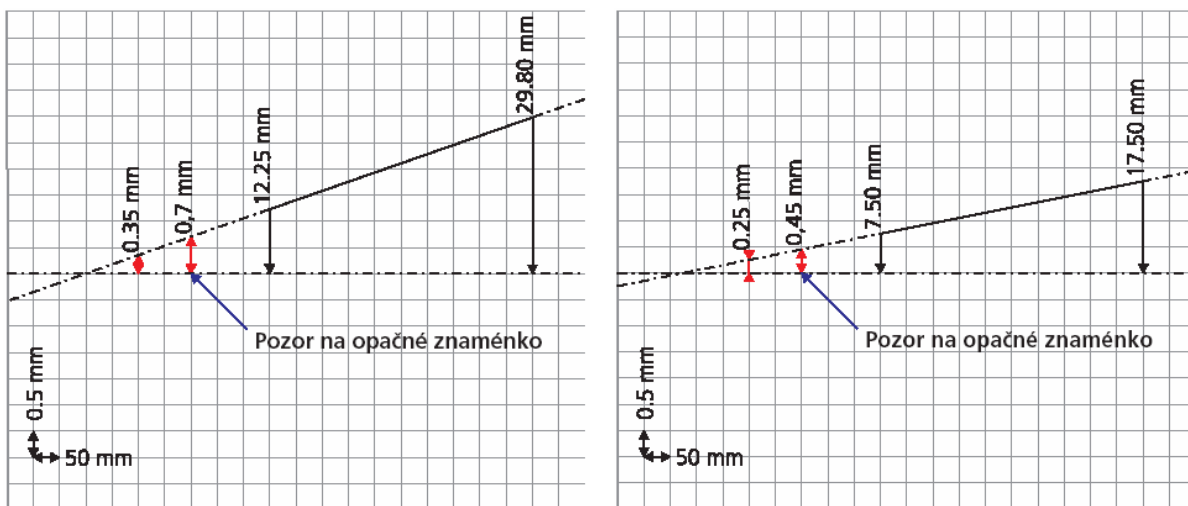
Takže skutečné hodnoty S a M jsou, jak je nám již známo, poloviční, tzn. $S = +0,35$ mm a $M = -0,7$ mm při respektování průhybu držáku -0,1 mm, čímž jsme změřili vertikální posunutí a musí být změřeno horizontální posunutí.

Když jsou oba číselníkové úchylkoměry v horizontální rovině v pozici 3.00 hodiny, vynulují se. Nato se s hřídelí pravého stroje pootočí o 180° ve směru provozních otáček a naměřené hodnoty se zaznamenají. Při otočení hřídelů do výchozí pozice 3.00 hodiny by se měřené údaje měly vrátit na hodnotu 0.

- úchylkoměr S, pozice 9.00 hodin: +0,5 mm
- úchylkoměr M, pozice 9.00 hodin: -0,9 mm

Skutečné hodnoty jsou opět poloviční, tzn. $S = +0,25$ mm a $M = -0,45$ mm. Korekce průhybů u horizontálních hodnot není nutná.

Uvedené hodnoty pak zaznamenáme do grafu jak pro vertikální, tak pro horizontální posunutí. Uvedený příklad v grafické podobě se například podle lit. [10] zobrazuje tak, jak je uvedeno na obr.30.



a) vertikální posunutí

b) horizontální posunutí

Obr.30 Grafické určení polohy hřídele pohyblivého stroje - čelně obvodová metoda

❖ REVERZNÍ OBVODOVÁ METODA - vertikální korekce

S přípravky uchycení úchylkoměrů, jak je na obr.26.a a obr.25.a, kde jsou také označeny výpočtové rozměry, byly změřeny například následující údaje:

- posunutí S na straně stacionárního stroje: +0,305 mm
- posunutí M na straně pohyblivého stroje: +0,444 mm
- rozměry: A = 127 mm, B = 177,8 mm, C = 609,6 mm

Pak pro výpočet polohy předních patek platí vzorec z předchozí kapitoly 3.4.3:

$$\left(\frac{(0,444 - 0,305)}{127} \cdot 177,8 \right) + 0,444 = 0,64 \text{ mm},$$

tzn. přední patky jsou příliš vysoko, je potřeba ubrat vypodložení.

Pro polohu zadních patek následně platí:

$$\left(\frac{(0,444 - 0,305)}{127} \cdot (177,8 + 609,6) \right) + 0,444 = 1,31 \text{ mm},$$

tzn. jsou také vysoko a opět musíme ubrat vypodložení.

Mimo nastíněného provedení výpočtu určení polohy hřídelů je také častěji prováděno již zmíněné grafické řešení.

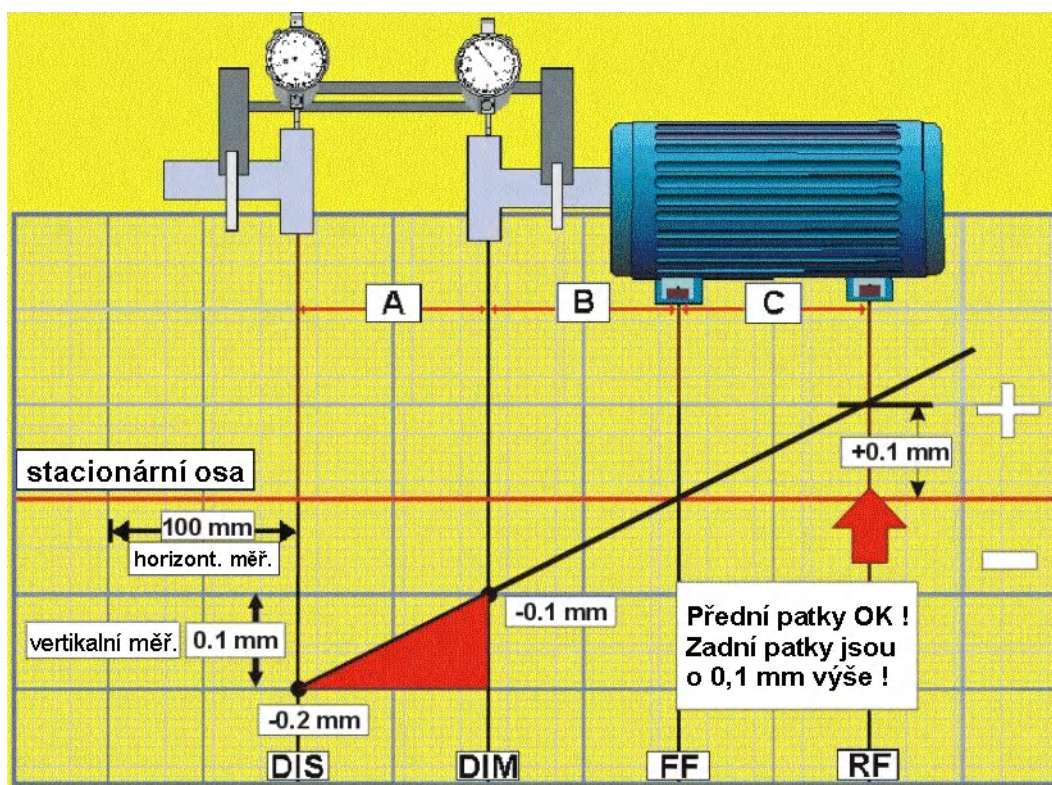
Hlavní výhodou grafických metod je vizualizace polohy rotačních os hřídelů a tedy také stavu sousostí. Zde prezentované informace se vztahují k reverznímu uspořádání obvodových úchylkoměrů, kdy se oba nacházejí ve stejné pozici na kružnici. Grafické postupy

lze aplikovat pro ustavování ve vertikální i horizontální rovině. Nicméně většinou jsou používány jen pro rovinu vertikální. Ustavení v horizontální rovině, jak jsme dříve uvedli, lze provést bez přesného stanovení polohy předních a zadních patek výpočetní či grafickou metodou.

Již z obr.30 a následně obr.31 je patrné, že konstrukce grafu se provádí na milimetrový papír a používáme vždy největší možné měřítko. Jak je zřejmé z obr.31, tak v daném příkladu bylo naměřeno $TIR\ DIM = -0,2\text{ mm}$ a $TIR\ DIS = -0,1\text{ mm}$. Po vykreslení naměřených posunutí (DIM a DIS) se poloha pohyblivého stroje určí jednoduchými kroky:

- ✓ vyneseny body proložíme přímkou a prodloužíme ji za úroveň zadních patek pohyblivého stroje,
- ✓ v rovině předních a zadních patek odměříme vzdálenosti mezi osou stacionárního stroje a zkonstruovanou osou pohyblivého stroje a ve vertikálním měřítku spočteme polohu patek a skutečné hodnoty požadovaných korekcí.

Na příkladu jsou přední patky ustaveny správně; není třeba je podkládat. Zadní patky jsou příliš vysoko (o 0,1 mm); je třeba snížit podložky u obou zadních patek.



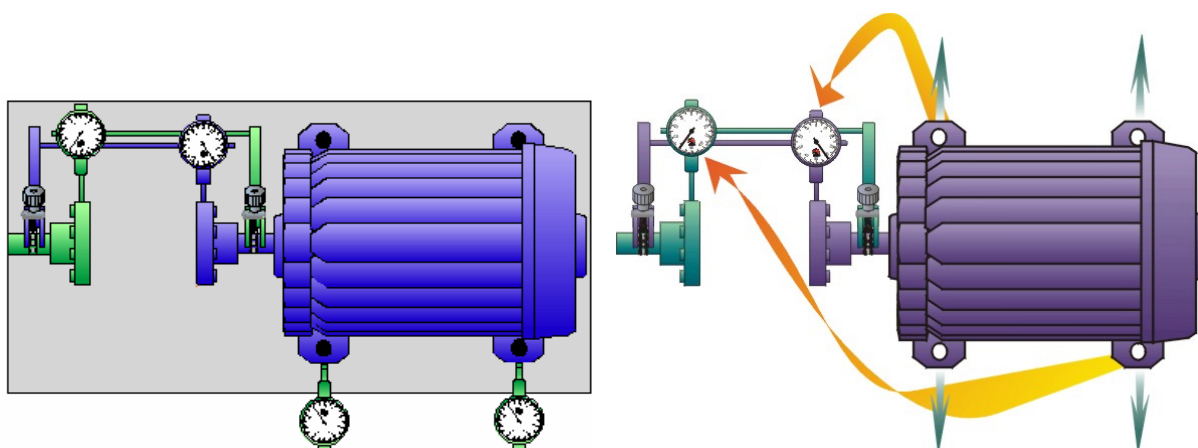
Obr.31 Grafické určení polohy hřídele pohyblivého stroje - reverzní obvodová metoda

❖ REVERZNÍ OBVODOVÁ METODA - horizontální korekce

Horizontální korekce se u reverzní metody obvykle provádí dvěma různými postupy:

- ✓ určením posuvu výpočetní nebo grafickou metodou a monitorováním pohybu stroje číselníkovými úchytkoměry umístěnými na patkách stroje - obr.32.a,

- ✓ monitorováním pohybu stroje číselníkovými úchylkoměry upevněnými na spojce - obr.32.b.



a) úchylkoměry umístěny na patkách

b) úchylkoměry umístěny na spojce

Obr.32 Monitorování pohybů stroje číselníkovými úchylkoměry

Postup provedení horizontálního ustavení do osy by z dosud uvedeného již měl být dostatečně zřejmý, případně je uveden v každé uživatelské příručce měřících systémů, např. [2].

❖ POŘADÍ ŘEŠENÍ USTAVOVÁNÍ [1], [9]

Oprava špatného ustavení (souososti) zahrnuje provedení počátečních a finálních korekcí. Počáteční korekce se provádějí za účelem snížení špatného ustavení a zvýšení přesnosti ustavovacích měření.

Než začneme jakkoli pohybovat strojem, zhodnotíme horizontální a vertikální polohu pohyblivého stroje. Celý proces korigování začíná většinou provedením počátečních korekcí v rovině, kde je souosost horší a teprve pak se provedou opravy konečné.

Prováděné korekce	Když	Potom
vertikální i horizontální předních i zadních patek	chyba souososti je 0,5 mm nebo menší	- provedeme finální vertikální korekce - provedeme finální horizontální korekce
vertikální i horizontální předních i zadních patek	chyba souososti je větší než 0,5 mm	- provedeme počáteční horizontální i vertikální korekce - provedeme finální vertikální korekce - provedeme finální horizontální korekce

Prováděné korekce	Když	Potom
bud' vertikální nebo horizontální předních i zadních patek	chyba souososti je větší než 0,5 mm	- provedeme počáteční horizontální nebo vertikální korekce - provedeme finální vertikální korekce - provedeme finální horizontální korekce

3.5 Laserové systémy

Z předchozího textu je patrné, že dosud uvedené metody měření polohy hřídelů jsou zatíženy chybou odečtů především při používání běžných měřidel vzdálenosti. S rozvojem mikroprocesorů, laserové techniky a podobně dochází nejen ke zvýšení přesnosti měření, ale také ke snížení času nutného na ustavení. Takže je logické, že v roce v roce 1984 uvedla na trh německá firma Prüftechnik první laserový souosovací systém.

3.5.1 Historie a možnosti použití laserů

Objev laseru je možno bez velkého přehánění zařadit mezi fyzikální události prvořadě důležitosti. Jeho význam může být srovnán se závažností objevů, jako jsou např. parní stroj, elektrický proud, štěpení atomového jádra, raketová technika, polovodiče a několik málo dalších. Je pro ně typické, že dlouhodobě ovlivňují širokou frontu nejruznějších vědních odvětví technického rozvoje a mnohé vstupují do našeho denního života.

Jako zajímavost lze uvést, že slovo laser najdeme i v latinském slovníku, kde ovšem znamená šťávu léčivé rostliny (hlodýš) z rodu laserpitium. Italský fyzik O. Svelto uvádí ve své učebnici laserové fyziky citát římského přírodopisce Plinia, jenž chválí laser jako vzácný dar přírody, mimořádně užitečný a potřebný. Těžko říci, nakolik blahodárné bylo léčivé působení laseru starých Římanů, ale náš novodobý laser patří rozhodně k nejužitečnějším vynálezům, které lidstvo kdy vytvořilo.

Princip laseru předpověděl již v roce 1916 Albert Einstein. K realizaci tohoto zařízení však došlo až téměř o padesát let později, kdy fyzika a technologie, zejména polovodičových struktur, dosáhly potřebného stupně vývoje.

Prvním přístrojem, založeným na principech kvantové elektroniky byl molekulární (čpavkový) generátor (kvantový generátor mikrovlnného záření o vlnové délce 1-10 cm), realizovaný v roce 1955 na dvou místech současně a to ve Fyzikálním ústavu Akademie věd v Moskvě a v Kolumbijské univerzitě v New Yorku. Jeho tvůrci byli Nikolaj Genadijevič Basov, Alexandr Michajlovič Prochorov (SSSR) a Charles Townes (USA). Název vznikl z počátečních písmen dlouhého anglického pojmenování popisujícího jeho funkci: „Microwave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation,“ což doslovně přeloženo znamená zesilování vlnění nucenou (stimulovanou) emisí záření. Za tento objev získali všichni jeho tvůrci v roce 1964 nejvyšší ocenění v oblasti fyziky - Nobelovu cenu.

Zdalo se, že po vytvoření maserů v oblasti radiových vln budou brzy vytvořeny také kvantové generátory v optické oblasti. Teoretický rozbor možností jejich konstrukce podali v roce 1958 A.L.Schawlow a CH.Townes a naznačili praktické ověření v prostředí plynné fáze s použitím Fabry-Perotova rezonátoru. K jejich praktické aplikaci bylo nutné pouze najít:

- rezonátor pro vlnové délky z optické oblasti spektra,
- metody realizující inverzní populaci hladin na kvantových přechodech v optické oblasti.

První „optický maser“, neboli LASER, zkonstruoval 15.5.1960 americký fyzik T. Maimann, který použil jako aktivní prostředí monokrystal rubínu. Rubín byl vybroušen do tvaru válečku a Fabry-Perotův rezonátor byl realizován postříbřením čelních ploch. Pracoval v pulzním režimu na vlnové délce $\lambda = 694,3 \text{ nm}$.

První plynový laser s kontinuálním provozem byl zkonstruován v roce 1961 A. Javanem, W. R. Bennetem a P. R. Herriotem. Aktivní prostředí tvořila směs plynů He-Ne a rezonátor planoparalelní dielektrická zrcadla.

Tyto dva experimentální úspěchy měly za následek bouřlivý rozvoj laserů. Byla vyzkoušena celá řada aktivních materiálů a nových konstrukcí. V roce 1959 navrhl N. G. Basov laser, založený na rekombinačním záření polovodičů. Prakticky byl ověřen v roce 1962 na polovodiči GaAs. Polovodičový laser vyřešil otázku jednoduché modulace světla současně s jeho miniaturizací.

Je třeba říci, že i tehdejší Československo se jako jedna z prvních zemí zapojilo do výzkumu a využívání laserové techniky. V únoru 1962 byl na Vojenské akademii Antonína Zápotockého v Brně spuštěn první československý čpavkový maser. Laserová éra začala u nás 9. dubna 1963, kdy ve fyzikálním ústavu ČSAV skupina dr. K. Pátka spustila první laser s neodymovým sklem. Tři dny nato, 12. dubna 1963, uvedl J. Pachman se svými spolupracovníky ve Vojenském výzkumném ústavu v Praze do chodu první československý rubínový laser. Již v červenci téhož roku začal v tehdejší Ústavu fyziky pevných látek ČSAV pracovat i první polovodičový laser, zkonstruovaný skupinou T. Šimečka. Třetí druh laserů, helium - neonový se rodil v Ústavu přístrojové techniky ČSAV v Brně a u jeho zrodu stál F. Petrů se svými spolupracovníky. V říjnu 1963 se podařilo získat infračervené záření tohoto laseru a na jaře následujícího roku i záření v oblasti červeného viditelného světla.

Laser je vynálezem dvacátého století a za necelých čtyřicet let své existence se stal nedílnou součástí našeho života. Setkáváme se s ním v mnoha oborech lidské činnosti. Pomáhá nám při měření vzdáleností a určování směru (například při stavbě Metra). V rukou lékaře se stává naprosto sterilním a bezbolestným skalpelem. Můžeme s ním opracovávat také velice tvrdé materiály. Lze s ním svařovat i materiály dříve nesvařovatelné. Dokáže přenášet obrovské množství informací na velké vzdálenosti. Nebo nám například doma přehrává kompaktní disky. Jen málokterý nástroj, který má člověk k dispozici je tak všestranně použitelný jako laser.

Slovo laser pochází z angličtiny. Je složené z počátečních písmen dlouhého anglického názvu popisujícího jeho funkci: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, což by se dalo přeložit jako zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření. České pojmenování laseru je *kvantový generátor světla*, ale plně zdomácněl v anglické výslovnosti „lejzr“. Z názvu je zřejmé, že laser vydává světlo, které je *monochromatické* (jednobarevné), *koherentní* (uspořádané) a má malou *divergenci* (rozbíhavost). Energii můžeme dodávat různým způsobem, například opticky (světlem výbojky), chemicky, elektricky atd. Vzhled samotných laserů je velmi různorodý. Záleží hlavně na druhu laseru, na jeho konstrukci a v neposlední řadě na jeho použití.

Až do dnešní doby byla realizována celá řada aktivních materiálů, čerpacích zařízení a konstrukčních uspořádání. Pouze jedno se nezměnilo: využití stimulované emise pro generování světla v laseru. V tomto směru jsou všechny typy laseru ekvivalentní a tudíž popsatelné jedním způsobem.

V aplikaci laserů se využívá těchto vlastností výstupního svazku: vysoké koherence (holografie), stability kmity (metrologie), směrovosti a malé rozbíhavosti (vytyčovací a geodetické práce, řízení strojů pro zemní práce), vysokého výkonu (použití v průmyslu pro technologické účely), možnosti soustředění svazku na velmi malou plochu (lékařství, záznam informací, řezání materiálu, svařování), krátké délky světelného impulsu (sdělování, dálko-

měry), monochromatickosti záření a přeladitelnosti vlnové délky (spektroskopie). Z tohoto výčtu plyne, že laser našel plné uplatnění ve všech oblastech lidské činnosti. V následujících řádcích se pokusíme heslovitě nastínit pouze aplikace v technické oblasti.

❖ **Strojírenská technologie**

Laserové technologie se zde používají v celé řadě aplikací metrologie, defektoskopie, analýzy materiálu, svařování, tepelného zpracování kovů, povrchové úpravy obrobku, řezání materiálu a podobně.

❖ **Interferometrická měření**

Laserové interferenční měřicí systémy doplněné různými mechanicko - optickými prvky se používají například pro bezdotyková měření délkových změn, házivosti a měření vibrací rotujících objektů, rovinnosti a rovnoběžnosti ploch a os, nastavení nástrojů obráběcích strojů a podobně.

❖ **Měření parametrů proudění**

Bezkontaktní metody k měření parametrů opticky průhledných kontinuů, čímž dostáváme interferogramy proudění, lze určit parametry teplotních polí a podobně.

❖ **Holografie**

Je obor fyzikální optiky, jehož existence je v podstatě vázána na použití laserů. Holografie umožňuje vytvořit stacionární prostorový obraz různých předmětů, dynamických jevů, tvarových změn povrchů, je využívána v nedestruktivní diagnostice a podobně.

❖ **Stavebnictví, geodézie, hornictví**

Přímočaré kontinuální záření laserů se využívá tam, kde přímka v obecném tvaru je základním prvkem:

- směrové a výškové řízení protlačovacích souprav pod komunikacemi,
- řízení stavebních a jiných mechanismů pomocí rotačních systémů,
- měřicí technika - deformace trvalého nebo přechodného rázu, například zatěžování konstrukcí mostů, rektifikace jeřábových drah a kruhových nosníků velkostrojů, bezdotyková měření objektů,
- geodetická měření ve stavebnictví a hornictví

a samozřejmě v oblasti, které je věnováno předkládané skriptum, tedy zajištění provozní spolehlivosti - údržbě, kde našel uplatnění využitím směrovosti a malé rozbíhavosti laserového světla. Pokud vynecháme již zmíněná konkrétní měření, např. jeřábových drah a podobně, tak v údržbě v obecné rovině hovoříme o:

- vyrovnaní do osy jak horizontální, tak vertikální,
- měření přímosti,
- měření kolmosti,

- měření rovnoběžnosti,
- vyrovnaní vřeten do osy

s tím, že pro tato skripta je podstatná první odrážka.

3.5.2 Druhy laseru a jejich klasifikace

Třebaže není možné vyčerpávajícím způsobem a ani to není cílem těchto skript, se uvedenými otázkami zabývat, přesto považujeme za nutné nastínit fyzikální princip a základní konstrukční uspořádání laserů.

Laser je optický kvantový generátor využívající jevu zesílení světla stimulovanou emisí záření, což znamená malinko se vrátit do fyziky.

Klasické teplotní a výbojkové zdroje emitují spontánní záření. Jestliže atomům dodáme energii (např. zahřátím na vysokou teplotu), pak jejich elektrony přejdou ze základních energetických hladin E_1 na hladiny s vyšší energií E_2 . Atomy se dostaly do tzv. nabuzeného (excitovaného) stavu ($E_2 > E_1$). Takto nabuzené elektrony mají tendenci samovolně se vracet na nižší energetické hladiny. Tento přechod elektronů je spojen s emitováním světelného kvanta - fotonu s energií, která je rovna rozdílu energií hladin $\Delta E = E_2 - E_1$. Tento jev se nazývá spontánní emise. Spektrum takto vzniklého záření závisí na rozmanitosti možných energetických přechodů. Záření při spontánní emisi je nekoherentní s nahodilými fázovými vztahy v prostoru a čase, neboť mezi vyzařujícími atomy neexistuje žádná koordinace. Jiná situace nastává, jestliže na systém hladin s energiemi E_1 a E_2 dopadne foton v případě, že atom je již v nabuzeném stavu $E_2 > E_1$. Vlivem vnějšího podnětu se nabuzený atom vrací do základního stavu, emituje nový foton se stejnou energií a tedy i frekvencí jako měl dopadající foton. Tedy po dopadu jednoho fotonu jistě frekvence opouští zasažený nabuzený atom dva fotony stejné frekvence. Tento jev se nazývá vynucená (stimulovaná) emise a tvoří základ funkce kvantových zesilovačů záření.

Základní konstrukční prvky laseru jsou: aktivní prostředí, budící generátor pro čerpání a optický rezonátor.

Aktivní prostředí záleží na typu laseru. Obecně musí vykazovat vhodné rozložení energetických hladin. Aktivní prostředí je tedy soubor kvantových soustav rozmístěných v jisté konečné části prostoru, které byly vnějším působením vyvedeny ze stavu termodynamické rovnováhy. Jejich celková vnitřní energie je větší než celková vnitřní (rovnovážná) energie před začátkem působení buzení.

Budící generátor musí dodávat aktivnímu prostředí vnější energii, která přivede atomy nebo molekuly na vyšší energetické hladiny. Tento proces se nazývá čerpání (excitace). Dosáhnout inverze populace znamená porušit rovnovážné rozdělení atomů a dosáhnout jiného stavu aktivního prostředí. K tomu je ovšem třeba dodat energii. Způsobů excitace je celá řada. Mezi nejznámější patří např. optická, elektrickým výbojem, chemická, elektronovým svazkem, injekcí nosičů náboje.

Zesílení světla se realizuje v optickém rezonátoru, takže úkolem rezonátoru v laseru je vytvořit kladnou zpětnou vazbu. Optický rezonanční obvod je obvykle představován zrcadly, která mohou mít různou konfiguraci. Prostor mezi zrcadly je vyplněn aktivním prostředím. Nejjednodušším uspořádáním jsou dvě rovinná rovnoběžná zrcadla, umístěná ve vzdálenosti L - Fabry-Perotův rezonátor.

Od spuštění prvního laseru uběhlo téměř čtyřicet let. Během té doby se, zejména v šedesátých letech, začaly objevovat další typy laserů, lišící se aktivním prostředím, nebo

konstrukčním uspořádáním. Vznikaly také lasery s dalšími vlnovými délkami v oblasti viditelného, infračerveného, ultrafialového a dokonce i rentgenového záření. Každý z těchto laserů našel uplatnění v jiné oblasti lidské činnosti. Ne každý laser se hodí pro každý účel.

Při sváření a vrtání je určující charakteristikou výkon laseru, proto se zde uplatňují impulsní lasery. Zvyšování výkonu se ale nedělo zvyšováním energie vyzářené laserem. Celková vyzářená energie nemůže být větší než energie přijatá. Výkon laseru ale také závisí na délce laserového pulsu, čím bude puls kratší, tím větší bude výkon. Zkracování délky pulsu vedlo až k několika nanosekundám. Takovým pulsům říkáme gigantické nebo obří a získáváme výkony slušné elektrárny.

Při přenosu informací se naopak používají lasery pracující v nepřetržitém režimu. Atmosféra ale laserový paprsek silně oslabuje, proto je vhodné použít lasery pracující v oblasti takzvaných atmosférických oken, pro která je atmosféra velmi průzračná. Většina laserů pracuje na jedné určité frekvenci, kterou není možné měnit. Pokud chceme používat více frekvencí, použijeme lasery laditelné.

Pokud používáme laser k přenosu energie je pro nás nejdůležitější účinnost přeměny energie v laserový paprsek. V tomto ohledu jsou na tom nejlépe lasery polovodičové. Pro lasery pracující ve vesmíru potřebujeme nezávislý zdroj energie. Neexistuje univerzální laser, který by vyhověl všem podmínkám.

Laserů je velké množství a každý něčím vyniká a je vhodný k určitému použití. Jednotlivé typy se také postupem času zdokonaľovaly a vylepšovaly se jejich parametry. Nejlepší bude si lasery ně-jak rozdělit a každý typ krátce charakterizovat.

Lasery lze rozdělit podle různých kritérií:

- ❖ podle povahy aktivního prostředí rozlišujeme lasery
 - pevnolátkové,
 - kapalinové,
 - plynové,
 - lasery využívající svazky nabitých částic,
- ❖ podle způsobu čerpání energie lze lasery rozdělit na lasery čerpané:
 - opticky (výbojkou, jiným laserem, slunečním světlem a radioaktivním zářením),
 - elektricky (srážkami v elektrickém výboji, svazkem nabitých částic, injekcí elektronů, interakcí elektromagnetického pole se shluky nabitých částic),
 - chemicky (energií chemické vazby, fotochemickou disociací, výměnou energie mezi molekulami a atomy),
 - termodynamicky (zahřáním a ochlazením plynu),
 - jadernou energií (reaktorem, jaderným výbuchem),
- ❖ z hlediska režimu práce mohou lasery pracovat:
 - kontinuálně (spojitě, nepřetržitě),
 - impulsně,

❖ lasery můžeme dělit také podle vyzařované vlnové délky na:

- infračervené,
- lasery v oblasti viditelného světla,
- ultrafialové,
- rentgenové,

❖ konečně můžeme lasery dělit podle použití na lasery:

- výzkumné,
- měřicí,
- lékařské,
- technologické,
- energetické,
- vojenské.

❖ **Lasery využívající pevné látky**

- ***rubínový laser***

Jedná se o nejstarší typ laseru. Jako aktivní prostředí je použit krystal korundu (Al_2O_3) s příměsí chrómu (řádově desetiny procenta), který představuje aktivní látku. Laser vyzařuje červené světlo o vlnové délce $0,6943\ \mu\text{m}$ a pohlcuje energii světla výbojky (kratší vlnové délky, zelenou část spektra). Dříve se používalo výbojky tvaru šroubovice, která ovíjela krystal. Výroba takové výbojky ale činí potíže, proto se přešlo na lasery s eliptickými zrcadly. Světlo vydávané výbojkou umístěnou v jednom ohnisku se soustřeďuje v druhém ohnisku, kde je umístěn krystal. Je to laser tříhladinový pracující v pulsním režimu. Pulsní režim je nutný, protože se krystal při čerpání energie silně zahřívá.

- ***lasery s neodymovým sklem a lasery YAG***

Tyto lasery jsou jedny z nejrozšířenějších. Ionty neodymu jsou rozptýleny ve skleněné matici u laseru YAG jsou krystaly yttrio - hlinitého granátu dotovaného neodymem. Neodymové sklo může být vyráběno v prakticky neomezených rozměrech a tak je dosahováno velkých laserových energií. Atomy neodymu pracují jako čtyřhladinový systém. Laser vyzařuje infračervený paprsek o velké energii. Pokud jde o YAG laser, vyznačuje se vysokou účinností, stačí jej osvětlit pouhou žárovkou a může vydávat spojitě světlo o výkonu stovky wattů. V poslední době se osvědčují i tak-zvané YAP lasery s krystalem yttrio - hlinitého perovskitu.

Vedle korundu, skla a yttrio - hlinitého granátu se jako základní materiál používá fluorit, wolfram vápenatý a jiné. Jako aktivní příměsi slouží většinou prvky vzácných zemin: chrom, kobalt, nikl nebo uran. Tyto prvky vydávají převážně červené a infračervené záření.

- ***polovodičové lasery***

Vlastnosti polovodičových krystalů, zejména přechodu PN byly zkoumány již dříve a tak se také brzy zrodila myšlenka využít elektroluminiscenční vlastnosti polovodičů k sestrojení laseru. Polovodičové lasery lze také zařadit mezi lasery pevnolátkové, mají však své zvláštnosti a významné použití především v optoelektronice.

První byly polovodičové lasery *injekčního typu*. K nevýhodám tohoto laseru patří nutnost jeho chlazení na teplotu kolem 77 K tekutým dusíkem. Laser pracuje na vlnové délce 0,840 μm a jeho výkon a účinnost silně závisí na provozní teplotě.

V dalším vývoji polovodičových laserů sehrála zásadní úlohu práce sovětských vědců, kteří našli způsob vytváření struktur s *heteropřechody*. Tak laser na struktuře AlGaAs může pracovat již při pokojové teplotě a s účinností kolem 20 % a dávat kolem 200 mW nepřetržitého výkonu.

Vedle injekčních polovodičových laserů se podařilo realizovat i *elektroionizační* polovodičové lasery, například na krystalu sulfidu kademnatého. Laser vydává při pokojové teplotě zelené světlo o vysokém impulsním výkonu.

❖ Lasery kapalinové

Kapalinové lasery pracující s cheláty různých prvků vzácných zemin se objevily již v roce 1963. Výhodou je, že můžou zabírat neomezeně velký objem a jsou dokonale homogenní. Nevýhodou ale je, že se chemicky rozkládají.

Důležitou skupinou jsou však zejména *barvivové lasery*, které využívají roztoků různých organických látek, například rhodaminu. K těmto kapalinovým laserům patří i lasery na barevných centrech, krystalech s různými defekty vyvolávající absorpci na různobarevných spektrálních čárách (krystal KCl s příměsí lithia). Barvivové lasery a lasery na barevných centrech mají společnou vlastnost, která je předurčuje k použití ve spektroskopii a v informační technice. Jsou laditelné a vlnovou délku laserového záření lze u nich plynule měnit.

❖ Lasery plynové

Plynové lasery se ukázaly jako velmi perspektivní a mohutné zdroje infračerveného i ultrafialového záření a našly významné uplatnění v technice a technologii. Je to dáno tím, že objem plynu je možno podle potřeby zvětšovat, plynulým přítokem je možné dodávat stále nové aktivní prostředí a je možno je čerpat nejrůznějšími mechanismy, elektricky, chemicky apod. Plynové lasery mají vyšší účinnost, protože přeměna elektrické energie ve výboj je hospodárnější. Proto tyto lasery pracují v nepřetržitém režimu, ale jejich trvalý výkon není moc velký.

• *laser helium - neonový*

Z plynových laserů se stal nejznámějším typem, generuje jak červené (na vlnové délce 0,6328 μm), tak infračervené záření. Helium - neonový laser tvoří dlouhá skleněná trubice naplněná směsí neonu a hélia, v níž se budí elektrický výboj na vysokém kmitočtu nejčastěji vnějšími elektrodami. Konce trubice bývají zkoseny pod Brewsterovým úhlem a celá trubice je umístěná mezi zrcadly vnějšího rezonátoru. Jako aktivní plyn působí neon. Paprsek má vysokou stabilitu kmitočtu (vyšší než u maseru) a malou rozbíhavost. To předurčuje helium - neonový laser k funkci přesných hodin, přesného dálkoměru a k účelům telekomunikačním a geodetickým.

• *argonový laser*

Vydává modrozelené světlo (zelené na vlně 0,514 μm a modré na vlně 0,488 μm). Je pro něj typická vysoká hustota elektrického proudu protékajícího výbojem a vysoká teplota. Výbojová trubice se obvykle zhotovuje z keramického materiálu a proud se izoluje od stěn magnetickým polem. Laser je schopen generovat desítky wattů ve spojitém režimu a je

vhodný i pro technologické účely. Podobné vlastnosti má i *kryptonový* a *kadmiový* laser a *lasery s parami kovů* (např. mědi).

- **CO₂ laser**

Nejvýkonnějšími z plynových laserů se staly laser s oxidem uhličitým a lasery chemické. Laser s oxidem uhličitým generuje infračervené záření na vlně 10,6 μm, tedy právě uprostřed atmosférického okna. Vzhledem k velikosti trubice může podávat vysoké výkony. U tohoto laseru se postupně uplatňovaly nové způsoby čerpání energie. V roce 1966 využití tepelné energie, která vzniká při prudké expanzi zahřátého plynu. Tak byly realizovány *gazodynamické lasery* s rychlým, nadzvukovým proudem oxidu uhličitého. V letech 1970 - 1971 to pak bylo čerpání pomocí svazku elektronů (*elektroionizační lasery EIL*). To umožnilo použít plyn pod vysokým tlakem a dále zvýšit laserový výkon. V roce 1969 vznikly v USA lasery s oxidem uhličitým pod atmosférickým tlakem a s příčným buzením (tzv. *TEA lasery*, **T**ransverse **E**xcitation **A**tmospheric - příčné buzení, atmosférický). Takové lasery umožní vytvořit výkonné tepelné stroje s uzavřenou cirkulací plynu, v nichž se tepelná energie mění v obrovskou energii infračerveného záření. CO₂ laser nachází uplatnění v technologii, ve vojenské a kosmické technice a ve vědeckém výzkumu.

- **chemické lasery**

Využívají k čerpání energie do aktivního prostředí energie exotermických řetězových chemických reakcí. První takový laser s použitím reakce mezi vodíkem a chlorem byl zkonstruován v roce 1965 a první výkonné lasery tohoto druhu založené na reakci vodíku a fluoru vznikly v roce 1969. Zvláštním druhem chemického laseru založeného na disociaci molekul ultrafialovým zářením (tzv. *fotodisociační laser*) je laser jódový.

- ❖ **Lasery využívající svazky nabitých částic**

Tyto lasery nepracují na kvantových přechodech, ale využívají synchronizované oscilace částic. Byly vytvořeny lasery se svazky rychlých elektronů, takzvané *FEL lasery* (**F**ree **E**lectron **L**asers), lasery na volných elektronech, případně jiných nabitých částicích. Takové lasery mají těsnou návaznost na urychlovače.

3.5.3 Základní vlastnosti laserového záření

V aplikaci laserů, jak již bylo zmíněno v kap.3.5.1, se využívá různých vlastností výstupního laserového svazku, což je následně využíváno pro různé formy nasazení. Nyní tedy velmi stručně k základním a nejvyužívanějším vlastnostem.

- ❖ **Monochromaticnost**

Ve svazku paprsků světelného záření definované vlnové délky se vyskytují mimo základní frekvenci ještě frekvence další. Takové světlo tvoří spektrum s omezeným frekvenčním pásem, to je spektrální linie. Šíře spektrální linie určuje stupeň monochromaticnosti světla. Laserové zařízení je neobvykle monochromatické, tedy má velice úzkou šířku spektrální linie. Šířka spektrální linie je sice nenulová, avšak mnohem užší než u běžných zdrojů záření.

❖ Koherence

Koherence laserového záření je vlastnost, vyznačující prostorově časové uspořádání vln světelného záření (světlo kmitá ve stejné fázi). Koherence laserového záření hraje významnou roli u těch použití laseru, ve kterých vystupující svazek laserového záření je rozdělen na další samostatné svazky s následným jejich složením. K těmto použitím patří například interferometrické laserové měření délek.

❖ Směrovost

Směrovost záření je charakterizována prostorovým úhlem, ve kterém se šíří (rozprostírá) velká část záření. Tedy stupeň směrovosti je dán úhlem rozbíhavosti (divergencí) svazku laserového záření.

Bez použití doplňující fokusační soustavy je rozbíhavost svazku laserů obvykle několik úhlových minut. Pomocí fokusační soustavy se dosahuje rozbíhavosti několika úhlových vteřin.

❖ Intenzita

Pod intenzitou laserového záření rozumíme vysoké hodnoty veličin, které popisují energetické parametry záření, to je výkon, hustota záření a další. Laserové záření je většinou intenzivní, třebaže výkon záření je v porovnání s jinými zdroji záření malý. To je způsobeno vysokým stupněm směrovosti laserového záření.

❖ Polarizace

Záření téměř všech typů laserů je polarizované. Jestliže čelní plocha aktivní části laseru je zkosena pod tzv. Brewsterovým úhlem, je stupeň polarizace blízký 100% a záření je lineárně polarizováno.

Při experimentálním ověřování vlastností indikátoru polohy svazku laserového záření byl zaznamenán nepříznivý vliv ozáření fotodiod detektoru druhotným zdrojem záření (umělým světlem). Má-li detektor zpracovávat pouze žádoucí záření (prvotní záření) generované laserem, musíme odstínit (potlačit) druhotná záření přídatným zařízením. Je zde možnost svazek laserového zařízení modulovat, což umožňuje rozlišení žádoucího záření od druhotného záření při detekci stopy laserového záření.

Z tohoto pohledu pak k základním parametrům optických detektorů patří - detektivita, konverzní účinnost, časová odezva a spektrální charakteristika. V technické praxi se pak hovoří o těchto metodách detekce - vizuální, tepelné, fotoelektrické, fotochemické.

Úzký svazek laserového záření představuje referenční přímkou, ke které lze vztáhnout potřebné měřicí prvky. V řadě úloh technické praxe je však nutné od této referenční přímky vytyčit další body v kolmém, rovnoběžném a obecném směru, resp. rozmítnout svazek laserového záření do roviny a podobně. Pak je nutná úprava svazku laserového záření, která je prováděna například:

- úprava svazku zrcadlem,
- úprava svazku hranolem,
- úprava svazku optickým klínem,
- úprava svazku válcovou čočkou,

- úprava svazku skleněnou tyčinkou,
- úprava svazku rozmítáním a podobně.

3.5.4 Laserové ustavovací systémy

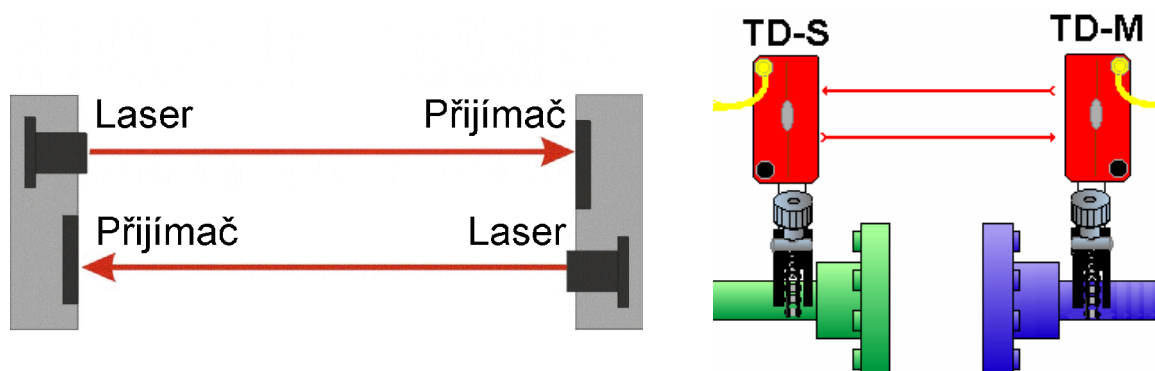
V současné době existuje celá řada laserových systémů od různých výrobců, využívaných v ustavovacích procedurách hřídelů do osy. Jejich hlavní výhodou je, že zde nedochází k nepřesnostem měření vlivem prohnutí nosných tyčí číselníkových úchylkoměrů.

3.5.4.1 Obecné základy laserových ustavovacích systémů

Ustavovací přístroje na bázi laserů se v zásadě sestávají ze tří základních částí:

- laseru
- přijímače
- zobrazovací jednotky s aplikačním software

Je logické, že jedna jednotka (TD-S) se upevňuje na stacionární části stroje a jedna jednotka (TD-M) na pohyblivé vyrovnávané části stroje a každá z jednotek TD obsahuje laser (vysílač) a detektor (přijímač) - obr.33.



Obr.33 Uchycení TD jednotek na hřídelích při laserovém ustavování

V aplikacích laserového ustavování a zeměměřičství byly až do konce 80-tých let používány především He - Ne lasery. Druhým typem laseru, jehož význam stále stoupá, je diodový, neboli injekční laser (polovodičové lasery). Jako detektoru PSD (**P**osition **S**ensitive **D**etector) je používán fotelektrický proud. Zobrazovací jednotka je uživatelským rozhraním, které navíc komunikuje s připojenými TD jednotkami a aplikační software pak prezentuje informace a výsledky měření v nutném formátu daného úkolu ustavování. Rozhodující pro ustavovací laserové systémy je flexibilita a modulární princip k řešení různorodých úkonů.

Pro ustavování se v současné době používá dvou základních laserových systémů:

❖ jeden laser s jedním cílem

Měří horizontální i vertikální složky s úhlem současně. Je nutné propojení hřídelů, tzn. současné otáčení.

❖ dvojice laserů pracující na principu reverzní indikátorové metody

Každá TD jednotka musí obsahovat jak vysílač, tak přijímač. Na tomto principu dnes pracuje většina ustavovacích laserových systémů.

Nedílnou součástí měřících ustavovacích laserových systémů je příslušenství, což jsou z pohledu těchto skript především přípravky pro uchycení na hřídele, z pohledu možných řešených úloh (kap.3.5.1) také přípravky další.

3.5.4.2 Ustavování horizontálních hřidelů

V kap.3.2 na obr.17 již byla zmínka o tzv. hrubém ustavování pomocí laseru - Coning 1 a Coning 2 a současně byl také stručně popsán jejich princip.

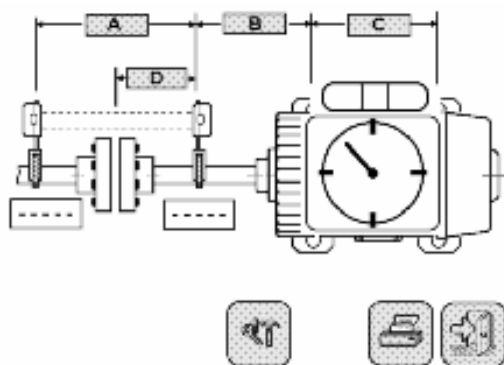
❖ Coning (Kružková metoda)

U této metody se používá dvojice laserů a pro vlastní ustavování jsou pak používány stejné postupy jako při ustavování číselníkovými úchylkoměry - reverzní obvodová metoda. Číselníkový úchylkoměr měří odchylku pomocí plunžru, laserová vysílací (přijímací) TD jednotka pak měří odchylku detekcí pohybu laserového paprsku na jednoosém detektoru. Více bude jistě zřejmé z příkladu uvedeném v kap.3.5.5. Bližší popis také najdeme v [1], [2] a [9].

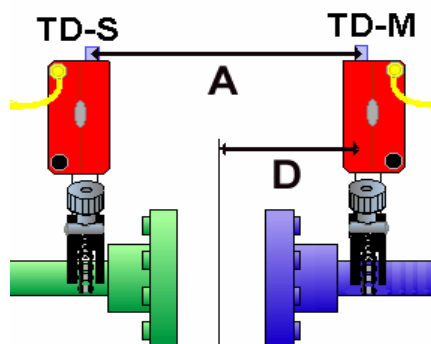
Vydeme-li pak z již zmíněné lit. [1], [2] a [9], tak ve své podstatě existují pro horizontální ustavování následující metody.

❖ Hodinová metoda

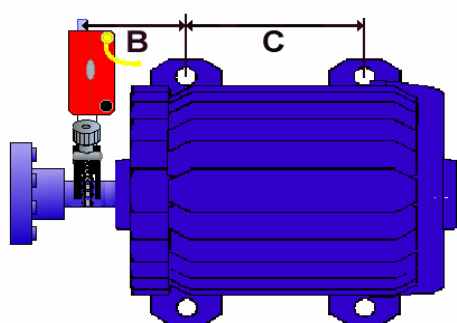
Hodinové pozice jsou odvozeny od stanoviště měření při postavení za pohyblivou částí ustavovaného soustrojí čelem k částí stacionární. V menu spustíme horizontální ustavování a změříme rozměry, které jsou patrné z obr.34.a, b, c. Měření začínáme v pozici 12.00 hodin, následně v pozici 3.00 hodiny atd. (blíže v každé uživatelské příručce, např. [2]). Obr.34 dále znázorňuje, že hřídele jsou při tomto způsobu ustavování rozpojeny. O správnosti výsledku se přesvědčíme opakováním měření. Mělo by být zřejmé, vertikální vyrovnání je možné v pozici 12.00 a 6.00 hodin, horizontální v pozici 3.00 a 9.00 hodin. Při měření je používán zabudovaný sklonoměr, povolená tolerance je $\pm 3^\circ$ a je indikována blikáním LED diody na jednotce TD-M zelenočerveně.



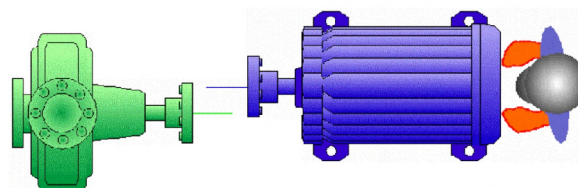
a)



b)



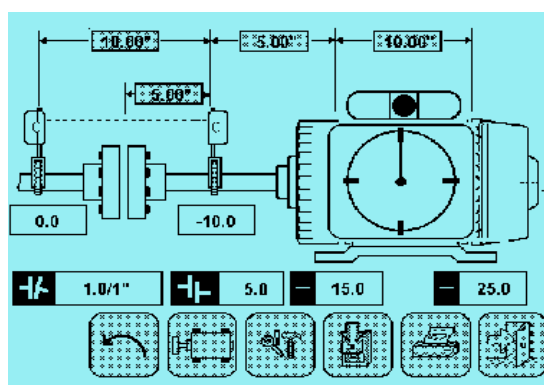
c)



stacionární stroj

pohyblivý stroj

d)



e)

Obr.34 Hodinová metoda

❖ Metoda „TRIPOINT“

Pokud se hřídele otáčejí v omezeném rozsahu nebo pouze jedním směrem, je nutné použít danou metodu. Další podmínkou použití uvedené metody je, že hřídele musí být během měření spojeny. Minimální úhel pootočení mezi měřicími body je 30° a platí, čím je úhel mezi třemi měřenými body větší, tím méně bude nutné opakovat měření. Je logické, že musíme změřit a zadávat do vyhodnocovacího software hodnoty uvedené v předchozí metodě (A, B, C, D).

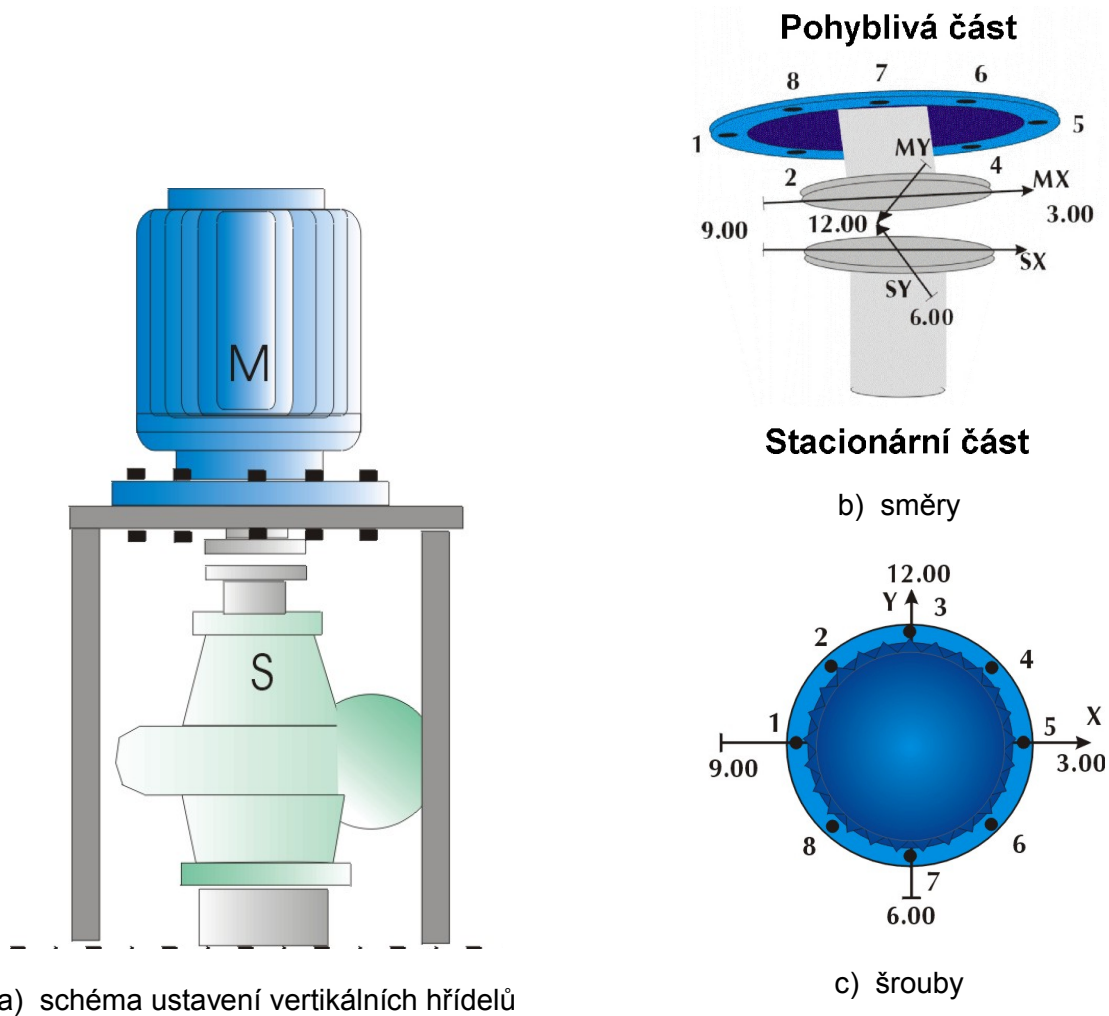
Další k uváděným metodám najdeme v kap.3.5.5 a literatuře, např. [1], [2] a [9].

3.5.4.3 Ustavování vertikálních hřídelů

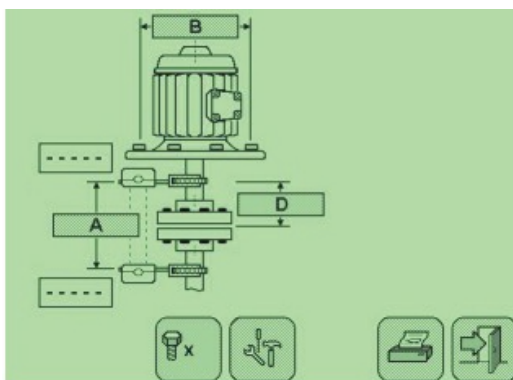
Vertikální stroje jsou obvykle montovány nikoliv na patky, ale pomocí šroubů na příruby, proto se v porovnání s horizontálními stroji liší i způsob výpočtu opravných hodnot. Šrouby, jejichž počet bývá různý, jsou umístěny na přírubě po kruhu. Někdy jsou uspořádány symetricky ve dvou kruzích s různými poloměry.

Všechny šrouby je nutno očíslovat - obr.35, stanovit směry X a Y a jako u ustavování horizontálních hřídelů musíme určit paralelní posunutí a úhlovou chybu. Pokud se týká rozměrů, které musí být změřeny, jsou uvedeny na obr.36. Program pro ustavování vertikálních hřídelů v závěrečné fázi počítá velikosti podložek pro jednotlivé šrouby pro opravu úhlové chyby, tzn. dosažení soustřednosti. Podmínkou je nutnost otáčení hřídele v rozsahu 180° .

Podrobnější postup najdeme samozřejmě v každé uživatelské příručce ustalovacích systémů, např. [2].



Obr.35 Stroje smontované na přírubu



Obr.36 Rozměry ke změření při ustavení vertikálních hřídelů

Čas od času se u vertikálních strojů setkáváme se čtvercovou přírubou, kde se otvory pro šrouby nacházejí na dvou kružnicích s různými průměry (dva průměry). V programu pro vertikální vyrovnání je možné zadat pouze jeden průměr, takže při ustavování takového stroje zadáme nejdříve menší průměr a jemu odpovídající všechny šrouby a následně zadáme větší a odpovídající šrouby. Program provede přepočty a zobrazí opravné hodnoty pro dané šrouby.

3.5.5 Příklady použití

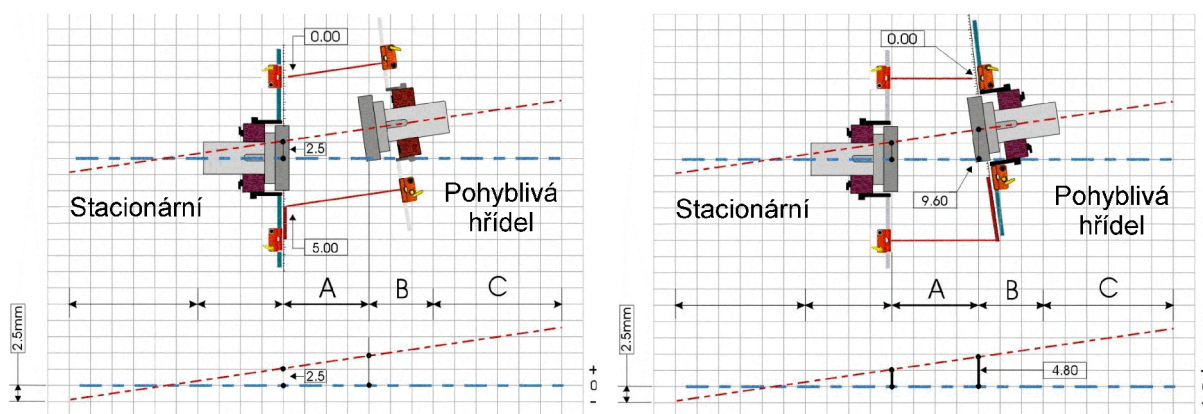
❖ Coning (Kuzelová metoda)

Z následujících obrázků (obr.37) by měl být jednoznačně jasný postup při použití této metody, stejně jako to, že platí rovnice:

- předních patek
$$FF = 2,5 + \frac{4,8 - 2,5}{100} \cdot (100 + 80) = 6,64$$

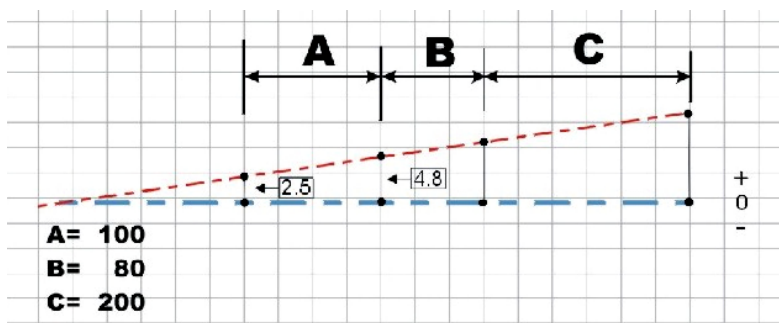
- zadních patek
$$RF = 2,5 + \frac{4,8 - 2,5}{100} \cdot (100 + 80 + 200) = 11,24$$

s tím, že z obr.37 jsou patrné také znaménkové dohody.



a) měření odchylky na stacionární části TD-S
části TD-M

b) měření odchylky na pohyblivé



c) příklad grafického zobrazení k vyrovnání patek (FF, RF)

Obr.37 Coning (Kuzelová metoda)

❖ Proces vyrovnnání a vyhodnocení při horizontálním ustavování

Proces vyrovnnávání stroje si lze usnadnit některými „palcovými“ pravidly. Je-li nesoosost větší než 1 mm (0,025"), doporučuje se následující postup:

1. provede se počáteční vertikální vyrovnnání,
2. provede se počáteční horizontální vyrovnnání,
3. provede se konečná vertikální vyrovnnání,
4. provede se konečná horizontální vyrovnnání.

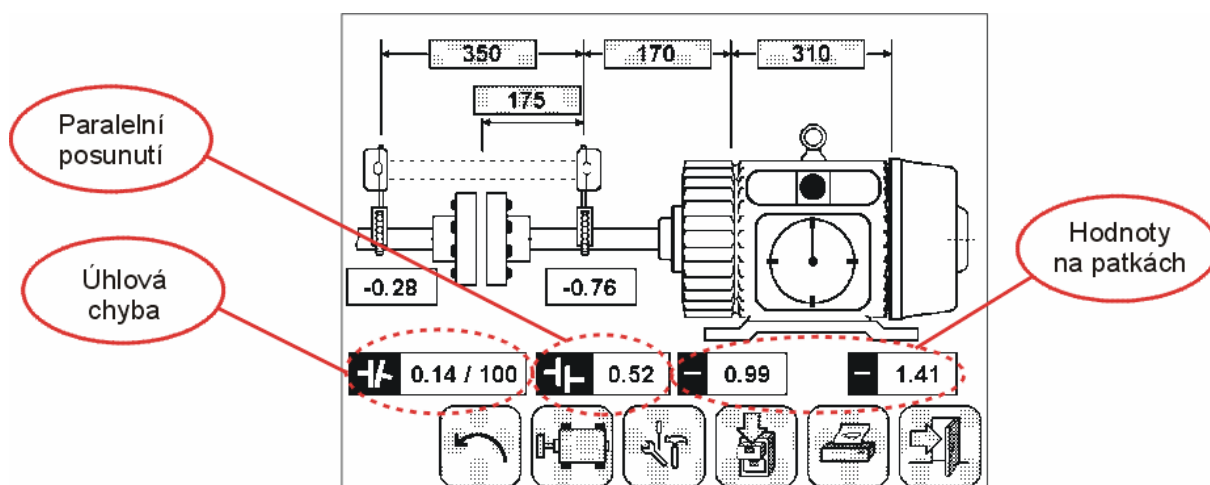
Pokud je nesoosost menší než 1 mm (0,025"), není počáteční vyrovnnání nutné. Proveďte se pouze konečné vyrovnnání, body 3 a 4.

Hodnoty na spojce ukazují polohu pohyblivého hřídele vzhledem ke hřídeli stacionárnímu, včetně velikosti úhlu vychýlení hřídele na vzdálenosti A a posunutí osy spojky.

Hodnoty zobrazené pod patkami udávají polohu pohyblivého stroje v rovinách patek:

- kladné hodnoty na patkách znamenají, že pohyblivý stroj je vysoko nebo posunutý směrem od nás,
- záporné hodnoty znamenají, že pohyblivý stroj je nízko nebo je posunutý směrem k nám.

Vlastní vyhodnocení je uvedeno na obr.38 a vzhledem k jednoznačnosti daného obrázku není určité nutno hlubšího komentáře.



Obr.38 Výsledky měření ve vertikální rovině

❖ Možná omezení při horizontálním ustavování

V provozní praxi, především u starších strojů, se při ustavování setkáme s celou řadou problémů, jejichž základem je - pohyblivá část stroje nejde posunout.

➤ **Omezení daná umístěním šroubů na patkách**

- boční posuv stroje není možný díky nedostatečnému průměru otvorů pro šrouby,
- boční posuv stroje není možný díky horizontálním adjustačním šroubům.

Možné řešení je od uřezání šroubů (nedoporučujeme), přes zvětšení otvorů pro šrouby v základové desce, respektive základovém rámu, případně použití funkce „Feetlock“ (viz. [1]).

➤ **Omezení daná polohou základové desky**

Je vlastně dáno stavem, kdy je pohyblivá část stroje namontována na základ bez podložek a je příliš vysoko a nejde tedy snížit. V praxi to znamená, že přední část pohyblivé části stroje je nízko nebo vysoko, část stacionární a pohyblivá jsou na různých úrovních. Je nutné si uvědomit, že montáž bez podložek (doporučujeme souhrnou tloušťku $3 \div 5$ mm) většinou vždy působí problémy s vertikálním ustavením. Možná řešení je nutno hledat ve zvednutí odpovídajících patek, obroušení základové desky, obroušení patek, zvednutí všech patek stacionární části stroje.

➤ **Změna polohy stacionární části stroje**

Je prováděno podle lit. [1], [2], [9] pomocí funkce statické patky (Static Feet).

Tento program nám dává možnost zvolit si, které patky budou seřizovány nebo uzamčeny. Software přepočte nové korekční hodnoty. Pře spuštěním programu musí být provedeno vyrovnaní hřidelů v horizontální rovině.

❖ **Ustavování vertikálních hřidelů**

Měřením bylo zjištěno:

- úhlová chyba 0,05 mm / 100 mm ve směru X,
- paralelní posunutí 0,1 mm ve směru X,
- úhlová chyba -0,2 mm / 100 mm ve směru Y,
- paralelní posunutí 0,15 ve směru Y,
- šrouby jsou na kružnici o průměru 800 mm,

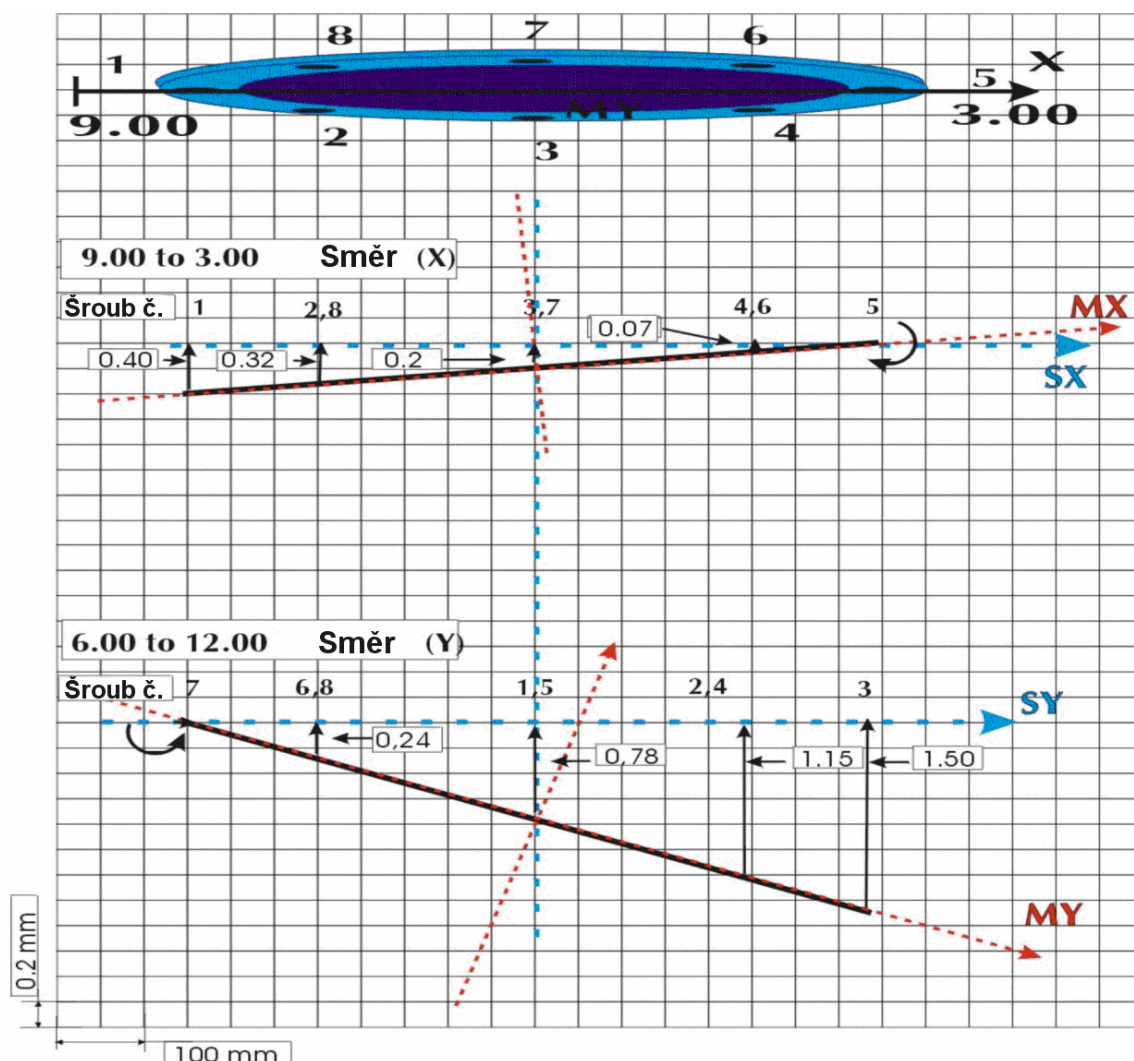
což je v grafickém zobrazení uvedeno na obr.39 a předpokládáme, že označení v něm použité je již dostatečně známé (M - pohyblivý, S - stacionární).

Hodnota podložek ve směru X (9.00 - 3.00 hodiny) musí být pak přičtena k hodnotě podložek ve směru Y (12.00 - 6.00 hodin) pro každý šroub. Z grafu pak dostaneme následující opravné hodnoty pro šrouby:

- Šroub 1 $0,78 + 0,40 = +1,18$ mm
- Šroub 2 $0,32 + 1,15 = +1,47$ mm
- Šroub 3 $0,20 + 1,50 = +1,70$ mm
- Šroub 4 $0,07 + 1,15 = +1,22$ mm

- Šroub 5 $0,00 + 0,78 = +0,78 \text{ mm}$
- Šroub 6 $0,07 + 0,24 = +0,31 \text{ mm}$
- Šroub 7 $0,00 + 0,20 = +0,20 \text{ mm}$
- Šroub 8 $0,32 + 0,24 = +0,56 \text{ mm}$

a je možné říci, že úhlovou odchylku napravíme podložením šroubů a paralelní posunutí horizontálním posunutím pohyblivé části stroje (M).



Obr.39 Grafický výpočet ustavení vertikálních hřídelů

4 Kompenzace provozních vlivů

Existuje velmi široká řada vlivů, která vede ke změnám polohy hřídelů jak v průběhu rozběhu, tak běhu (provozu). Jestliže dodržujeme pravidlo, že se hřídele musí při normálních provozních musí otáčet v jedné přímce, tak je nutné znát velikost a směr pohybu k určení správné polohy při tzv. „studeném“ ustavovacím procesu a tímto kompenzovat tyto změny. U drtivé většiny rotujících strojů ještě nikdy nebyl tento pohyb přesně zjištěn a je dle [8] pravdou, že asi u 60% soustrojí je tento pohyb zanedbatelný, respektive jeho velikost je nepodstatná, takže může být ignorována. Nicméně u některých strojů jsou přípustné tolerance značně převyšovány (lit. [1] udává až 100x), byť je pravdou, že takto vzniklé síly se mohou nejen sčítat, ale někdy také vzájemně rušit.

Je také nespornou pravdou, že některé vlivy lze předvídat a jsou už kompenzovány v projekčních kancelářích, takže nejtěžší otázkou je - určit, která soustrojí vykazují změnu polohy z klidu do běhu.

Literatura [8] uvádí, že pravděpodobně k tomuto jevu dochází:

- u rotujících pohonů nad 200 HP (cca 149 kW) a s otáčkami nad 1200 min⁻¹,
- s teplotními změnami pláště stroje - elektromotory a generátory, parní turbíny, plynové turbíny, spalovací motory, převodovky a podobně,
- u strojů, jež čerpají nebo stlačují plyny, kapaliny a dochází ke změně teploty vstup - výstup (více jak 50 °C) - kompresory, ventilátory a podobně,
- u zařízení, která jsou připojena na potrubí nedostatečně podepřená.

Z uvedeného pak plyne, že předvídaní pohybů strojů a jejich ustavení v režimu vypnuto (off line) a za chodu (on line) se stává důležitou a významnou částí procesu ustavování hřídelů do osy. Hlavními zdroji těchto pohybů jsou **teplotní a mechanické vlivy**, někdy nazývané OL2R (off line to running).

4.1 Teplotní vlivy

Je-li nějaký materiál zahříván, dochází k jeho rozpínání a opačný proces nastává při jeho ochlazení. U strojů a jejich nosných konstrukcí pak nejčastěji mluvíme o tzv. „koeficientu teplotní roztažnosti“, jehož velikost pro nejčastěji používané materiály najdeme v [8] a grafické zobrazení v [1], [9] a další nespecifikované literatuře.

Rovnice pro výpočet roztažnosti (tzv. deformační rovnice) je:

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

kde:

ΔL rozpínání (mm nebo mils)

L délka předmětu [metr nebo palec]

α koeficient teplotní roztažnosti [mm.m⁻¹.°C⁻¹]

ΔT změna teploty [°C]

Rychlost rozpínání materiálu je stanovena na jednotku délky a pro nárůst teploty ve stupních. Různé materiály se rozpínají různou rychlostí, například hliníková základová deska se bude rozpínat mnohem rychleji než stroj, který nese.

Koeficienty teplotní roztažnosti uvedené v [8], [1], [9] lze použít jen pro rozmezí teplot $32 \div 212\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($0 \div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), neboť pro teploty vyšší a nižší jsou hodnoty poněkud vyšší z důvodu nelinearity pohybu molekul v materiálu.

Při teplotě $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je mimochodem maximální teplota pláště stroje, jakou ruka ještě může snést, se stroj, kde vzdálenost základny k ose hřídele je 500 mm (20 palců), zvedne asi o 0,4 mm (16 mils). Ocelová trubka délky 1 m (40 palců) (niklová ocel) se při nárůstu teploty o $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ prodlouží o 0,73 mm (29 mils), což v průmyslových procesech není neobvyklé. Aby se mohla rozpínat, musí mít k tomu prostor a může se stát, že posune stroj, se kterým je spojena. To také znamená, že například držák / konzola, na který je namontováno nějaké měřicí zařízení (dokonce i když ho držíme v ruce) se rozpíná. Kdyby měl celý stroj stejnou teplotu, pak by bylo možné velice snadno spočítat, jak velký pohyb lze očekávat. Ovšem takový případ se vyskytuje ojediněle. Teplotní gradienty v různých místech stroje vznikají v důsledku měnící se teploty kapalin nebo plynů v různých částech systému. Například rozdíl teplot plynů na vstupu a výstupu z turbíny může být několik stovek stupňů. Méně dramatický, ovšem stejně významné jsou tyto rozdíly u kompresoru.

Rovnoměrný růst teploty by znamenal rovnoměrné rozpínání celého stroje. Docházelo by tedy k navzájem rovnoběžnému posunu os hřídelů. Pokud ovšem existuje rozdíl mezi teplotou přední a zadní části stroje, pak jeden konec může expandovat více a způsobovat úhlové vychýlení. Nejčastějším důsledkem je však kombinace úhlového a paralelního posunutí.

- Je důležité poznamenat, že účinky teplotního rozpínání mohou být jak vertikální, tak i horizontální nebo kombinací obou.
- Přítomen je i axiální (osový) účinek. Ten má hlavní vliv, zejména na rozpínání hřídelů. Zásadní je přesné nastavení mezery mezi spojkami.

Zdroje tepla, které se mohou podílet na růstu teploty, lze rozdělit do dvou hlavních skupin:

- vnitřní zdroje neboli zdroje systému,
- vnější zdroje.

❖ Vnitřní zdroje neboli zdroje systému

Tyto zdroje lze většinou předvídat a slouží jako základ pro výpočet posunutí (offsets), která jsou dodávána od výrobce:

- Teploty ložisek
- Teploty oleje a chladících směsí
- Teploty procesních plynů a kapalin

Lokální nárůsty teplot jsou jedním ze symptomů špatného ustavení. Vlivem malé / mírné nevyrovnanosti může docházet k nadměrnému zahřívání, což může dále produkovat lokální teplotní nárůst a přispívat k celkovému špatnému ustavení. Negativní účinek mohou mít i teploty z procesu. Z toho plyne, že dokonce u zdánlivě nekomplikovaného případu mohou mít teplotní účinky na předpokládané ustavení velký vliv.

❖ Vnější zdroje

➤ Světlo a stín

Rozdíl mezi teplotami prvků na přímém slunci a ve stínu může být i oblastech s mírným podnebím v řádu desítek stupňů. Tyto denní výkyvy způsobují, že stroj může být i během jediného dne vystaven značnému rozpětí teplot. Je důležité mít na paměti, že účinek nemusí být omezen jen na samotný stroj, ale má vliv i na základovou desku, kluzné lišty, základy a připojené potrubí.

➤ Spojené stroje

K přenosu tepla dochází přes spojku hřídelů, mezi základovou deskou a základy a sáláním.

➤ Blízkost provozu a procesů

Výrobní proces sám o sobě je zdrojem sálavého a přeneseného tepla. Obzvláště je to zřejmé v prostředí horkých procesů, např. v ocelárnách, cementářských mlýnech a podobně.

4.2 Mechanické vlivy

Nezbytným předpokladem dobrého ustavení či identifikace problému je důkladná znalost stroje. Zdrojem většiny obtížných problémů, k jakým během ustavování dochází, zejména při získávání opakovaných výsledků, jsou mechanické vlivy. V mnoha případech jsou předvídatelné nebo mohou být eliminovány v rámci kontrol předcházejících ustavování, stále však zůstává široká škála faktorů, které mohou vyvolávat nepředvídatelné problémy.

❖ Napětí potrubí

Pravděpodobně je to nejvýznamnější faktor, který spolu s měkkou patkou ovlivňuje kvalitu ustavení strojního zařízení.

❖ Olejový klín

V klidu je většina hřídelů uložena v dolní části ložiskového pouzdra. Ovšem za chodu jsou hřídele podpírány olejovým filmem, který zajišťuje 30% styčnou plochu / oblast. Obvykle lze pohyby hřídelů předvídat a také je kompenzovat, ovšem existují situace, kdy pohyb hřídele a jeho poloha jsou dány tuhostí spojky nebo uložením dalšího hřídele či ložiska. Hřídel se pak nemusí otáčet přesně v dolní poloze ložiska. Monitorování vůle nebo (v generátorových sestavách) vzduchové mezery je proto kritickou částí procesu ustavování. Tzv. „zvedací / nosná kapalina“ se většinou používá u těžších strojů. Například parní turbíny vyžadují přetlakovaný nosný olej, který umožňuje snadné otáčení rotoru. Ten dokáže nadzvednout rotor ze statické polohy až o 0,05 ÷ 0,10 mm (2 ÷ 4 mils). Je na technicích, zda se pak rozhodnou pro měření při zapnutém nebo vypnutém tlakování. Měření při zapnutém tlakování bude zřejmě dávat pravdivější obrázek o ustavení stroje za chodu, ovšem použité posunutí (offset) by se řídilo protokolem, který doporučuje výrobce. Nicméně, pokud se rozhodneme pro kteroukoliv metodu, musíme ji pak důsledně používat pro celé soustrojí.

❖ **Vůle v převodech**

Nejtěžší a nejsložitější problémy vznikají při ustavování převodových skříních. Výrobci často udávají hodnoty posunutí (offset) s ohledem na teplotní rozpínání a mechanické pohyby. Ovšem u některých strojů opotřebené ozubení, elipticky osekané převody, mechanické uvolnění nebo vůle v ložiscích nedovolují provést ustavení v rámci požadovaných tolerancí. S těmito jevy se můžeme setkat i u nových převodových skříní. Často nelze z těchto důvodů dosáhnout ani opakovatelnosti měření.

❖ **Mechanické uvolnění, opotřebená nebo špatně uložená ložiska**

Nadpis je plně vystihující.

❖ **Prohnutí řetězovky a katenoid - otáčkový - orbital**

Ustavení hřídele se může výrazně měnit podle místa / způsobu uložení / podepření. Bude se prohýbat vlastní hmotností nebo může být ovlivněn hmotností setrvačníku, spojek nebo brzdých systémů.

❖ **Pohyby základů, lyžin a základových desek**

Příčinou může být celá řada jevů:

- sedání a zdvihání / vzdutí,
- působení mrazu,
- stoupání a klesání hladiny podzemních vod,
- vliv přílivu v přímořských zařízeních,
- výkyv / průhyb / odchylka následkem činnosti mostového jeřábu,
- hmotnost technologického materiálu,
- přerušovaný pohyb konstrukcí zejména u námořních / lodních nebo příbřežních aplikací.

K takovým jevům může docházet denně, sezónně nebo jen občas. Mnoho z nich má silící tendenci a působí v průběhu dlouhého časového úseku. Je to zejména případ pohybů základů. Jsou ovšem případy, kdy je účinek mimořádně prudký. Snad je evidentní, ale jedním z často opomíjených faktorů je výrazně větší provozní hmotnost. Desítky tun hmotnosti navíc mohou mít významný vliv na podloží / základovou desku, zejména pokud se stroj nachází na vyvýšené úrovni, která je podepřená.

4.3 Měřící metody

V současné době se používá mnoho metod, většinou jsou založeny na:

❖ **Měření teplot**

Měření teplotního gradientu stroje od patek až po úroveň rotační osy hřídele pomocí sond. Provádí se výpočet roztažnosti pro známou vzdálenost a materiál (viz předchozí kapitoly).

❖ Měření „ochlazování“

Změří se hodnoty ustavení ihned po vypnutí. Přesnost závisí na tom, jak brzo po vypnutí se měření provádí. V běžné proceduře se provádí větší počet měření s následnou zpětnou extrapolací výsledků. Díky jednoduchosti a rychlosti jsou pro tyto aplikace laserové přístroje ideální.

❖ Měření za chodu stroje

Měření pohybů pláště stroje se provádí v podmínkách, kdy je stroj vypnutý až po provozní podmínky (OL2R). K měření lze použít optické, mechanické nebo laserové metody, i když laserové ustavování má některé praktické výhody, např. měření a sběr dat v reálném čase.

Jak je patrné, jedná se své podstatě o porovnání os rotace stroje za klidu a za chodu. Každá metoda má své výhody a nevýhody, a proto je vhodné porovnat více metod a prověřit srovnatelnost naměřených dat. Každopádně je nutné provést opakovatelnost měření jednou metodou a tím eliminovat jistou míru neurčitosti naměřených dat. Pokud při opakovatelnosti nedostaneme srovnatelné výsledky, pak je jednoznačně nutné použít jinou metodu.

Cílem měřících technik, které se zabývají sledováním pohybu stroje při změně stavu z klidu do běhu, je tedy zjištění:

- pohybu osy rotace stroje k jeho základové desce nebo rámu,
- pohybu osy rotace stroje vzhledem k referenčnímu bodu,
- pohybu jednoho stroje vůči druhému,
- pohyby jednoho hřídele vůči druhému.

Jak již bylo zmíněno, posunutí (offsety) lze předvídat různými způsoby, a proto výrobci strojů obvykle poskytují hodnoty předpokládaných posunutí, a jsou specifikovány jedním ze tří způsobů jako:

- Paralelní posunutí a úhel (hodnoty na spojce)
- Korekční hodnoty na patkách
- Předpokládané hodnoty v hodinových pozicích

❖ Hodnoty na spojce

Teplotní růst strojů je různými výrobci definován různě, ale většinou najdeme tento údaj jako záměrnou nevyrovnanost (misalignment) vyjádřenou paralelním posunutím a úhlovou chybou. Těmto údajům se rovněž říká chyba mezery a úhlu (Gap and Zag error) nebo periferní měření. Mohou být použity k vykreslení sklonu a posunutí a následně k výpočtům opravných hodnot pro patky pro ustavení stroje v klidové poloze.

❖ Hodnoty na patkách

Výrobci je někdy poskytují, ale častěji jsou počítány z jiných údajů, jako např. požadovaný úhel a dané posunutí.

❖ **Předpovídané hodnoty číselníkového úchylkoměru (PDR)**

Předpovídané hodnoty pro hodinové pozice jsou dány / se udává pro určitou vzdálenost, běžně je to vzdálenost mezi dvěma konci hřídele. Korekce na patkách je třeba vypočítat a ručně zakreslit do grafu. Jedná se o metodu převzatou firmami, které standardizovaly reverzní indikátorové metody pro vyrovnávání hřídelů do přímky.

Například přístroj Fixturlaser Shaft 200 umožňuje před zahájením ustavování nastavit hodnoty posunutí z programu pro ustavování hřídelů. Ustavování pak probíhá, jakoby šlo o ustavování za chodu. Seřizování se pak provádí směrem k nule. Zadávat je možno hodnoty na patkách, hodinové hodnoty a paralelní posunutí / úhlová odchylka. Takže lze říci, že každý dnešní moderní přístroj má ve svém menu nabídku k měření dané problematiky a příklady najdeme také v lit. [1] a [9].

Závěrem si dovolíme uvést poznámku týkající se rotace dlouhých a pružných hřídelů v nadkritických otáčkách.

Když velmi dlouhý a pružný hřídel začíná rotovat, prohnutí se snaží narovnat, nicméně hřídel nebude nikdy ideálně přímý. Je důležité porozumět tomu, že osa rotace může být obecně křivka. V situacích, kdy jsou dva nebo více strojů vzájemně spojeny a jeden nebo více hřídelů rotuje ve tvaru "průhybovky", je důležité ustavit hřídele tak, aby se dodržovala křivka průhybu jako křivka rotace, což tedy představuje další mechanický vliv u daných hřídelů. Nezbývá nic jiného, než poukázat na uvedenou a další neuváděnou literaturu, neboť není možné vyčerpávajícím způsobem v předpokládaném rozsahu skript zpracovat kompletní řešení dané problematiky.

5 Provozní zjištění nesouososti a provozní spolehlivost částí strojních systémů

Vždy platí, že k nejučinnějšímu přenosu energie dochází při souosém uložení hřídelů, kdy se hřídele chovají tak, jakoby tvořily jeden celek. Jsou-li hřídele ustaveny špatně, vznikají ve spojkách různé síly. Jakákoliv odchylka posunutí nebo úhlového vychýlení nutně způsobí, že hřídel bude hledat nějakou osu rotace. Dochází tak ke ztrátám energie ve spojce a zvýšenému zatížení jiných mechanických součástí zajišťujících rotaci, např. těsnění, ložiskových pouzder, atd.

Tato tvrzení korespondují s informacemi uvedenými v kap.1.1 - Význam a přínos ustavení hřídelů do osy a je tedy vhodné znovu připomenout citaci z literatury, zejména [1] a [9], ale také [5] - „Dokonce i ty nejopatrnější průzkumy uskutečněné v širokém spektru průmyslových odvětví v posledních pěti letech ukazují, že 50% havárií strojů bylo zapříčiněno špatným ustavením (nesouosostí). Některé průzkumy však tvrdí, že až 90% strojů je provozováno s nedodržením předepsaných tolerancí.“ - konec citace.

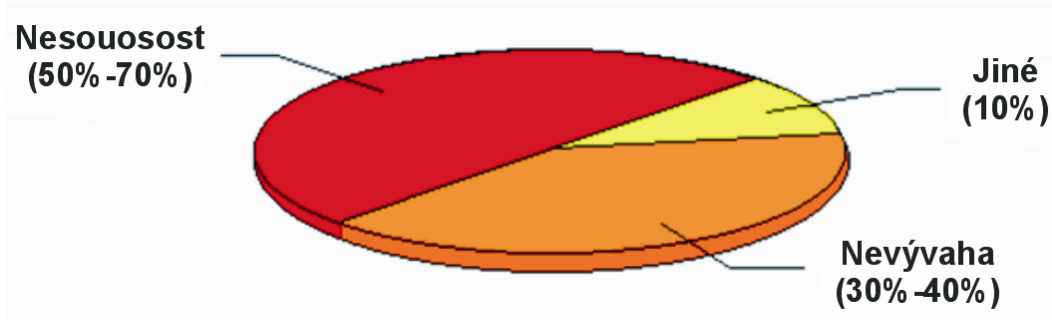
5.1 Měření vibrací

Nesouosost je příčinou vibrací. Z níže uvedeného diagramu (obr.40) je patrné, že špatné ustavení je považováno za největší zdroj nadměrných vibrací strojů a s tím spojeného jejich předčasného selhání. Všimněme si, že 50 ÷ 70% představuje neustavenost hřídelů a mnoho problémů souvisejících s ustavením, jako je měkká patka, křivá ložiska atd.

Vibrace se měří horizontálně, vertikálně a axiálně a v analýze vibrací platí jistá empirická pravidla:

- horizontální vibrace ukazují na nevyvážení (H)
- vertikální vibrace ukazují na slabé nebo uvolněné základy (V)
- axiální vibrace ukazují na špatné ustavení (A)

Analýza vibrací strojů tedy jednoznačně umožňuje odhalit problémy s nesouosostí. Vyhodnocování frekvenčních spekter se specifikací - nesouosost není cílem předkládaných skript, proto odkazujeme na lit. [4], [12] a další, zabývající se vyhodnocováním a analýzou vibračních spekter. Obr.40 je ve své podstatě modifikací již dříve uvedeného obrázku 14.

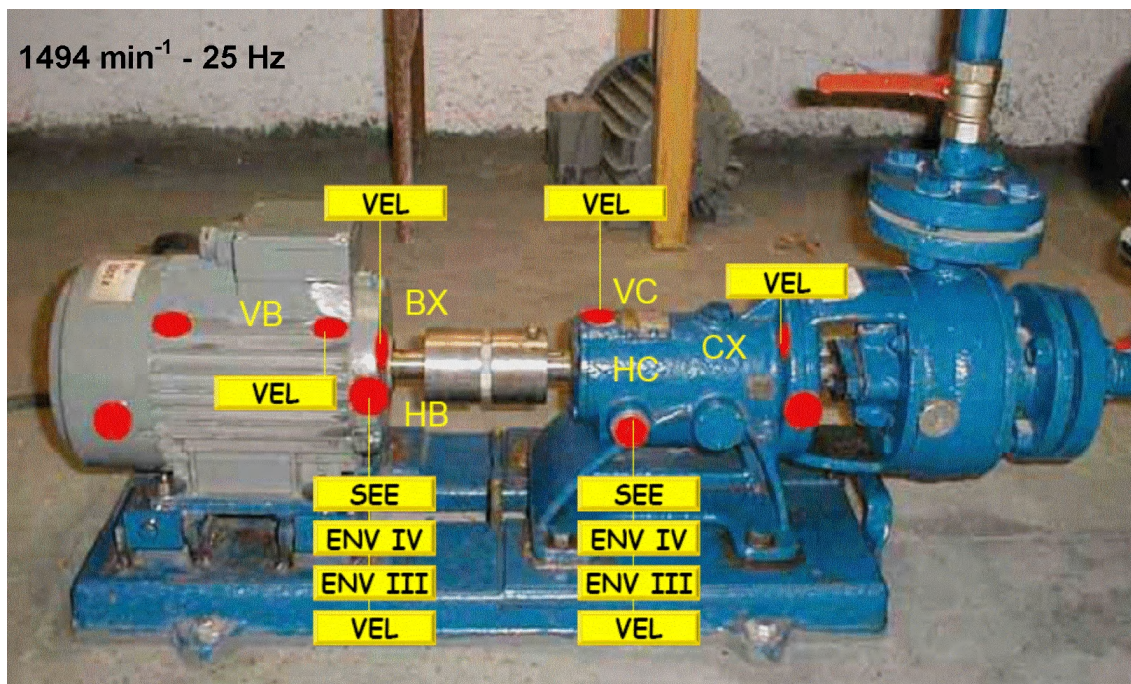


Obr.40 Hlavní zdroje vibrací rotujících strojů

Ke zvýšení obraznosti dané problematiky použijeme práce prováděné a publikované v lit. [3], které ukazují trendy vibrací v návaznosti na vyosení. Vlastní měření byla prováděna na čerpadle s pohonem elektrickým motorem (obr.41) a vlastní simulace vyosení byla prová-

děna na celé řadě spojek - LKN, zubová (Lovejoy), BKN, Periflex s měřením celého souboru diagnostických veličin:

- rychlost vibrací na určených místech ($10 \div 1000$ Hz)
- obálková analýza - ENV III, ENV IV
- hodnota SEE (blížeji viz. [4])
- proudová spektra
- termografická měření (termovize)

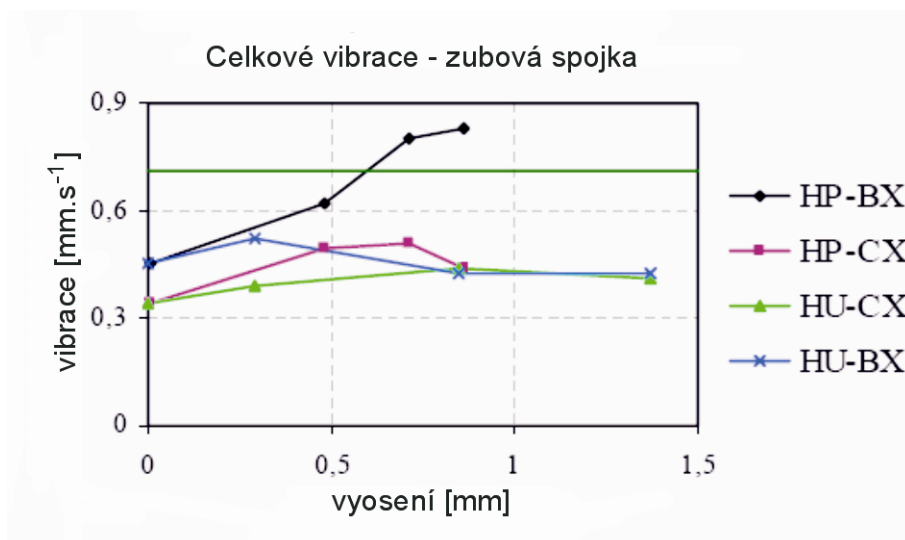
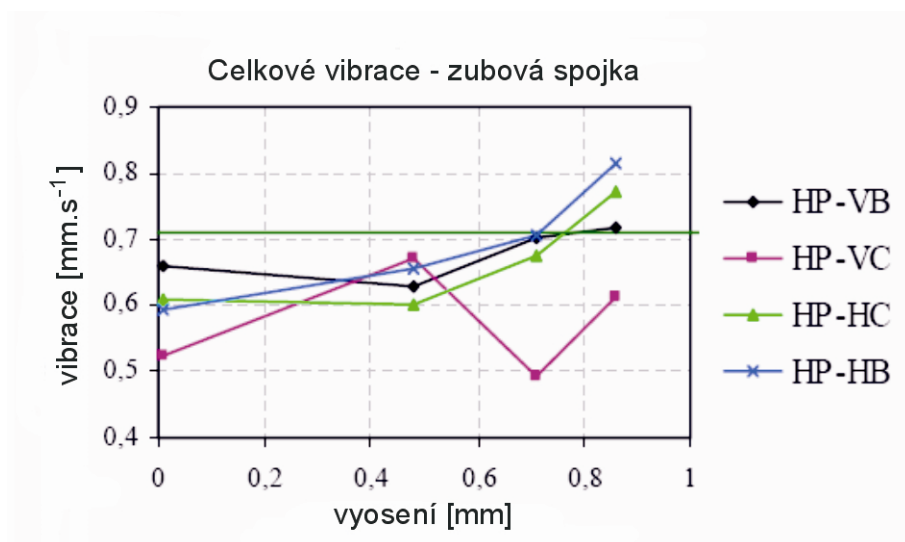
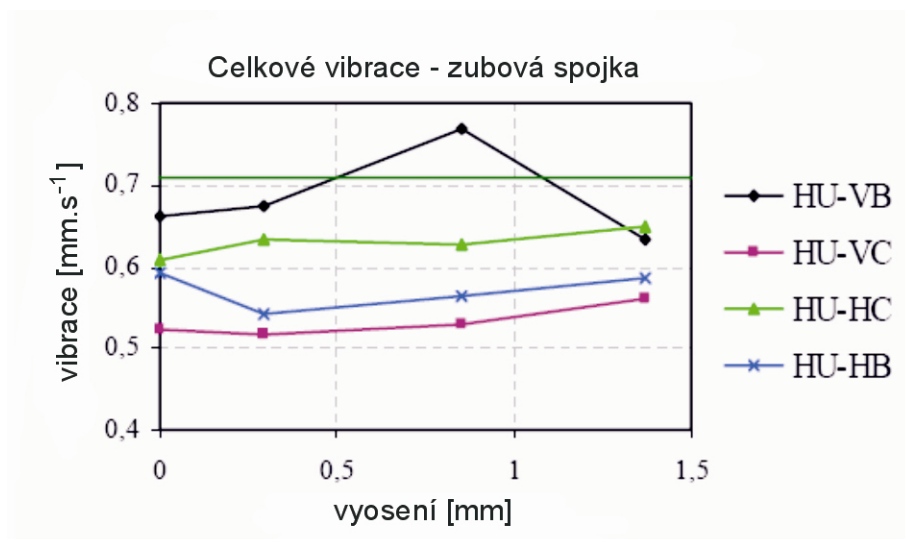


Obr.41 Pohled na čerpadlo s pohonem el. motorem a vyznačením měřících míst a veličin vibrací

Je proto logické, že v této kapitole předvedeme výstupy týkající se pouze měření vibrací různými alternativními metodami.

Na obr.42 je zobrazen naměřený trend rychlosti vibrací v závislosti na vyosení pro zubovou spojku a na obr.43 jsou naměřená spektra vibrací u zubové spojky pro různé druhy nesouososti. Další obr.44 a obr.45 ukazují trendy vibrací při jejich měření alternativními metodami pro měření vibrací - obálková metoda a SEE metoda.

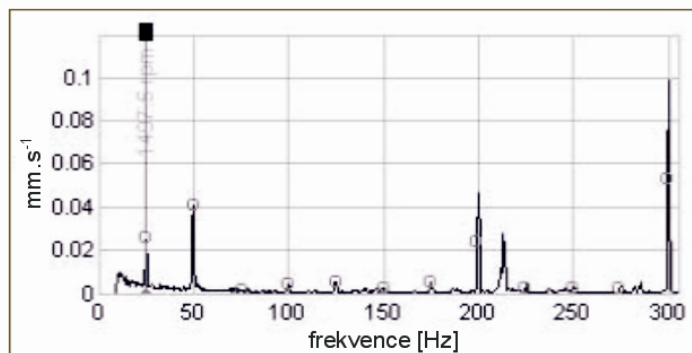
Platí (jak je patrné z uvedených obrázků), že chceme-li specifikovat nesouosost ve frekvenčním spektru, tak musíme vyhodnocovat základní otáčkovou frekvenci hřídele ($1x$) a vyšší harmonické této frekvence ($2x$, $3x$), a to, pokud je to technicky a bezpečně možné, jak v axiálním směru, což v řadě provozních měření nelze, tak v horizontálním a vertikálním směru, což určitě dokumentuje skutečné měření [5] - obr.46 a samozřejmě odkaz na celou řadu publikací zabývajících se vyhodnocováním frekvenčních spekter.



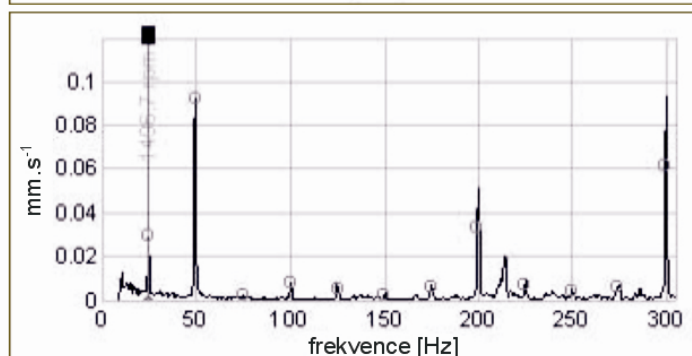
Obr.42 Trend velikosti rychlosti vibrací v závislosti na vyosení u zubové spojky

HU - HB

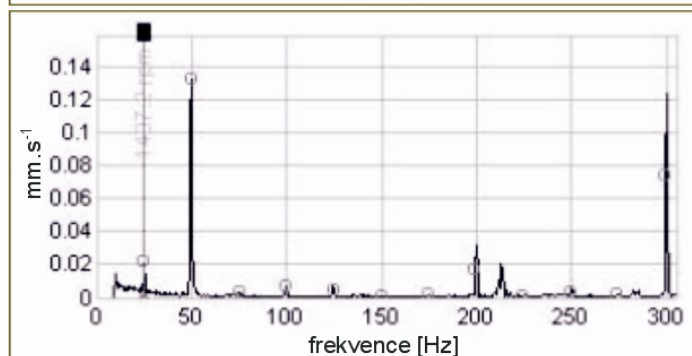
0 mm/100 mm



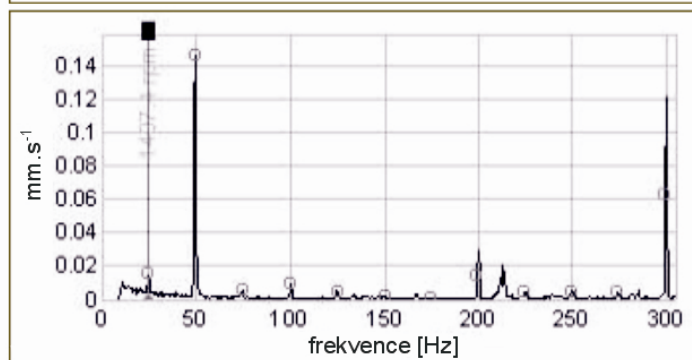
0,29 mm/100 mm

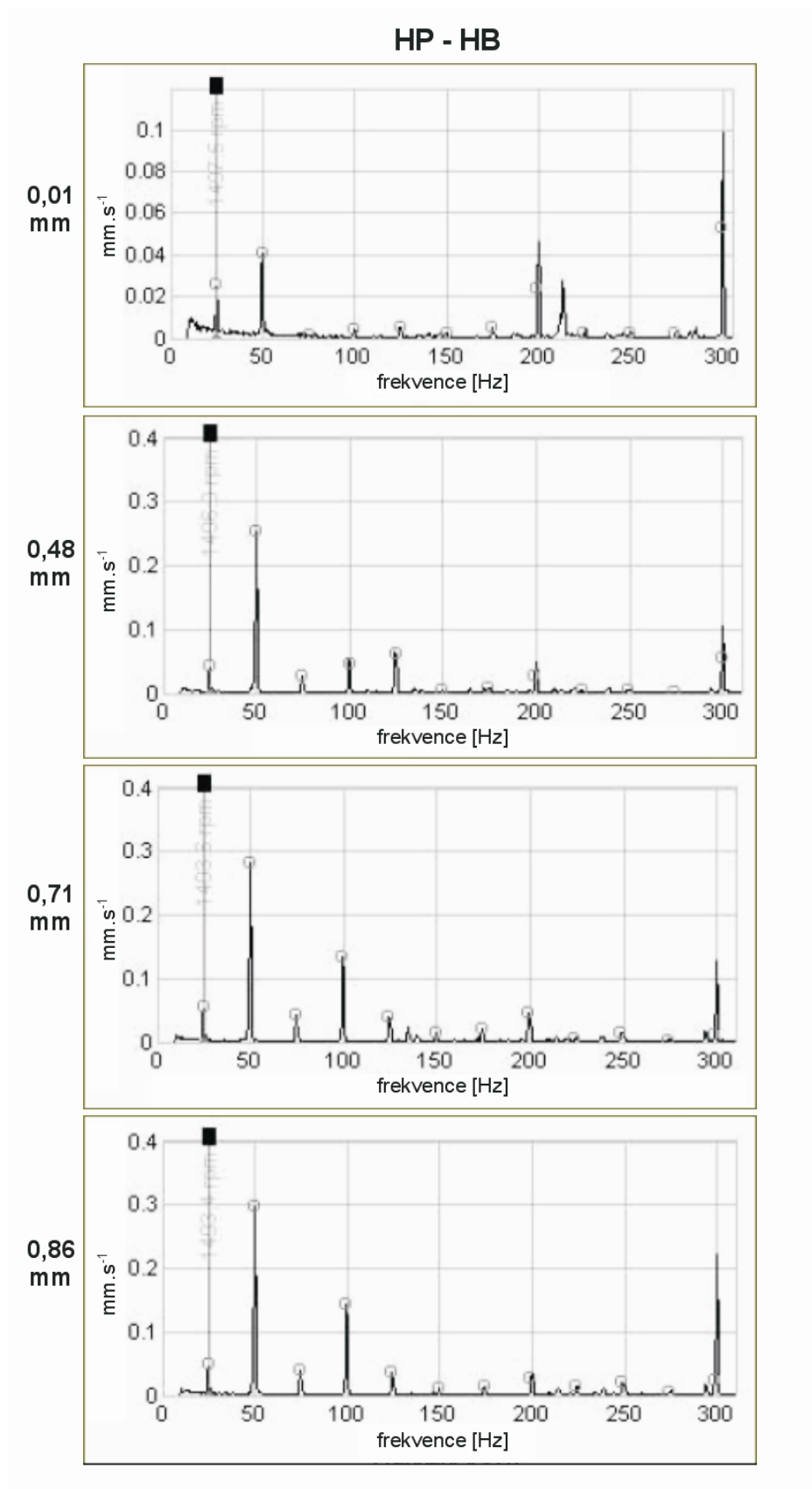


0,85 mm/100 mm

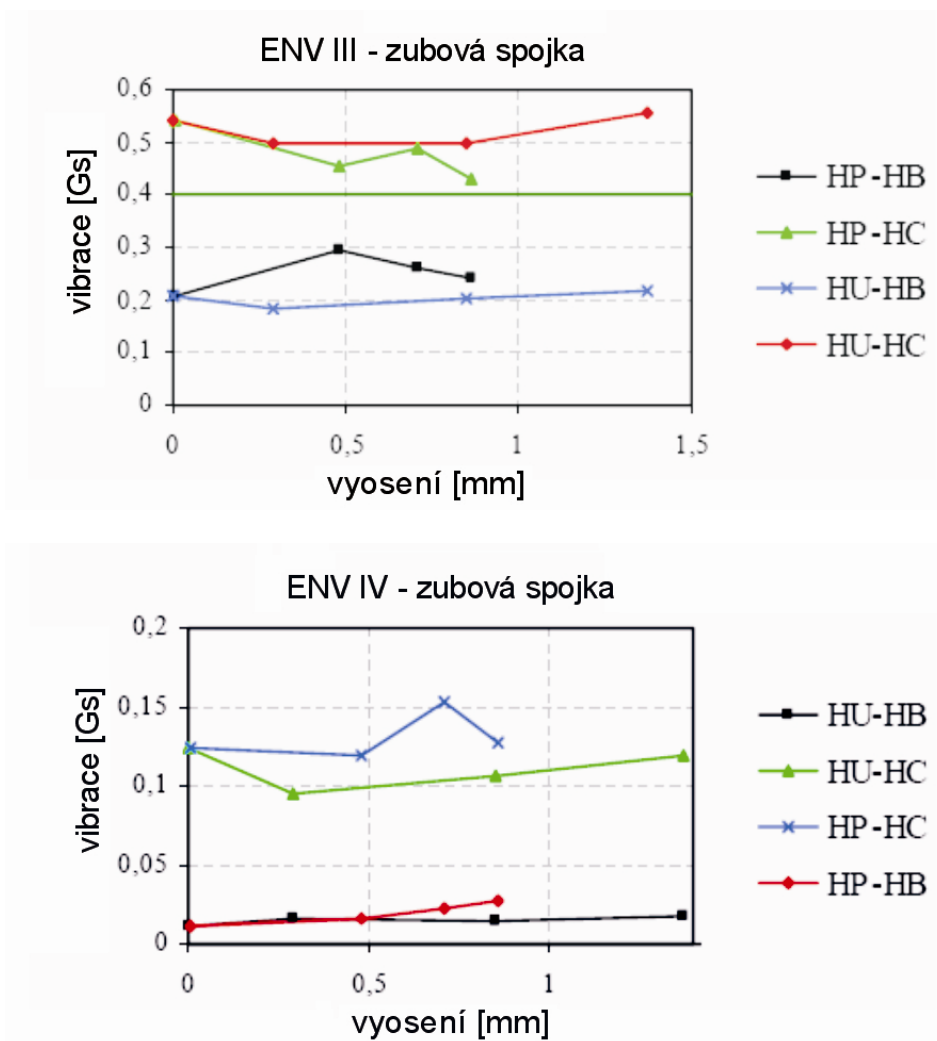


1,37 mm/100 mm

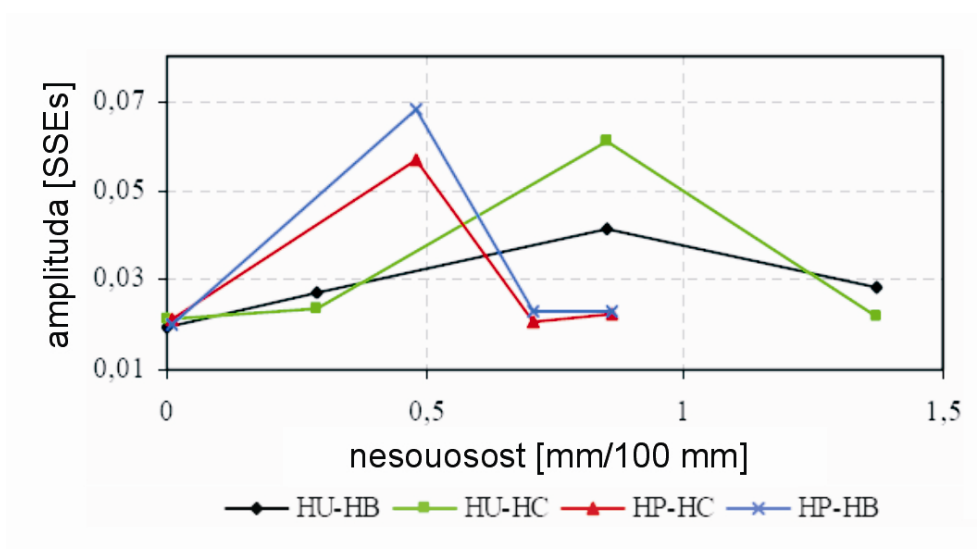




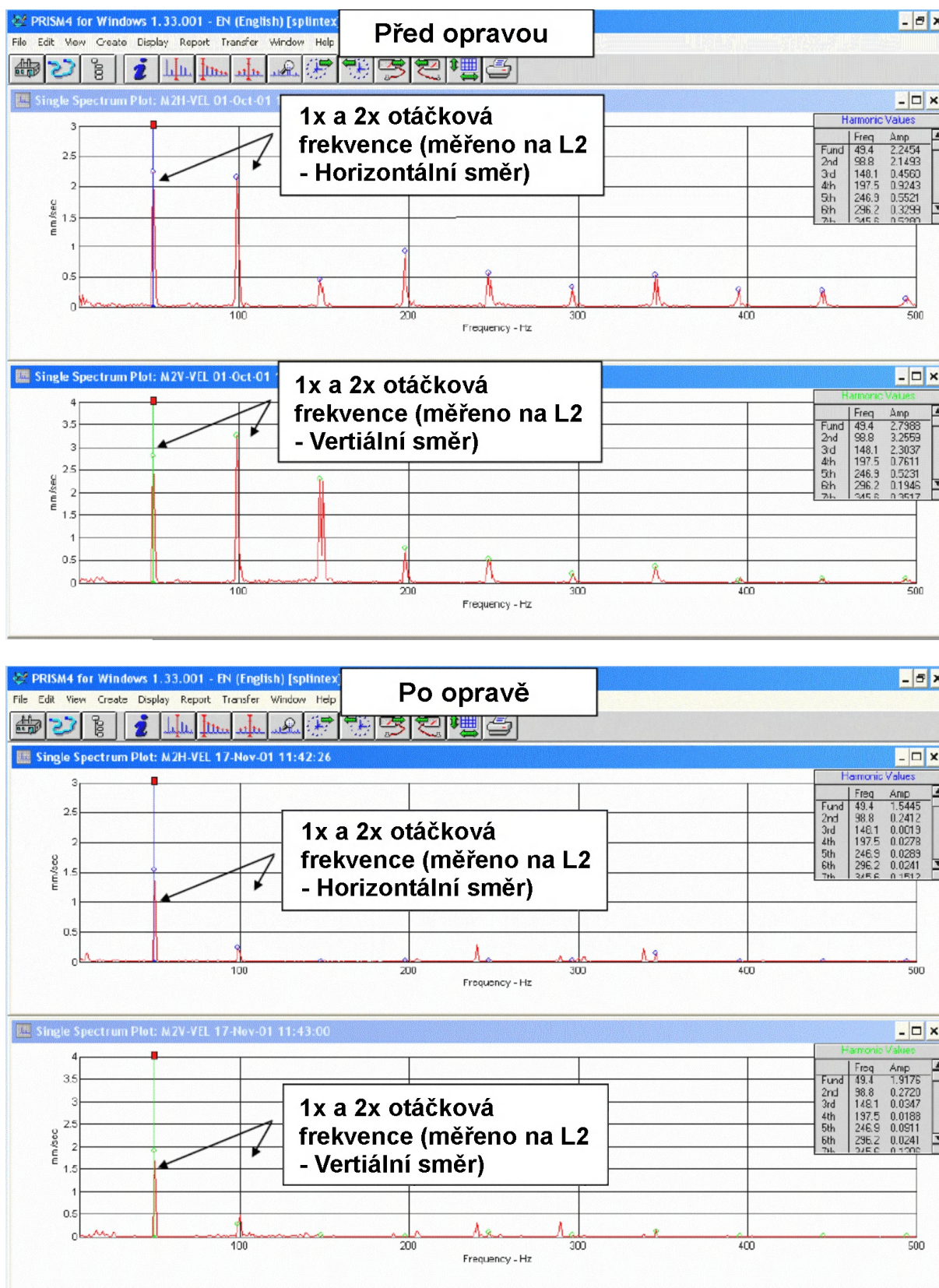
Obr.43 Spektra rychlosti vibrací pro různé nesouososti u zubové spojky



Obr.44 Trend při použití obáلكové metody u zubové spojky v závislosti na vyosení

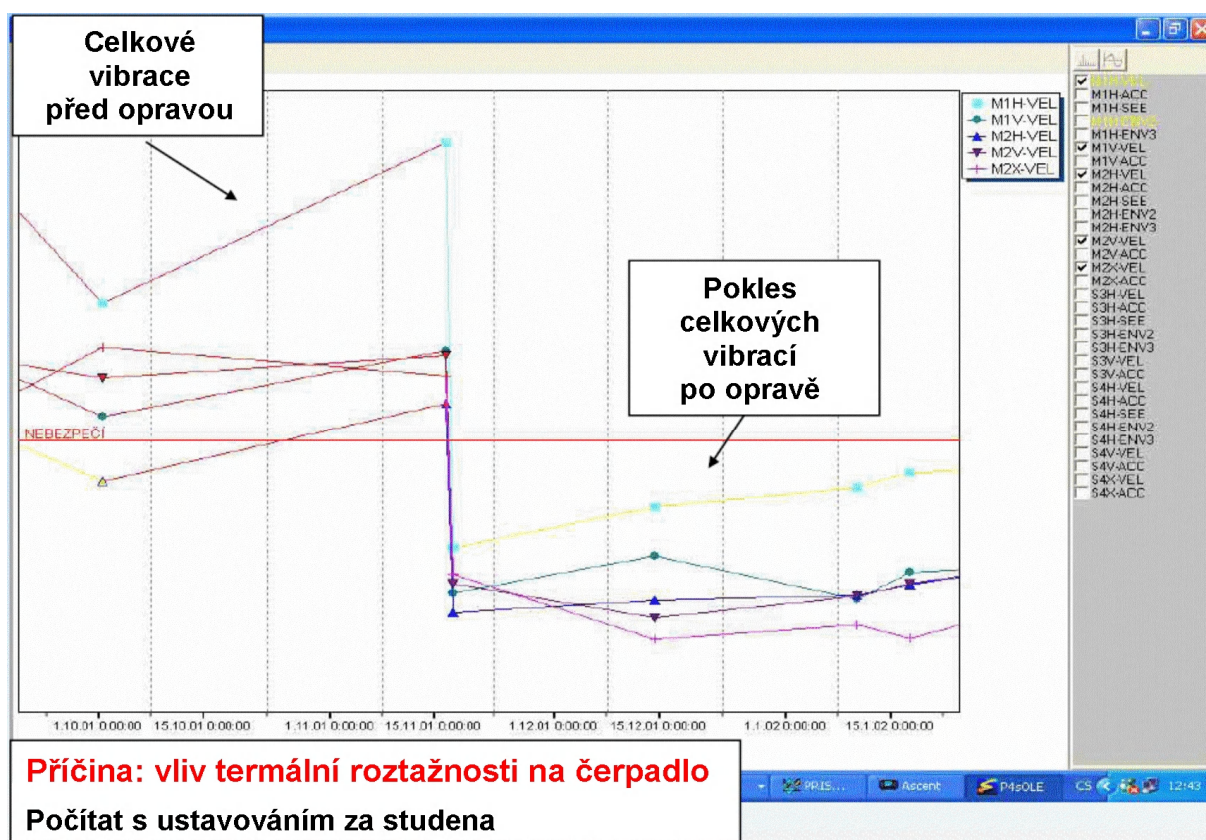


Obr.45 Trend při použití metody SEE u zubové spojky v závislosti na vyosení



Obr.46 Naměřené frekvenční spektra nesouososti v rychlosti vibrací na čerpadle před a po opravě (L2 - měřeno na straně elektromotoru)

Pedagogicky názorný je obr.47, který ukazuje trend naměřených celkových vibrací před a po opravě u stejného objektu, jako byl u obr.46.



Obr.47 Trend vibrací při nesouososti před a po opravě u čerpadla

5.2 Termografická měření

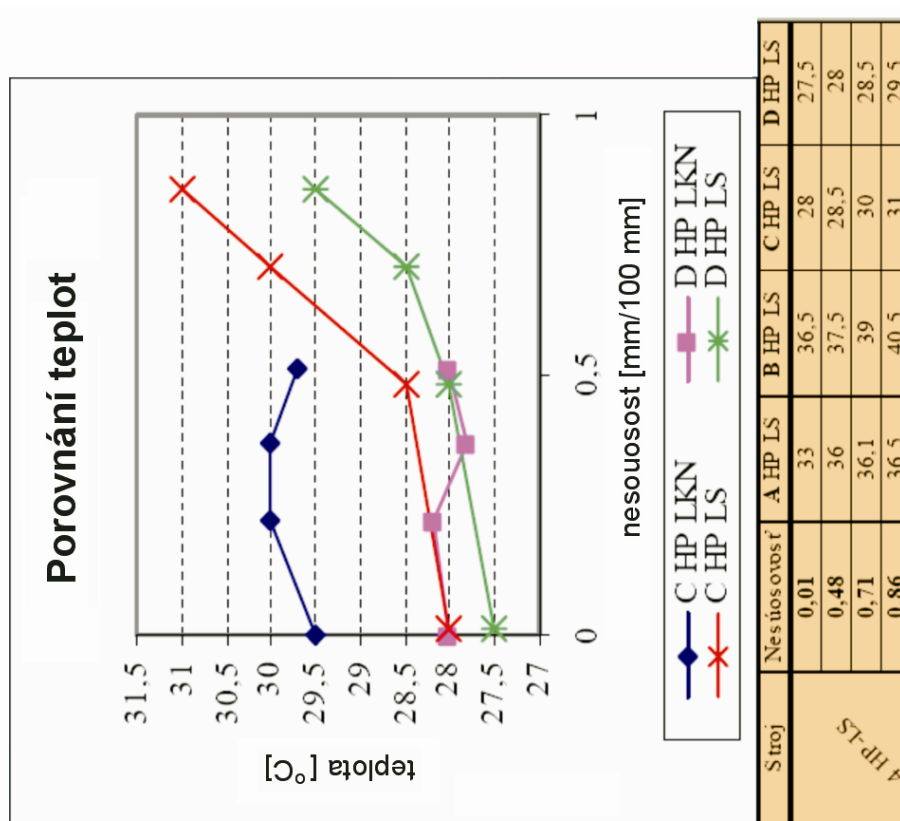
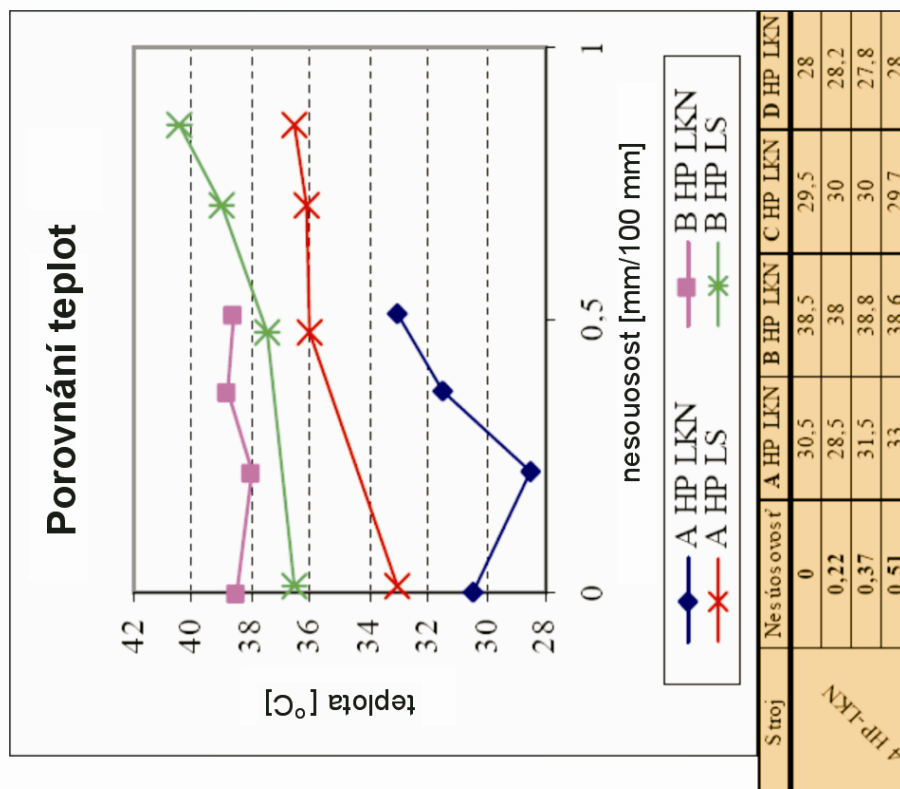
Další známkou špatného ustavení je, že spojka má zřetelně vyšší teplotu, což se jednoduše zjistí, když se stroj zastaví a rukou se dotkneme vlastní spojky. Tento subjektivní pocit lze samozřejmě dokázat pomocí termografie, respektive termovizním měřením. Opět použijeme lit. [3], která se, jak už byla zmínka, zabývá popisem vlivu nesouososti na její měřitelné symptomy.

Na obr.48 je jpak zobrazen vývoj trendu teplot pro různé druhy spojek. Teplota byla také měřena na ložiscích A, B, C, D - B+C jsou vyznačeny na obr.41 a určitě je z daného obrázku zřejmé, kde nalezneme ložiska A+D.

Určitě zajímavý je také obr.49, který ukazuje termovizní obrázek a histogram vývoje teplot pro různé velikosti nesouososti u ložiska B.

Pak nás jistě nepřekvapí termografický záznam již několikrát znázorněné zubové spojky [3] v závislosti na různé velikosti nesouososti - obr.50.

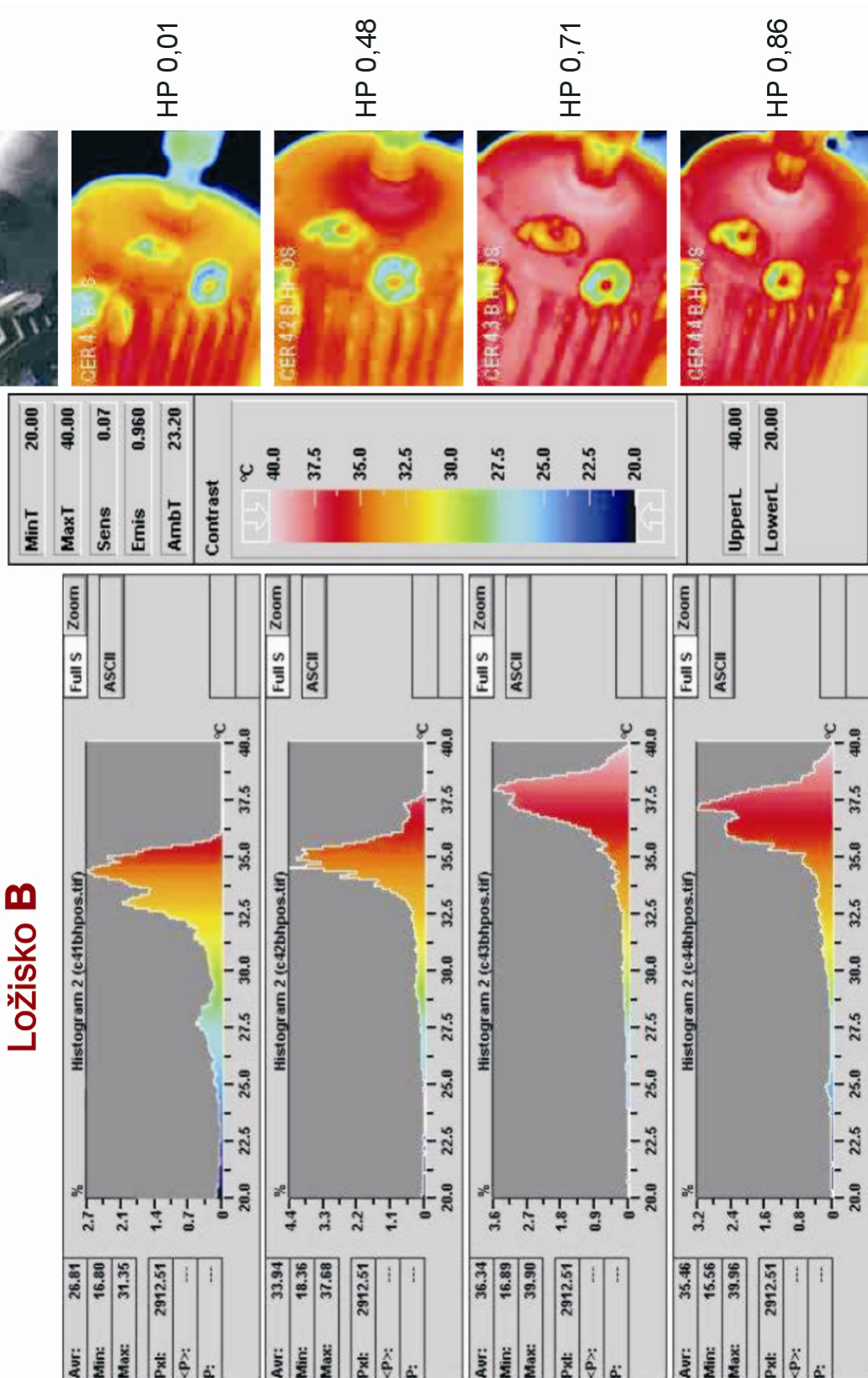
Jak je tedy patrné, pomocí termografie lze přesně zjistit, že nesprávné ustavení má za následek vyšší namáhání spojky - vyšší teplota je světlejší barva na termogramu.



Obr.48 Trendy vývoje teplot na různých spojkách v závislosti na nesouososti včetně teplot na ložiscích čerpadla a elektromotoru

Čerpadlo 1 - HP, zubová spojka

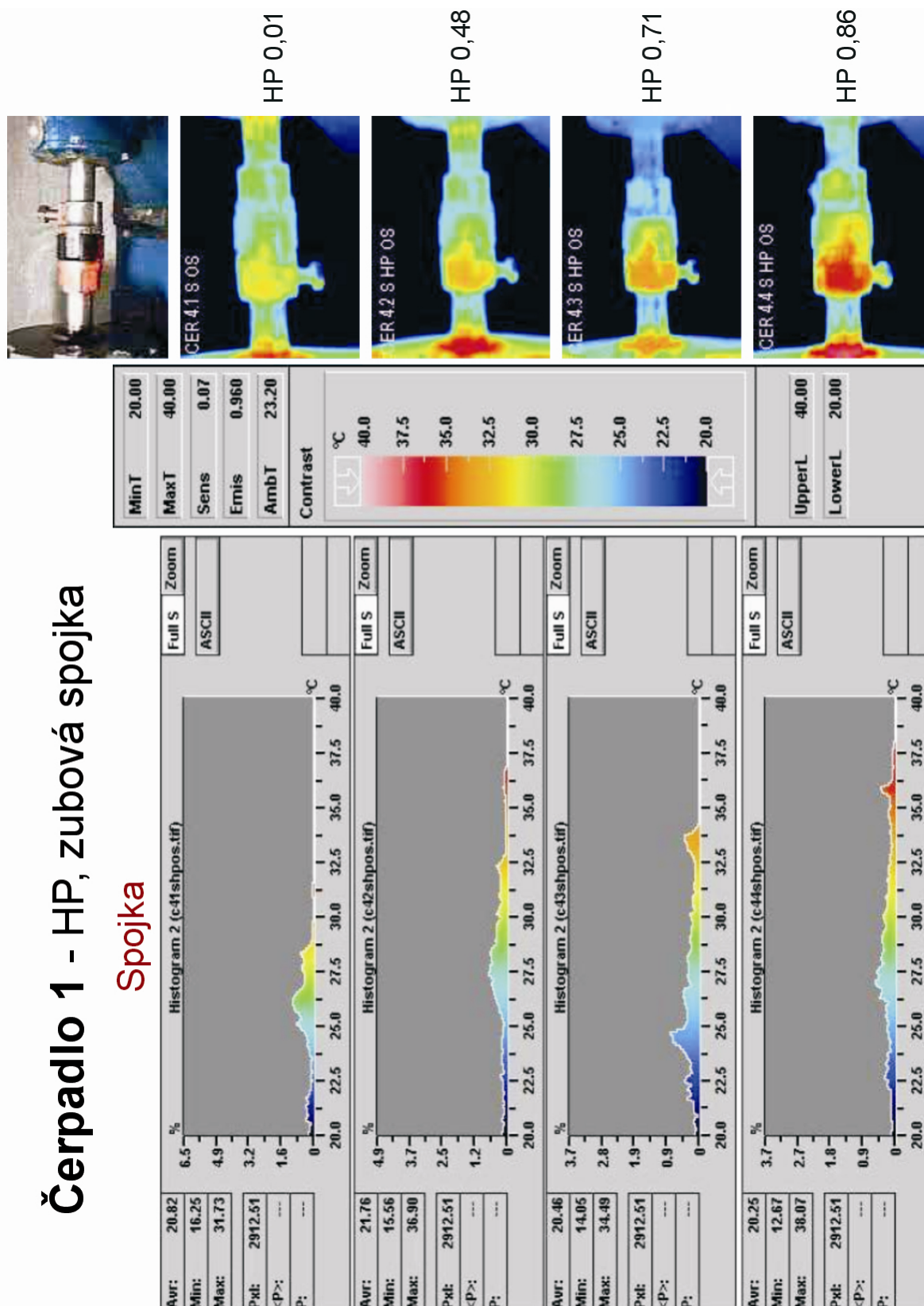
Ložisko B



Obr.49 Termografický záznam vlivu nesouososti na ložisko elektromotoru

Čerpadlo 1 - HP, zubová spojka

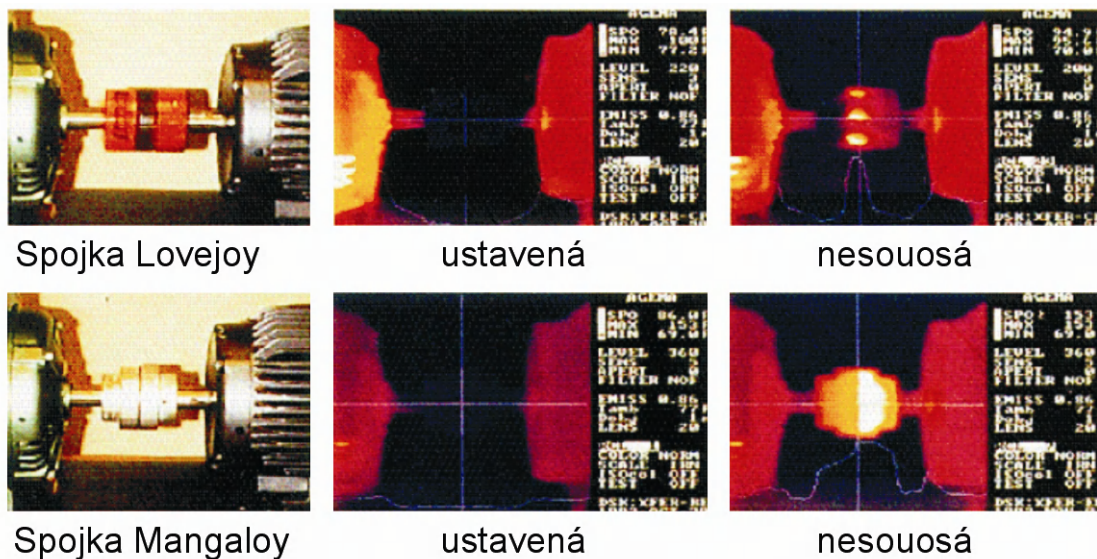
Spojka



Obr.50 Termografický záznam zubové spojky v závislosti na velikosti nesouososti

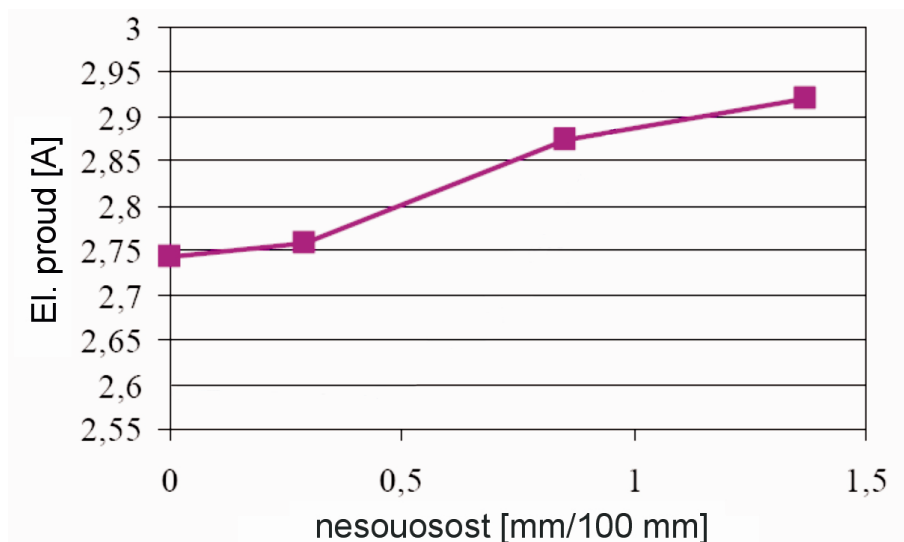
5.3 Nesouosost a energetická náročnost

Správným ustavením soustrojí lze snížit spotřebu jeho energie až o 15% a v některých případech i více. Toto je velmi často doloženo graficky, viz. například obr.51 (původně [1], [9], ale zde je použito upraveného - VALENT O. Proaktivní údržba - technologie na predložení životnosti strojov. *II. ročník mezinárodní konference „Zkušenosti se zaváděním proaktivní a prediktivní údržby do podnikové praxe“*. CMMS Praha, Smolenice 2004). Je také pravdou, že lit. [1], [9] uvádí, že špatné ustavení má na svědomí minimálně 3% všech nákladů na energii - konec citace. Zmíněný obr.51 také poukazuje na další negativní tendence - degradace maziva.



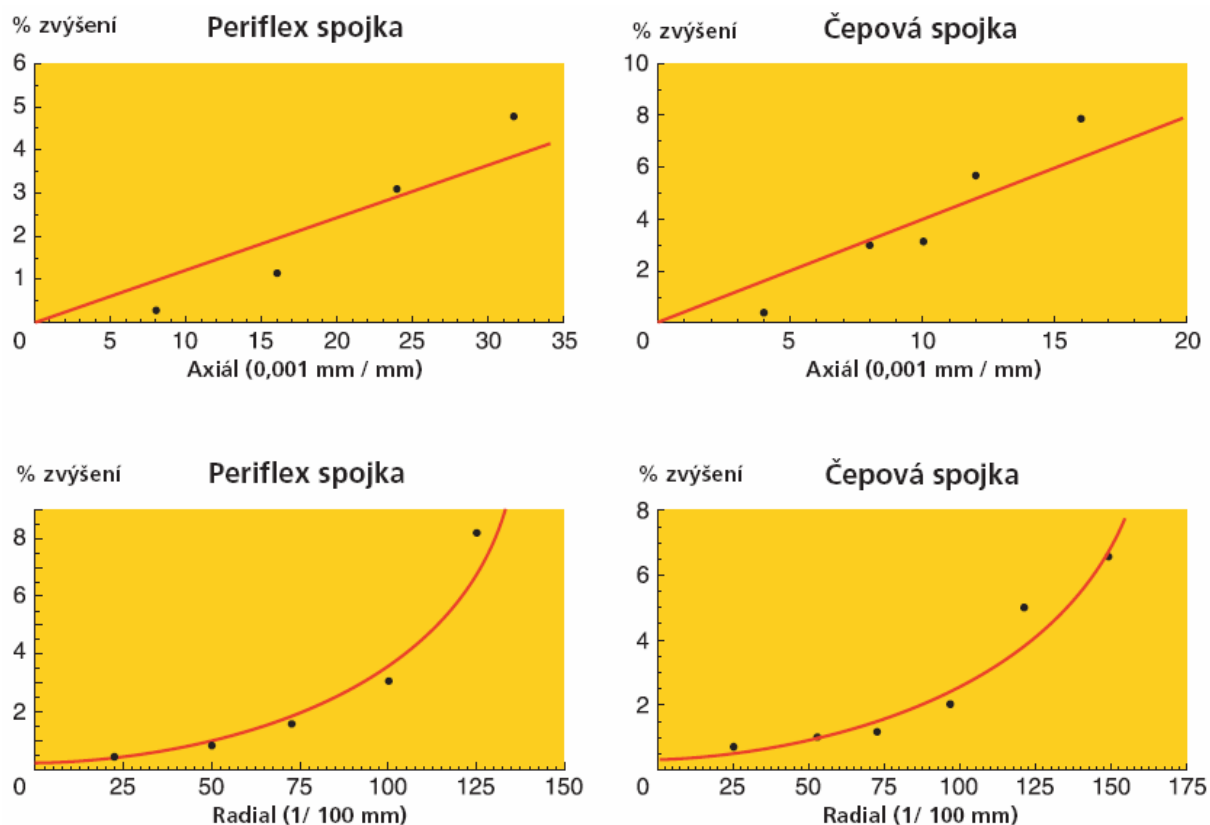
Obr.51 Tepelné vyzařování spojek ustavených a neustavených

Zjednodušeným důkazem je pak obr.52 [3], kde je zobrazen nárůst proudu [A] v závislosti na nesouososti a pokud si vzpomeneme, že jednotka výkonu je kW, který je dán součinem volty [V] x ampéry [A], tak je naprosto zřejmý nárůst energetické náročnosti. Literatura [1], [9] uvádí, že v jednom petrochemickém komplexu bylo ušetřeno 8% nákladů na jeden ventilátor ročně.



Obr.52 Závislost el. proudu na nesouososti u čerpadla se zubovou spojkou

Vše svým způsobem shrnuje obr.53 [10], který ukazuje vliv nesprávného ustavení na spotřebu elektrické energie u pohonu čerpadla o výkonu 7,5 kW, 300 min⁻¹ pro dva uvedené druhy spojek.



Obr.53 Vliv nesouososti na spotřebu elektrické energie

5.4 Nesouosost a opotřebení částí strojních systémů

Nesouosost je rovněž příčinou předčasného a opakujícího se opotřebení mechanických součástí stroje. Výskyt zvýšeného tření a zatížení v ložiscích, spojkách a těsnění je následkem aktuálního hlavního problému, způsobeného špatným ustavením. Je vcelku běžné, že stále se opakující opravy těchto součástí jsou stále bohužel víceméně přijímány jako běžná údržbářská činnost, místo hledání skutečné příčiny (proaktivní přístup k údržbě).

Nyní je určitě na místě zrekapitulovat, že nesouosost je příčinou:

- poškození ložisek,
- poškození hřídelů únavou a ohybem,
- poškození a opotřebení těsnění a ucpávek,
- zvýšeného opotřebení spojek,
- zvýšeného zahřívání,
- energetických ztrát,
- zvýšených vibrací (radiální a axiální),
- degradace maziva,
- vnikání nečistot přes opotřebovaná těsnění do maziva,
- deformací rotoru nepravidelnou mezerou,
- prasklin hřídelů a vnitřního ložiska nebo náboje spojky,
- vytékání plastického maziva (zahřívání způsobuje ztekucování),
- uvolňování nebo zlom spojkových šroubů,
- uvolňování uchycovacích (kotevních) šroubů (způsobují zvýšené vibrace)

a svým způsobem bychom mohli v daném výčtu pokračovat, neboť každá příčina má ve své podstatě pyramidový efekt. Z těchto důvodů se budeme v následujícím textu věnovat těm nejzákladnějším.

❖ Ložiska

Nesouosost generuje nežádoucí síly, které snižují životnost ložiska [1], [9].

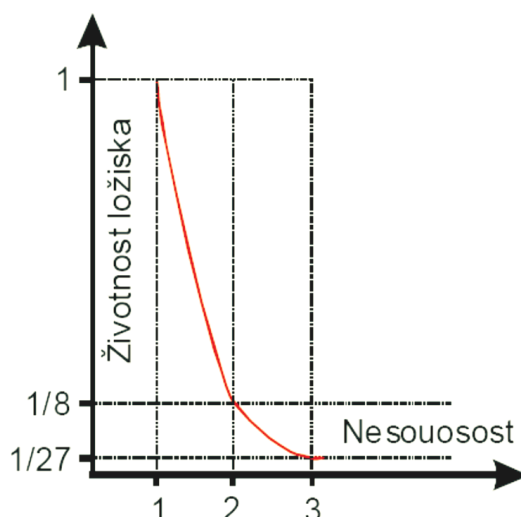
- Špatná souosost má za následek exponenciální snížení životnosti ložisek (obr.54).
- Dvojnásobné zatížení ložiska snižuje životnost ložiska na osminu projektované životnosti.
- Životnost valivých prvků ložiska se snižuje s třetí mocninou zvýšené síly.

Je všeobecně známo, že pro výpočet životnosti ložiska platí rovnice

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^3,$$

Takže lze říci, že při zdvojnásobení projektovaného zatížení se dostaneme na 1/8 původní životnosti, při ztrojnásobení zatížení na 1/27 původní životnosti (obr.54).

- 20 % zvýšení zatížení ložiska snižuje jeho projektovanou životnost o 50%.

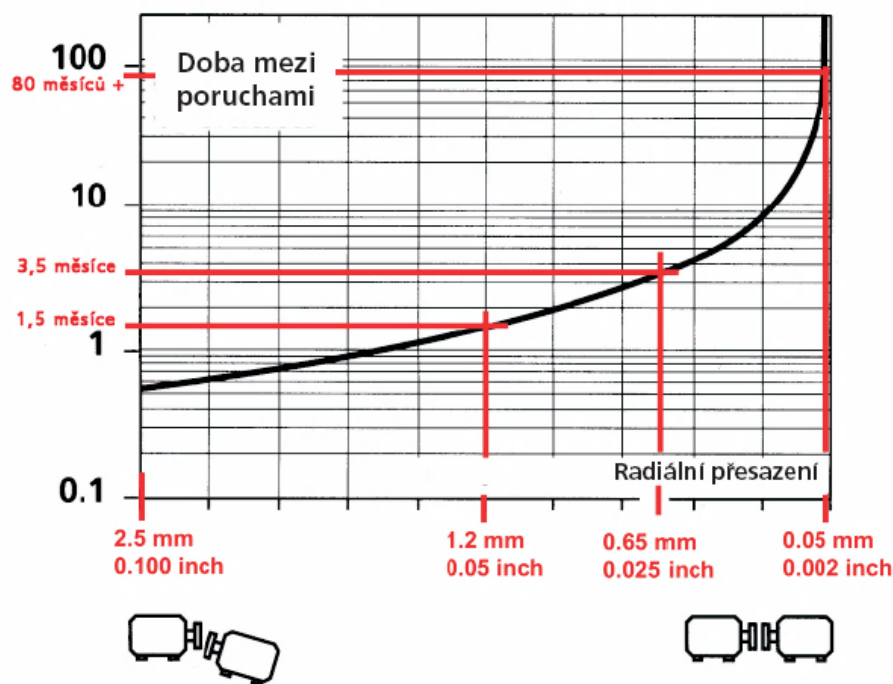


Obr.54 Životnost ložiska v závislosti na nesouososti - exponenciální průběh

❖ Těsnění

Špatně ustavené hřídele rotujících strojů mají podstatný vliv na životnost těsnění. Nesprávným ustavením působí na těsnění síly, které způsobují opotřebení (poškození), a tím únik maziva a současně vnikání nečistot do stroje, tedy problémy s mazáním. V mnoha případech právě problémy s mazáním jsou přímým symptomem neustavenosti, kterým lze snadno předcházet zavedením pravidelných kontrol souososti hřídelů. Vlivy na životnost těsnění jsou samozřejmě různé, ovšem 30 ÷ 50% životnost z vypočtené životnosti není neobvyklá. Přičteme-li k uvedenému vyšší teploty, čímž způsobíme urychlenou degradaci maziva, možnost vniknutí vody a podobně, tak určitě není nutno dalšího komentáře. Pouze na závěr uvedeme výsledky sledování poruchovosti elektromotorů z let 2000 - 2003 (viz také citovaný článek VALENT O. - kap.5.3), kde je uvedeno - 69% poruchovosti je mechanického původu, 62% poruchovosti zapříčiní ložiska a 45% poruchovosti zapříčiní ložiska elektromotoru na straně spojky. A tím se dostáváme zpět k otázce „Co je asi nejčastější příčinou poruch ložisek na straně spojky?“

Další příklad je na obr.55 a ukazuje průběh životnosti mechanické ucpávky v závislosti na ustavení [10].



Obr.55 Průběh životnosti mechanické ucpávky v závislosti na ustavení

❖ Spojky

Úvodem si dovolíme uvést. Síly a tření vzniklé špatným ustavením se vždy za určitý čas na spojce projeví, třebaže používáme tzv. „pružné spojky“.

U pružných spojek, s pryžovou nebo plastovou objímkou mezi hlavami, má souosost dramatický vliv na četnost její výměny. Běžným příznakem špatné souososti je drolení pryže nebo plastu, které se hromadí pod spojkou nebo jejím krytem.

U ozubených spojek má velikost nesouososti přímý vliv na opotřebení zubů v záběru. V podmínkách nadměrného neustavení jsou zatěžovány zejména okraje bočních stran zubů spojky. Toto může případně způsobit vyhloubení drážek na vnitřním ozubení a „nožové zbroušení zubů“ na vnějších převodech. Špatná souosost může být rovněž zdrojem problémů s mazáním spojek, což nakonec vede ke stavu, kdy mazivo mezi zuby zcela chybí. V těchto místech dochází k přímému kontaktu kov na kov a opotřebení převodů se prudce zvyšuje. Mohli bychom nyní pokračovat popisem možných poškození u různých typů spojek, ale dovolíme si opět pouze upozornit na literaturu [5], kde najdeme fotografie různých poškození, ale také naměřená frekvenční spektra.

Již z úvodu této kapitoly je zřejmé a navíc bylo postupně zdůrazněno, že jsme se ve stručnosti věnovali jen těm nejzákladnějším a nejdůležitějším elementům strojních systémů v souvislosti s projevy nesouososti těchto systémů, takže tento svým způsobem nekonečný příběh ukončíme poznámkou.

Vlivy špatného ustavení hřídelů se samozřejmě projeví nejen na strojních systémech a jejich elementech, ale také ve výrobní produkci a její kvalitě, ve snížení výrobní kapacity a podobně.

6 Závěr

Závěr by mohl být velice stručný. „Hlavním důvodem pro přesné ustavení hřídelí je spolehlivý provoz rotujících strojů a jejich součástí s největší poruchovostí, respektive selháním“, tedy v provozní praxi radikální snížení oprav a údržby. Bohužel prováděné průzkumy [10] ukazují, že méně než 10% z náhodně vybraných 160 strojů vyhovělo přijatelným tolerancím.

Proto si dovolíme ve svém závěru definovat nejzákladnější zásady k ustavování rotujících strojních systémů:

- dodržovat tolerance pro ustavování strojů,
- po každé opravě provést nové ustavení,
- provádět objektivně nutnou kontrolu ustavenosti v provozních podmínkách, včetně definování provozní kompenzace,
- používat správné měřicí postupy, metody, přístroje a nutné doplňky.

Závěrečné slovo

Předkládanými skripty si v žádném případě nečiníme nárok na originalnost a ani si nemyslíme, že jsme danou problematiku zpracovali vyčerpávajícím způsobem. Plně si uvědomujeme její rozsáhlost (lit.[8] má například 347 stran), její vývoj daný vývojem měřicí techniky a měřících metod nutných k ustavení dnešních rotujících strojních systémů a plně doufáme, že po jejich přečtení již nikdy neuslyšíme častou otázku „Proč ustavovat stroje, když spojky vydrží i velkou nesouosost?“.

Použitá literatura

- [1] FIXTUR LASER. *Aplikační materiál*. kap. 1-10
- [2] FIXTUR LASER. *Uživatelská příručka*. Čtvrté vydání, září 2000
- [3] GALAD M., KAČMAR L. Ustavovanie spojok a ich vplyv na ekonomiku výroby a životnosť strojov. In. *II. ročník mezinárodní konference „Zkušenosti se zaváděním proaktivní a prediktivní údržby do podnikové praxe“*. Smolenice, 2004. CMMS, s.r.o., Praha
- [4] HELEBRANT F., ZIEGLER J. *Technická diagnostika a spolehlivost II - Vibrodiagnostika*. VŠB - TU Ostrava, 1. vydání, Ostrava 2004. 178 s., ISBN 80-248-0650-9
- [5] KAČMAR L. Příklady analýzy základních příčin poruch rotačních strojov. In. *II. ročník mezinárodní konference „Zkušenosti se zaváděním proaktivní a prediktivní údržby do podnikové praxe“*. Smolenice, 2004. CMMS, s.r.o., Praha
- [6] KNYBLOVÁ L. *Fyzikální principy měřících metod*. Interní učební text katedry fyziky VŠB - TU Ostrava, 2004
- [7] MAZALOVÁ J. *Využití laseru v měření*. Habilitační práce, VŠB - TU Ostrava, 2003. 93 s.
- [8] PIOTROWSKI J. *Příručka souosování*. 2. rozšířené vydání, český překlad, díl 1 a 2. 347 s.
- [9] SKF Ložiska, a.s., Praha. *Ustavování hřídelů*. Aplikační materiál FIXTUR LASER
- [10] ŠEREMETA L. *Podkladové materiály k ustavování*. LAMI KAPPA s.r.o., Teplice, 2004
- [11] ŽARNOVSKÝ J. Softvér pre riadenie diagnostických postupov. In. *Kvalita a spoľahlivosť strojov 2004, 9. medzinárodné sympozium*. SPU Nitra, 2004. s.391-394, ISBN 80-8069-369-2
- [12] ŽARNOVSKÝ J. Prognozovanie stavu objektu v technickej diagnostike. In. *Technická diagnostika Z1/2005*, ročník XIV, sborník 24. mezinárodní konference „DIAGO 2005“, s.363-369, ISSN 1210-311-X