

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Vliv poškození lopatek na provoz a diagnostiku vývěvy

Impact of Damaged Blades on the Operation and Diagnostics of the
Vacuum Pump

Student:
Vedoucí bakalářské práce:

Marek Hora
Ing. Ladislav Hrabec, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Hora**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma: **Vliv poškození lopatek na provoz a diagnostiku vývěvy**
Impact of Damaged Blades on the Operation and Diagnostics of the Vacuum Pump
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Na základě informací a požadavků zadavatele zpracujte problematiku nasazení vývěv v podmínkách průmyslového podniku se zaměřením na sledování vlivu poškození lopatek na provoz vývěvy a nasazení prostředků technické diagnostiky.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši k problematice možnosti využití vývěv v podmínkách průmyslového podniku s ohledem na jejich konstrukční provedení a požadavky konkrétního provozu.
2. Posouzení současného nasazení prostředků technické diagnostiky zadavatele pro monitorování provozních stavů vývěv ve sledovaném provozu výrobního podniku, včetně plánování a provádění údržby.
3. Měření vlivu poškození lopatek na provoz vývěvy s využitím lopatek z reálného provozu a simulace poškození lopatek a dalších komponent vývěvy v laboratorních podmínkách.
4. Doporučení k možnostem oprav a provozu sledovaných zařízení s cílem zajištění vysoké provozní spolehlivosti a životnosti.

Další pokyny a informace poskytne konzultant bakalářské práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

PÁTÝ, L. a J. PETR. *Vakuová technika: určeno pro stud. fak. elektrotechn.* 1. vyd. Praha: ČVUT, 1990. 233 s. ISBN 80-01-00216-0.

ZOBAČ, L. *Základy vakuové techniky: Určeno pro techn. kádry závodů a výzkum. ústavů, učebnice prakt. vakuové techniky.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1954. 313, [1] s. Řada elektrotechnické literatury.

HELEBRANT, F. *Technická diagnostika a spolehlivost. IV., Provoz a údržba strojů.* 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. 127 s. ISBN 978-80-248-1690-6.

BLATA, J. a J. JURASZEK. *Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej: teorie a praktyka.* 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. 130, 135 s. ISBN 978-80-248-2997-5

SZCZEREK, M. a M. WISNIEWSKI. *Tribologie, Tribotechnika.* Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji Radom, 2000. 727 s. ISBN 83-7204-199-7

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

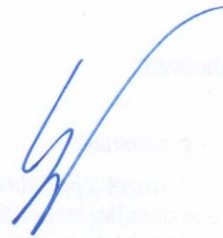
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ladislav Hrabec, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Poděkování:

Rád bych poděkoval společnosti ESOS Ostrava s.r.o., díky které mohla tato bakalářská práce vzniknout, dále bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Ladislavu Hrabcovi, Ph.D.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě. 14.5.2017

.....
.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

74.5.2017

Podpis.....



Jméno a příjmení autora práce:

Marek Hora

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Přemyslovců 42, 709 00 Ostrava

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HORA, M. *Vliv poškození lopatek na provoz a diagnostiku vývěvy: Bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2017, 50 s. Vedoucí práce: HRABEC, L.

Úvod práce je věnován základnímu rozdělení vývěv, které se v dnešní době v provozu objevují. Je zde jednoduše vysvětlen princip jejich funkce a vyzvednuty jejich výhody. V následující kapitole je popsán systém údržby vývěv v provozu. Následně se práce zaměřuje na jednu konkrétní vývěvu, na které byla prováděna měření. V závěru práce jsou výsledky vyhodnocovány, a také jsou zde další doporučení pro zlepšení provozu s cílem zajištění vysoké provozní spolehlivosti a životnosti.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

HORA, M. *Impact of Damaged Blades on the Operation and Diagnostics of the Vacuum Pump: Bachelor Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of production machines and design, 2017, 50 p. Thesis head: HRABEC, L.

The introduction of this work is devoted to the basic distribution of vacuum pumps that are in operation today. There is a simple explanation of their function and their advantages. The following chapter describes the vacuum pumps service maintenance system. Afterwards, the work focuses on one particular pump on which measurements were made. At the end of the work the results are evaluated and there are other recommendations for improving the operation to ensure high operational reliability and service life.

Obsah

Seznam použitých značek, symbolů a veličin.....	10
Úvod.....	11
1 Vývěvy.....	12
1.1 Transportní vývěvy.....	12
1.1.1 Rotační olejové vývěvy.....	12
1.1.2 Rootsovy vývěvy.....	13
1.1.3 Grafitové vývěvy.....	15
1.1.4 Pistové vývěvy.....	16
1.1.5 Šroubové vývěvy.....	17
1.1.6 Zobákové vývěvy.....	18
1.1.7 Vodokružné vývěvy.....	20
1.2 Sorpční vývěvy.....	20
1.2.1 Kryogenní vývěvy.....	20
1.2.2 Iontové vývěvy.....	21
2 Údržba vývěv.....	23
2.1 ESOS Ostrava.....	23
2.2 Současný stav údržby.....	23
2.3 Doporučená údržba grafitové vývěvy.....	25
2.3.1 Dodatečné mazání ložisek.....	26
2.3.2 Kontrola lamel.....	26
2.3.3 Filtrace vzduchu.....	27

2.3.4	Kontrola spojky	28
3	Měření vlivu poškození lopatek na provoz vývěvy	30
3.1	Měřená vývěva a její motor	30
3.2	Příprava měření	32
3.3	Prováděná měření	37
3.3.1	Měření s šesti lopatkami na hranici životnosti	38
3.3.2	Měření s třemi velmi opotřebovanými lopatkami	40
3.3.3	Měření vývěvy bez lopatek	41
3.3.4	Samostatné měření elektromotoru	43
4	Doporučení k možnostem oprav a provozu	46
	Závěr.....	48
	Použitá literatura	49

Seznam použitých značek, symbolů a veličin

Zkratka-veličina	Význam	Jednotka
ATEX	Atmosphere explosible	[-]
B	Tloušťka ložiska	[mm]
BPFI	Poruchová frekvence vnitřního kroužku	[Hz]
BPFO	Poruchová frekvence vnějšího kroužku	[Hz]
BSF	Poruchová frekvence valivých elementů	[Hz]
D	Vnější průměr ložiska	[mm]
F_L	Síťová frekvence	[Hz]
FTF	Poruchová frekvence klece	[Hz]
P	Výkon	[kW]
Q_v	Objemový průtok	[m ³ ·h ⁻¹]
RMS	Efektivní hodnota	[-]
S_o	Čerpací rychlost	[m ³ ·h ⁻¹]
a	Zrychlení	[g]
d	Vnitřní průměr ložiska	[mm]
f	Frekvence	[Hz]
f_L	Lopatková frekvence	[Hz]
f_o	Otáčková frekvence	[Hz]
n	Otáčky	[1·min ⁻¹]
p	Tlak	[mbar, bar, Pa]
t	Teplota	[°C]
ν	Kinematická viskozita	[mm ² ·s ⁻¹]

Úvod

Použití vakua je v dnešní době v průmyslu hojně rozšířené. Využívá se snad ve všech průmyslových oblastech. Za zmínění by stál především elektrotechnický průmysl, který nejenže přímo vyrábí vakuové systémy (vakuové kondenzátory, rentgenky atd.), ale taky při výrobě vakuovou techniku používá. Dalším průmyslovým odvětvím je chemický průmysl (vakuová destilace) a optický průmysl (výroba reflexních nebo antireflexních vrstev). Nelze také opomenout potravinářský průmysl, ve kterém se vakuová technika používá převážně při konzervaci, zahušťování atd. Počet strojů a zařízení, které ke své funkci využívají podtlaku stále stoupá a s ním roste i použití vývěv. V průmyslu bude stále nutné tyto stroje využívat, a proto je třeba věnovat údržbě a konstrukci těchto zařízení nemalou pozornost. Využití také nacházejí v tiskařských strojích, kde je pomocí podtlaku podáván papír ze zásobníku do stroje.

V této bakalářské práci se budu věnovat vývěvám a vlivu poškození jejich lopatek na provoz a diagnostiku těchto zařízení, dále se budu snažit najít nedostatky v probíhající údržbě vývěv v provozu. Jejich odstraněním a vylepšením systému údržby by bylo možné zvýšit životnost a provozní spolehlivost vývěv a jejich lopatek.

1 Vývěvy

Pod pojmem vývěva si můžeme představit zařízení, jehož funkcí je odsávat z určitého prostoru plyn a pak jej buď na druhé straně při větším tlaku vytlačovat nebo jej uvnitř vývěvy různým způsobem vázat. Podle toho se vývěvy dělí na transportní a s vazbou plynu neboli vývěvy sorpční. [1, 2]

1.1 Transportní vývěvy

Transportní vývěvy mají vstupní a výstupní hrdlo, jelikož jimi plyn prochází. Existuje mnoho druhů transportních vývěv, například rotační olejová, pístová, Rootsova atd. [1, 2]

1.1.1 Rotační olejové vývěvy

Rotační olejové vývěvy jsou nejvíce rozšířeným typem vývěv, používají se v přerušovaném a taky v trvalém provozu. Moderní jednostupňové rotační olejové vývěvy mají integrovaný odlučovač olejové mlhy, který odstraňuje olej z vyfukovaného vzduchu, olej je následně vývěvou znovu použit. [4]

Princip fungování rotační olejové vývěvy:

Excentricky uložený rotor ve válci je rozdělen lamelami na komory. Díky otáčení rotoru se zmenšuje objem komor mezi lamelami a dochází ke kompresi. Lamely se nachází ve drážkách rotoru a od statoru jsou těsněny olejem. [4]



Obr. 1 Rotační olejová vývěva [7]

Výhody rotačních olejových vývěv:

- odolná konstrukce
- energeticky úsporné
- vakuum vhodné pro většinu aplikací

Parametry olejových vývěv:

- *čerpací rychlost:* od $4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ do $1\,600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- *výkon motoru:* od 0,1 kW do 30 kW
- *max. vakuum:* 0,1 mbar [4]

Pro plnění rotačních vývěv můžeme použít středně těžkých turbínových, kompresorových nebo motorových olejů. Olej by neměl obsahovat mnoho prachových částic, nesmí tvořit snadno emulzi s vodou a musí být odolný proti kyslíku. Důležitým požadavkem na olej je, aby dobře tvořil tenkou vrstvu. [1]

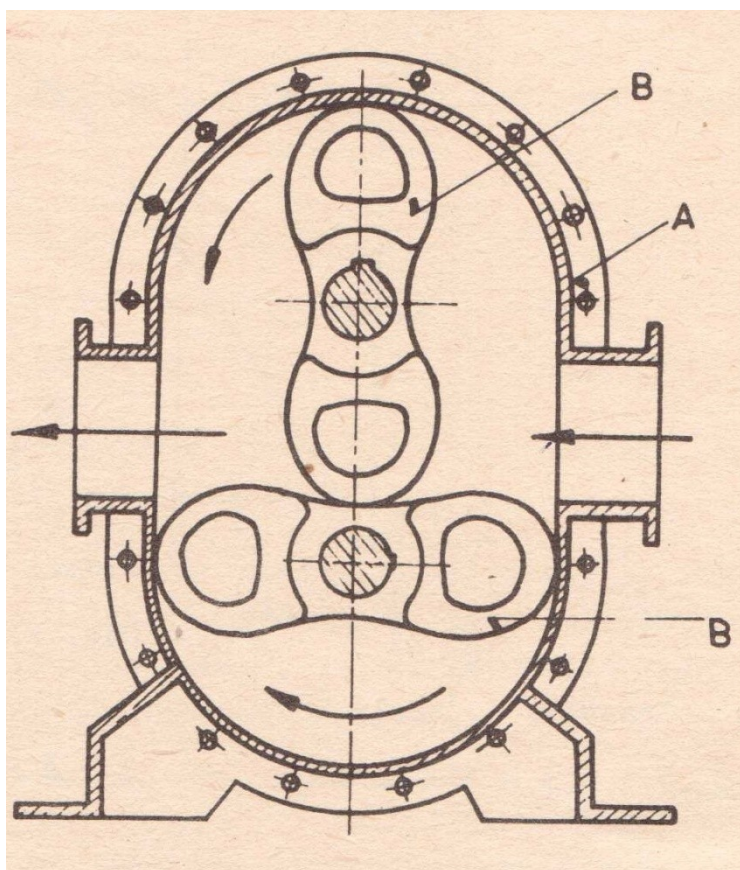
1.1.2 Rootsovy vývěvy

Rootsovy vývěvy, jinak nazývané taky jako Rootsova dmychadla, posilovací vývěvy nebo vakuové boostery fungují na principu užitém již r. 1867 Rootsem při konstrukci dmychadel. Používají se pro zvýšení vakua a pro zvýšení čerpací rychlosti. Řadí se mezi

suchoběžné vývěvy. Rootsovy vývěvy jsou vhodné pro stálý chod a chladí se vodou nebo vzduchem, v praxi se často kombinují s pístovými vývěvami, olejovými vývěvami, zubovými vývěvami, šroubovými vývěvami a vodokružnými vývěvami. [1, 3, 4]

Princip funkce Rootsovy vývěvy:

Ve statoru se nachází dva písty, které se protiběžně otáčejí, při rotaci nedochází ke kontaktu pístu se státorem ani ke kontaktu pístů mezi sebou navzájem. Rotaci pístů obstarává dvojice ozubených kol, která je umístěná v převodovce na konci hřídele. [4]



Obr. 2 Rootsova vývěva [1]

A-Stator, B-Rotory

Výhody Rootsových vývěv:

- zvýšení čerpací rychlosti
- prohloubení vakua
- energeticky efektivní
- dlouhá životnost

Parametry Rootsových vývěv:

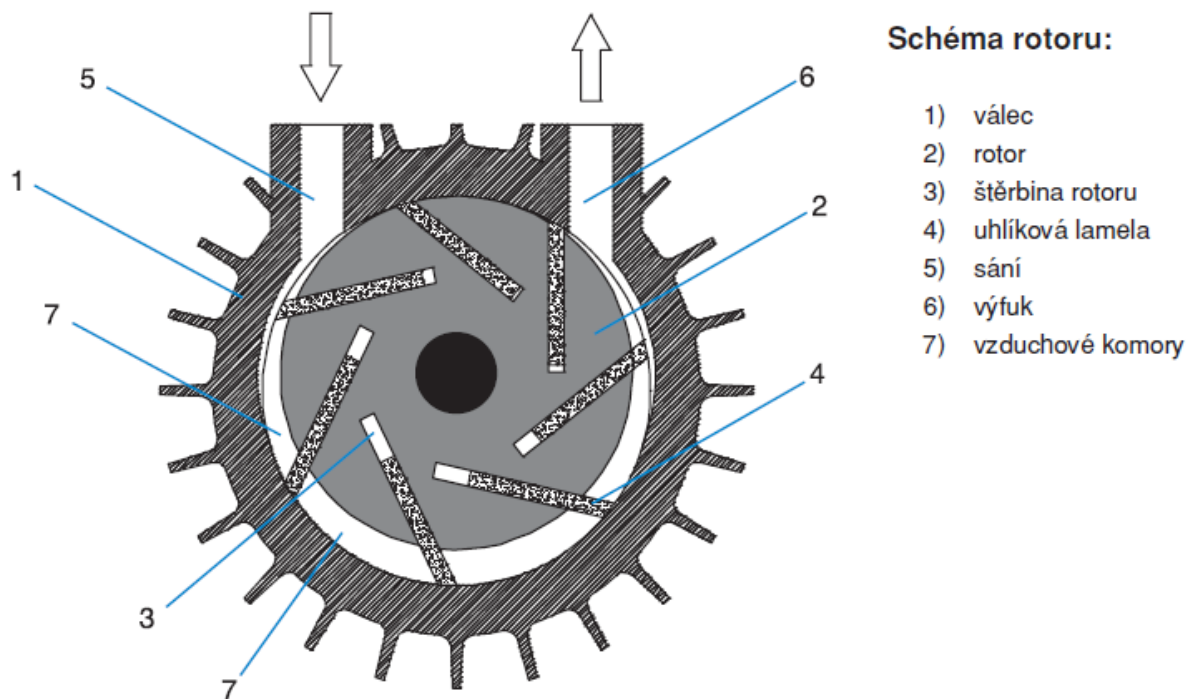
- *čerpací rychlost:* od $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ do $15\,500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- *výkon motoru:* od 0,75 kW do 30 kW
- *max. tlakový rozdíl:* 130 mbar [4]

1.1.3 Grafitové vývěvy

Tento typ vývěv se řadí mezi rotační bezolejové vývěvy. Jsou chlazené vzduchem a používají se jak v přerušovaném, tak v trvalém provozu. Pracují na podobném principu jako rotační olejové vývěvy, ale fungují zcela bez maziva. Namísto kompozitových lamel těsněných olejem se v tomto typu vývěv používají grafitové lamely. Další typy bezolejových vývěv jsou vývěvy zobákové a šroubové. [4]

Princip fungování grafitové vývěvy:

Vzduch který je nasán prvně prochází přes integrovaný sací filtr. Excentricky uložený rotor se otáčí ve válci. Grafitové lamely se pohybují ve šterbinách rotoru a odstředivou silou jsou tlačeny směrem ke statoru. Otěrem lamel o stator se snižuje tření a vývěva se těsní. Vytažená lamela se zapříčiní o uzavření prostoru mezi rotorem a statorem. Objem tohoto prostoru se v čase díky otáčení rotoru mění a tak dochází k nasávání, kompresi a výfuku. [4]



Obr. 3 Grafitová vývěva [5]

Výhody grafitových vývěv:

- provoz absolutně bez oleje
- nízká četnost údržby
- vývěvy lze použít jako kompresory pro vakuotlaké aplikace

Parametry suchoběžných vývěv:

- *čerpací rychlost:* od $3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ do $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- *výkon motoru:* od 0,1 kW do 15 kW
- *max. vakuum:* 100 mbar [4]

1.1.4 Pístové vývěvy

Pístové vývěvy jsou odolné vůči nečistotám a jsou robustní, proto jsou vhodné pro náročné a špinavé aplikace. Pístové vývěvy se chladí vodou a mají vysokou čerpací rychlost i při hlubokém vakuu. Používají se hlavně v chemickém a těžkém průmyslu. Pro dosažení větší čerpací rychlosti nebo pro prohloubení vakua se používají předřazené posilovací Rootsovy vývěvy.[4]

Princip fungování pístové vývěvy:

Vývěva používá tři typy paralelně propojených pístů, které jsou dynamicky vyvážené. Prostor mezi válcem a pístem je utěsněný olejem a na výstupu je připojen odlučovač olejové mlhy. Pístová vývěva pracuje při nízkých otáčkách, proto mají její ložiska vysokou životnost. Vývěva je velmi spolehlivá. [4]

Výhody vývěv s pístem:

- vysoce robustní
- odolné vůči nečistotám
- vysoká čerpací rychlost při nízkém tlaku
- dlouhá životnost

Parametry vývěv s pístem:

- *čerpací rychlost:* od $36 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ do $1350 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- *výkon motoru:* od 1,1 kW do 30 kW
- *max. vakuum:* 0.00026 mbar nebo 0,013 mbar
- *pomaloběžné vývěvy* [4]

1.1.5 Šroubové vývěvy

Tenhle typ vývěv se používá tam, kde se jiné vývěvy použít nedají. Jsou ideální pro chemický a farmaceutický průmysl a pracují bez oleje. Vývěvy mohou pracovat dokonce v prostředí, kde je nebezpečí výbuchu, nebo mohou čerpat výbušné plyny. Obvykle jsou chlazené vodou. Díly, které přichází do kontaktu s médiem, se mohou povrchově upravovat, aby odolávaly chemikáliím.[4]

Princip fungování šroubové vývěvy:

Uvnitř vývěvy se nacházejí dva šroubové rotory, které se otáčejí uvnitř válce. Pohyb je zajišťován velmi přesným převodovým ústrojím. Plyn je nasáván do prostoru mezi válcem a šroubem a potom je dopravován k výtlačku.[4]

Výhody šroubových vývěv:

- jsou suchoběžné
- mezi rotory a statorem není kontakt
- vysoké vakuum v jednostupňové vývěvě
- protikorozi povrchové úpravy
- téměř bezúdržbové
- možnost regulace frekvenčním měničem

Parametry šroubových vývěv:

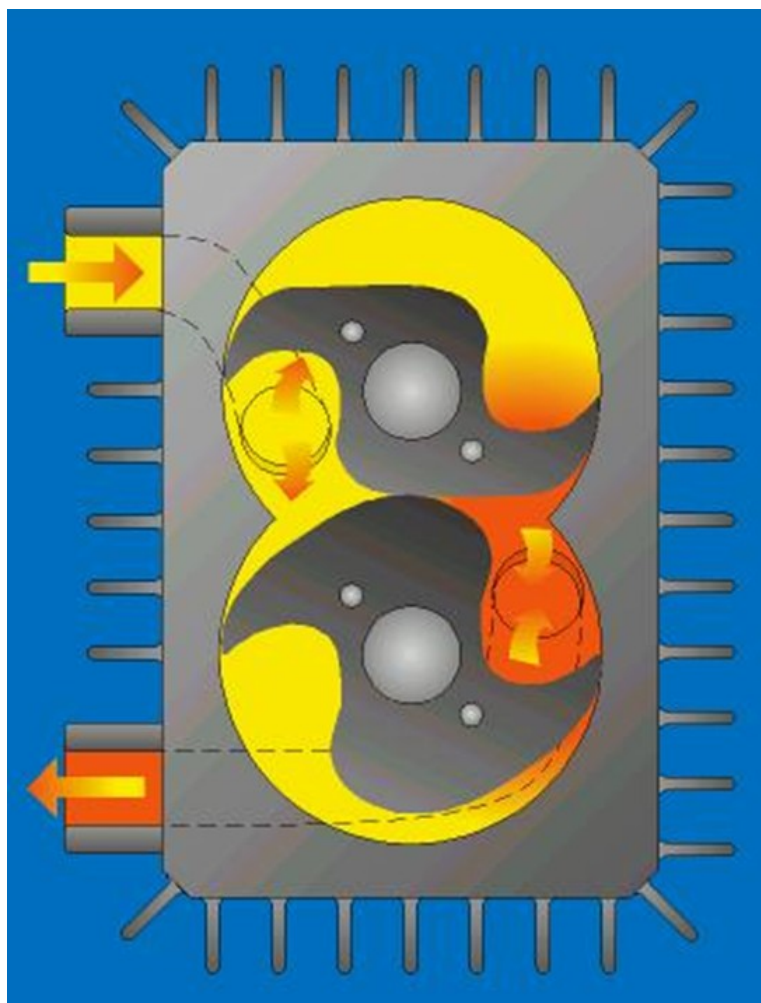
- *čerpací rychlost:* od $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ do $2500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- *výkon motoru:* od 3,5 kW do 55 kW
- *max. vakuum:* 0,05 mbar
- *ATEX vnější:* zóna 1 nebo 2
- *ATEX vnitřní:* zóna 0 nebo 1 nebo 2
- *chemické povrchové úpravy TEFLON*[4]

1.1.6 Zobákové vývěvy

Se řadí mezi bezolejové, vzduchem chlazené vývěvy. Jsou vhodné pro přerušovaný i trvalý chod. Jejich obrovskou výhodou je, že mají nízké provozní náklady a jsou nenáročné na údržbu. Některé lze taky použít jako kompresory, a tak je lze použít ve vakuotlakových aplikacích. [4]

Princip fungování zobákové vývěvy:

Uvnitř vývěvy se nacházejí dva rotory ve tvaru dvojzobáku. Rotory se ve statoru otáčejí protisměrně a mezi rotory navzájem, ani mezi rotory a statorem nedochází k žádnému kontaktu. Vzduch se nasává do kompresní komory a pohybem zubů v prostoru sací přípojky se přemísťuje k výtlačku. [4]



Obr. 4 Zobáková vývěva [6]

Výhody zobákových vývěv:

- spolehlivý provoz
- pracovní komora je bez oleje
- nízká spotřeba energie
- nízké servisní náklady

Parametry zobákových vývěv:

- *čerpací rychlost:* od $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ do $950 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- *výkon motoru:* od 1,1 kW do 18,5 kW
- *max. vakuum:* 20 mbar
- vývěvy lze použít i jako kompresory pro vakuotlaké aplikace [4]

1.1.7 Vodokružné vývěvy

Vodokružné vývěvy se používají v těch nejnáročnějších aplikacích. Jsou to nejvíce odolné průmyslové vývěvy vůči nasání nečistot. Mohou čerpat i výbušné plyny nebo být nasazeny v prostředí s nebezpečím výbuchu (ATEX). Vývěvy jsou chlazené protékající vodou. [4]

Výhody vodokružných vývěv:

- vysoce odolné vůči nečistotám
- robustní a odolné
- bez potřeby servisu po mnoho let
- možnost celonerezového provedení
- možnost ATEX

Parametry vodokružných vývěv:

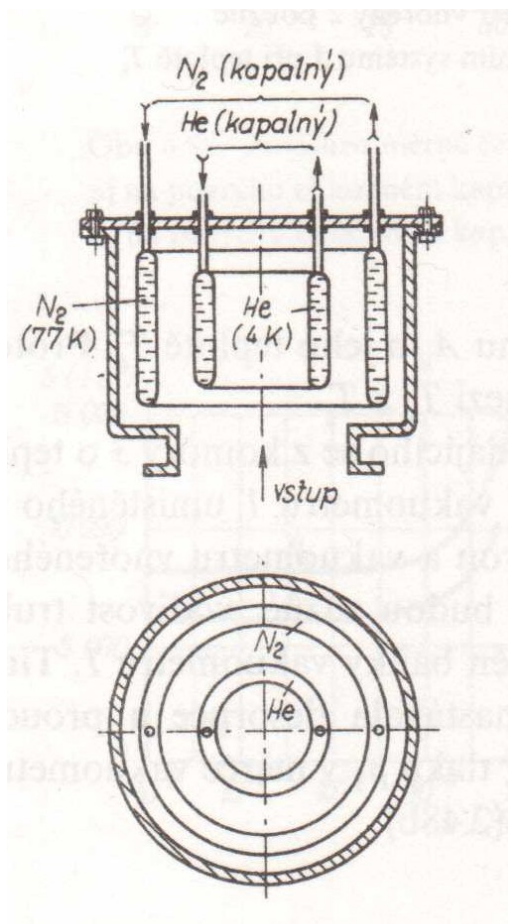
- *čerpací rychlost:* od $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ do $37\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- *výkon motoru:* od 0,75 kW do 680 kW
- *max. vakuum:* 33 mbar [4]

1.2 Sorpční vývěvy

Sorpční vývěvy fungují na principu vazby plynů a par na povrchu a v materiálech, které jsou k tomu připravené. Sorpční vývěvy nemají výstupní hrdlo, neboť nasátý plyn v nich ve vázaném stavu zůstává, jejich čerpací rychlost je závislá na velikosti sorbujícího povrchu. [3]

1.2.1 Kryogenní vývěvy

Kryogenní vývěvy jsou sorpční vývěvy, které jsou schopné dosáhnout čistého vakua až ultravakua. Fungují na principu absorpce a kondenzace plynů na povrchu, jehož teplota je o hodně nižší než teplota okolí. Nízká teplota se zajišťuje tekutým dusíkem popřípadě tekutým heliem. Lze dosáhnout velmi nízkých tlaků až pod 10^{-10} Pa. Kryogenní vývěvy se užívají hlavně pro získání ultravakua, zapojují se do činnosti až potom, kdy bylo jinými vývěvami dosaženo dostatečně nízkého tlaku. [3, 8]



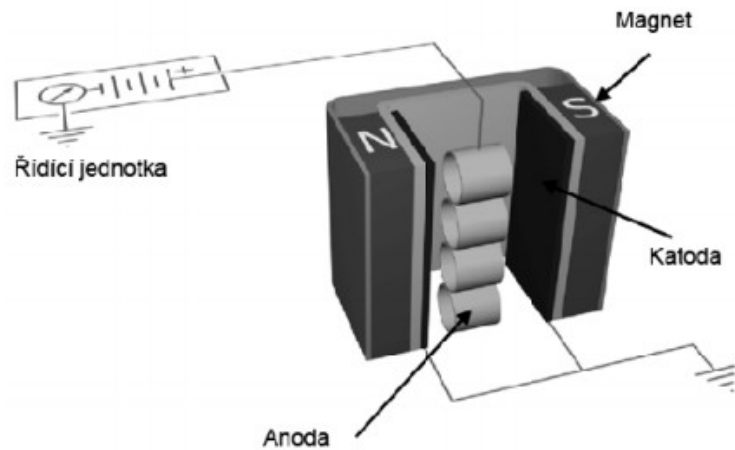
Obr. 5 Schéma heliové kryogenní vývěvy se stíněním chlazeným kapalným dusíkem [3]

Kryogenní vývěvy mají dvě hlavní nevýhody:

- Nejsou vhodné pro čerpání z atmosférického tlaku, vzhledem k velkému množství plynu.
- Obtížně se pomocí nich čerpá vodík, neon a helium. [8]

1.2.2 Iontové vývěvy

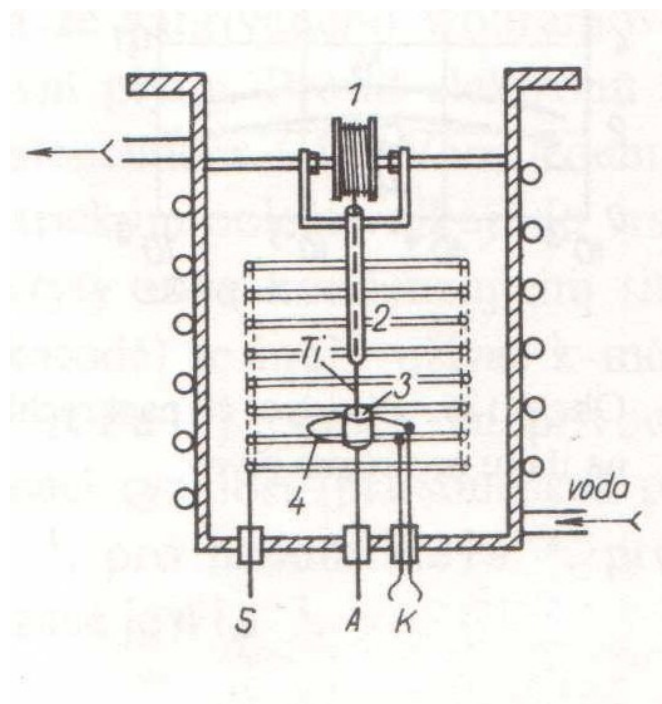
Penningův vakuometr je prototypem iontových vývěv, dochází v něm k pozorovatelnému čerpání plynů. Jev je způsoben ionizací plynu vlivem magnetického pole a naprašováním kovu z katody, ke kterému dochází vlivem bombardování katody ionty. Základní zapojení iontové vývěvy obsahuje dvě elektrody (anodu, katodu) a magnet. [3, 9]



Obr. 6 Základní zapojení iontové vývěvy [9]

Princip činnosti:

Molekuly čerpaného plynu získají velkou rychlost, při srážce s povrchem kovu se do něj zastřelí a jsou do něj "zazděny" vrstvami naprášeného kovu. Rychlost molekulám uděluje elektrické pole po předchozí ionizaci plynu. [3]



Obr. 7 Iontová sublimační vývěva [3]

1 - cívka s titánovým drátem, 2 - trubička, 3 - tyglíková anoda, K - katoda, S - mřížka, A -
přívod anody [3]

2 Údržba vývěv

2.1 ESOS Ostrava

Společnost ESOS Ostrava byla založena roku 1995 a už od svého založení se soustředila na zabezpečení bezporuchového chodu strojů. Základní filosofií firmy je totální spolehlivost strojů a zařízení. V začátcích se zabývala prodejem klínových řemenů, gufer, ložisek, olejů, náradí pro demontáž a montáž ložisek atd. Časem společnost přešla na komplexní řešení potřeb v oblasti bezporuchového chodu strojů a zařízení. [10]

Firma se zabývá:

- vyhodnocováním problémového a zhavarovaného sortimentu
- vytváří metodiky montáže a demontáže
- vyhodnocuje práci mechaniků se sortimentem a na základě výsledků a hodnocení pak doporučuje a navrhuje změny a úpravy

Od roku 1998 má společnost vlastní skupinu technické diagnostiky. Od roku 2016 se ESOS začal zabývat také audity údržby, jejichž cílem je pomoci snížit zákazníkům poruchovost, prostoje a zvýšit efektivitu a produktivitu. [10]

2.2 Současný stav údržby

Jedním ze zákazníků firmy ESOS Ostrava je tiskařský podnik, ve kterém jsou vývěvy součástí tiskového stroje Rapida 142.



Obr. 8 Tiskový stroj Rapida 142 [11]

V tiskařském podniku, který jsem mohl navštívit, byly u stroje Rapida 142 použité suchoběžné grafitové vývěvy od výrobců Elmo Rietschle a Becker. Ty byly spolu s dmychadly uloženy v tunelu po stranách stroje. Tunel je ze všech stran uzavřený, výměna vzduchu je zde zajištěna ventilátorem na začátku tunelu.



Obr. 9 Uložení vývěv a dmychadel v tunelu

Údržbu zcela zajišťuje firma ESOS Ostrava, vývěvy jsou kontrolovány co tři měsíce vibrodiagnostickým měřením, při zjištění vysokých vibrací se následně problém řeší. V tříměsíčních intervalech se také provádí preventivní prohlídky které zahrnují kontrolu filtrů, kontrolu těsnění, kontrolu ložisek, kontrolu spojky a kontrolu lopatek. Preventivní prohlídky jsou časově naplánované tak, aby vycházely co nejdříve po vibrodiagnostickém měření.

2.3 Doporučená údržba grafitové vývěvy

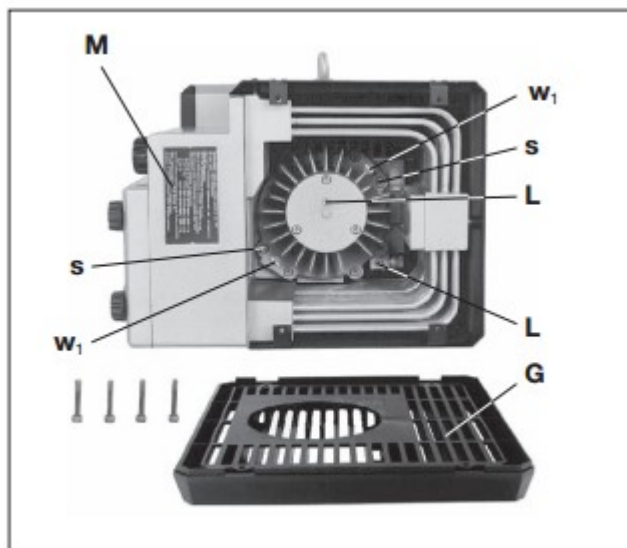
Toto doporučení platí pro vývěvy Elmo Rietschle KTA 140/3 (01) a je přímo od výrobce. Níže uvedená tabulka uvádí, v jakých intervalech by se měly udržovat nebo kontrolovat konkrétní části vývěvy.

Tab. 1 Doporučené intervaly údržby [12]

Intervaly	Opatření pro údržbu
Měsíčně	Zkontrolujte trubkové vedení a sešroubování na netěsnosti a pevné posazení a eventuálně znovu utěsněte/dotáhněte.
Měsíčně	Svorkovou skříň a otvory vedení kabelů zkontrolujte na netěsnosti a eventuálně znovu utěsněte.
Měsíčně	Regulační ventil, větrací šterbinu stroje a chladicí žebra motoru vyčistěte. Při silném nánosu prachu vyčistěte meziprostory chladicích žebek a chladicích trubek po sejmutí sací mřížky a krytu vyfouknutím.
4.000 h -10.000 h	Dodatečné mazání ložisek
4.000 h - 1.000 h	Kontrola lamel, při zjištění poškození výměna lamel
měsíčně / pololetně	Vyčistěte / nahrad'te filtrační patrony
min. 1 x za rok	Zkontrolujte opotřeben'í spojky

2.3.1 Dodatečné mazání ložisek

Před dodatečným mazáním ložisek je třeba odšroubovat krycí mřížku, mělo by se mazat podle provozních hodin viz. Tab. 1, ale vždy nejpozději po uplynutí jednoho roku. [12]

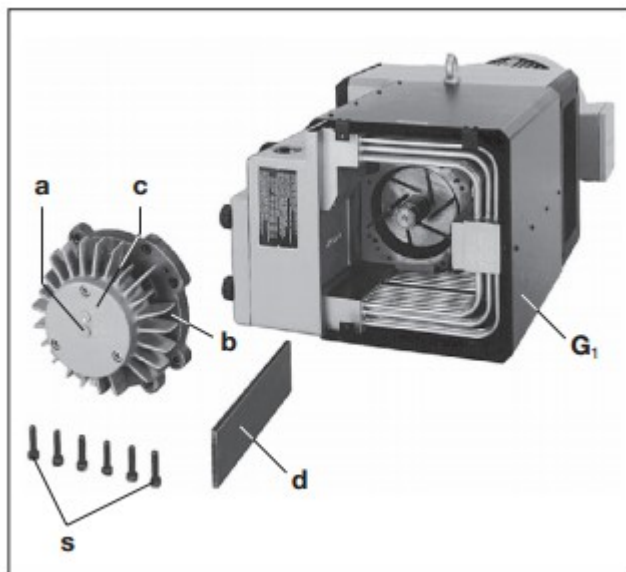


Obr. 10 Promazávání [12]

G - Sací mřížka, L - Maznice, M - štítek k doporučení maziva, s - šrouby, w_1 - Kruhová matice s drážkami

2.3.2 Kontrola lamel

Typ KTA 140/3 má šest grafitových lamel, které se při provozu opotřebovávají. První kontrola by se měla provést po 4000 provozních hodinách, potom po každých 1000 provozních hodinách. K správné funkci vývěvy musí mít všechny lamely minimální výšku větší než 38 mm. [12]



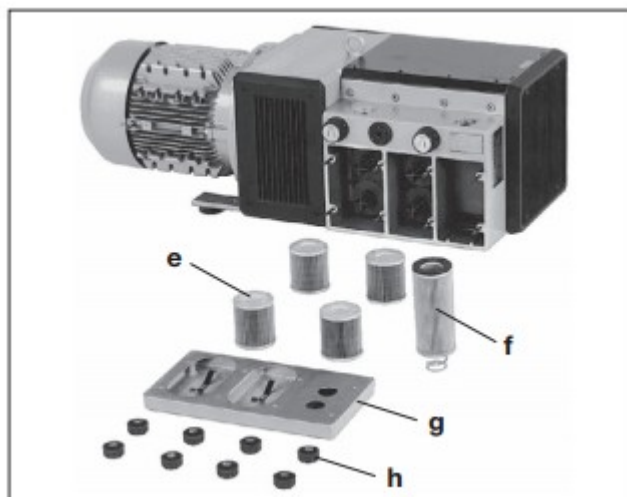
Obr. 11 Výměna lamel [12]

G_1 - Zákryt, a - Šrouby, b - Kryt tělesa, c - Tukový depot, d - Lamela, s - šrouby

První je třeba odšroubovat nasazovací mřížku, abychom mohli sundat kryt tělesa. Ten se odkryje po odšroubování potřebných šroubů, následně budeme mít přístup do samotného rotoru. Po vyndání lamel je třeba skříň a štěrby rotoru vyfoukat pomocí stlačeného vzduchu. Při vkládání nových lamel musíme dát pozor na to, aby lamely ukazovaly šikmou stranou ven z drážky rotoru a aby šikmost souhlasila se směrem otáčení. [12]

2.3.3 Filtrace vzduchu

Filtrační patrony se čistí pomocí stlačeného vzduchu, což je třeba činit měsíčně, ačkoliv čištěním filtru se postupně jeho funkčnost zhoršuje. Proto se musí filtry měnit co půl roku za nové. Po uvolnění otočných regulátorů filtru a krytu tělesa filtru lze filtrační patrony vyjmout k vyčištění. Taky se musí vyčistit komory tělesa filtru. Při čištění je třeba dát velký důraz na to, aby se filtrační patrony nepoškodily a taky aby se při čištění komor tělesa filtru do stroje nedostala nečistota. [12]

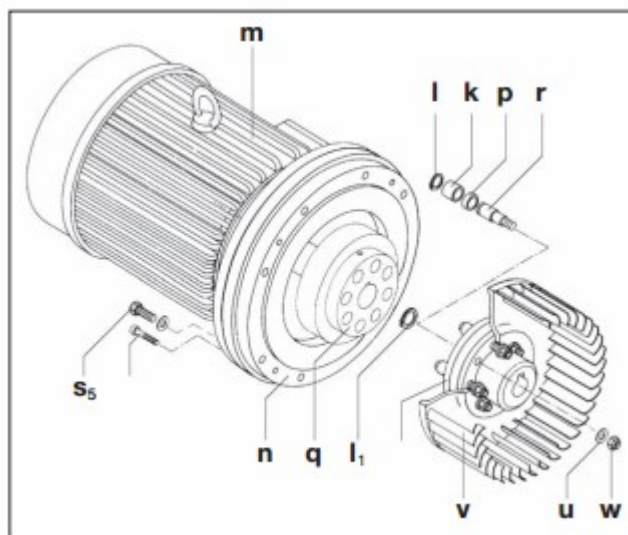


Obr. 12 Filtrace vzduchu [12]

e – Filtrační patrony (nasávaný vzduch), f – filtrační patrony (ofukovací vzduch), g – kryt tělesa filtru, h – Otočné regulátory filtru

2.3.4 Kontrola spojky

Při provozu se gumičky spojek opotřebovávají, proto je třeba je čas od času překontrolovat popřípadě vyměnit. Opotřebování gumiček se projevuje klepáním při náběhu vývěvy. Při zanedbání údržby může opotřebení gumiček vést až ke zlomení hřídele rotoru. [12]



Obr. 13 Spojka [12]

k – Gumičky spojky, l – Pojišťovací kroužky, l_1 – Pojišťovací kroužky, m – Motor, n – Příruba, p – Distanční kroužek, q – Polovina spojky na straně motoru, r – Čep spojky, s_5 – Šrouby, u, w – Šroubové matky, v – Ventilátor

3 Měření vlivu poškození lopatek na provoz vývěvy

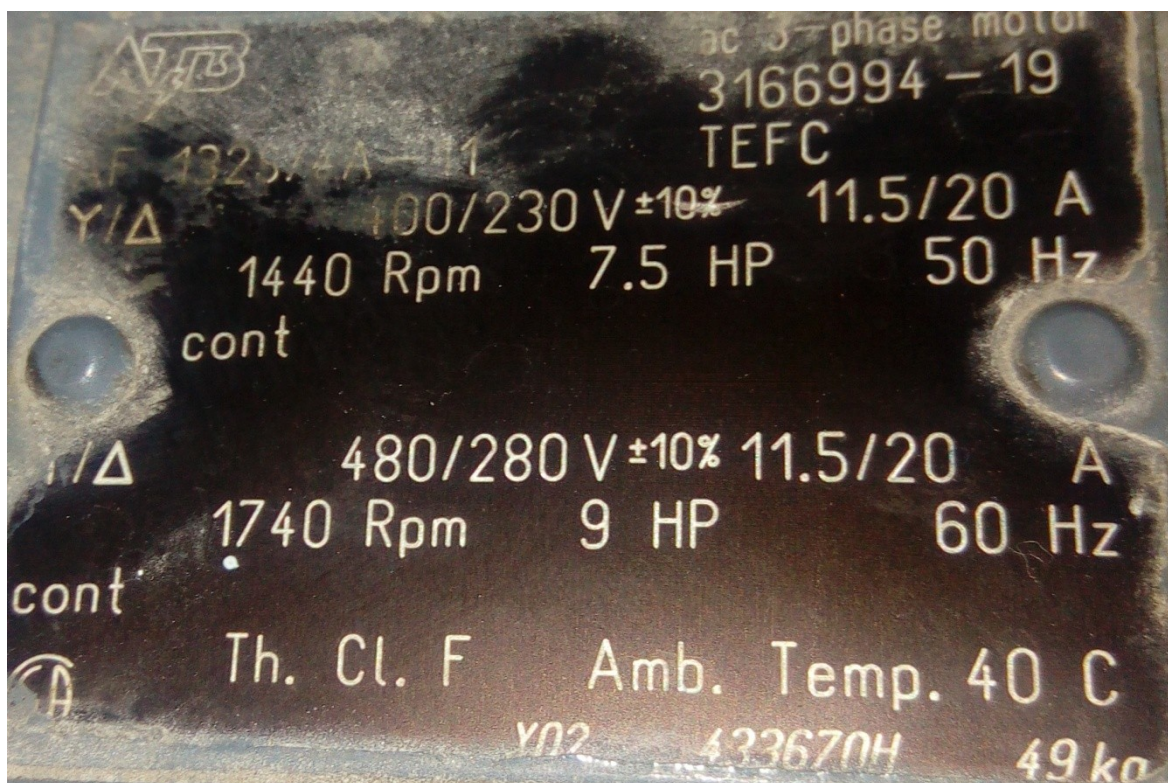
Měření byla prováděna na vývěvě Elmo Rietschle KTA 140/3 (01). Tato vývěva je ve vlastnictví společnosti ESOS Ostrava. Vývěva kdysi pracovala v provozu, nyní je však už pouze uskladněná ve firmě. Používá se jako náhradní kus k zapůjčení v případě, že se zákazníkovi nějaká vývěva hodně poškodí a je třeba jí odpojit a složitěji opravit.

3.1 Měřená vývěva a její motor

Vývěva obsahuje dvě ložiska - jednořadé válečkové ložisko FAG NU 205 E (měřicí místo 4) a dvouřadé kuličkové ložisko FAG 3206 (měřicí místo 3). Základní parametry stroje jsem získal ze štítků, které byly umístěny na vývěvě a jejím motoru.



Obr. 14 Štítek vývěvy



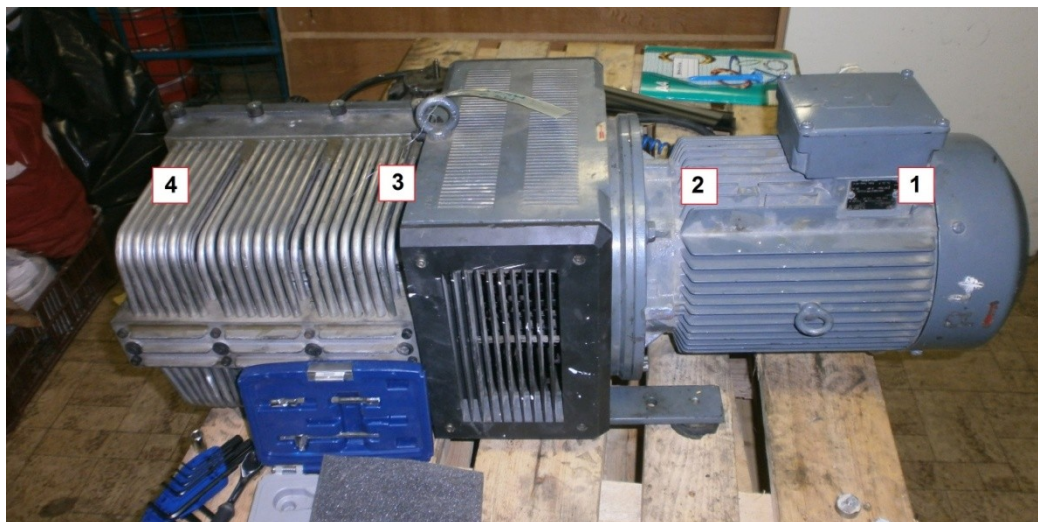
Obr. 15 Štítek motoru

Tab. 2 Základní parametry

Sériové číslo	2117750
Typ	KTA 140/3 (01)
Číslo výrobku	102358-0186
Přetlak/podtlak	+0,5/-0,6 bar
Objemový průtok při 50/60 Hz	140/168 m ³ · h ⁻¹
Výkon motoru při 50/60 Hz	5,50/6,50 kW
Otáčky při 50/60 Hz	1440/1740 min ⁻¹

3.2 Příprava měření

Měření se uskutečnilo v dílně firmy ESOS Ostrava, vibrace se snímaly na čtyřech měřicích místech (1 - u ložiska na volném konci motoru, 2 - u ložiska motoru blízko spojky, 3 - u ložiska vývěvy blízko spojky, 4 - u ložiska na volném konci vývěvy), kromě vibrací se taky měřil podtlak na sání. Měřicí místa jsou vyobrazena na obr. 16.



Obr. 16 Měřicí místa

Prvním nutným krokem před samotným měřením bylo sundat krycí mřížku, z které vystupují kanálky, sloužící pro dodatečné mazání ložisek vývěvy (měřicí místa 3 a 4), ložiska motoru se dodatečně mazat nedají.



Obr. 17 Krycí mřížka

Pro dodatečné mazání ložisek bylo použito mazivo Total ALTIS MV 2, což je víceúčelové plastické mazivo na bázi močoviny a je vhodné pro vysoké teploty, rychlosti a tlaky.

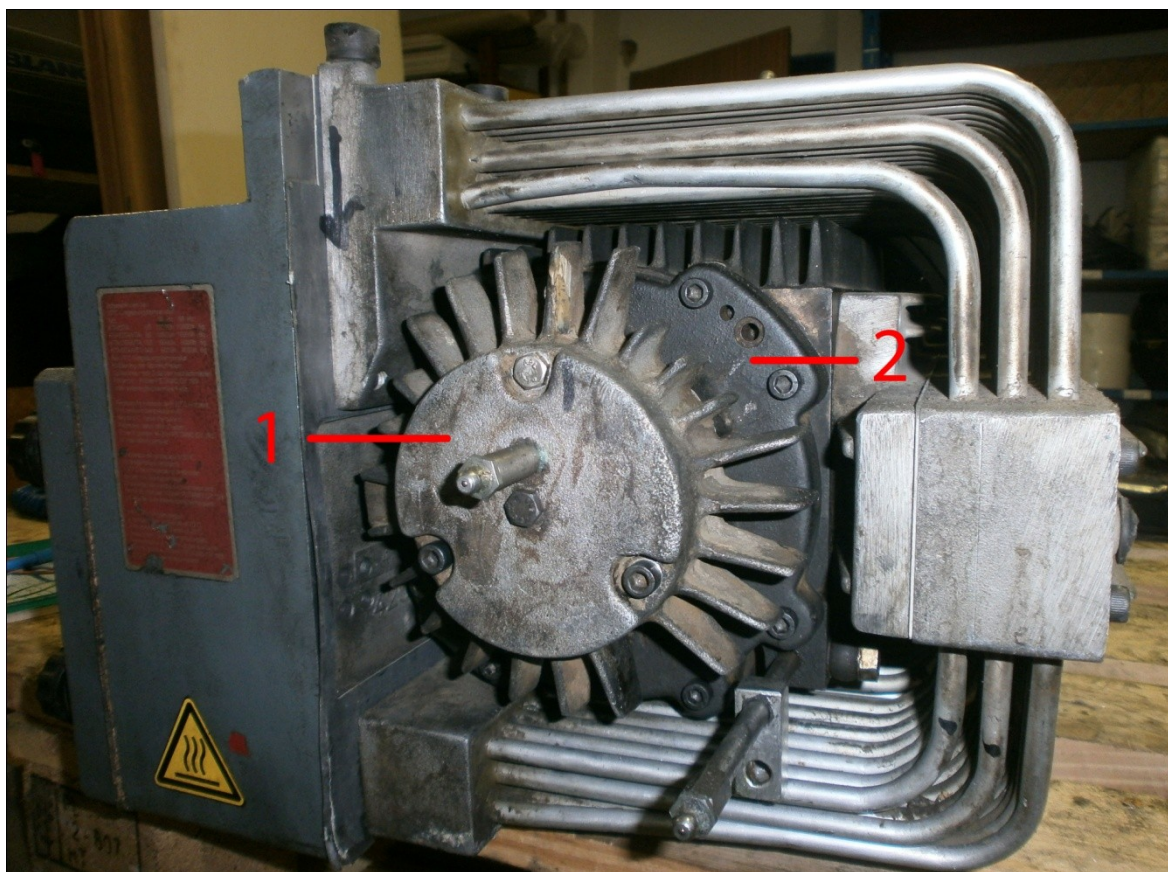
Výhody maziva Total ALTIS MV 2

- Dlouhé přemazávací intervaly.
- Dobrá stabilita při provozu a při skladování.
- Snadná čerpatelnost a plnění mazivem.
- Má skvělou přilnavost ke kovu.
- Skvělé antikorozi vlastnosti.
- Vynikající tepelná stabilita spojená s výbornými reversními schopnostmi. [13]

Tab. 3 Vlastnosti maziva Total ALTIS MV 2 [13]

Typ maziva	Plastické mazivo – mazací tuk
SPEC. MEZINÁRODNÍ	ISO 6743-9
ZPEVŇOVADLO	Polymočovina
BARVA	Kobaltová zelená
ROZSAH PRAC. TEPLOT (°C)	od -25 do +160
BOD SKAPNUTÍ (°C)	>240
PENETRACE PŘI 25°C (0,1 mm)	265 - 295
KIN.VISKOZITA ZÁKL.OLEJE PŘI 40°C (mm ² · s ⁻¹)	160
VZHLED (vizuálně)	jemný, máslovitý

Při provozu běžných grafitových vývěv dosahují teploty na ložiskách přibližně 80-90°C, takže mazivo je více než vhodné. Pro přístup k rotoru, bylo třeba sundat kryt ložiska a kryt obalu.



Obr. 18 Kryt ložiska a kryt obalu

1 – Kryt ložiska, 2 – Kryt obalu

Pod krytem ložiska se nacházelo jednořadé válečkové ložisko FAG NU 205 E.

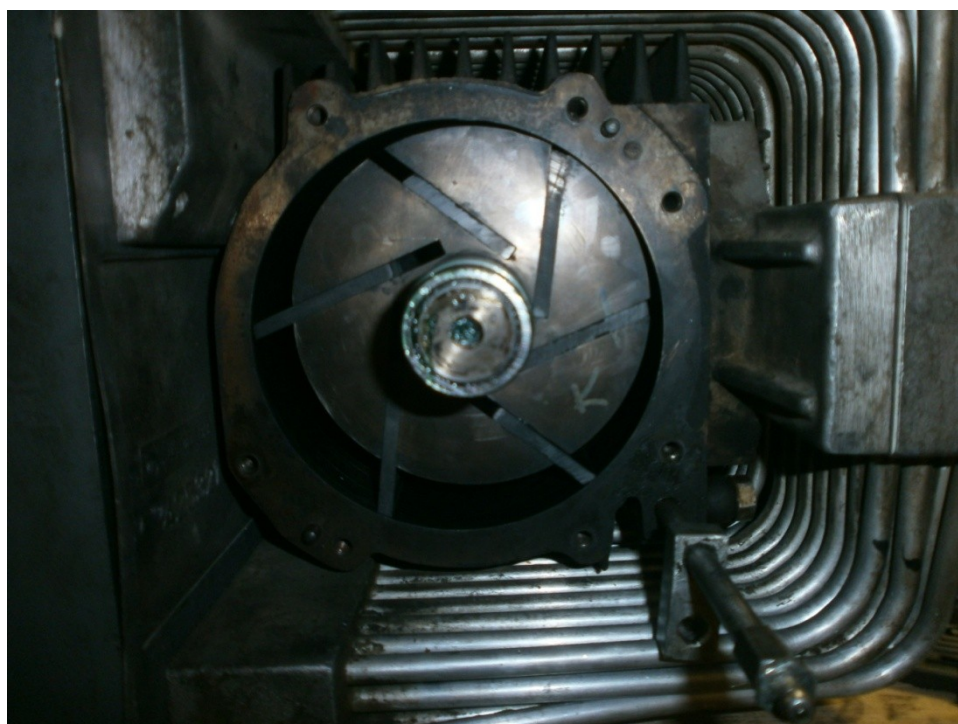
Základní rozměry ložiska FAG NU 205 E:

- Vnitřní průměr ložiska $d = 25$ mm
- Vnější průměr ložiska $D = 52$ mm
- Tloušťka ložiska $B = 15$ mm [14]



Obr. 19 Ložisko FAG NU 205 E

Vizuálně vypadalo ložisko v pořádku, nebylo vidět žádné poškození. Pod krytem obalu se už nacházel rotor, do kterého se umísťovaly uhlíkové lamely a prováděla se potřebná měření. Před každým dalším měřením bylo třeba zase zpátky nasadit oba kryty.



Obr. 20 Rotor vývěvy

Na obr. 20 lze vidět rotor vývěvy s grafitovými lamelami, také je zde vyznačen směr otáčení. Ve vývěvě byly nainstalovány filtry MANN FILTER C1112/2 (u sání) a MANN FILTER C 718 (A) (u výtlaku). Filtry vypadaly v pořádku, nebylo třeba je vyměňovat.



Obr. 21 Vzduchové filtry

Pro kontrolu spojky bylo třeba odšroubovat motor, vývěvu s motorem spojuje čepová spojka s pryžovým elementem.



Obr. 22 Spojka

3.3 Prováděná měření

Prováděla se čtyři měření, pokaždé se snímala rychlost, zrychlení a obálková metoda ve vertikálním směru. Taktéž se pomocí tlakoměru měřil podtlak u sacího otvoru. Měřicí místa jsou vyobrazena na obr. 16. ESOS Ostrava mi dal za úkol posoudit mezní hodnoty RMS rychlosti vibrací u vývěv podle normy ČSN 10 816 - 1, proto volím toto rozmezí mezních hodnot RMS rychlosti vibrací.

Tab. 4 Mezní hodnoty RMS rychlosti vibrací dle normy ČSN 10 816 – 1
v pásmu 1 - 1000 Hz

Mezní hodnoty RMS rychlosti vibrací [mm/s]			
Norma ČSN 10 816 - 1	A/B	B/C	C/D
Třída I: do 15 kW	0,71	1,8	4,5
Pásmo A	Vibrace nových přejímaných strojů		
Pásmo B	Pásmo vibrací pro neomezenou dobu provozu strojů		
Pásmo C	Pásmo vibrací považováno za neuspokojivé pro dlouhodobý provoz		
Pásmo D	Pásmo vibrací považováno za nebezpečné a můžou způsobit poškození stroje		

Tabulku pro posuzování mezních hodnot zrychlení volím podle měření s šesti lopatkami, měření bez lopatek a samostatného měření elektromotoru.

Tab. 5 Zvolené mezní hodnoty RMS zrychlení vibrací v pásmu 1 - 5000 Hz a pro mezní hodnoty RMS zrychlení po obálkové metodě v pásmu 1 - 1000 Hz

Rozhraní pásem	Efektivní hodnota zrychlení vibrací [g]
A/B	0,5
B/C	2,5
C/D	4

Dále jsem si zjistil poruchové frekvence ložisek vývěvy, jsou vypsány v tab. 6.

Tab. 6 Poruchové frekvence ložisek

Typ ložiska	FAG NU 205 E	FAG 3206
	Poruchové frekvence [Hz]	
FTF	0,407	0,417
BSF	2,878	2,552
BPFO	4,969	5,889
BFI	6,994	8,075

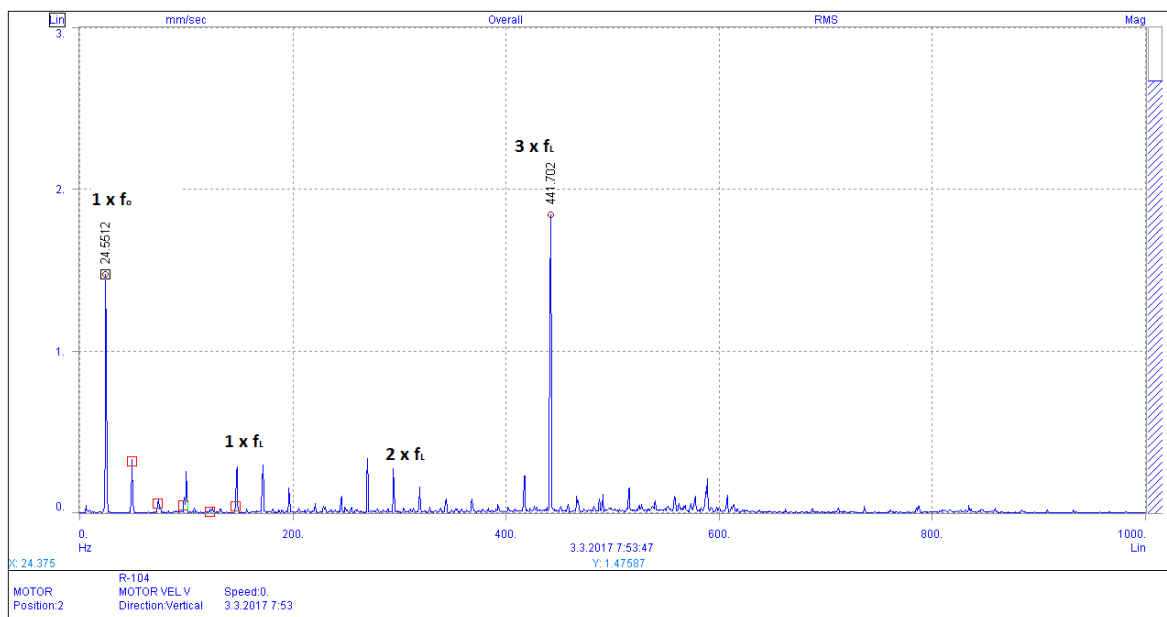
3.3.1 Měření s šesti lopatkami na hranici životnosti

Při tomhle měření bylo v rotoru umístěno šest lopatek, které byly provozně opotřebované a již byly vyřazeny z provozu, ale ještě by nějakou dobu zvládly ve stroji účinně fungovat.

Tab. 7 Efektivní hodnoty při měření se šesti lopatkami

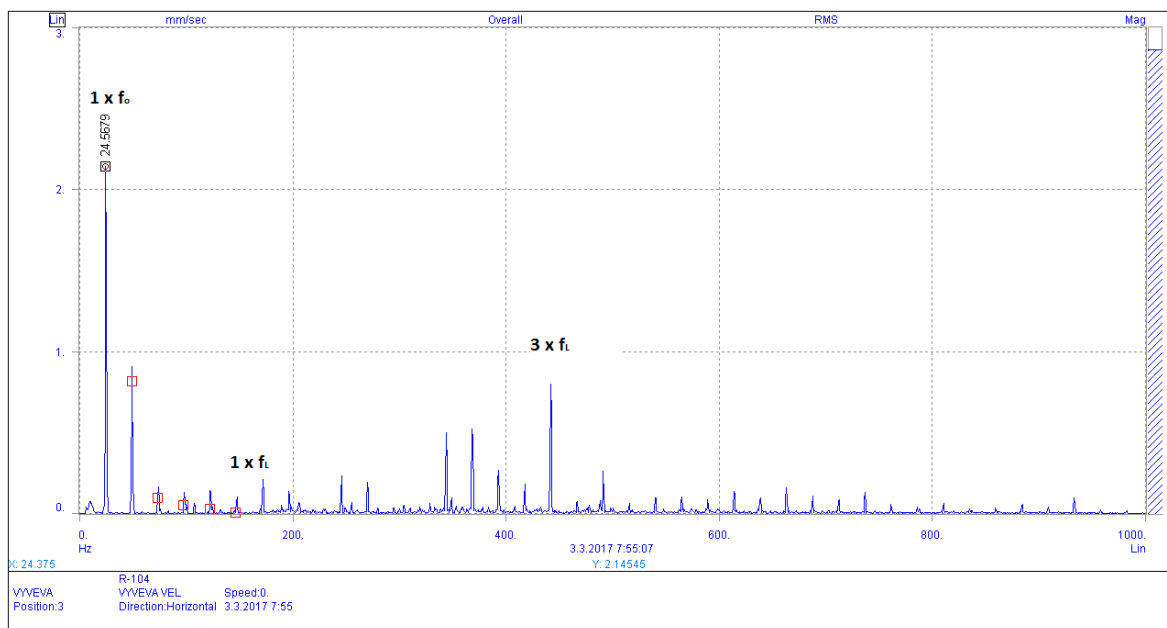
Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 1 – 1000 Hz (v_{RMS}) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 1 – 5000 Hz (a_{RMS}) efektivní hodnoty zrychlení vibrací po obáلكové metodě v pásmu 1 – 1000 Hz					
Popis		Motor		Vývěva	
Měřicí místo		1	2	3	4
Veličina	Směr				
Max. ot/min		1440		1440	
v_{RMS} [mm/s]	V	3,1	3,8	4,3	5,1
a_{RMS} [g]	V	0,9	1,2	2,6	3,7
Obáلكová metoda [g]	V	0,7	0,9	2,9	5,2

Hodnota podtlaku byla naměřená $p = -0,5$ bar (-50 000 Pa), což odpovídá provoznímu podtlaku uvedenému na štítku.



Obr. 23 Frekvenční spektrum efektivní hodnoty rychlosti vibrací v měřícím bodě 2, ve vertikálním směru s vyznačením otáčkové složky a špičky na trojnásobku lopatkové frekvence. Měření s šesti lopatkami.

Malé hodnoty za otáčkovou frekvencí jsou způsobené vlivem lopatek. Špička naměřená na frekvenci 441 Hz je trojnásobkem lopatkové frekvence. Tuhle špičku lze nalézt i ve frekvenčním spektru efektivní hodnoty rychlosti vibrací v měřícím bodě tři.



Obr. 24 Frekvenční spektrum efektivní hodnoty rychlosti vibrací v měřícím bodě 3, ve vertikálním směru s vyznačením otáčkové složky a špičky na trojnásobku lopatkové frekvence. Měření s šesti lopatkami.

3.3.2 Měření s třemi velmi opotřebovanými lopatkami

Při tomhle měření byly v rotoru umístěny tři velmi opotřebované lopatky, které byly opotřebovány tak moc, že by jejich použití v provozu bylo nepřijatelné. Tři další místa v rotoru byla prázdná. Jedna z lopatek, použitých při tomhle měření, je vyfocena na obr. 25.



Obr. 25 Velmi poškozená lopatka

Tab. 8 Efektivní hodnoty při měření se třemi velmi opotřebovanými lopatkami

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 1 – 1000 Hz (v_{RMS}) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 1 – 5000 Hz (a_{RMS}) efektivní hodnoty zrychlení vibrací po obálkové metodě v pásmu 1 – 1000 Hz					
Popis		Motor		Vývěva	
Měřicí místo		1	2	3	4
Veličina	Směr				
Max. ot/min		1440		1440	
v_{RMS} [mm/s]	V	2,4	2,4	2,6	3,9
a_{RMS} [g]	V	0,6	0,6	0,5	1,0
Obálková metoda [g]	V	0,4	0,5	0,4	1,3

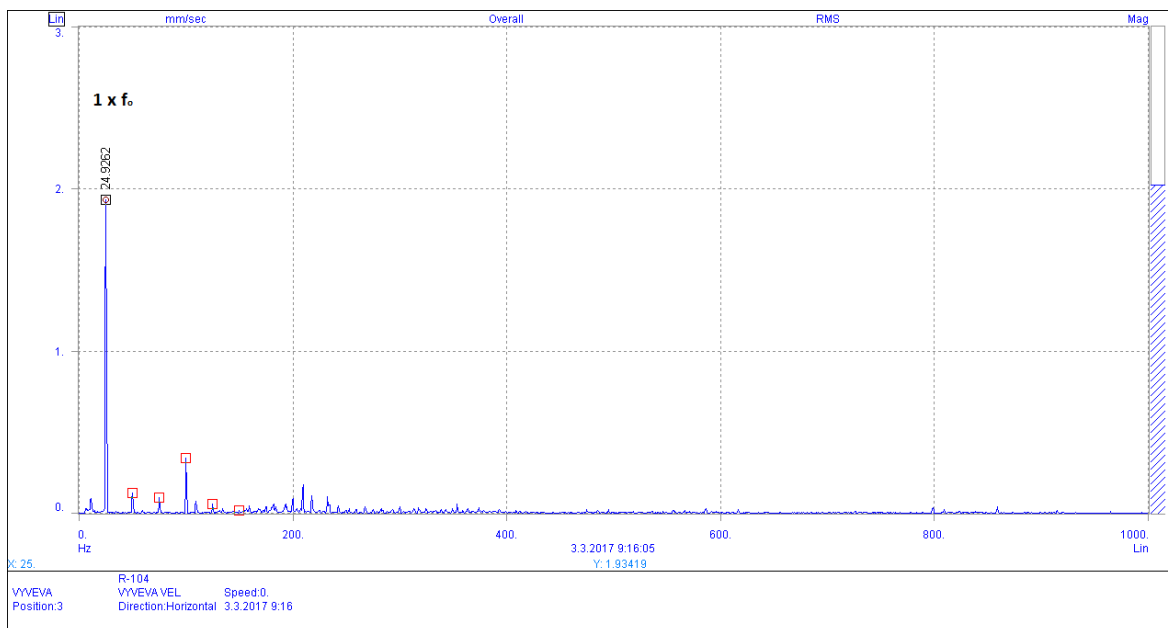
Dobré efektivní hodnoty, které byly naměřené při tomto měření, jsou pravděpodobně způsobené zaseknutím jedné nebo více lopatek v drážce. Lopatky se pravděpodobně vůbec nevysunuly. Při vypnutí stroje bylo slyšet, jak se lopatky z drážek uvolnily. Ve frekvenčních spektrech se občas objevuje šum, který je způsobený občasným vysunutím lopatky. Vývěva při měření byla relativně tichá a nenasávala žádný vzduch, naměřený podtlak na sání byl $p = 0$ bar.

3.3.3 Měření vývěvy bez lopatek

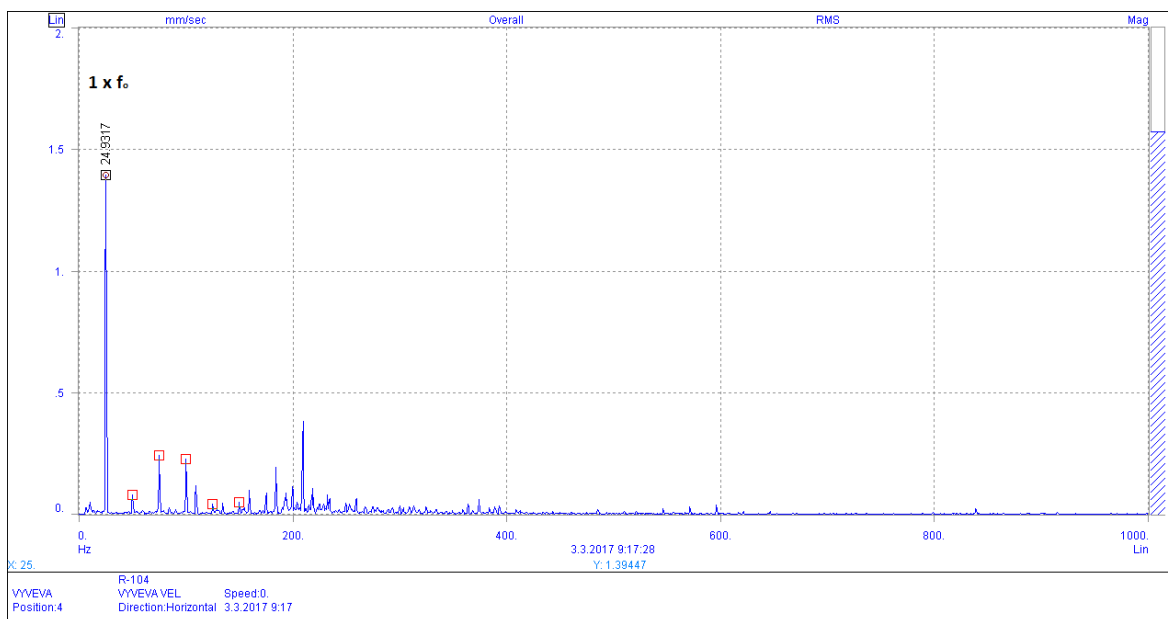
Při tomhle měření se snímala pouze vývěva. Tím, že se měřilo bez lopatek, byl z frekvenčního spektra vyloučen jejich vliv na ložiska vývěvy. Tohle měření je vhodné, pokud chceme zkontrolovat stav ložisek.

Tab. 9 Efektivní hodnoty při měření bez lopatek

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 1 – 1000 Hz (v_{RMS}) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 1 – 5000 Hz (a_{RMS}) efektivní hodnoty zrychlení vibrací po obáلكové metodě v pásmu 1 – 1000 Hz			
Popis		Vývěva	
Měřicí místo		3	4
Veličina	Směr		
Max. ot/min		1440	
v_{RMS} [mm/s]	V	2,9	2,3
a_{RMS} [g]	V	0,3	0,3
Obáلكová metoda [g]	V	0,3	0,2



Obr. 26 Frekvenční spektrum efektivní hodnoty rychlosti vibrací v měřicím bodě 3, ve vertikálním směru s vyznačením otáčkové složky. Měření bez lopatek.

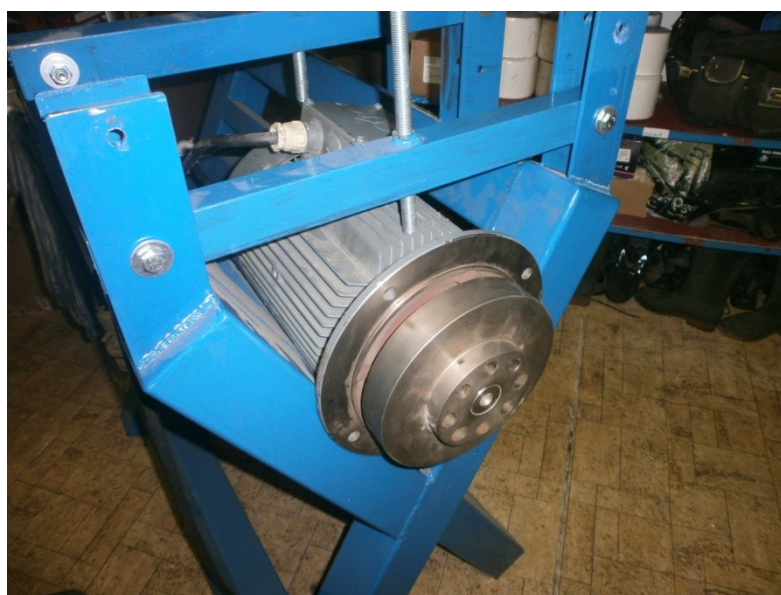


Obr. 27 Frekvenční spektrum efektivní hodnoty rychlosti vibrací v měřícím bodě 4, ve vertikálním směru s vyznačením otáčkové složky. Měření bez lopatek.

Na obr. 26 a 27 lze vidět, že kromě špičky v otáčkové frekvenci se ve frekvenčním spektru neobjevují žádné jiné vysoké vibrace.

3.3.4 Samostatné měření elektromotoru

Před tímhle měřením bylo třeba odpojit motor od vývěvy. Následně byl umístěn do speciálního stojanu, ve kterém měření probíhalo.

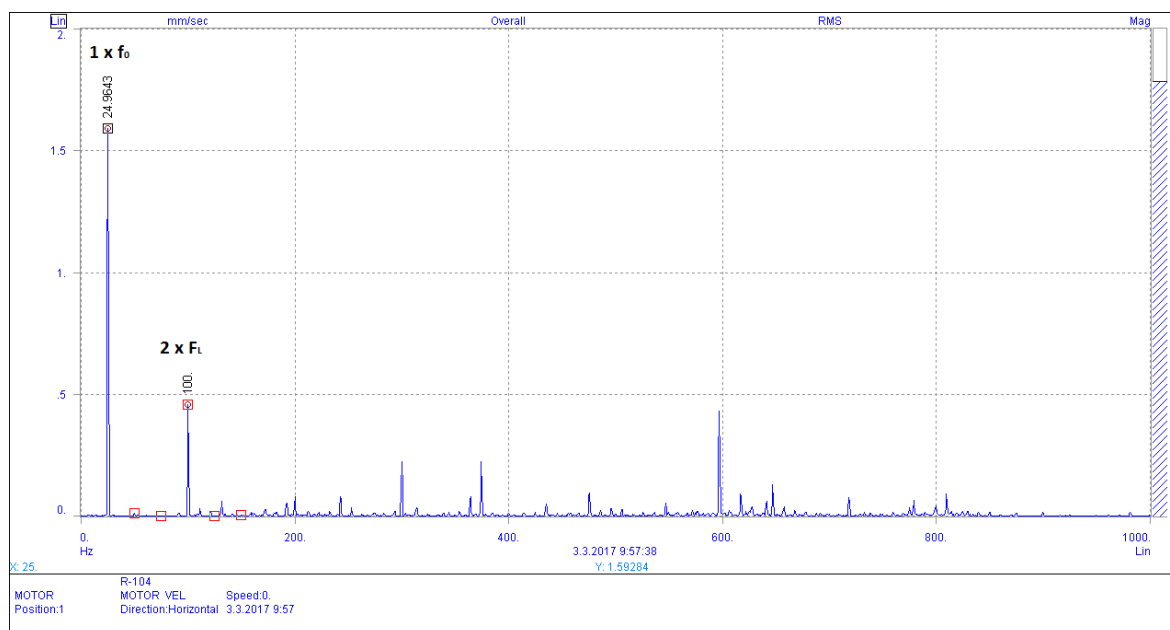


Obr. 28 Elektromotor ve stojanu

Samostatné měření elektromotoru je vhodné pro zkontrolování jeho stavu. Ve frekvenčních spektrech se nám neobjevuje vliv vývěvy a spojky, což znamená, že opotřebení elektromotoru a jeho ložisek je ve spektrech více viditelné.

Tab. 9 Efektivní hodnoty při samostatném měření elektromotoru

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 1 – 1000 Hz (v_{RMS}) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 1 – 5000 Hz (a_{RMS}) efektivní hodnoty zrychlení vibrací po obáلكové metodě v pásmu 1 – 1000 Hz			
Popis		Motor	
Měřicí místo		1	2
Veličina	Směr		
Max. ot/min		1440	
v_{RMS} [mm/s]	V	2,6	1,6
a_{RMS} [g]	V	0,5	0,9
Obáلكová metoda [g]	V	0,4	0,8

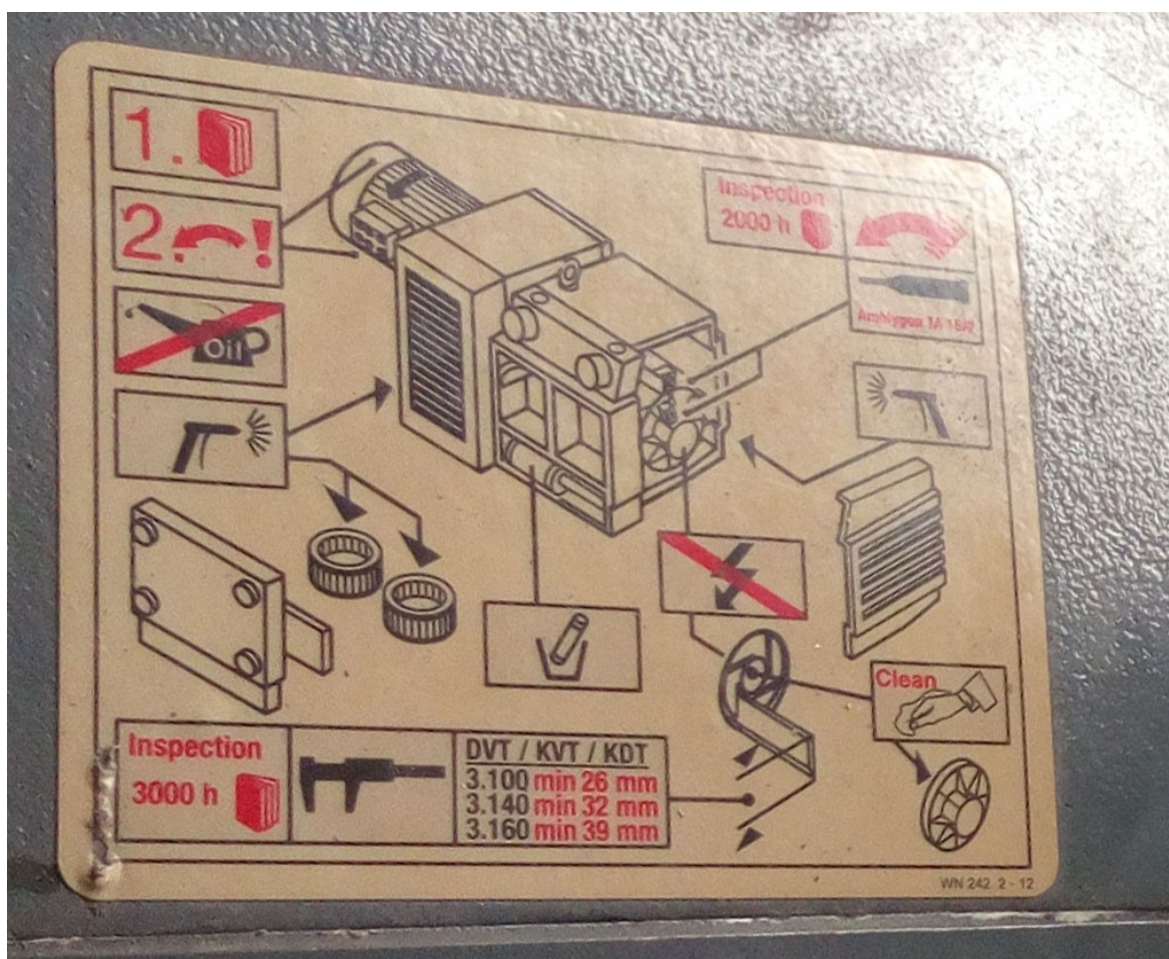


Obr. 29 Frekvenční spektrum efektivní hodnoty rychlosti vibrací v měřícím bodě 1, ve vertikálním směru s vyznačením otáčkové složky a špičky na dvojnásobku síťové frekvence. Samostatné měření elektromotoru.

Ve spektru lze vidět špičku na frekvenci 100 Hz, což je dvojnásobek síťové frekvence. Jedná se o nesymetrii elektromagnetického pole u střídavého asynchronního motoru. Tato nesymetrie bývá způsobená nestejnou mezerou mezi rotorem a statorem, nesymetrickým elektromagnetickým polem nebo nesymetrií rotoru vůči statoru. Zatím velikost vibrací na této frekvenci není kritická, ale doporučoval bych, aby tomuto jevu věnovala údržba zvýšenou pozornost.

4 Doporučení k možnostem oprav a provozu

K zajištění správné funkce zařízení a pro zvýšení životnosti a provozní spolehlivosti je třeba provádět vhodnou údržbu ve stanovených intervalech. Doporučuji respektovat pokyny výrobce, který uvádí u každého zařízení, jaká údržba a v jakých intervalech se má provádět. Kombinací vhodně aplikovaných metod technické diagnostiky a prováděním správné údržby lze docílit nejlepšího údržbářského systému. Důležité je sledování inspekčního doporučení, které je napsané na štítku vývěv. Je na něm uvedeno, po kolika provozních hodinách se má jaká část vývěvy kontrolovat.



Obr. 30 Štítek vývěvy

Doporučil bych tiskařskému podniku, který jsem mohl díky firmě ESOS Ostrava navštívit, aby do svých strojů zařadil vývěvy jen od jednoho výrobce, protože skladování náhradních dílů bude přehlednější a pohodlnější pro údržbářský tým.

Norma ČSN ISO 10 816 - 1, podle které jsem měl posuzovat mezní hodnoty RMS rychlosti vibrací se mi zdá pro měřenou vývěvu velmi přísná. Je pro zařízení o výkonu do

15 kW, ale měřená vývěva má provozní výkon 5,50 kW. Bylo by tedy vhodné, na základě dlouhodobého monitorování a měření, vytvořit tabulky maximálně efektivních hodnot rychlosti vibrací, které by byly pro vývěvy používané tiskařským podnikem vhodnější.

Také bych doporučoval častější čištění a výměnu filtrů. Pokud se kontrola filtrů zanedbává, do komor vývěvy se dostane více částic z okolí, čímž se lopatky vývěvy rychleji opotřebovávají. Při úbytku materiálu z lopatek dochází k nevyváženosti rotoru, která se pak projeví zvýšením vibrací na ložiskách. Při obrovském opotřebením lopatek dokonce vývěva může přestat fungovat.

Závěr

Pro měření vlivu poškození lopatek na provoz a diagnostiku vývěvy byla použita grafitová suchoběžná vývěva. Je oprávněné u tohoto druhu vývěv tuhle problematiku řešit, neboť jejich lopatky jsou vyrobené z grafitu, který je na opotřebení náchylný. Opotřebení lopatek zvyšuje vibrace na ložiskách, což snižuje jejich životnost. Při prováděných měřeních nebyla nalezena žádná velká vada na ložiskách, což bylo způsobené tím, že vývěva byla krátkou dobu po servisní prohlídce.

Při měření s šesti lopatkami byly naměřeny vysoké hodnoty vibrací na trojnásobku lopatkové frekvence. Při dlouhodobém provozu vývěvy, bez řešení těchto vibrací, by se určitě vibrace na stroji podepsaly a snížila by se jeho životnost a provozní spolehlivost.

Měření vývěvy s třemi velmi opotřebovanými lopatkami dopadlo tak, že lopatky se ve vývěvě zasekly a naměřené vibrace byly nízké. Naměřené hodnoty byly podobné hodnotám měření vývěvy bez lopatek.

Měřením vývěvy bez lopatek a samostatným měřením elektromotoru byl ještě pro jistotu zkontrolován stav ložisek a celého zařízení. Ve frekvenčních spektrech nebyla nalezena žádná vysoká hodnota vibrací, pouze u samostatného měření elektromotoru jsem narazil na nesymetrii elektromagnetického pole.

Doporučoval bych více dbát na pokyny výrobce, jenž udává, v jakých intervalech se má jaká část vývěvy udržovat. Dále bych do provozu zařadil vývěvy pouze od jednoho výrobce, údržba pak bude jednodušší a přehlednější.

Použitá literatura

- [1] HRBEK, Jiří. *Vakuová technika*. Praha: České vysoké učení technické, 1981.
- [2] HRBEK, Jiří. *Vakuová a ultravakuová technika*. Praha: České vysoké učení technické, 1984.
- [3] GROSZKOWSKI, Janusz. *Technika vysokého vakua*. Přeložil Libor PÁTÝ. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [4] *Vývěvy. Vakuum Bohemia* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.vakuum-bohemia.cz/vyvevy>
- [5] *Katalog Vakuum Bohemia* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: http://www.vakuum-bohemia.cz/katalog_produkty/Suchob%C4%9B%C5%BEn%C3%A9_v%C3%BDv%C4%9Bvy_NERO_CZ.pdf
- [6] *Zobáková vývěva* [online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.vacio.co/home.html>
- [7] *Rotační olejová vývěva* [online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/pfeiffer-vacuum/product-14656-468911.html>
- [8] *Kryogenní technika*[online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/vak/VAK/KryoZychacek.pdf>
- [9] *Iontové vývěvy* [online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/vak/CERPANI/IONT_VYV_Chvila.pdf
- [10] *ESOS Ostrava* [online]. [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: http://www.diagnostikastroju.cz/o_spolecnosti.php
- [11] *Rapida 142* [online]. [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: http://www2.kba.com/uploads/RTEmagicC_26ce9372-7d94-4bb4-87e4-46e95c2a5d0c-weblarge.jpg.jpg

[12] *Originální provozní návod: KTA 140/3* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: http://www.gd-elmoietschle.com/uploadedfiles/elmoietschle/downloads/content_v/kta/ba450-cs.pdf

[13] *Total ALTIS MV2* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.oleje-total.cz/prumyslove-oleje-a-maziva/plasticka-maziva/univerzalni-automobilova-plasticka-maziva/trida-nlgi-2/total-altis-mv2-0-4kg>

[14] *FAG NU 205 E* [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: http://www.tengdabearings.com/Products/Cylindrical_Roller_Bearings/FAG_NU_205_E_205064.html