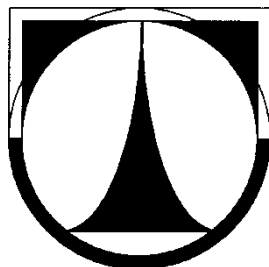


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



**SNÍŽENÍ VIBRACÍ A HLUK ZPĚTNÉ RYCHLOSTI
PŘEVODOVKY MQ 100**

**VIBRATION REDUCING AND GEARBOX MQ 100 BACKWARD
SPEED NOISE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Petr Brož

Květen 2015

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Obor N2301

Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření

Kolové dopravní a manipulační stroje

**SNÍŽENÍ VIBRACÍ A HLUK ZPĚTNÉ RYCHLOSTI
PŘEVODOVKY MQ 100**

**VIBRATION REDUCING AND GEARBOX MQ 100 BACKWARD
SPEED NOISE**

Diplomová práce

KVM – DP

Bc. Petr Brož

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Elias Tomeh

Konzultant diplomové práce: Ing. Miroslav Hejcman

Počet stran: 62

Počet obrázků: 38

Počet tabulek: 22

Počet příloh: 7

Květen 2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Brož**
Osobní číslo: **S10000817**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**
Název tématu: **Snížení vibrací a hluku zpětné rychlosti převodovky MQ 100**
Zadávající katedra: **Katedra vozidel a motorů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Studijní a experimentální práce zaměřené na posouzení vlivu technologie obrábění zpětné rychlosti na hluk a vibrace převodovky MQ 100.

1. Popište aktuální stav převodovky MQ 100 a používanou metodu pro měření vibrací a hluku včetně popisu zabíhacího stavu pro zkoušky převodovek MQ 100 a měření hlučnosti.
2. Proveďte rozbor dynamických poměrů náhonu stroje pro opracování kola hřídele zpětné rychlosti a vypočítejte jeho hlavní zdroje buzení. Posuďte konstrukční uložení náhonu stroje, popište vliv vibrací na jakost výroby.
3. Popište způsob měření parametrů zubů kola zpětné rychlosti, ozubení hřídele zpátečky, vyhodnocení a porovnání naměřených hodnot zpětné rychlosti při různých způsobech obrábění.
4. Analyzujte provedená měření, projev výrobních závad zpětné rychlosti ve vibračních spektrch převodovky a navrhněte jejich odstranění z výroby, za účelem snížení hlučnosti převodovek. Vyhodnoťte a porovnejte výsledky měření hlučnosti zpětné rychlosti na zkušebním stavu ve firmě Škoda Auto a.s., případně na dalším zkušebním stavu.
5. Během řešení diplomové práce spolupracujte se společností Škoda Auto a.s..

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: cca 50 stran textu

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] TOMEH, Elias. Diagnostic Methodology of Rolling Element and Journal Bearings. /Skripta TU v Liberci/, TUL Liberec, 2007.
- [2] TOMEH, Elias. Hodnocení hlučnosti automobilových převodovek měřeními vibrací. In DIAGO 2003. ISBN 80-248-0210-4.
- [3] TOMEH, Elias. Identifying Motor Vehicles Mechanical Defects by Vibrodiagnostics Methods. In Journal of Middle European Construction and Design of Cars. Number 1, January 2003. ISSN 1214 0821.
- [4] TOMEH, Elias. Identify the Sources of Vibration and Noise on Cars Gearbox by Spectral Analysis. In 54th International Conference of Machine Design Departments. September 2013. ISBN: 978-80-7372-986-8.
- [5] JANOUSEK, Ivo. Technická diagnostika. Praha 1988.
- [6] NAVRÁTIL, M. - PLUHAŘ, O. Měření a analýza mechanického kmitání. Metody a přístroje. Praha, 1986.
- [7] Jens Trampe BROCH. Mechanical vibration and shock measurements. Brüel a Kjaer, Denmark, 1984.
- [8] RANDALL, R. B. Frequency analysis. Brüel a Kjaer, Naerum, 1987.
- [9] Brüel a Kjaer. Vibration Monitoring of Machines. Denmark 1987.
- [10] Metodiky měření a manuály přístrojů.


Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Elias Tomeh
Katedra vozidel a motorů

Datum zadání diplomové práce: 6. března 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 6. června 2016


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 6. března 2015

SNÍŽENÍ VIBRACÍ A HLUK ZPĚTNÉ RYCHLOSTI PŘEVODOVKY MQ 100

Anotace

Studijní a experimentální práce zaměřená na posouzení snížení výsledné hlučnosti zpětné rychlosti převodovky MQ 100 vlivem různého způsobu opracování ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele, výrobu a měření jednotlivých součástí zpětné rychlosti. Práce se také zabývá měřeními spekter vibrací jednotlivých vřeten obráběcích strojů určených k obrábění ozubení zpětného kola a ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele, včetně rozboru dynamických poměrů náhonů strojů a výpočtem hlavních zdrojů buzení. Byly vypočteny frekvence jednotlivých hřídelů, frekvence ložisek na hnacím hřídeli a na ložisku hřídele zpětné rychlosti. Vyhodnocení výsledků měření ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele provedeno pro oba způsoby obrábění. Následně byly porovnány výsledky měření hlučnosti jak ze spekter vibrací, tak na zabíhacím stavu převodovky. Dále byla provedena konstrukční úprava rozměru Mdk pro ozubení zpětné rychlosti hřídele a ozubení vloženého kola z důvodu snížení zubové vůle ozubení.

Klíčová slova: vibrace, hluk, ozubení, hřídel, převodovka, frézování, honování

VIBRATION REDUCING AND GEARBOX MQ 100 BACKWARD SPEED NOISE

Annotation

Study and experimental work focused on gearbox MQ 100 resultant backward speed noise decrease assessment effected by different processing way of drive shaft gearbox gearing. The work is also focused on single backward motion parts production and measurement. The single spindle of machining tools vibration spread measurement is also followed up. The tools used to gearing machining of backward wheel and backward drive shaft. Followed by tools dynamic drive ratio analysis and main source awakening calculation. Single drive shaft, drive shaft bearing and gearbox drive shaft bearing frequency has been calculated. Drive shaft gearbox gearing measurement outcomes evaluation performed for both working ways. Noise measurement outcomes for both vibration spread and gearbox run-in status were compared. At last the construction adjustment Mdk dimension for drive shaft gearbox gearing and for embedded wheel gearing has been performed due to gear backlash gearing reducing.

Key words: vibration, noise, gering, pinion, gearbox, milling, honing

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Dokončeno : 05/2015

Archivní označení zprávy:

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 21.5.2015

Podpis BWS

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především svému vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Eliasu Tomehovi za odborné vedení, pomoc při měřeních, vyhodnocení zpracování práce a poskytnutí cenných rad. Dále bych také poděkoval konzultantovi diplomové práce Ing. Miroslavu Hejcmanovi a pracovníkům oddělení GQH, VKT za pomoc při organizaci jednotlivých měření, poskytnutí užitečných materiálů a zkušeností z oblasti výroby převodovek.

Seznam symbolů a jednotek:

f_R	rotorová frekvence	[Hz]
f_z	zubová frekvence	[Hz]
f_{zs}	zubová frekvence stálého převodu	[Hz]
f_{4H}	čtvrtá harmonická frekvence	[Hz]
f_{Lk}	frekvence klece ložiska	[Hz]
f_{Li}	frekvence ložiska vnitřního kroužku	[Hz]
f_{Lo}	frekvence ložiska vnějšího kroužku	[Hz]
f_{Lv}	frekvence ložiska valivých těles	[Hz]
d_o	průměr valivých tělísek	[mm]
D_s	střední průměr ložiska	[mm]
α	stykový úhel	[°]
Z	počet valivých tělísek	[-]
a_o	amplituda zrychlení	[mms ⁻² = 10xg]
$a_o f_z$	amplituda zubové frekvence	[mms ⁻²]
$a_o f_{zs}$	amplituda zubové frekvence stálého převodu	[mms ⁻²]
a_{ef}	celková efektivní hodnota zrychlení vibrací	[Gs]
v_{ef}	celková efektivní hodnota rychlosti vibrací	[mms ⁻¹]
v_o	amplituda rychlosti	[mms ⁻¹]
ε_α	součinitel délky trvání záběru	[-]
f_{pt}	úchylka obvodových roztečí	[μm]
F_r	obvodové házení ozubení	[μm]
ff_α	tvárová úchylka profilu	[μm]
C_α	soudek profilu	[μm]
RPM, n	otáčky	[ot/min]
M_{dk}	průměrná hodnota rozměru přes kuličky	[mm]
d_k	průměr kuličky	[mm]
d_s	průměr sednutí kuličky	[mm]
R_z	drsnost povrchu	[μm]
QAE, QAB	označení převodovek	
FFT	rychlá Fourierova transformace	
SK1	synchronní kanál vstupního hřídele převodovky	
SK2	synchronní kanál pastorku převodovky	

SK3	synchronní kanál klece diferenciálu
OK	dobrá převodovka, díl
NOK	chybná převodovka, díl
C1, C2	elektrovřetenena obrobku unášecí
E1	elektrovřeteneno pro frézování nahrubo
E2	elektrovřeteneno pro sražení otřepů
E3	elektrovřeteneno pro frézování načisto
E4, E5	elektrovřetenena pro špičkování
z I _i	počet zubů vstupního hřídele rychlostních stupňů
z II _i	počet zubů výstupního hřídele rychlostních stupňů
z III _i	počet zubů hřídele diferenciálu

Obsah

1	Úvod	10
2	Převodovka MQ 100.....	12
2.1	Vliv hluku automobilových převodovek	14
2.2	Obecně hluk, zvuk, vibrace	14
2.3	Převodovky osobních automobilů	14
3	Popis zabíhacího stavu převodovek MQ 100	16
3.1	Uspořádání a druhy provozu zkušební stanice	16
3.2	Průběh zkoušky převodovky v zabíhací stanici.....	18
3.3	Metoda měření vibrací a hluku na zkušební stanici	19
4	Výroba a měření ozubení převodovky MQ 100	22
4.1	Postup výroby kola zpětné rychlosti.....	22
4.2	Popis výroby hnacího hřídele.....	23
4.3	Popis výroby ozubení kola zpětné rychlosti na stroji PRÄWEMA	24
4.4	Popis výroby ozubení hnacího hřídele na stroji GLEASON	25
4.5	Popis výroby ozubení hnacího hřídele na stroji PRÄWEMA	26
4.6	Kontrola ozubení zp. kola a hnacího hřídele převodovky MQ 100.....	29
4.6.1	Měření ozubení zpětného vloženého kola.....	30
4.6.2	Měření ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele.....	30
4.6.3	Vyhodnocení výsledků měření pro oba způsoby opracování	31
5	Rozbor dynamických poměrů náhonů obráběcích strojů.....	40
5.1	Rozbor dyn. poměrů frézovacího stroje zpětného kola PRÄWEMA.....	40
5.2	Rozbor dyn. poměrů frézovacího stroje ozubení hnací hřídele GLEASON.....	42
5.3	Rozbor dyn. poměrů honovacího stroje ozubení hnací hřídele PRÄWEMA....	43
5.4	Výpočet hlavních zdrojů buzení vibrací.....	43
5.5	Konstrukční uložení náhonů strojů.....	44
5.6	Vliv vibrací na jakost výroby	44
6	Úprava Mdk.....	46
7	Měření a výpočet frekvencí hnacího hřídele.....	48
7.1	Výpočet frekvencí ložisek převodovky MQ 100.....	51
8	Analýza provedených měření	53
9	Závěr	59
	Seznam použité literatury.....	61

1. ÚVOD

Převodovka je součástí hnacího ústrojí vozidla, které je jedním z potencionálních zdrojů hluku vozu. K zjištění mechanických závad ovlivňujících montáž, kvalitu a zároveň celkovou hlučnost kompletu převodovky jsou nástroje jako např. analýza frekvenčních spekter vibrací nebo jiné metody a prostředky měření. Analýza spekter vibrací se provádí s použitím metody frekvenční analýzy a prostředků technické diagnostiky. Použitím těchto metod a prostředků se sleduje vliv ložisek a ozubených soukolí v převodových skříních automobilů. Převodovky MQ 100, jenž se vyrábí v závodě Škoda Auto a. s., jsou kontrolovány na zkušebních stavech vyhodnocujících hluk a úroveň vibrací. Převodovka MQ 100 se v závodě vyrábí od roku 2011. Převodovky jsou vyhodnoceny pomocí dvou průběhů zvukových signálů, hodnotí se řádová spektra z důvodu přesažení hraničních hodnot a v závislosti na otáčkách daného řádu se analyzuje průběh signálu. Hraniční křivky jsou dány pro oba způsoby vyhodnocení a měřené hodnoty nesmí tyto křivky překročit. Ze součástí, které se vyrábí v závodě Škoda Auto a. s., jsou např. ozubená kola, hřídele, skříně převodovky. Další díly jako např. diferenciál, ložiska, řadicí komponenty dodávají externí firmy. V hale M2 se vyrábí ozubená kola, pastorky, hřídele, včetně hnacího hřídele a kola zpětné rychlosti. V hale M6 je pak z dalších součástí prováděna montáž kompletu převodovky.

Tato práce popisuje vibrace a hluk zabudovaného hnacího hřídele v převodovce vlivem různých způsobů obrábění ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele se současně nasazeným dalším opatřením: úpravou rozměrů Mdk z důvodu snížení zubové vůle ozubení (viz kap. 6). Práce se také zabývá výrobou a měřením ozubení jednotlivých komponentů zpětné rychlosti (vloženého kola a zpětné rychlosti hnacího hřídele) a měřením spekter vibrací jednotlivých vřeten obráběcích strojů. Závada převodovky MQ 100 se na zabíhacích stavech hlukově projevuje při zařazených rychlostech 1. - 5. st. jako rachtavý zpětný chod se zvýšenými hodnotami. Rizikem pak je, že za tento zvuk se schovají ostatní možné závady na ozubení (např. poškození zubů), závady ložisek, které díky zvýšené hladině zvuku nelze na zabíhací stanici včas odhalit.

Obrábění ozubení hnacího hřídele je prováděno na frézovacím stroji GLEASON (viz kap. 4.4). Další způsob opracování ozubení hřídele - honování je prováděno na honovacím stroji PRÄWEMA (viz kap. 4.5) po předopracování

(frézováním nahrubo) na stroji GLEASON. Obrábění zpětného kola je prováděno na dvouřetenovém stroji PRÄWEMA (viz kap. 4.3). Frézované ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele bylo nejprve na frézovacím stroji frézováno načisto a v měrovém středisku rozměrově kontrolováno. Poté byl hnací hřídel zastavěn do převodovky typu QAE. Na zabíhací stoličce a pomocí měřicího přístroje – analyzátoru vibrací byla hodnocena hlučnost převodovky s takto opracovaným hřídelem. V dalším kroku následovala výroba honovaného ozubení zpětné rychlosti hřídele, měření, výměna za frézovaný hřídel zástavbou do identické převodovky a další hodnocení hlučnosti převodovky. Vzhledem k tomu, že hlučnost se zlepšila, ale nebyla zcela odstraněna, byla na ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele a ozubení vloženého kola provedena úprava rozměru M_{dk} a provedena opětovná zástavba a hodnocení hlučnosti.

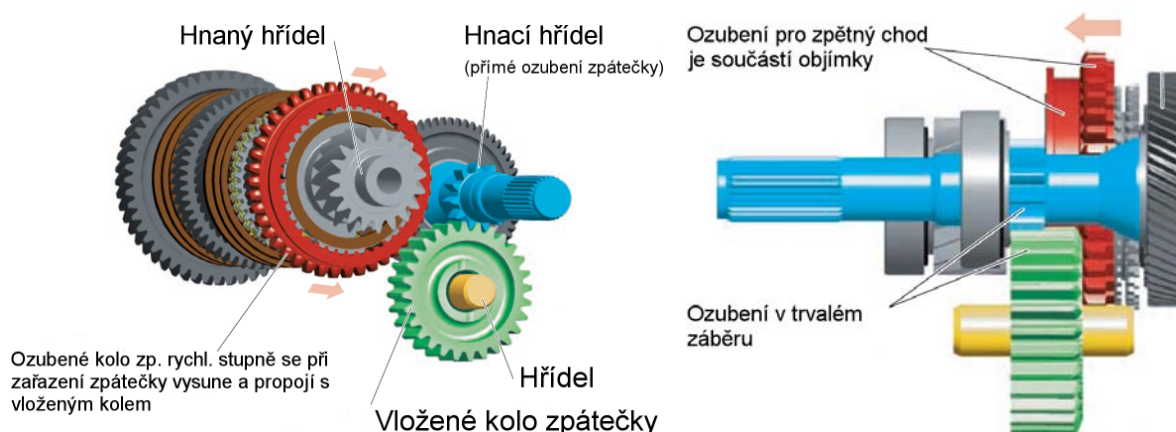
2. PŘEVODOVKA MQ 100

Pětistupňová převodovka je montována do vozů Citigo, Fabie, VW Polo, VW Up a Seat Mii. Jedná se o nejmenší vyráběnou převodovku v koncernu. Při vývoji převodovky byl kladen důraz na kompaktnost, nízkou hmotnost, snadné a přesné řazení. Skříň převodovky je vyrobena z hliníkové slitiny a je složena ze dvou dílů v příčném dělení. Jedná se o mimořádně lehkou převodovku se dvěma hřídeli, které jsou uloženy v kuželíkových ložiskách. Převodová kola dopředných rychlostních stupňů se synchronizací najdeme na hnaném hřídeli. Dopředné rychlostní stupně jsou realizovány koly se šikmým ozubením. Soustava převodových kol zpětného chodu je opatřena kombinací přímého a kónického ozubení. Součástí převodovky je ozubené kolo rozvodovky s diferenciálem. Převodovka se pro současné agregáty 1,0l/44kW a 1,0l/55kW odlišuje ve zpřevodování stálého záběru.

Na hnací hřídel jsou nalisována ozubená kola třetího, čtvrtého a pátého rychlostního stupně a kuželíková ložiska. Soustava hnaného hřídele obsahuje pohyblivá ozubená kola jednotlivých převodů usazená na jehlových ložiskách a příslušné zámkové synchronizace, jejichž středy jsou spojeny s hnaným hřídelem pomocí drážkování. Mechanická pětistupňová převodovka má dva hlavní hřídele a jeden pomocný nepohyblivý hřídel pro přídatné kolo zpětného chodu. Dopředné rychlostní stupně jsou řešeny pomocí dvojic ozubených kol se šikmými zuby. Šikmé zuby dokážou přenášet velké zatížení a mají tišší chod v porovnání s přímým ozubením. Bezproblémové a nehlukné řazení je realizováno pomocí vynucené synchronizace, kterou jsou opatřeny všechny dopředné stupně. Synchronizace je umístěna na hnaném hřídeli. Součástí obrobku samotné hnací hřídele je již ozubení prvního, druhého rychlostního stupně a ozubení zpětného chodu. Ozubená kola třetího, čtvrtého a pátého rychlostního stupně jsou na hřídel nalisována a tak jsou s ním pevně a nepohyblivě spojena. Nalisovaná ozubená kola jsou navíc proti axiálnímu pohybu zajištěna pomocí pojistných kroužků. Hřídel je odlehčen slepou vrtanou dírou ve své ose. Hnaný hřídel je v převodovce usazen s axiální vůlí a je odlehčen otvorem v celé délce osy – hřídel je dutý. Řadicí kola dopředných rychlostních stupňů jsou v trvalém záběru s ozubenými koly na hřídeli hnacím, jsou uložena na jehlových ložiskách a tím oddělena od samotného hnaného hřídele. Kolo zpětné rychlosti na hnaném hřídeli, jako jediné v celé převodovce, není v trvalém záběru s ozubeným soukolím hnacího hřídele. Kola dopředných rychlostních stupňů

jsou v ose hřídele nepohyblivá a k hnanému hřídeli se připojují pomocí synchronních spojek, jejichž přesuvné objímky se axiálně pohybují. Kolo zpětného chodu se společně s přesuvnou objímkou synchronizace pohybuje v ose hřídele (axiálně) [10].

Zpětný rychlostní stupeň je v převodovce realizován soustavou třech ozubených kol s přímými a kónickými zuby. Z ozubení hnacího hřídele je točivý moment přenášen na vložené kolo zpětného chodu. Vložené ozubené kolo je v trvalém záběru s ozubením hnacího hřídele, tedy je na něj neustále přenášena energie motoru. Posledním ozubeným kolem soustavy zpětného chodu je kolo, které přivádí sílu motoru na hnaný hřídel, toto ozubené kolo však není v trvalém záběru s vloženým kolem zpětné rychlosti. Při řazení zpětného chodu se ozubené kolo na hnaném hřídeli posune tak, až se dostane do záběru s vloženým kolem a tím propojí hnací hřídel s hnaným. Zpětný rychlostní stupeň není opatřen synchronizací, ozubené kolo na hnaném hřídeli je součástí přesuvné objímky synchronizace pátého rychlostního stupně, tedy je v trvalém spojení se samotným hnaným hřídelem obr. 5.



Obr. 1 Uspořádání zpětné rychlosti

Šipky v obrázku znázorňují směr řazení zpětné rychlosti, v opačném směru dochází k zařazení 5. rychlostního stupně. Prostřednictvím vloženého ozubeného kola zpětné rychlosti se obrací směr otáčení hnaného hřídele. Vložené ozubené kolo zpětné rychlosti je uloženo přes jehlové ložisko na nepohyblivou hřídel, která je nalisována do skříně převodovky [10].

2.1. Vliv hluku automobilových převodovek

Zvýšená úroveň hluku ve vozidle může negativně působit jak na řidiče, tak na přepravované osoby a zároveň ovlivňuje jejich komunikaci. Dále zatěžuje nervovou soustavu řidiče, zhoršuje pozornost, což má za následek snížení reakcí řidiče na změny v dopravní situaci a ovlivnění bezpečnosti účastníků v silničním provozu. Bezproblémová komunikace mezi cestujícími ve vozidle, kvalitní hudební poslech tvoří atraktivní složku pro možného zájemce o vozidlo. Z těchto důvodů i z pohledu legislativy je pro výrobce vozů důležité konstruovat vozy s nízkou úrovní hluku uvnitř vozu.

2.2. Obecně hluk, zvuk, vibrace

Hluk je zvukem, akustickým signálem, který je nežádoucí. Lékařsky lze považovat hluk za zvuk, který má účinky přímo na správnou činnost sluchového orgánu, nebo prostřednictvím něho v různé intenzitě jinak působí škodlivě na člověka (poškození sluchového aparátu, ale má i vliv na kardiovaskulární a imunitní systém). Zvuk je vjem sluchového orgánu, jehož objektivní příčinou je zvukové (akustické) vlnění [5]. Frekvence tohoto vlnění, které je člověk schopen vnímat, jsou značně individuální a leží v intervalu přibližně 16 Hz až 20 000 Hz. Vibrace je mechanické kmitání pružného prostředí, popř. tělesa. Jednotlivé body tělesa/prostředí kmitají kolem rovnovážné polohy. Vibrace způsobují mechanické síly, které vznikají nedokonalým opracováním částí strojních zařízení. Vlivem těchto nepřesností vznikají dynamické síly způsobené třením a záběrem ozubených kol.

2.3. Převodovky osobních automobilů

Úlohou převodovky je zajistit, aby byla na hnací kola vozidla přenášena vždy potřebná hnací síla. Převodovky slouží ke změně (zpravidla zvětšování) přenášeného momentu, jeho dlouhodobého přerušení (neutrál), i ke změně jeho smyslu (zpětný chod – couvání) [8]. Při rozjíždění je vyžadováno, aby na hnací kola byl přenášen co možná největší hnací moment při současně minimálních otáčkách. Toho se dosahuje pomocí převodu „do pomala“. Pokud je vozidlo uvedeno do pohybu, zvyšuje rychlost – akceleruje. Po dosažení jmenovitých otáček motoru je nutné převod změnit, aby vozidlo mohlo nadále svoji rychlost zvyšovat. Dalším typem jsou automatické převodovky, u kterých jsou skoky mezi jednotlivými rychlostními

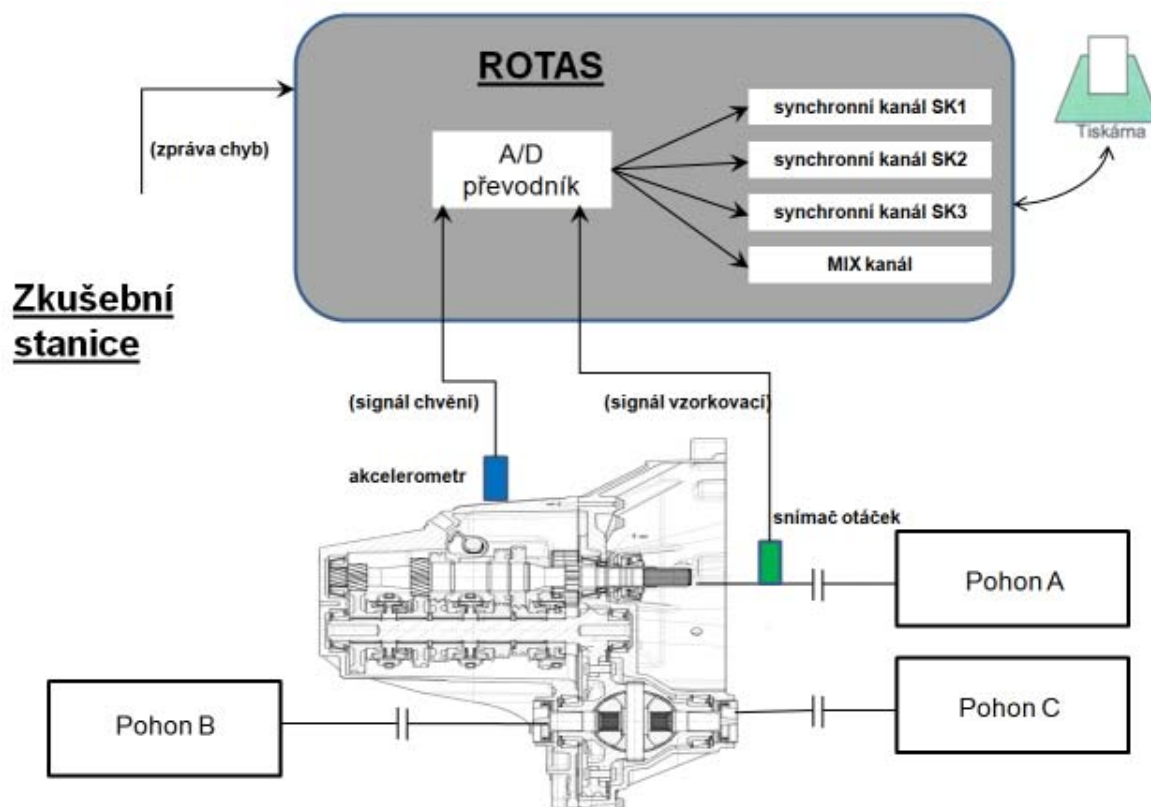
stupni překonávány pomocí hydrodynamického měniče točivého momentu. Automatické převodovky se dnes prosazují nejen ve vozidlech vyšších tříd, ale stále častěji se s nimi lze setkat i ve vozidlech nižších cenových kategorií. Dále se lze setkat s automatizovanými převodovkami, což jsou v podstatě převodovky mechanické s automatickým ovládním spojky a řadicích mechanismů. Zatím je však většina automobilů v Evropě dodávána s mechanickými stupňovými převodovkami. Rostoucí nároky na jízdní komfort, spotřebu paliva, hlučnost a snížení škodlivých emisí výfukových plynů kladou na stupňové převodovky takové nároky, aby byly přizpůsobeny různým motorům a tvořily s nimi jednu konstrukční skupinu. Z tohoto důvodu se stále více do popředí dostávají šesti a sedmistupňové převodovky. Ty umožňují lepší, „jemnější“ odstupňování převodových stupňů s lepším využitím výkonu a průběhu točivého momentu motoru, větší komfort v důsledku klidnějšího chodu, zajišťují nižší spotřebu paliva, větší tažnou sílu při prvním rychlostním stupni a vyšší pohodlí při pomalé jízdě, zároveň však mají vyšší konstrukční nároky, zvyšuje se hmotnost a v některých případech se zhorší účinnost.

3. POPIS ZABÍHACÍHO STAVU PŘEVODOVEK MQ 100

Zkušební stanice (zabíhací stav) převodovek slouží k zkoušení převodovek konstrukčního provedení MQ 100 a MQ 200, pro varianty s různými převody (např. QAE, QAB,...) a možností změn parametrů pro nové typy převodovek, dle příslušných motorizací. Je součástí výrobní linky, kde se kontroluje každá vyrobená převodovka se zaměřením na hlučnost a funkci řazení. Výsledkem zkoušky je vyhodnocení, zda je výrobek OK, či NOK. V případě OK jsou převodovky dále expedovány do pobočných závodů Škoda Auto a. s. a závodů koncernu VW. Pokud je převodovka vyhodnocena jako NOK, je označena lístkem „Díl pozastaven“, z výrobní linky je vyřazena a na repasním pracovišti demontována nebo pozastavena pro pozdější analýzu. Rozebírá se celá převodovka, špatné díly se demontují a dobré jsou dle seznamu opětovně montovaných dílů vráceny do jednotlivých výrobních středisek k posouzení o další montáži. Veškerá data k jednotlivým převodovkám (momenty, den výroby, typ, lisovací síly atd.) jsou z důvodu případných reklamací archivována. Archivace je prováděna zvlášť jak pro montážní data výrobních linek, tak data ze zkoušek hlučnosti. Veškerá data z montáže a hlukové analýzy převodovky jsou archivována. Celková velikost objemu dat odpovídá cca 12GB za týden.

3.1. Uspořádání a druhy provozu zkušební stanice

Skládá se z masivního základního podstavce, na němž je umístěna celá mechanická a elektrická část (pohony s měřicími systémy, čidla a další). Vedle podstavce jsou umístěny oddělené stojany jednotek s ovládacími prvky pro obsluhu, zobrazení a hlukovou analýzu.



Obr. 2 Zjednodušené schéma zkušební stanice

Pro zkoušky převodovek se používají tři hnací (brzdící agregáty). Regulačním zařízením se nastavují požadované provozní podmínky tak, že se dle programů mění počet otáček, kroutící moment a čas záběhu. Kontrola zkušební stanice (počty otáček, točivé momenty) a kontrola převodových poměrů se provádí pomocí digitální regulace, akustická kontrola se provádí pomocí FFT hlukové analýzy. Dále se provádí kontrola snímače otáček, spínače zpětného chodu a snímače neutrální polohy pro systém START/STOP. Ostatní kontroly zkoušených převodovek provádí pracovník obsluhy. Stroje mohou pracovat v celé oblasti otáček střídavě jako pohon nebo generátor (brzda). Zkušební stanice může pracovat ve třech režimech provozu:

1. Automatika

Automatický režim představuje normální formu provozu zařízení, při kterém je možný automatický i manuální zkušební provoz. V automatickém zkušebním provozu se provede zkouška jednotlivých převodových stupňů dle zvoleného druhu převodovky s hodnotami danými pro daný převodový stupeň a druh převodovky. V manuálním provozu lze na ovládacím panelu měnit rychlosti tlačítky „zvýšit“ a „snížit“, měnit velikost kroutícího momentu a dobu zkoušky.

2. Seřizování

Tento druh provozu se používá při poruchách, podrobnějších analýzách nebo seřizovacích pracích, kdy pracovníku obsluhy je umožněn veškerý dílčí pohyb válců resp. strojů a os. Zkoušení převodovek v tomto režimu není možné.

3. Start VYP

Aktivuje se stiskem tlačítka „Start VYP“ na ovládacím panelu. Při tomto druhu provozu nejsou možné žádné pohyby válců resp. strojů.

3.2. Průběh zkoušky převodovky v zabíhací stanici

Jakmile je převodovka řádně ustavena a zapojena (pracovník musí připojit kabely pro snímače otáček, zpětného chodu a neutrální polohy, řadicí páku), může se zahájit vlastní zkouška. V průběhu automatického cyklu dojde pomocí systému ROTAS ke zkoušce hlučnosti převodovky všech rychlostních stupňů, řídicí systém stavu kontroluje kinematické poměry zkoušeného soukolí, funkci diferenciálu, spínač zpětných světel a snímač otáček. Obsluha po ukončení zkoušky dále kontroluje funkci snímače neutrální polohy a u 100% převodovek provede vizuální kontrolu, zda se na převodovce nevyskytují olejové úniky. Každá zkouška převodového stupně se může vícekrát zopakovat. Tlačítkem „NOK“ se může zkouška kdykoliv přerušit. Aby bylo možné ukončit zkoušku tlačítkem „OK“ musí být všechny převodové stupně kompletně vyzkoušené a být v pořádku. Pokud se zkouška převodovky přeruší nebo ukončí s výsledkem „Převodovka se závadami“, zapíše se všechny zjištěné chyby do zkušebního protokolu. Převodovky vyřazené ze zabíhacího stavu se závadami se označí závěskou „Díl pozastaven“ a montážní paleta se přesune na další operaci, na které se další montáže nebudou provádět. Obsluha má možnost vymazat chyby ve zkušebním protokolu a v případě odstranění veškerých chyb je převodovka vyhodnocena a zapsána jako „Převodovka bez závad“. Pracovník rovněž může ke zkušebnímu protokolu připojit další chyby ze seznamu chyb, který je k dispozici. To je možné manuálním zadáním příslušného čísla chyby. Na zkušební stanici se k vyhodnocení převodovky se závadami rozlišují tři druhy chyb. Chyby, které se rozpoznají systémem Simadyn, chyby, které se rozpoznají frekvenční analýzou, a chyby, které zjistí pracovník obsluhy a které sám ručně zapíše do zkušebního protokolu (vizuální poškození - závity unašeče, poškození broušené plochy, další závady hluku). Veškeré chyby jsou uvedeny ve zkušebním protokolu.

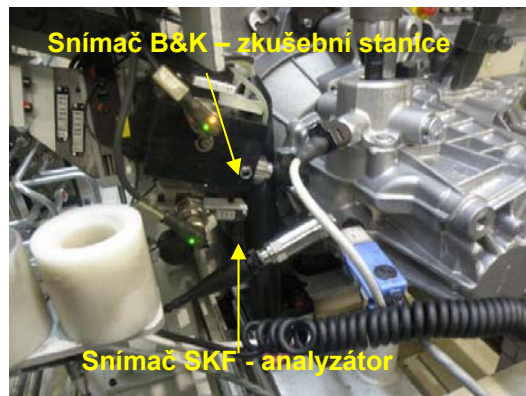
P1 MQ100+200KA St92 QCF		9017	1394-150219	19.2.2015 23:09				1/1 n.i.O.		
Kód	Výpis závad	Stupeň	Instrument	Místo	Parametr	Kanál	Pozice	Hodnota	Hranic	E
60	Zvuk v 5. chodu	5-S	Spectrum	Mez./Dru.	Max	Synch,KS	95,00	96,33	94,19	-
WaveFileName		NIOIP1 MQ100+200KA St920 QCF 1394-150219 2015-02-19.23-09-06.wav								
P2 MQ100+200KA St93 QCF		9017	0007-150220	20.2.2015 1:11				1/1 n.i.O.		
Kód	Výpis závad	Stupeň	Instrument	Místo	Parametr	Kanál	Pozice	Hodnota	Hranic	E
2	Poškození 1. Chod	1-S	Crest	První	Max	Mix,KS	2393,26	23,85	21,46	-
WaveFileName		NIOIP2 MQ100+200KA St930 QCF 0007-150220 2015-02-20.01-11-26.wav								
P3 MQ100+200KA St94 QCF		9017	0057-150220	20.2.2015 1:54				1/1 n.i.O.		
Kód	Výpis závad	Stupeň	Instrument	Místo	Parametr	Kanál	Pozice	Hodnota	Hranic	E
2	Poškození 1. Chod	1-S	Crest	První	Max	Synch,KS	2386,91	15,81	12,87	-
WaveFileName		NIOIP3 MQ100+200KA St940 QCF 0057-150220 2015-02-20.01-54-14.wav								

Obr. 3 Příklad protokolu

Převodovky vyřazené ze zabíhacího stavu na hlučnost jsou útvarem kvality analyzovány a následně je rozhodnuto o případném uvolnění či demontáži kompletu převodovky nebo jednotlivých dílů.

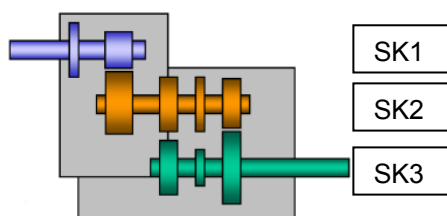
3.3. Metoda měření vibrací a hluku na zkušební stanici

Pro měření vibrací a hluku na zkušební stanici se používá snímač chvění tzv. akcelerometr od firmy B&K měřící zrychlení, který je v průběhu zkoušky přitlačován ke stěně převodovky. Pohyb měřený snímačem zrychlení je vlastně síla působící na setrvačnou hmotu převedená na elektrické veličiny a A/D převodníkem konvertována na číslo.



Obr. 4 Zkušební stanice převodovek se snímači

Pro měření je použita otáčkově synchronní analýza, kdy je signál zachycen synchronně s otáčkami vstupního hřídele. V převodovkové databance jsou pro různé typy převodovek uloženy převodové poměry a počty zubů jednotlivých ozubených kol. Z těchto údajů se pak v signálním podílu určují složky patřící buzení kteréhokoli hřídele převodovky. Vždy se vytvoří tři takovéto signální kanály závislé na otáčkách a jako čtvrtý se analyzuje celkový signál tzv. MIX kanál. Z jednotlivých signálních kanálů se identifikují hluky a vibrace. Na převodovce jsou postupně zkoušeny všechny převodové stupně a každý stupeň je zkoušen ve dvou režimech. V prvním režimu pro akceleraci (TAH) se otáčky převodovky zvyšují a pohon A pracuje jako motor, pohony B a C pracují jako brzdy (obr. 2). V druhém režimu (ZPĚT) se otáčky převodovky snižují, pohon A pracuje jako brzda a pohony B, C jako motory (jízda z kopce). Pro jednotlivé rychlostní stupně jsou stanoveny min. a max. otáčky k provedení akustické zkoušky. Vyhodnocení naměřených dat je prováděno programem TasAlyzer od německé firmy DISCOM. Program dostává přes sériové rozhraní informace o typu zkoušené převodovky a spínacím stavu aktuální zkušební fáze. Od zkušebního objektu odebírá program zvukový signál a počet otáček hnacího hřídele. Program rozděluje senzorem snímaný zvuk k jednotlivým komponentům převodovky.

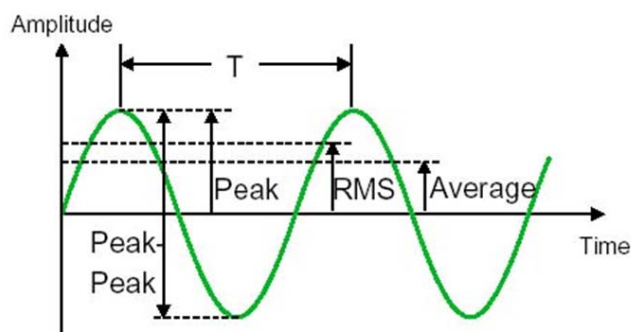


Obr. 5 Komponenty převodovky s kanály SK

Převodovky jsou hodnoceny pomocí dvou průběhů zvukových signálů. Hodnotí se pomocí řádové analýzy na překročení hraničních hodnot a analyzuje se průběh signálu v závislosti na otáčkách pro daný řád. Cílem těchto dvou postupů je získat optimální měřicí hodnoty k charakteristice převodkových chyb. Otáčkově synchronní kanály jsou přiřazeny hřídelům v převodovce a zachycují chvění související s otáčkami SK1 – vstupního hřídele převodovky, SK2 – pastorku převodovky, SK3 – diferenciálu. MIX kanál zachytí celkový signál (veškeré vibrace převodovky) proto, aby zaznamenal zvukový podíl v konstrukčních součástech jako např. ložiska nebo ozubená kola. Signální komponenty sledovaného hřídele jsou

zesíleny, komponenty jiných hřídelů oslabeny. Poškození jsou ukazována v synchronním kanálu, který je synchronizován na poškozený hřídel. Pokud se hlučnost vyskytuje v synchronních kanálech, jedná se o chyby ozubení, pokud ne, jedná se o jiné závady (např. chyby ložisek). Pokud jsou chyby v ozubení, určuje se, kde se chyba nachází (kanály SK1, SK2, SK3), při jakém způsobu jízdy k ní dojde (akcelerace, jízda z kopce) a v jaké rychlosti. V MIX kanálu se sledují chyby způsobené ložisky. Pokud se frekvenční poloha chyby nemění v závislosti na převodovém stupni, vyskytuje se chyba na vstupním hřídeli. V opačném případě, kdy se frekvenční poloha chyby mění, vyskytuje se chyba na pastorku nebo hnaném kole rozvodovky.

Další hodnotící faktory jsou špičková hodnota (Peak), efektivní hodnota (RMS), Crestfaktor (Crest) a Kurtosis, které umožní najít další defekty. Obzvláště citlivý je Crestfaktor, který se počítá jako vztah mezi špičkovou hodnotou a efektivní hodnotou. Peak a RMS hodnoty jsou jakožto absolutní velikosti závislé na zvuku zkoušené převodovky. S Crest-hodnotou souvisí Kurtosis. Kurtosis-hodnota stoupá, když obsahuje signál mnohé špičky. Tento zvuk odpovídá praskání. K takovému praskání mohou vést například defektní ložiska [11].



Obr. 6 Časový průběh signálu

Pro jednotlivá spektra má systém ROTAS hraniční křivky. Jestliže překročí spektrum na určitém místě hraniční křivku, svědčí místo překročení o možné závadě. Pro každý typ převodovky existují samostatné hraniční hodnoty a hraniční křivky. Hlavním zdrojem hluku jsou především ozubená kola, resp. záběr jednotlivých zubů. V jednotlivých spektrech signálních podílů se zubová záběrová frekvence zřetelně projeví. Hraniční křivky a hraniční hodnoty se vytváří automaticky prostřednictvím samoučícího se procesu a skrze databanku parametrů je možné je ohraničit. Pro učící proces se používá nastavený počet převodovek, které jsou v pořádku.

4. VÝROBA A MĚŘENÍ OZUBENÍ PŘEVODOVKY MQ 100

Kolo zpětné rychlosti a hnací hřídel jsou kompletně vyráběny v závodě Škoda Auto a.s. Výroba začíná v hutích haly H2, kde se z pětimetrové tyčové oceli TL 4227 o průměru 38 mm pro kolo a 51 mm pro hřídel nastříhají jednotlivé kusy, které se ohřejí na teplotu 1220 °C. Pro vložené kolo následují procesy kování na kovacím lise, děrování na ostříhovacím lise, normalizační žíhání (880 °C - 920 °C) a tryskání bubnovým tryskačem ocelovými broky. Pro hnací hřídel následují procesy válcování, normalizační žíhání, tryskání a kontrola ultrazvukem na přítomnost vnitřních vad.

Další opracování výkovek (polotovaru) je prováděno ve výrobě dílů převodovky haly M2 dle výrobního postupu rozděleného na jednotlivé operace (viz kap. 4.1 a 4.2). V hale M2 také probíhá předmontáž kompletu hnacího a hnaného hřídele nalisováním ložisek, montáží kol jednotlivých rychlostí, synchronních spojek a pojistných kroužků. Dále jsou tyto sestavy hřídelů expedovány do haly M6, kde dojde společně s ostatními díly k zabudování do kompletu převodovky MQ 100.

4.1. Postup výroby kola zpětné rychlosti

- Na stroji EMAG VL3 proběhne v prvním kroku soustružení pravé strany nábojky a věnce, včetně sražení u předkovaného odlehčení. Dále se soustruží otvor na průměr 20,8 H8. V druhém kroku se soustruží levá strana nábojky a věnce včetně sražení, hlavového průměru a mazacích drážek.
- Na odvalovací frézce stroje PRÄWEMA jsou frézovány oba segmenty ozubení.
- Ofrézované zpětné kolo je dále ve vakuové lince ALD tepelně zpracováno v cyklech nitrocementace, kalení a popouštění.
- Po tepelném zpracování následuje proces pevnostního tryskání ocelovými broky. Velikost nového média tryskání je 0,6 mm.
- Poslední operací je honování otvoru vnitřního průměru.

Jednotlivé rozměry kola jsou kontrolovány jak ve výrobním procesu, tak na měrovém středisku výroby dílů převodovky. V měrovém středisku se kontrolují výkresem dané rozměry pro ozubení (viz kap. 4.6.1). Ve výrobním procesu jsou všechny ostatní opracované rozměry z jednotlivých operací kontrolovány dle předepsané četnosti měření a časového intervalu. Probíhá kontrola tvrdosti, vizuální kontrola praní, kontrola pevnostního tryskání a tepelného zpracování. Zkoušecím strojem

dvoubokého odvalu Linnenbrink je vyhodnocena „hlučnost“ a kontrolováno ozubení na přítomnost poškození.

4.2. Postup výroby hnacího hřídele

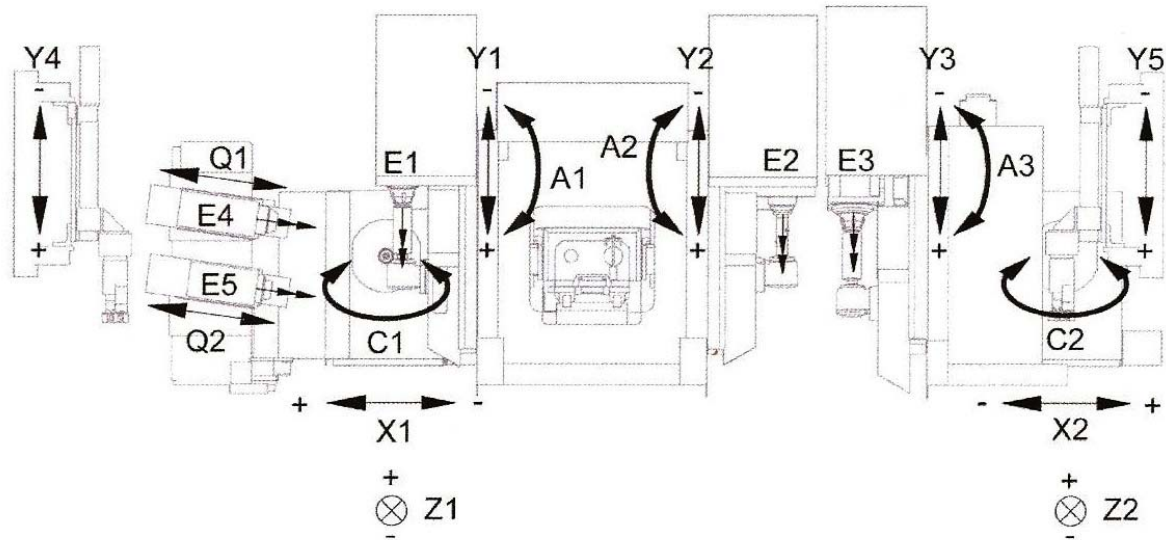
- Na stroji pro zarovnání jsou oboustranně zarovnány ofrézováním čelní plochy výkovku a soustruženy jednotlivé průměry výkovku. Dále jsou z pravé a levé strany navrtány středící důlky.
- CNC soustruhem jsou postupně soustruženy jednotlivé válcové průměry pastorku, čelní strany ozubení, jsou provedeny zápichy a sraženy hrany. Ozubení pro zpětnou rychlost je soustruženo na rozměr $\varnothing 32,3^{-0,15}$.
- Frézou je frézováno ozubení hřídele pro první, druhou a zpětnou rychlost. V prvním řezu probíhá hrubovací frézování, v druhém frézování s přídavkem na brusné honování. Mezi prvním a druhým řezem jsou sraženy hrany ozubení a odstraněny otřepy na čelech.
- Válcovacím strojem je válcováno evolventní drážkování hnacího hřídele s následným očištěním v pracím stroji.
- Poté se dávka hřidelí po 70 ks v automatickém cyklu vakuové linky ohřeje na požadovanou teplotu 960 °C, proběhne proces nízkotlaké cementace a proces kalení v přetlaku plynu. Následuje proces popouštění v popouštěcí peci o teplotě 160 °C. Po provedení popouštění jsou součásti chlazeny v chladící jednotce a převezeny na další operaci.
- Rovnání probíhá v rovnacím lisu z důvodu minimalizace házení (max. hodnota pro házení je stanovena na 0,06 mm). Zároveň při rovnání automaticky probíhá čištění otvoru díry, kontrola výskytu trhlin a sledování prohnutí před a po rovnání pastorku. Po dokončení operace rovnání jsou díly namátkově vybrány a vizuálně se kontroluje kvalita praní a pevnostního tryskání.
- Bruskami Buderus a GST se brousí všechny válcové průměry hřídele a zároveň jsou broušeny zápichy.
- Ozubení hřídele pro první, druhou a zpětnou rychlost je dále honováno na honovacích strojích PRÄWEMA. Konečnou operací finálního hřídele je praní v pracím stroji.

Jednotlivé rozměry hřídele jsou kontrolovány jak ve výrobním procesu, tak na měrovém středisku výroby dílů převodovky. V měrovém středisku se kontrolují

výkresem dané rozměry pro ozubení (viz kap. 4.6.2) a rozměry pro drážkování. Ve výrobním procesu jsou všechny ostatní opracované rozměry z jednotlivých operací kontrolovány dle předepsané četnosti měření a časového intervalu. Probíhá kontrola tvrdosti, vizuální kontrola praní, kontrola pevnostního tryskání, tepelného zpracování a drážkování pomocí kalibračních kroužků. Zařízením pro zkoušení „hlučnosti“ ozubení Linnenbrink bylo kontrolováno frézované ozubení hřídele na přítomnost poškození, pro honovaný hřídel se tato kontrola již neprovádí.

4.3. Popis výroby ozubení kola zpětné rychlosti na stroji PRÄWEMA

Kolo zpětné rychlosti je vyráběno na dvouřetenovém frézovacím stroji PRÄWEMA typu SynchronForm WPWSL5-2. Frézovací stroj pracuje v režimu odvalovacího frézování, stříškování a obrážení a je určen k obrábění na sucho. Stroj je vybaven 5 nástrojovými a 2 obrobkovými vřeteny (obr. 7). Obrobky jsou na paletách transportovány na přiváděcím pásu k separaci (oddělování jednotlivých obrobků). Chapadlo uchopí obrobek a předá ho obrobkovému vřetenu vlevo. To pak s ním odjede k operaci obrábění ozubení nahrubo (odvalovací frézování) kde jsou nejdříve frézovány oba segmenty ozubení nahrubo s přídavkem pro frézování načisto ($z=32$) a je provedeno stříškování levé strany ozubení. Následně je díl předán do kontrolní stanice uprostřed. Obrobkové vřeteno vlevo předá díl chapadlu uprostřed. Obrobkové vřeteno vpravo si díl vyzvedne a odjede k obráběcí operaci odgrotování, kde je z pravé strany ozubení odstraněno vyhrnuté ostří a sraženy hrany ozubení. Poté je provedeno finální frézování obou segmentů načisto. Obrobkové vřeteno vpravo odjede k chapadlu hotové součásti, které odloží hotovou součást na odváděcí pás [12].



C1,C2 - obrobková vřetena E1 - frézovací vřeteno nahrubo
 E2 - odjehlovací vřeteno E3 - frézovací vřeteno načisto
 E4,E5 - stříškovací vřetena X,Y,A - osy

Obr. 7 Schéma stroje PRAWEMA, vřeten a os řízení CNC

Obr. 8 znázorňuje vložené kolo zpětné rychlosti, dolní segment je určen pro ozubení hnacího hřídele, horní pro ozubení přesuvné objímky synchronní spojky.

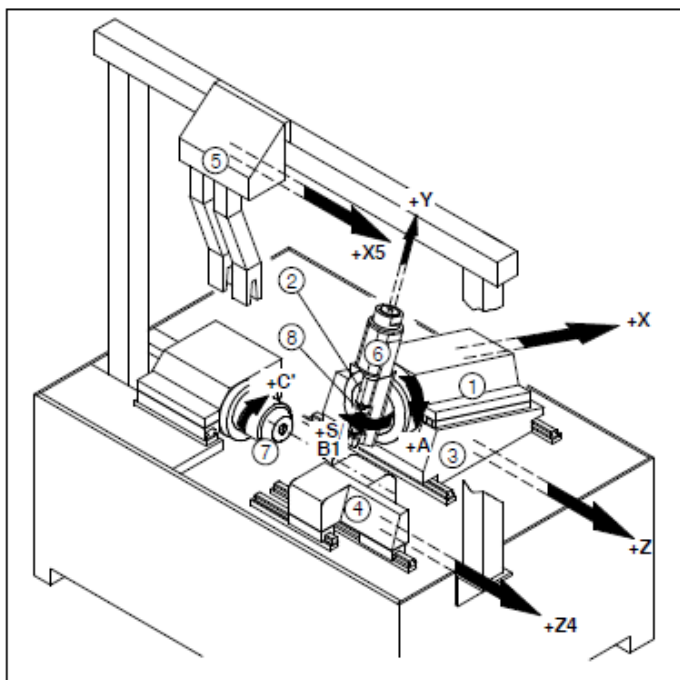


Obr. 8 Kolo zpětné rychlosti

4.4. Popis výroby ozubení hnacího hřídele na stroji GLEASON

Ozubení hnacího hřídele bylo nejdříve vyráběno pouze na frézovacím stroji GLEASON - Pfauter typu P210 LiC (obr. 9). Dříve byly hřídele frézovány načisto, materiál se odebíral za měkka a hřídel byl finálně opracován před tepelným zpracováním. Další opracování na ozubení zpětné rychlosti nebylo prováděno. Od 10/2014 se na tomto stroji frézuje ozubení zp. chodu s přídatkem pro honování. Proces honování je popsán v kapitole 4.5. Posuv frézy pro frézovaný hřídel načisto

byl 0,8 mm, nyní je pro frézovaný hřídel nahrubo nastaven posuv 1,9 mm (obr. 12). Tento stroj se používá pro ozubení válcových a šnekových kol a všech ostatních profilů a tvarů, pravidelně se vyskytujících na cylindrickém obvodu obrobku frézovatelných odvalováním. Stroj je vybaven automatickým zařízením pro výměnu obrobků a speciálním zařízením pro upínání obrobků. Frézovací hlava je vybavena speciální upínací kleštinou pro upevnění roztažných upínacích prvků. Integrovaná odgroťovací stanice slouží k sražení hran zubů a čelních ozubení. Hřídel se ze zásobníku automaticky naloží, upne a v prvním kroku proběhne hrubovací frézování. Následně jsou z obou stran sraženy hrany ozubení s ohledem na přídavek pro honování a odstraněny otřepy na čelech. V druhém kroku se hřídel frézuje načisto s přídavkem pro honování.

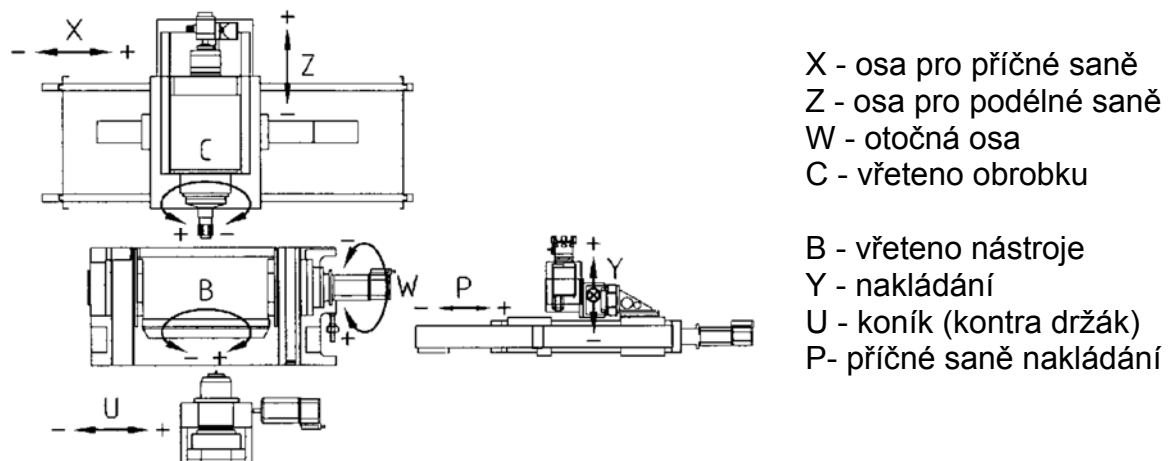


- 1 - osa X (radiální saně)
- 5 - osa X₅ - nakladač
- 2 - osa Y (tangenciální saně)
- 6 - osa A - frézovací vřeteno
- 3 - osa Z (axiální saně)
- 7 - osa C - vřeteno obrobku
- 4 - osa Z₄ - koník
- 8 - osa S/B1 - vřeteno pro odgroťování

Obr. 9 Schéma stroje GLEASON, vřeten a os řízení CNC

4.5. Popis výroby ozubení hnacího hřídele na stroji PRÄWEMA

Vysokovýkonný honovací stroj na ozubení HFSL 203 W je samonakládací stroj, který si upínacím systémem obrobek sám odebere, elektronicky vyrovná, prověří oblast tolerance a přesune do obráběcí stanice. Osa X je poháněna elektrickým lineárním motorem a všechny další osy CNC jsou vybaveny, vysoce dynamickými AC servomotory. Všechny lineární osy jsou kontrolovány systémem na měření délky.

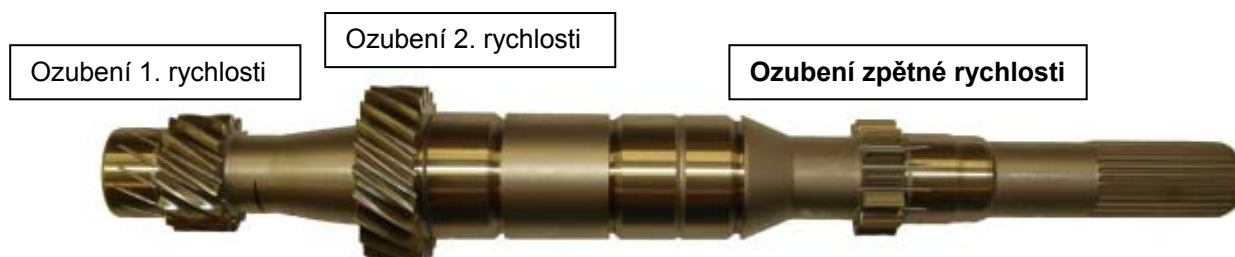


Obr. 10 Blokové schéma honovacího zařízení (přehled os stroje HFSL 203 W)

Nástroj je plynule, díky možnostem úhlového a lineárního přestavení, nastavitelný k obrobku. Ke zvýšení celkové tuhosti systému stroje se osa sklápění obrobku W pneumaticky upíná. Jednotlivé pohony os s regulovanou polohou jsou vybaveny odpovídajícími vysokodynamickými motory a regulátory. Obrobky se přepravují do stroje pomocí přiváděcího zařízení. Automatický nakládací systém otáčí přicházející obrobky do vodorovné přijímací polohy. Upínací systém namontovaný na křížových saních převezme obrobek a najede s ním napřed na elektronické polohovací zařízení. Pomocí kola zajišťujícího následně do ozubení se kontroluje rozsah tolerance dílu před opracováním. Díly s větším nebo menším rozměrem se kvůli ochraně drahého nástroje dále neobrábějí. Stroj pak jede s obrobkem zpět do nakládací polohy. Dobré díly se přesunou do obráběcí stanice, honují a přes nakládací zařízení podávají zpět do předávací stanice. Ke korekci opotřebení nástroje (honovací kroužek) jsou v zásobníku k dispozici dva orovnávací nástroje. Tyto nástroje jsou v oddělených intervalech snímány upínacím zařízením a zajíždí do honovacího nástroje k provedení profilování. Strany zubů a plocha hlavy nástroje se orovňávají zvlášť. Vřeteno obrobku a upínací zařízení tvoří jednu jednotku. Upnutí obrobku se provádí zabudovaným pružinovým paketem, který se k uvolnění obrobku pneumaticky stiskne. Honovací vřeteno je motorové vřeteno, které se otáčí v namazaných, vysoce přesných ložiskách [12].

Honování ozubení zpětné rychlosti (obr. 11) hřídele za tvrda (po tepelném zpracování) je prováděno na stroji PRÄWEMA a provádí se ve dvou krocích. Nejprve

se honuje nahrubo a následně načisto. Jednotlivé parametry pro oba kroky honování a velikosti odběru přídávku materiálu jsou patrné z tab. 1.

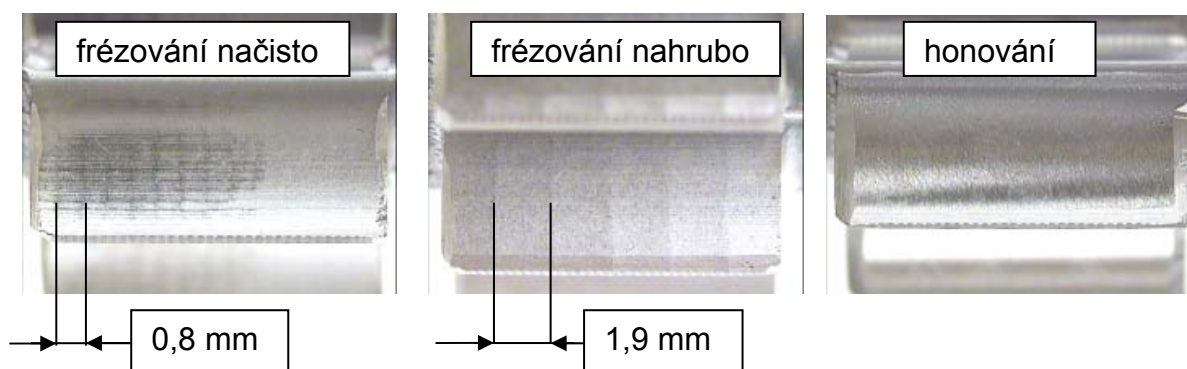


Obr. 11 Ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele MQ 100

Tab. 1 Parametry při honování ozubení hnacího hřídele

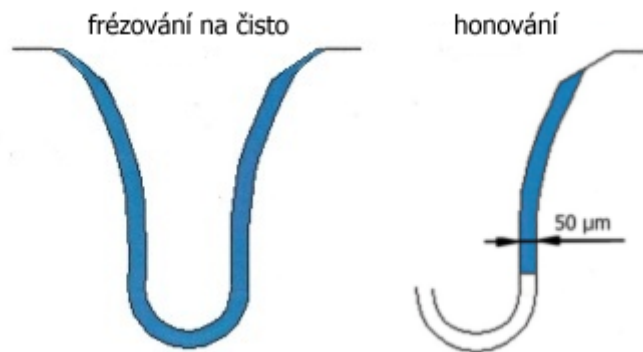
Kroky honování	Pracovní otáčky [ot/min]	Velikost odběru [μm]	Velikost posuvu [mm]
1. nahrubo	980	40	1,9
2. načisto	975	10	0,8

Rozdíl opracování ozubení frézovaného a honovaného hřídele je patrný z obr. 12.



Obr. 12. Rozdíl způsobu opracování ozubení hřídele převodovky MQ 100

Při frézování načisto se odebírá materiál z boků zubů a patního přechodu. Při obrábění honováním se odebírá materiál pouze z boku zubu, pata je již opracována frézováním a hlava soustruhem (obr. 13)



Obr. 13 Opracování zubu frézováním a honováním

4.6. Kontrola ozubení zp. kola a hnacího hřídele převodovky MQ 100

Je prováděna pracovníky technické kontroly měrového střediska. Každou směnu nebo při výměně nástroje či seřízení je z výroby odebrán jeden kus opracovaného kola a hnacího hřídele, které jsou podrobeny kontrole. Provádí se před i po tepelném zpracování. Vlastní měření probíhá na měřicím přístroji KLINGELNBERG P26.



Obr. 14 KLINGELNBERG P26

4.6.1. Měření ozubení zpětného vloženého kola

Měření zpětného kola probíhá tak, že na otočný talíř měřicího přístroje mezi upínací hroty se vloží zpětné kolo již upnuté na rozpínacím trnu. Pro měření jsou použity 2 programy, zvláště pro každý segment. Celé ozubení je měřeno kuličkovým dotykem o velikosti $\varnothing 1,5$ mm. Před spuštěním automatického programu pro kontrolu parametrů

ozubení kola se ručně provede nastavení do výchozí polohy. Nejprve probíhá měření 1 segmentu, na prvním zubu probíhá měření pravého sklonu a profilu zubu v 3 řezech. Další měření ozubení se provádí pro další 3 zuby po 90°, ale pouze v 1 řezu (ve středu zubu). Stejným způsobem je kontrolován levý sklon zubu, pouze opačným způsobem (od posledního zubu k prvnímu). Na stejných zubech (1,9,17,25) je dále prováděna kontrola patního a hlavového průměru, kontrola soudku profilu a sklonu zubu. Poté probíhá měření zubové rozteče pro levý a pravý bok, Mdk a měření radiálního házení. Druhým programem se stejným způsobem, ale s jinými parametry vyhodnotí druhý - kónický segment. Doba měření ozubení kola trvá cca 10 minut. Protokoly z měření vloženého kola zabudovaného v převodovce typu QAE jsou uvedeny na obr. 19-22. Výsledek měření je OK.

4.6.2. Měření ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele

Měření ozubení hnacího hřídele probíhá tak, že se hřídel upne mezi upínací hroty přístroje a z databáze měření se vybere program pro měření ozubení zpětné rychlosti hřídele. Pro měření se používá kuličkový dotyk o velikosti \varnothing 1 mm. Nejprve se provede nastavení do výchozí polohy. U frézovaného hřídele probíhala eliminace posuvných stop vzniklých po opracování nástrojem (eliminace se provádí z důvodu odstranění chyb při měření). Pro honovaný hřídel se eliminace neprovádí. Vlastní měření začíná měřením sklonu a profilu prvního zubu ve 3 řezech, poté následuje kontrola ozubení pro další 3 zuby po 90°, ale pouze v 1 řezu (ve středu zubu). Měření sklonu a profilu zubu se provádí pro levou a pravou stranu zubu. Na stejných zubech (1,5,8,11) je dále prováděna kontrola patního a hlavového průměru, kontrola soudku profilu a sklonu zubu. Poté probíhá měření zubové rozteče pro levý a pravý bok, Mdk a měření radiálního házení. Doba měření ozubení zpětné rychlosti hřídele trvá cca 5 minut. Protokoly z měření frézovaného a honovaného hřídele jsou uvedeny na obr. 15-18. Výsledek měření pro oba způsoby opracování je OK.

Po naměření všech hodnot pro ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele (platí také pro vložené kolo zpětné rychlosti) následuje export změřených dat do počítače, kde se data dále zpracují a vyhodnotí ve formě protokolů. Jestliže bude ozubení dílů v pořádku, jsou vráceny do výroby. Pokud bude vyhodnoceno jako chybné, následuje

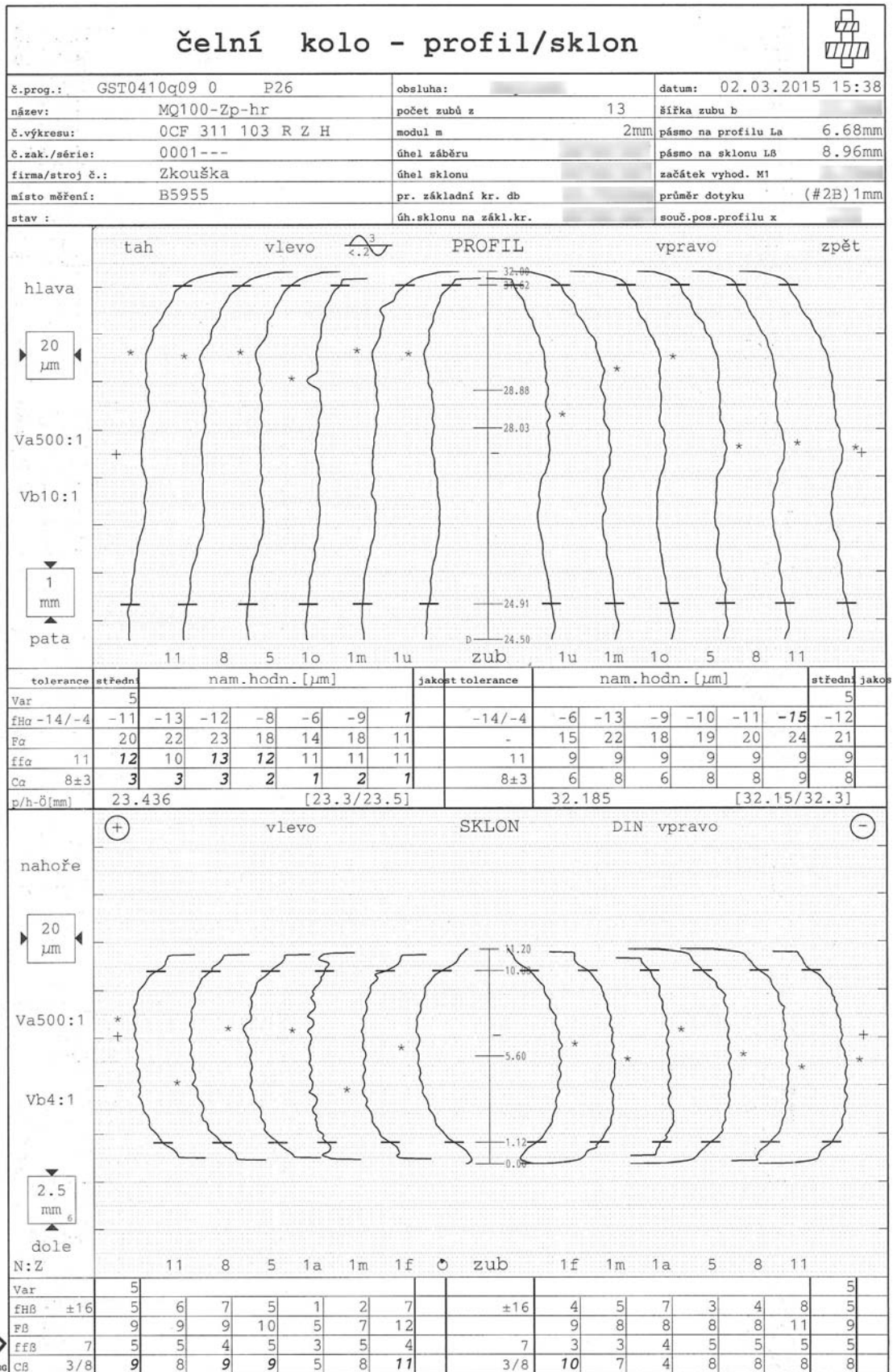
kontrola a seřízení stroje či úprava strojního zařízení a opětovné měření vzorků po seřízení.

4.6.3. Vyhodnocení výsledků měření pro oba způsoby opracování

Při porovnání výsledků protokolů měření frézovaného a honovaného ozubení hřídele je z grafického znázornění patrné dodržení hladších profilů a šroubovice zubů u honovaného hřídele. Tvar soudků je u honovaného hřídele menší, což je příznivější pro záběr ozubení. Úchyly obvodových roztečí jsou mnohem nižší při obrábění honováním, obdobná situace je u radiálního házení. Maximální úchylka obvodových roztečí f_{pt} u honovaného hřídele nabíhá plynule, nekolísá (součinitel délky trvání záběru $\varepsilon_\alpha = 1,04$ je malý a každá úchylka má vliv na plynulost, rachtání). Vliv jednotlivých parametrů, které mají vliv na hlučnost a vzájemné porovnání dosažených hodnot pro oba způsoby obrábění je uveden v tab. 2. Tabulka vychází ze sériově dosahovaných hodnot. Maximální dovolená drsnost ozubení měřená po profilu pro frézovaný hřídel je $R_z = \text{max. } 6 \mu\text{m}$ (stejná hodnota i pro vložené kolo zpětné rychlosti), pro honovaný hřídel je $R_z = \text{max. } 3 \mu\text{m}$.

Tab. 2 Obecné porovnání výsledků měření frézovaného a honovaného ozubení

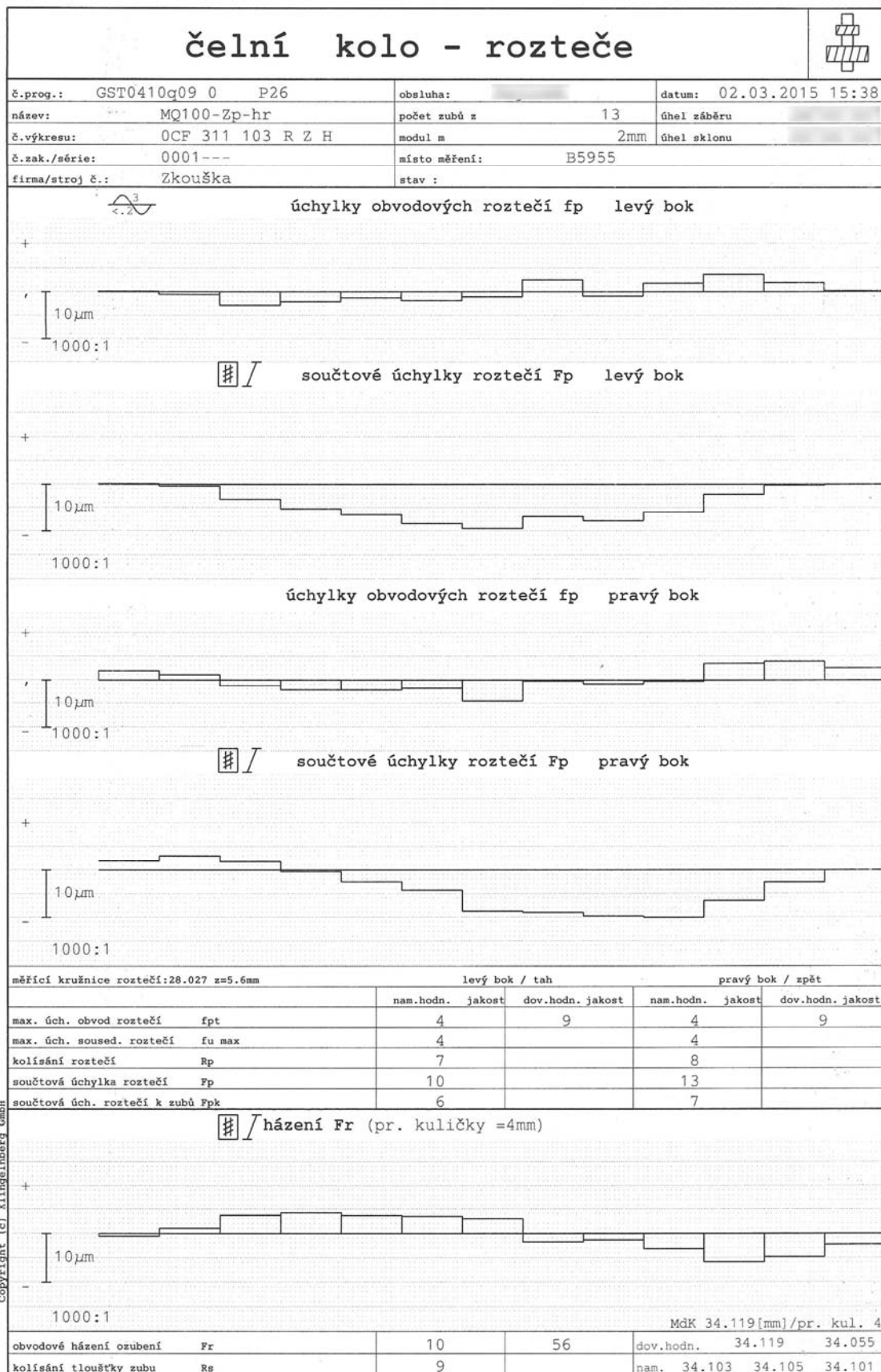
Parametr [μm]	Frézovaný	Honovaný	% rozdíl
Tvarová úchylka profilu (ff_α)	9-11	2-3	300
Soudek profilu (C_α)	7-10	3-4	143
Úchylka obvodových roztečí (f_{pt})	4-5	1-2	200
Obvodové házení ozubení (F_r)	10-20	2-10	150



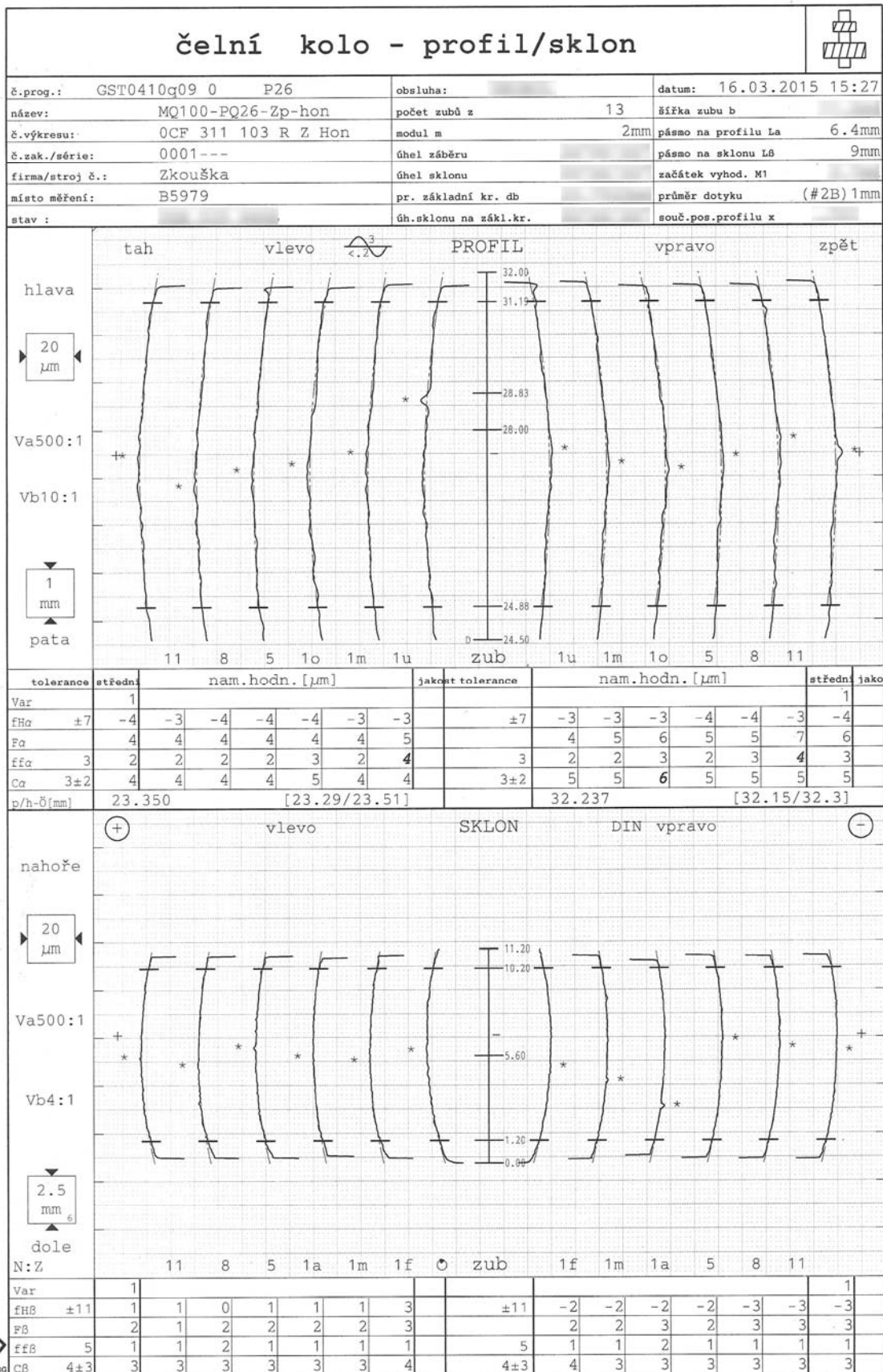
Copyright (c) Klingelberg GmbH



Obr. 15 Protokol měření frézovaného ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele str. 1



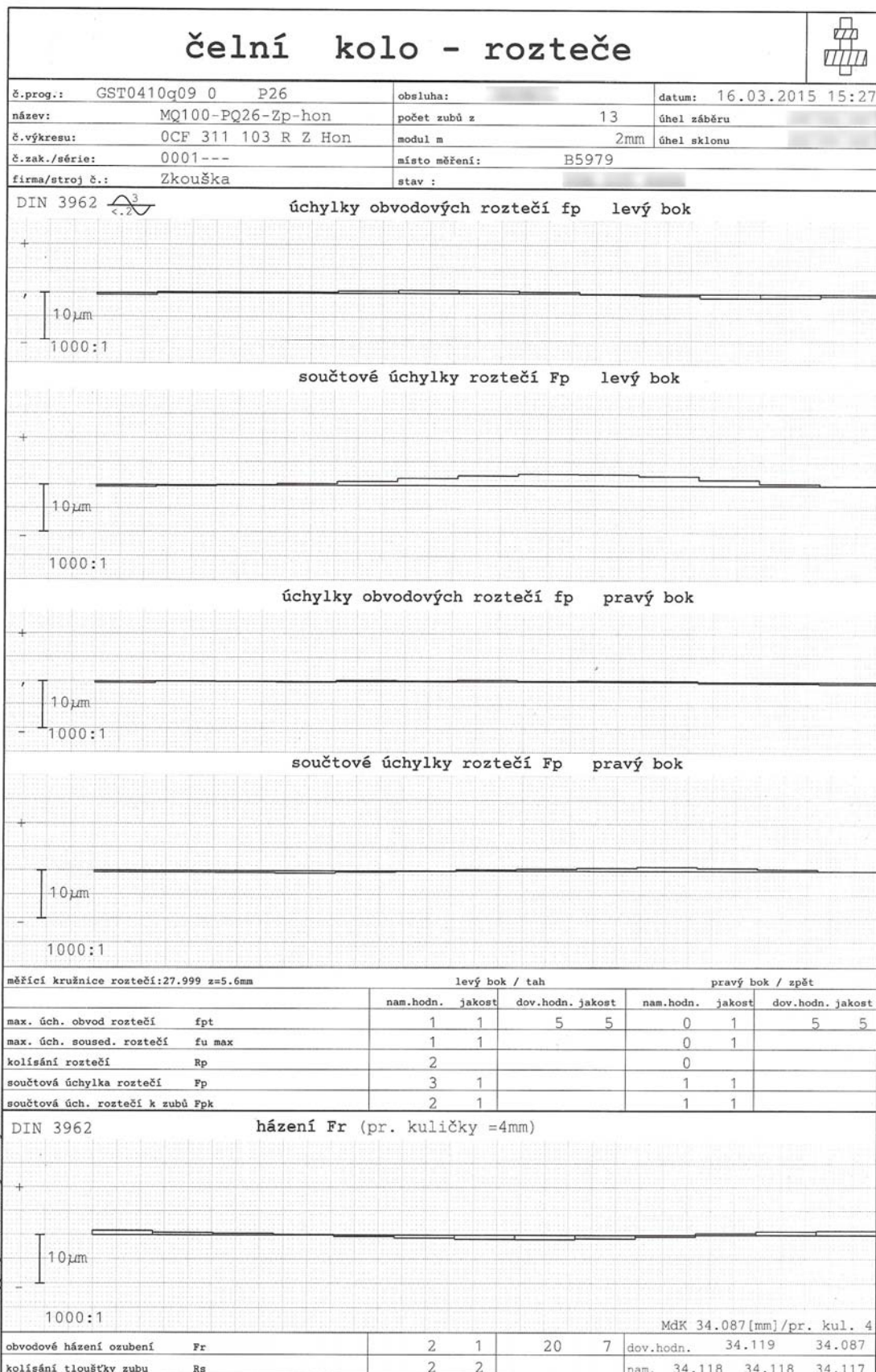
Obr. 16 Protokol měření frézovaného ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele str. 2



Copyright (c) Klingelberg GmbH



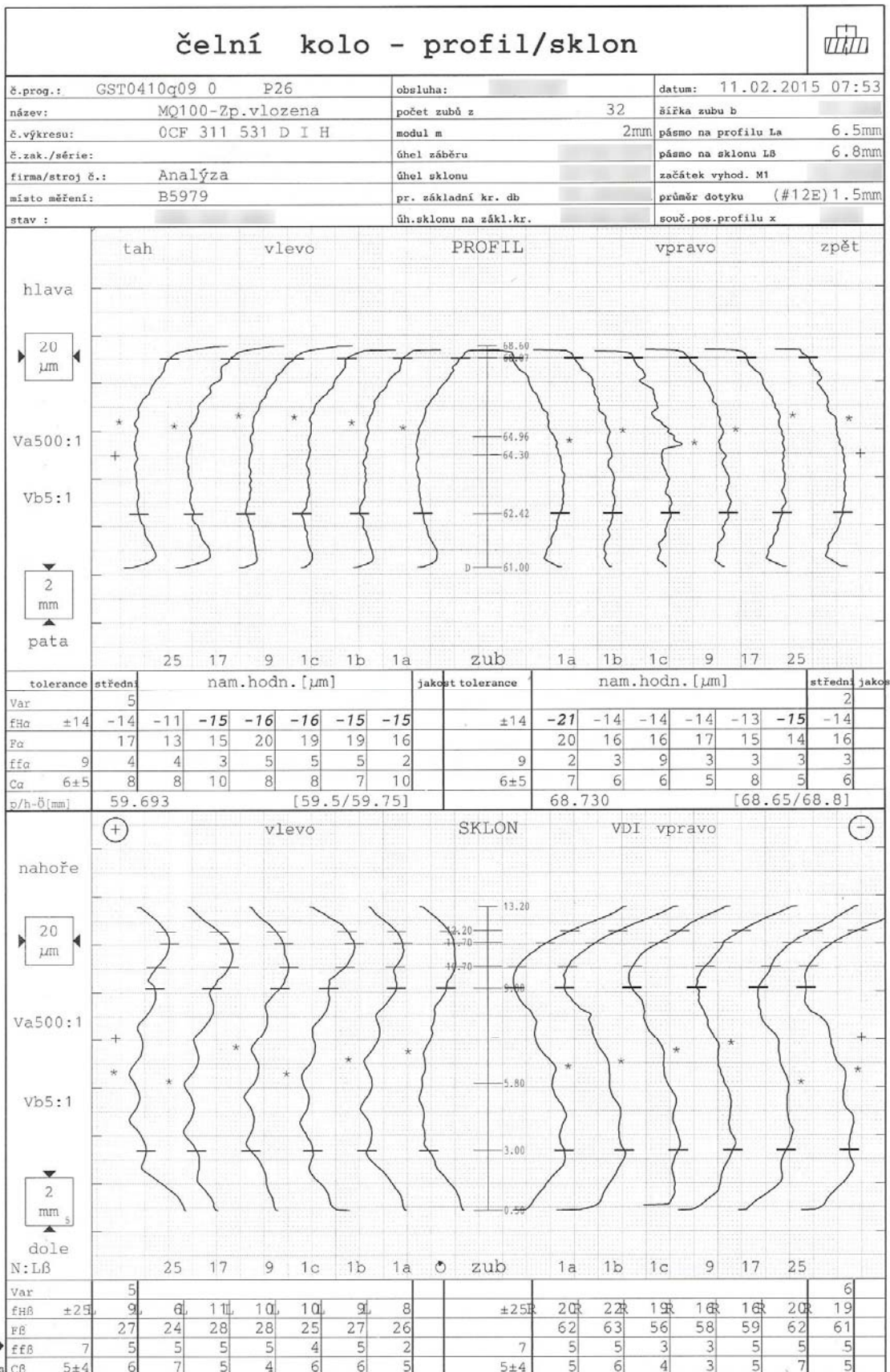
Obr. 17 Protokol měření honovaného ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele str. 1



Copyright (c) Klingelberg GmbH



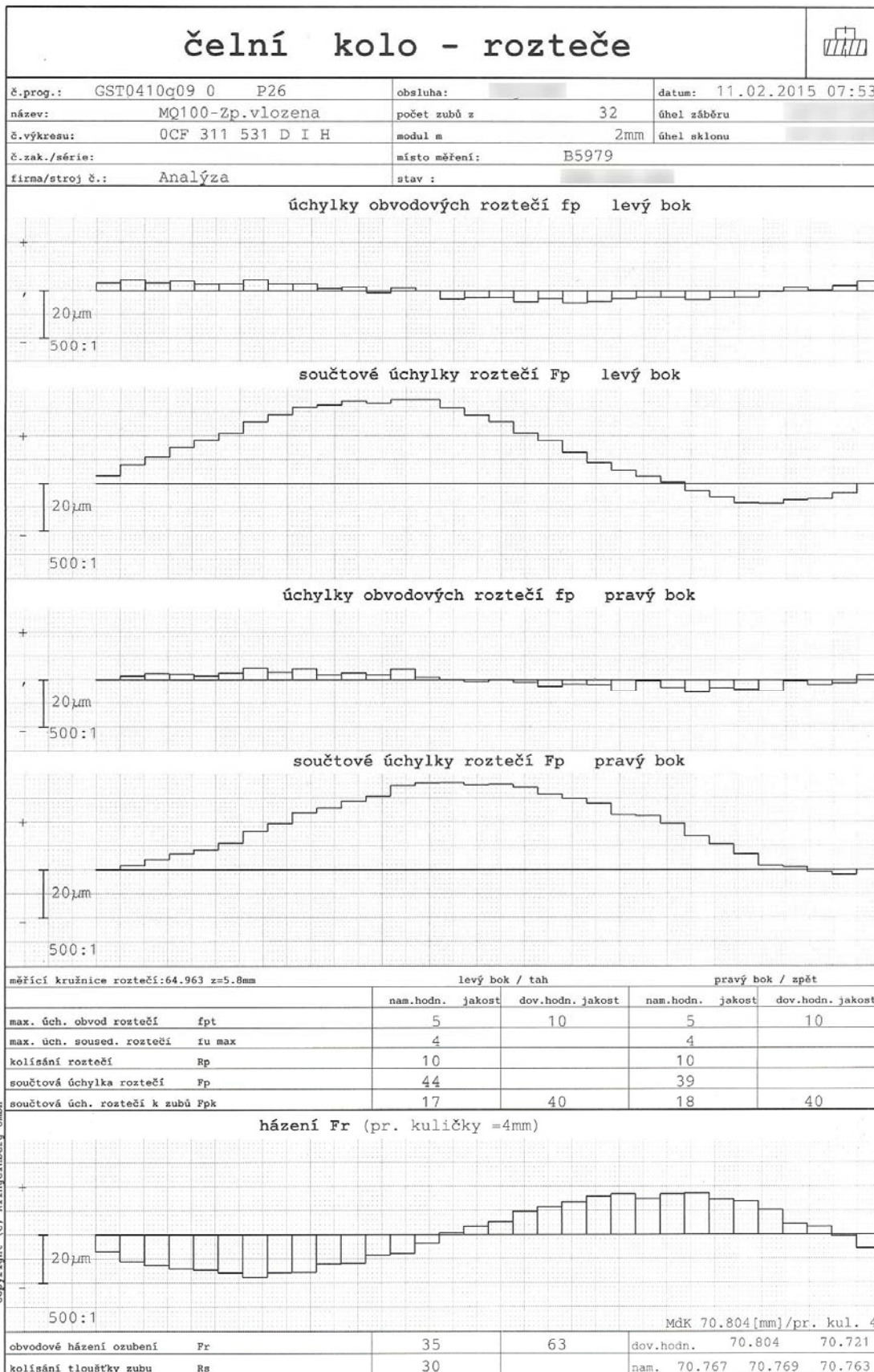
Obr. 18 Protokol měření honovaného ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele str. 2



Copyright (c) Klingelberg GmbH



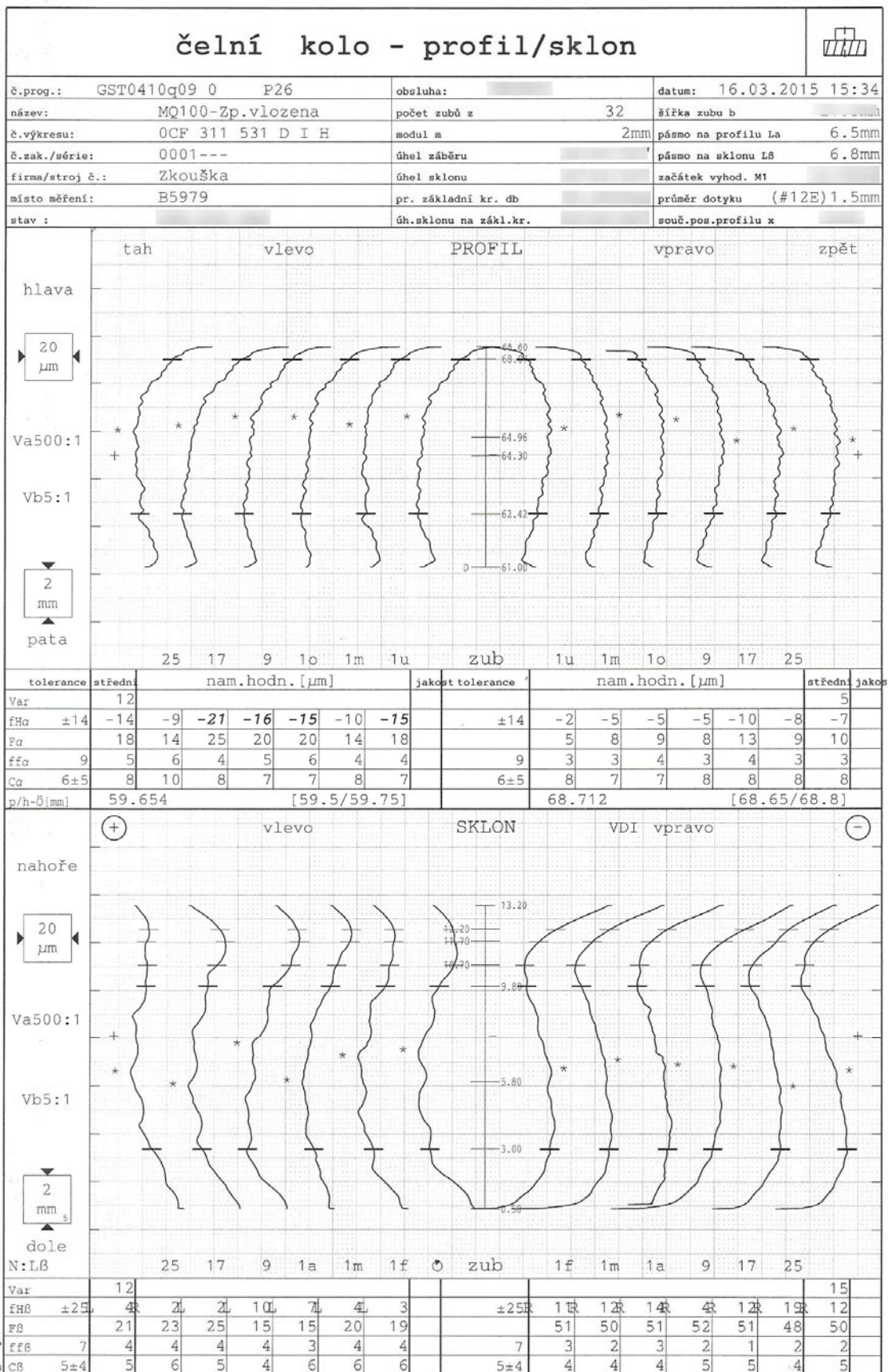
Obr. 19 Protokol měření kola zpětné rychlosti bez úpravy Mdk str. 1



Copyright (c) Klingelberg GmbH



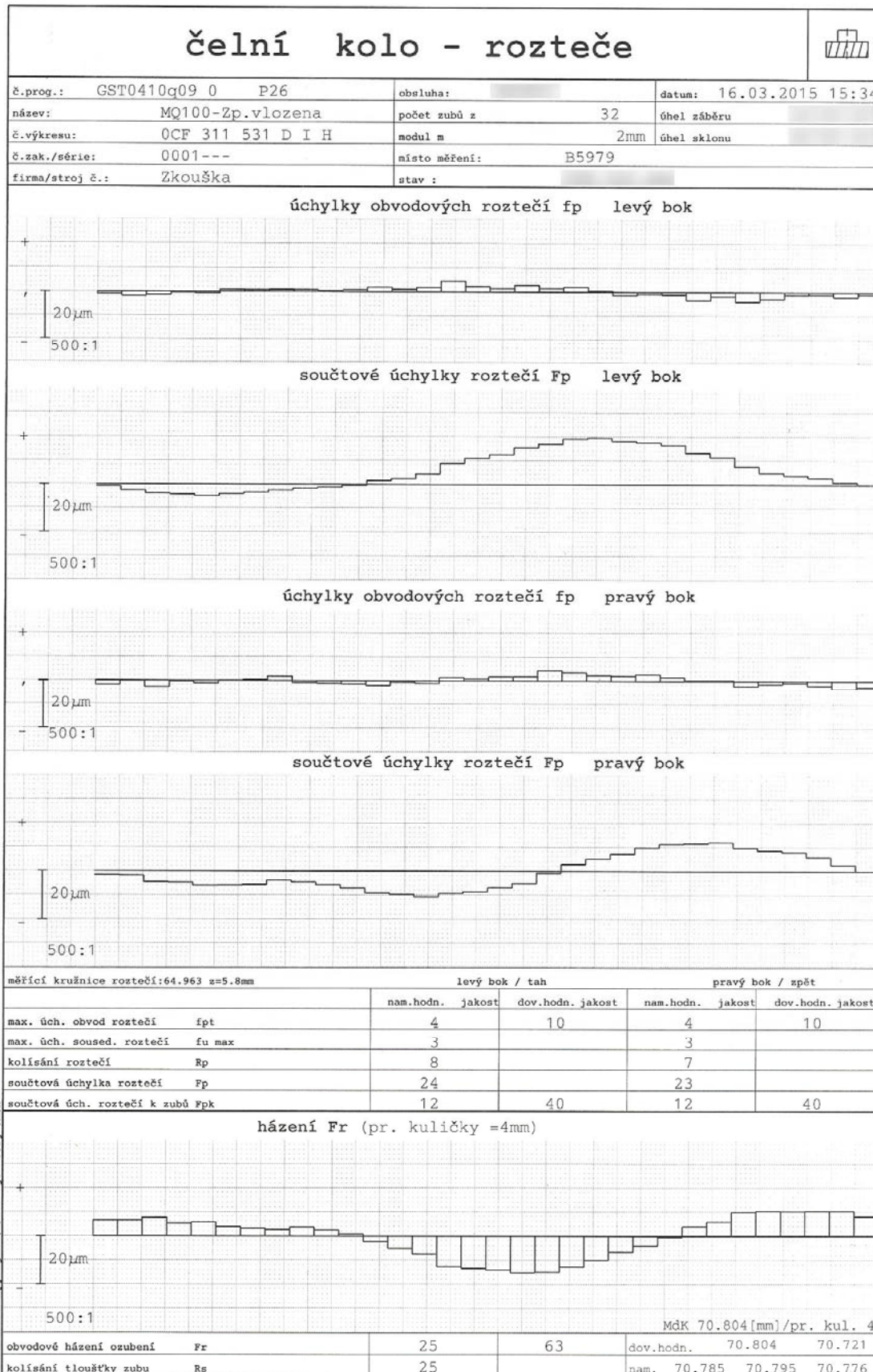
Obr. 20 Protokol měření kola zpětné rychlosti bez úpravy Mdk str. 2



Copyright (c) Klingelberg GmbH



Obr. 21 Protokol měření kola zpětné rychlosti s úpravou Mdk str. 1



Copyright (c) Klingelberg GmbH

Obr. 22 Protokol měření kola zpětné rychlosti s úpravou Mdk str. 2

5. ROZBOR DYNAMICKÝCH POMĚRŮ NÁHONŮ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Na jednotlivých strojích bylo provedeno měření spekter vibrací unášecích nebo obráběcích vřeten s cílem analýz spekter vibrací, zda nevykazují poškození ovlivňující výrobu ozubení zpětného kola a ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele.

5.1. Rozbor dynamických poměrů frézovacího stroje zpětného kola PRÄWEMA

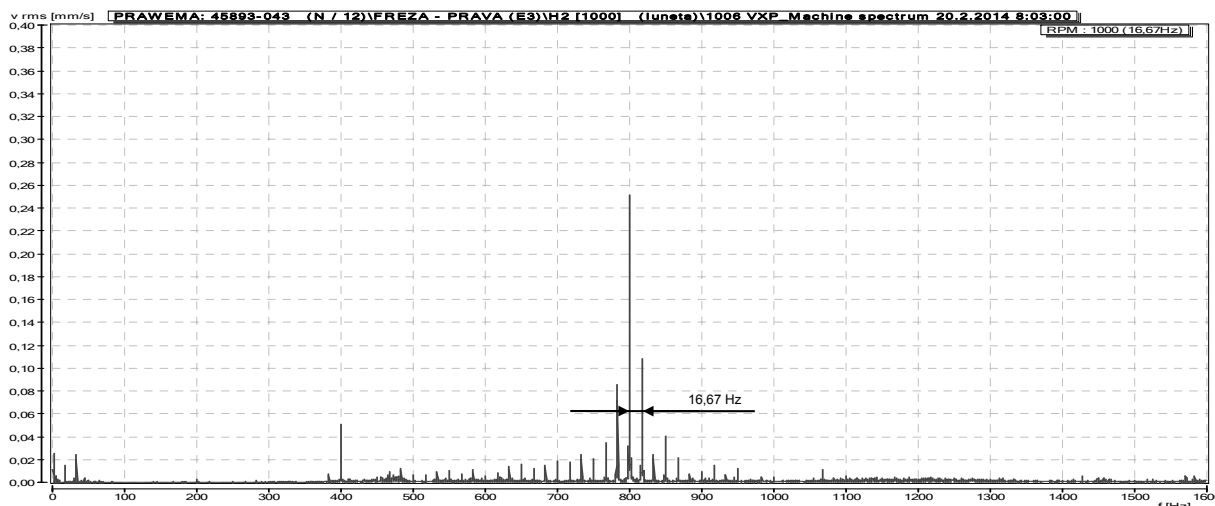
Byla prověřena jednotlivá elektrovřetena pro špičkování (E4, E5), vřetena pro frézování nahrubo (E1), vřeteno pro sražení otřepů (E2) a vřeteno pro frézování načisto (E3).

Dále byla prověřena jednotlivá ložiska lunet fréz elektrovřeten pro frézování nahrubo (E1), ložisko pro sražení otřepů (E2) a luneta s ložiskem pro frézování načisto (E3). Jednotlivé parametry elektrovřeten jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 Parametry elektrovřeten stroje PRÄWEMA

Elektrovřeteno	obrobku unášecí C1	obrobku unášecí C2	frézování nahrubo E1	sražení otřepů E2	frézování načisto E3	špičkování dolní, horní E4,E5
Rozsah otáček [ot/min]	0-1600	0-1600	0-1500	0-1500	0-1500	0-6000
Pracovní otáčky [ot/min]	100	94	750	1500	1000	6000

Při otáčkách naprázdno se měřila spektra rychlosti vibrací vřeten a ložisek s výsledky uvedenými v přílohách č. 1. - 3. Měření proběhlo pomocí měřicího přístroje VIBEXPERT od firmy PRÜFTECHNIK. Dle výsledků měření jevílo ložisko lunety frézy elektrovřetena (E3) známky opotřebení.



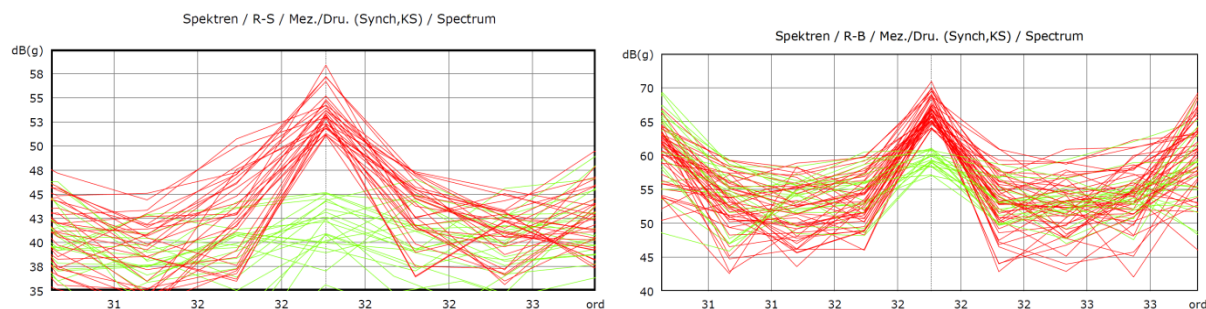
Obr. 23 Spektrum vibrací ložiska lunety frézy elektrovřetene (E3) při výrobě zpětného kola. $f_R = 16,67 \text{ Hz}$, $f_{4H} = 800 \text{ Hz}$

Analýza tohoto spektra vykazuje poškození vnitřního kroužku ložiska na základní frekvenci 200 Hz, čemuž odpovídá čtvrtá harmonická na frekvenci 800 Hz (obr. 23).

Ověřeno i výpočtem ze vzorce pro výpočet frekvence vnitřního kroužku ložiska (1):

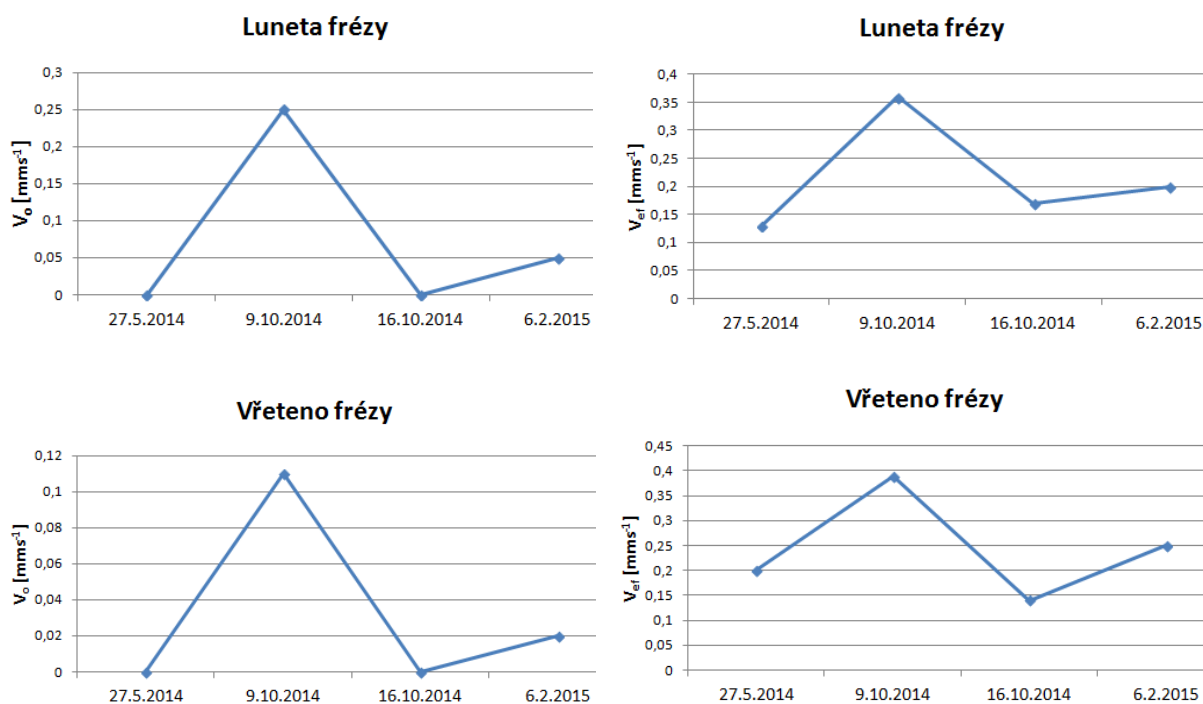
$$f_{Li} = \frac{Z}{2} \cdot f_{Ri} \cdot \left(1 + \frac{d_0}{D_S} \cdot \cos \alpha \right) = \frac{21}{2} \times 16,67 \left(1 + \frac{13,112}{82,5} \times \cos 25^\circ \right) = 200,2 \text{ Hz} \quad (1)$$

Z obrázku jsou také patrná postranní pásma odpovídající rotorové frekvenci 16,67 Hz (RPM 1000 ot/min). Ložisko je typu IBC B7013E TP2U. Výměna ložiska se také projevila na zabíhacích stavech předovky v řádové analýze rozdílem výsledné hlučnosti vloženého zpětného kola o cca 10 dB, viz obr. 24. Levý graf představuje spektrum pro TAH, pravý graf představuje spektrum pro ZPĚT. Bylo porovnáno cca 30 převodovek před (červená křivka) a po (zelená křivka) výměně ložiska lunety frézy elektrovřetene (E3) stroje PRÄWEMA.



Obr. 24 Spektrum vibrací na zabíhacím stavu před a po výměně ložiska

Vývoj trendu celkové efektivní hodnoty rychlosti vibrací v_{ef} a amplitud rychlosti v_o při měření spekter vibrací ložiska lunety frézy a vřetene je znázorněn na obr. 25. Z grafů jsou patrné zvýšené amplitudy hodnot rychlostí před výměnou ložiska a jejich pokles po výměně ložiska.



Obr. 25 Vývoj trendu hodnot rychlostí v_{ef} a v_o

U ostatních vřeten a ložisek nebyly zjištěny žádné známky opotřebení.

5.2. Rozbor dynamických poměrů frézovacího stroje ozubení hnací hřídele GLEASON

Pro pohony frézy a obrobku jsou použita elektrovřetena s parametry dle tab. 4. Byla měřena spektra vibrací vřetene frézovacího a lunety frézy. Analýza spekter nevykazuje žádné poškození, viz příloha č. 4.

Tab. 4 Parametry elektrovřeten stroje GLEASON

Elektrovřeteno	frézovací	obrobku
Rozsah otáček [ot/min]	300-4000	0-1000
Pracovní otáčky [ot/min]	1380	neměří se

5.3. Rozbor dynamických poměrů honovacího stroje ozubení hnací hřídele stroje PRÄWEMA

Pro pohony honovací hlavy a obrobku jsou použita elektrovřetena s parametry dle tab. 5. Byla měřena spektra vibrací vřetene obrobku a vřetene honovací hlavy. Analýza spekter nevykazuje žádné poškození, viz příloha č. 5.

Tab. 5 Parametry elektrovřeten honovacího stroje PRÄWEMA

Elektrovřeteno	nástroje	obrobku
Rozsah otáček [ot/min]	0-1500	0-6500
Pracovní otáčky nahrubo [ot/min]	980	5955
Pracovní otáčky načisto [ot/min]	1380	5955

5.4. Výpočet hlavních zdrojů buzení vibrací

Výpočty hlavních zdrojů vibrací všech obráběcích strojů jsou uvedeny v tab. 6. - 8. Výpočet byl proveden pro všechna elektrovřetena. Pro výpočet byl použit vzorec:

$$f_R = \frac{RPM}{60} [Hz] \quad (2)$$

Tab. 6 Frézovací stroj PRÄWEMA, RPM a výpočet frekvencí (2)

Elektrovřeteno	obrobku unášecí C1	obrobku unášecí C2	frézování nahrubo E1	sražení otřepů E2	frézování načisto E3	špičkování dolní, horní E4,E5
RPM vřetene [ot/min]	100	94	750	1500	1000	6000
f_R [Hz]	1,67	1,57	12,5	25	16,67	100

Tab. 7 Frézovací stroj GLEASON, RPM a výpočet frekvencí (2)

Elektrovřeteno	frézovací	obrobku
RPM vřetene [ot/min]	1380	Neměří se
f_R [Hz]	23	-

Tab. 8 Honovací stroj PRÄWEMA, RPM a výpočet frekvencí (2)

Elektrovřeteno	nástroje	obrobku
RPM vřetene [ot/min]	1380	5955
f_R [Hz]	23	99,25

5.5. Konstrukční uložení náhonů strojů

Všechny obráběcí stroje (honovací stroj PRÄWEMA a frézovací stroje GLEASON a PRÄWEMA) používají k obrábění vřetena s integrovaným pohonem - elektrovřetena. Výhodou těchto vřeten je uložení pohonu mezi předními a zadními ložisky, kdy není třeba dalších spojovacích součástí, což vede k snížení rizika vzniku vibrací a zároveň k zmenšení zástavbových rozměrů. V případě poruchy se jedná poměrně o snadnou a rychlou výměnu vřetene. Mezi další výhody elektrovřeten vzhledem k jejich konstrukci je možnost využití pro obrábění při vyšších otáčkách. Nevýhodou elektrovřeten je samotný motor, jenž vytváří teplo, které se přenáší na vřeteno. Z tohoto důvodu je nutné tato vřetena chladit.

5.6. Vliv vibrací na jakost výroby

Každý obráběcí stroj, na kterém probíhá řezný proces, je spjat s výskytem vibrací. Každý řezný nástroj při obrábění po sobě na obráběném povrchu zanechává více či méně výrazné stopy. Pokud nepřesáhnou určitou míru danou např. zrychlením či velikostí, nemají tyto vibrace na vlastní řezný proces a zároveň výsledek jakosti povrchu negativní vliv. Avšak když tlumící vlastnosti soustavy (nástroj, upínač nástroje, stroj, upínač obrobku a obrobek) nedokážou vibrace tlumit na přijatelnou mez, je výsledkem zhoršená jakost obráběného povrchu a nižší životnost řezného nástroje. Aby se zamezilo nežádoucím vibracím, volí se snížení řezných parametrů, což bohužel snižuje produktivitu obrábění. Z tohoto důvodu je žádoucí volit taková opatření vedoucí k snížení vibrací, která nebudou mít vliv na produktivitu, a případně pokud ano, tak minimální.

Vibrace můžeme rozdělit na vynucené a samobuzené. Vynucené vibrace vznikají působením periodických proměnlivých budících sil způsobených strojem nebo řezným procesem jako např. (přerušovaným řezem, vměstky v obráběném materiálu, nebo kolísáním průřezu třísky), kdy se jejich frekvence shoduje s frekvencí

této síly. Příčinou vzniku samovolných vibrací je budící impulz s existující zpětnou vazbou. Když se např. obrábí již obrobený povrch a přitom se periodicky mění tloušťka třísky a řezná síla. Jakmile samobuzené vibrace vzniknou, i dále se udržují a projevují se zvýšeným hlukem a stopou po chvění na obráběném povrchu. Vibrace při obrábění jsou jednoznačně nežádoucí jev.

Snad nejdůležitější podmínka k dosažení nízké drsnosti a kvality povrchu obrobku při obrábění na stroji je jeho stabilita a statická a dynamická tuhost celého systému sestávajícího se z nástroje, stroje, obrobku a upínacího přípravku. Tuhost rámu je důležitá pro útlum celého obráběcího procesu. Vznik vibrací může také způsobit nedostatečné upnutí polotovaru, které se dá redukovat změnou tlaku v systému. Kvalitu povrchu také ovlivňuje tuhost vřetene.

Z důvodu zvýšení tuhosti při provádění operací jako např. frézování, soustružení, nebo vyvrtávání je potřeba používat nástroj s minimálním vyložením a s maximálním možným průměrem. Ke snížení vibrací a jejich snadnějšímu tlumení přispívá co nejnižší hmotnost vlastní řezné jednotky nacházející se v místě největšího vyložení (obr. 26) a vlastní vyvážení nástrojů.

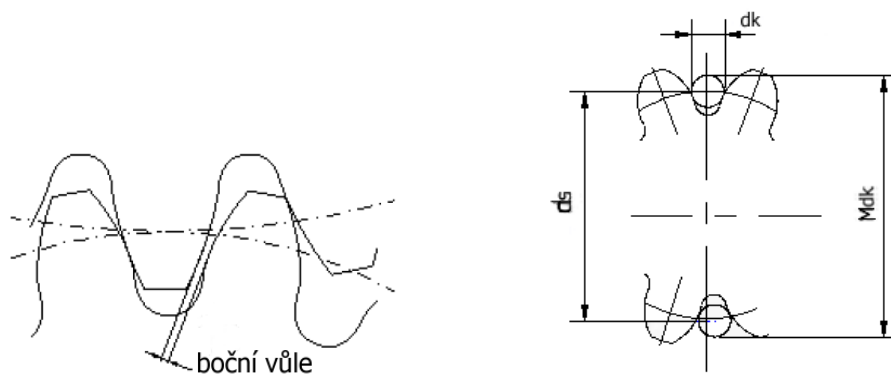


Obr. 26 Porovnání vyložení řezných jednotek

Pro obráběcí stroj s možným vznikem vibrací je žádoucí volit takový stroj, kde je zaručen dobrý stav ložisek vřeten a mechanismů posuvů, protože špatný stav ložisek způsobuje nežádoucí kmity a vibrace, ale zároveň zhoršuje tuhost stroje, čímž zvyšuje jeho sklon k vibracím. Se stoupající jakostí obrobeného povrchu se zároveň zvyšují i výrobní náklady. Z těchto důvodů je při výrobě jednotlivých součástí nezbytné volit takové kontrolní postupy pro stroj i výrobek, které zaručí, že daný výrobek bude svými parametry odpovídat předepsané technické dokumentaci. V opačném případě by mohly vzniknout vícenásobné náklady vlivem dalšího zabudování součásti do kompletu, který by později vykazoval známky nekvality.

6. ÚPRAVA MDK

Vzhledem k tomu, že operace honování dle cca 14-ti denního sledování sice problematiku „rachtání“ zlepšila, ale nevyřešila 100%, bylo nasazeno kombinovaně další opatření. Cílem tohoto opatření bylo snížit boční zubovou vůli tak, aby se v tomto směru snížil prostor pro možné rozkmitání. Prakticky řešeno změnou parametru Mdk. Na obou dílech soukolí zpětné rychlosti parametr Mdk technologicky držen v horní polovině toleranční meze (tab. 9). Mdk se v součtu na obou dílech zvětšilo cca o 0,06 mm. Tím došlo ke snížení zubové vůle o cca 0,02 mm. Honovaný hnací hřídel a vložené zpětné kolo, jež jsou předmětem této práce, byly s takto upraveným Mdk také vyrobeny. Naměřené a předepsané hodnoty pro rozměr Mdk ozubení hřídele a vloženého kola jsou patrné z protokolů na obr. 15 - 22. V tab. 9 je shrnut z uvedených protokolů rozdíl jednotlivých rozměrů pro ozubení hřídele a kola.



Obr. 27 Zubová mezera a rozměr přes kuličky Mdk

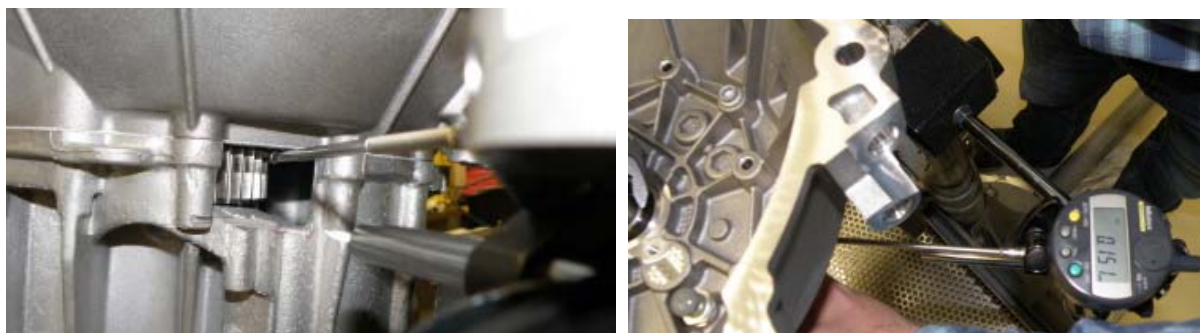
sudý počet zubů: $Mdk = d_s + d_k$

lichý počet zubů: $Mdk = d_s \times \cos(90 / z) + d_k$

Tab. 9 Porovnání hodnot před a po změně Mdk, F_r a f_{pt} z naměřených protokolů

Rozměr	Předpis před změnou	Předpis po změně	Kus před změnou	Kus po změně	Rozdíl
Mdk hřídele [mm]	34,055-34,119	34,087-34,119	34,103	34,118	0,015
Mdk vloženého kola [mm]	70,721 - 70,804	70,721-70,804	70,767	70,785	0,018
f_{pt} hřídele [μ m]	9	5	4	1	4
F_r hřídele [μ m]	56	20	10	2	8
f_{pt} vl. kola [μ m]	10	10	5	4	1
F_r vl. kola [μ m]	63	63	35	25	10

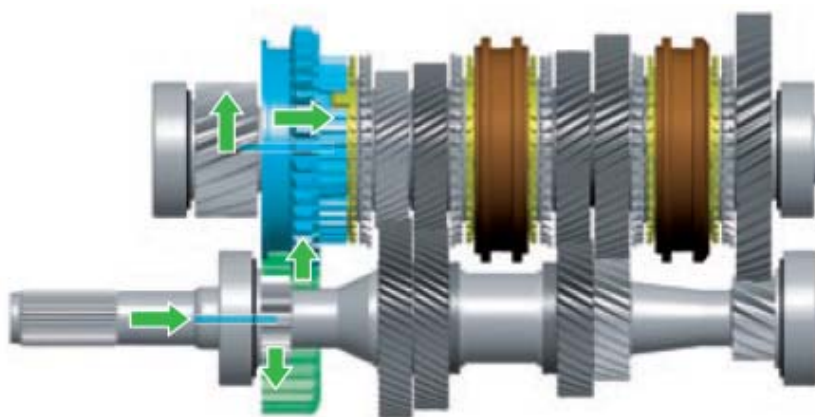
Pro měření zubové vůle byl do skříně převodovky MQ 100 vyříznut otvor a za pomoci digitálního úchylkoměru byla experimentálně měřena zubová vůle. Hřídel byl pevně zafixován proti otáčení, kolo zpětné rychlosti bylo nejdříve nastaveno do 1. krajní polohy a na úchylkoměru nastavena nula, poté bylo v rámci zubové vůle mezi ozubením zpětné rychlosti hnacího hřídele a ozubením vloženého kola otočeno kolem do 2. krajní polohy. Na úchylkoměru byla naměřena výsledná hodnota o velikosti 0,151 mm, což představuje cca 0,15 mm (obr. 28). Před úpravou Mdk se naměřená zubová vůle pohybovala okolo cca 0,17 mm.



Obr. 28 Měření zubové vůle digitálním úchylkoměrem

7. MĚŘENÍ A VÝPOČET FREKVENCÍ HNACÍHO HŘÍDELE

Pro výpočet frekvencí hnacího hřídele byla použita převodovka s označením QAE. Na zabíhací stanici se pro každý rychlostní stupeň nastavily vstupní otáčky hřídele a na analyzátoru vibrací se pro tyto otáčky zaznamenala měřená data. Data měřená analyzátozem MICROLOG byla snímána pomocí snímače vibrací od firmy SKF, který byl přišroubován na připevněný držák ke skříní převodovky (obr. 4). Měření bylo provedeno v režimu převodovky pro TAH i ZPĚT ve frekvenční analýze, nejprve pro frézované ozubení hnacího hřídele dne 12. 3. 2015 a následně pro honované ozubení hnacího hřídele dne 27. 4. 2015. Aby bylo možné jednotlivé frekvence počítat, je nutné znát údaje zabudovaných součástí uvedené v tab. 10 a otáčky vstupního hřídele nastavené na zabíhací stolici.



Obr. 29 Tok výkonu zpátečkou

Tab. 10 Počty zubů převodovky s označením QAE

Rychlostní stupeň	Počet zubů			
	Vstupního hřídele z I_i	Výstupního hřídele z II_i	Vložené kolo zp. rychlosti	Hřídel diferenciálu z III_i
1	14	51	-	-
2	22	43	-	-
3	37	47	-	-
4	49	47	-	-
5	54	43	-	-
Stálý převod	-	16	-	77
Zpětná rychlost (hnací h. + vložené kolo)	13	-	32	-
Zpětná rychlost (vložené kolo + hnaná h.)	-	47	32	-

Použité vzorce ve výpočtech:

Rotorová frekvence vstupního hřídele

Rotorová frekvence výstupního hřídele

$$f_{RI} = \frac{n}{60} \text{ [Hz]} \quad f_{RII} = f_{RI} \cdot \frac{z_{II}}{z_{II_i}} \text{ [Hz]} \quad (4)$$

Rotorová frekvence diferenciálu

Zubová frekvence a frekvence stálého převodu

$$f_{RIII} = f_{RII} \cdot \frac{z_{II_s}}{z_{II_s}} \text{ [Hz]} \quad f_{z_i} = f_{RI} \cdot z_{II} = f_{RII} \cdot z_{II_i}, f_{z_s} = f_{RII} \cdot z_{II_s} \text{ [Hz]} \quad (5)$$

Měření a výpočet frekvencí pro frézované ozubení hřídele ze dne 12. 3. 2015

Tab. 11 Rotorové a zubové frekvence převodovky QAE: frézované ozubení – Frekvenční TAH, (4), (5)

Rychlostní stupeň	Otáčky vstupní hřídele ot/min	Rotorová frekvence vstupní hřídele f_{RI} [Hz]	Rotorová frekvence výstupní hřídele f_{RII} [Hz]	Rotorová frekvence hřídele diferenciálu f_{RIII} [Hz]	Zubová frekvence f_z [Hz]	Zubová frekvence stálého převodu f_{zs} [Hz]
1	1822	30,367	8,336	1,732	425,133	133,375
2	3697	61,617	31,525	6,550	1355,574	504,4
3	3048	50,8	39,992	8,310	1879,6	639,872
4	4485	74,75	77,931	16,193	3662,75	1246,896
5	3600	60	75,349	15,657	3240	1205,584
Zp.	1325	22,083	-	-	287,080	-

Tab. 12 Rotorové a zubové frekvence převodovky QAE: frézované ozubení – Frekvenční ZPĚT, (4), (5)

Rychlostní stupeň	Otáčky vstupní hřídele ot/min	Rotorová frekvence vstupní hřídele f_{RI} [Hz]	Rotorová frekvence výstupní hřídele f_{RII} [Hz]	Rotorová frekvence hřídele diferenciálu f_{RIII} [Hz]	Zubová frekvence f_z [Hz]	Zubová frekvence stálého převodu f_{zs} [Hz]
1	1802	30,033	8,244	1,713	420,462	131,904
2	2305	38,417	19,655	4,084	845,167	314,48
3	3046	50,767	39,965	8,305	1878,379	639,44
4	4482	74,7	77,879	16,183	3660,3	1246,06
5	3628	60,467	75,935	15,779	3265,22	1214,958
Zp.	1313	21,883	-	-	284,479	-

Měření a výpočet frekvencí pro honované ozubení hřídele ze dne 27. 4. 2015

Tab. 13 Rotorové a zubové frekvence převodovky QAE: honované ozubení – Frekvenční TAH, (4), (5)

Rychlostní stupeň	Otáčky vstupní hřídele ot/min	Rotorová frekvence vstupní hřídele $f_{R I}$ [Hz]	Rotorová frekvence výstupní hřídele $f_{R II}$ [Hz]	Rotorová frekvence hřídele diferenciálu $f_{R III}$ [Hz]	Zubová frekvence f_z [Hz]	Zubová frekvence stálého převodu f_{zs} [Hz]
1	2075	34,583	9,494	1,973	484,167	151,895
2	3630	60,5	30,954	6,432	1331	495,256
3	3101	51,683	40,687	8,454	1912,283	650,990
4	4422	73,7	76,836	15,966	3611,3	1229,379
5	3562	59,367	74,554	15,492	3205,8	1192,856
Zp.	1470	24,5	-	-	318,5	-

Tab. 14 Rotorové a zubové frekvence převodovky QAE: honované ozubení – Frekvenční ZPĚT, (4), (5)

Rychlostní stupeň	Otáčky vstupní hřídele ot/min	Rotorová frekvence vstupní hřídele $f_{R I}$ [Hz]	Rotorová frekvence výstupní hřídele $f_{R II}$ [Hz]	Rotorová frekvence hřídele diferenciálu $f_{R III}$ [Hz]	Zubová frekvence f_z [Hz]	Zubová frekvence stálého převodu f_{zs} [Hz]
1	1899	31,65	8,688	1,805	443,1	139,012
2	2293	38,217	19,553	4,063	840,767	312,843
3	3084	51,4	40,464	8,408	1901,8	647,421
4	4491	74,85	78,035	16,215	3667,65	1248,562
5	3633	60,55	76,040	15,800	3269,7	1216,633
Zp.	1644	27,4	-	-	356,2	-

Porovnání spekter vibrací frézovaného a honovaného ozubení hřídele

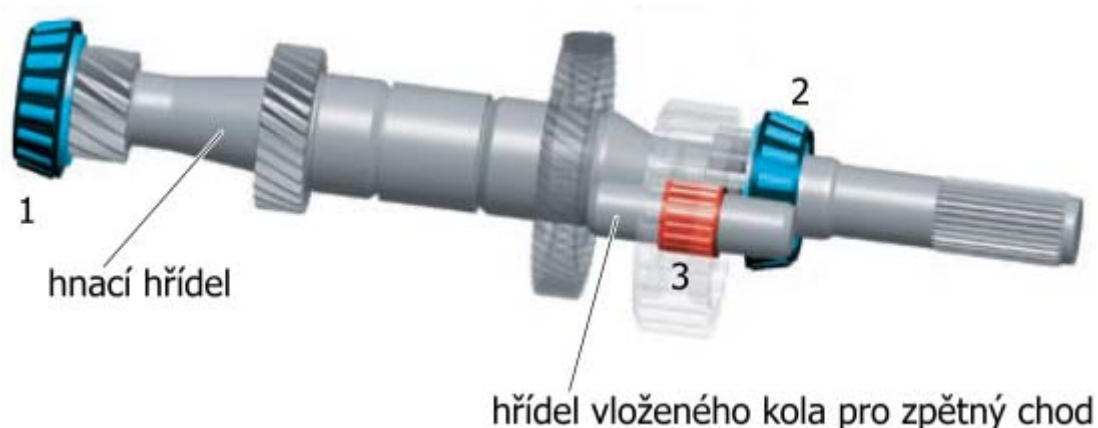
Pro jednotlivé rychlosti v režimu TAH a ZPĚT byla z analyzátoru vibrací do počítače zkopírována jednotlivá vibrační spektra, která byla analyzována pomocí frekvenční analýzy. Ze spekter vibrací stanoveny amplitudy pro zubové frekvence a celkové efektivní hodnoty zrychlení vibrací (viz kap. 8).

7.1. Výpočet frekvencí ložisek převodovky MQ 100

Pro výpočty frekvencí je třeba znát jednotlivé parametry ložisek, které jsou uvedeny v tab. 15 a rotorové frekvence hřídelů vypočtených v kapitole 7. Jednotlivá ložiska jsou umístěna dle obr. č. 30.

Tab. 15 Parametry ložisek převodovky MQ 100

Ložisko	Označení / Typ	Počet valivých těles Z	Průměr valivého tělíska do [mm]	Střední průměr ložiska D _s [mm]	Úhel dotyku α [°]
1,2	OAM 311 123 D kuželíkové	17	7,835	38,5	14°2'10''
3	02J 311 848 jehlové	17	2	19	0



Obr. 30 Umístění ložisek na hřídelích

Použité vzorce ve výpočtech:

$$f_{Li} = \frac{Z}{2} \cdot f_{Ri} \cdot \left(1 + \frac{d_0}{D_S} \cdot \cos\alpha\right) \quad f_{Lo} = \frac{Z}{2} \cdot f_{Ri} \cdot \left(1 - \frac{d_0}{D_S} \cdot \cos\alpha\right) \quad (6)$$

$$f_{Lv} = \frac{D_S}{2d_0} \cdot f_{Ri} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_0}{D_S} \cdot \cos\alpha\right)^2\right] \quad f_{Lk} = \frac{1}{2} \cdot f_{Ri} \cdot \left(1 - \frac{d_0}{D_S} \cdot \cos\alpha\right) \quad (7)$$

Tab. 16 Frekvence ložiska č. 1 a 2 pro frézovaný hnací hřídel, (6), (7)

Rychlostní stupeň	Frekvence vnitřního kroužku f_{Li} [Hz]		Frekvence vnějšího kroužku f_{Lo} [Hz]		Frekvence valivých těles f_{Lv} [Hz]		Frekvence klece ložiska f_{Lk} [Hz]	
	F. T.	F. Z.	F. T.	F. Z.	F. T.	F. Z.	F. T.	F. Z.
Typ analýzy								
1	309,078	305,678	207,161	204,883	71,701	70,913	12,186	12,052
2	627,143	391,011	420,346	262,078	145,488	90,709	24,726	15,416
3	517,047	516,711	346,553	346,328	119,947	119,869	20,385	20,372
4	760,812	760,303	509,938	509,597	176,497	176,379	29,996	29,976
5	610,685	615,438	409,315	412,501	141,67	142,773	24,077	24,265
Zp.	224,763	222,727	150,648	149,284	52,142	51,669	8,862	8,781

Tab. 17 Frekvence ložiska č. 3 pro frézovaný hnací hřídel, (7)

Rychlostní stupeň	Frekvence vnitřního kroužku f_{Li} [Hz]		Frekvence vnějšího kroužku f_{Lo} [Hz]		Frekvence valivých těles f_{Lv} [Hz]		Frekvence klece ložiska f_{Lk} [Hz]	
	F. T.	F. Z.	F. T.	F. Z.	F. T.	F. Z.	F. T.	F. Z.
Typ analýzy								
Zp.	-	-	-	-	42,135	41,76	4,013	3,997

Tab. 18 Frekvence ložiska č. 1 a 2 pro honovaný hnací hřídel, (6), (7)

Rychlostní stupeň	Frekvence vnitřního kroužku f_{Li} [Hz]		Frekvence vnějšího kroužku f_{Lo} [Hz]		Frekvence valivých těles f_{Lv} [Hz]		Frekvence klece ložiska f_{Lk} [Hz]	
	F. T.	F. Z.	F. T.	F. Z.	F. T.	F. Z.	F. T.	F. Z.
Typ analýzy								
1	351,989	322,136	235,922	215,914	81,656	74,731	13,878	12,701
2	615,774	388,976	412,726	260,713	142,85	90,237	24,278	15,336
3	526,034	523,154	352,577	350,646	122,032	121,364	20,74	20,626
4	750,125	761,83	502,775	510,62	174,018	176,733	29,575	30,036
5	604,242	616,283	404,997	413,067	140,175	142,969	23,823	24,298
Zp.	249,363	278,88	167,137	186,92	57,849	64,696	9,832	10,995

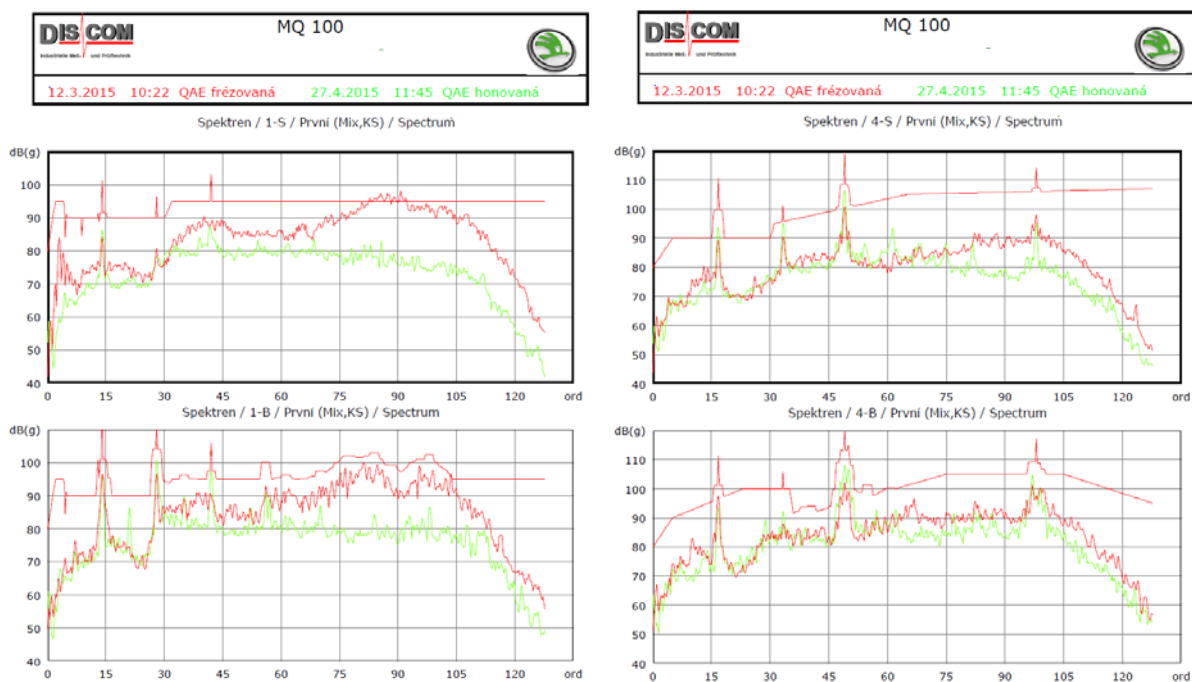
Tab. 19 Frekvence ložiska č. 3 pro honovaný hnací hřídel, (7)

Rychlostní stupeň	Frekvence vnitřního kroužku f_{Li} [Hz]		Frekvence vnějšího kroužku f_{Lo} [Hz]		Frekvence valivých těles f_{Lv} [Hz]		Frekvence klece ložiska f_{Lk} [Hz]	
	F. T.	F. Z.	F. T.	F. Z.	F. T.	F. Z.	F. T.	F. Z.
Typ analýzy								
Zp.	-	-	-	-	46,739	52,282	4,451	4,979

8. ANALÝZA PROVEDENÝCH MĚŘENÍ

Z výpočtu frekvencí ložisek a z analýzy změřených spekter vibrací nebyla zjištěna žádná poškození, ložiska převodovky MQ 100 na hnacím hřídeli a hřídeli zpětné rychlosti nemají žádný vliv na zvýšenou hlučnost převodovky.

Porovnání hlučnosti na zabíhacím stavu v řádové analýze pro oba způsoby opracování ozubení je patrné z obr. 31. Zelená křivka představuje honované ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele (včetně úpravy rozměru Mdk na ozubení hřídele a ozubení vloženého kola zpětné rychlosti), červená představuje frézovaný pastorek (bez úprav rozměru Mdk hřídele a kola). Frézované ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele se na zabíhací stanici ve všech rychlostech pro TAH i ZPĚT projevilo zvýšenou hlučností především ve vyšších řádech. V nižších řádech lze konstatovat, že hlučnost převodovky se oproti honovanému ozubení nezměnila, v některých řádech byla i nižší. Honováním ozubení včetně úprav Mdk se hlučnost snížila především u první rychlosti ve vyšších řádech až o cca 15 dB. V ostatních rychlostech došlo ke snížení hlučnosti ve vyšších řádech o cca 10 dB, u zpětné rychlosti o cca max. 5 dB.

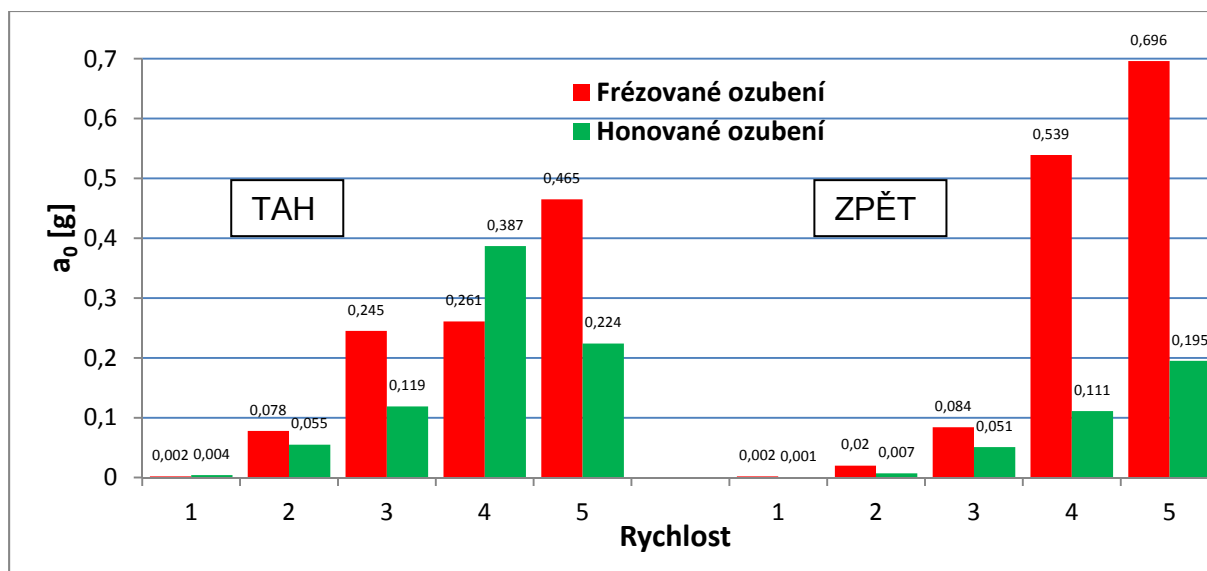


Obr. 31 Porovnání řádové analýzy 1. a 4. rychlosti v TAHU i ZPĚT

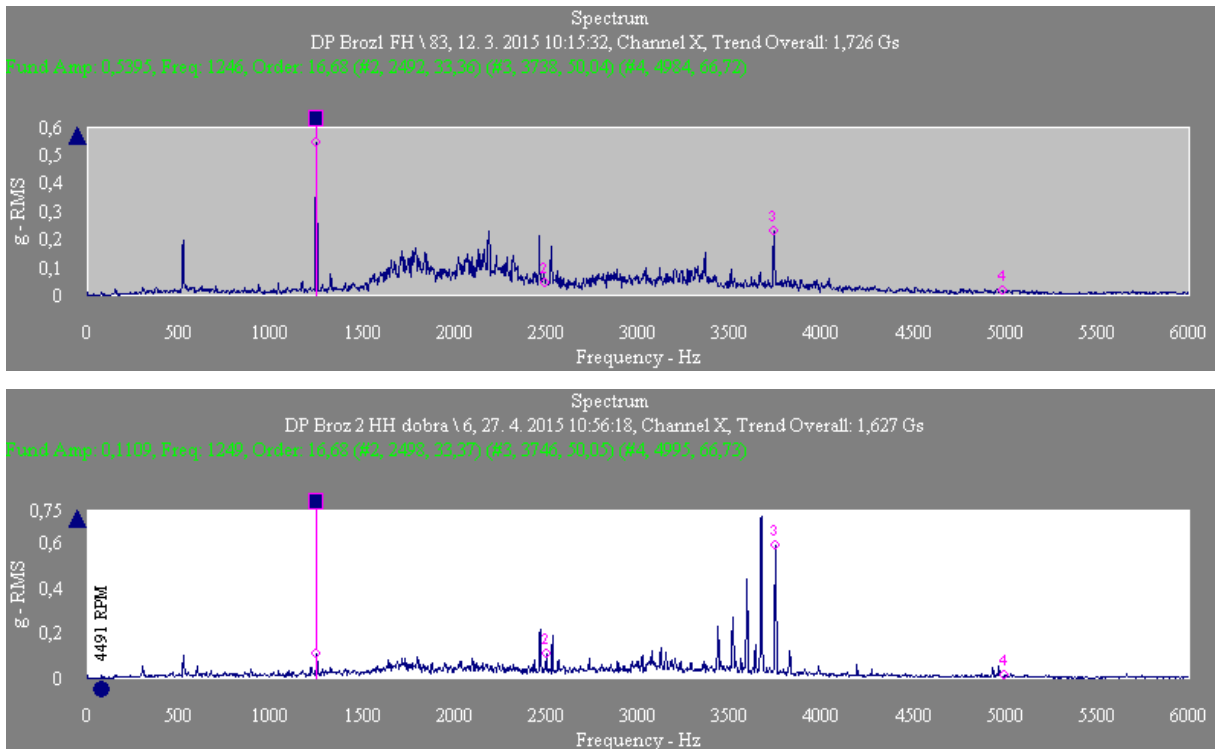
Z analýzy frekvenčních spekter vibrací provedených měření pomocí přístroje MICROLOG byla v jednotlivých rychlostech pro režim TAH i ZPĚT porovnána amplituda zubové frekvence stálého převodu. Z provedených měření je zřejmé, že u honovaného ozubení ve všech rychlostech došlo ke snížení amplitudy zrychlení zubové frekvence stálého převodu. To se nejvíce projevilo především v 5. a 4. rychlosti na ZPĚT (tab. 20 a obr. 32 - 34). Vyjímkou byla 4. rychlost v TAHU, kde se zvýšila amplituda z 0,261 (frézované ozubení) na 0,387 (honované ozubení).

Tab. 20 Výsledné hodnoty amplitud zrychlení pro frekvenci f_{zs}

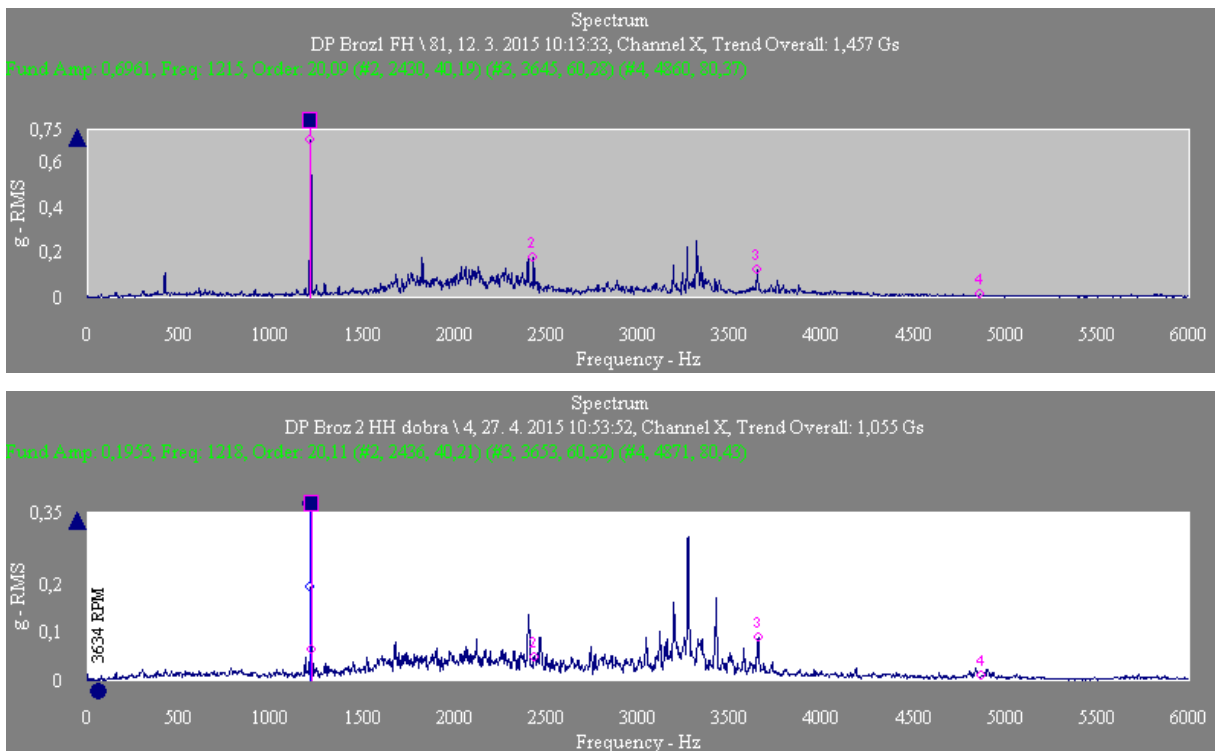
Rychlost	Frézované ozubení $a_0 (f_{zs})$ – frekvenční analýza		Honované ozubení $a_0 (f_{zs})$ – frekvenční analýza	
	TAH	ZPĚT	TAH	ZPĚT
1	0,002	0,002	0,004	0,001
2	0,078	0,020	0,055	0,007
3	0,245	0,084	0,119	0,051
4	0,261	0,539	0,387	0,111
5	0,465	0,696	0,224	0,195



Obr. 32 Porovnání amplitud zrychlení frézovaného a honovaného ozubení z tab. 20



Obr. 33 Frekvenční spektrum vibrací převodovky MQ100 při 4. rychlosti na ZPĚT (horní obr. frézované ozubení - $a_{0\ fzs} = 0,539\text{ g}$, dolní obr. honované ozubení - $a_{0\ fzs} = 0,111\text{ g}$ => honování je o 79% menší).

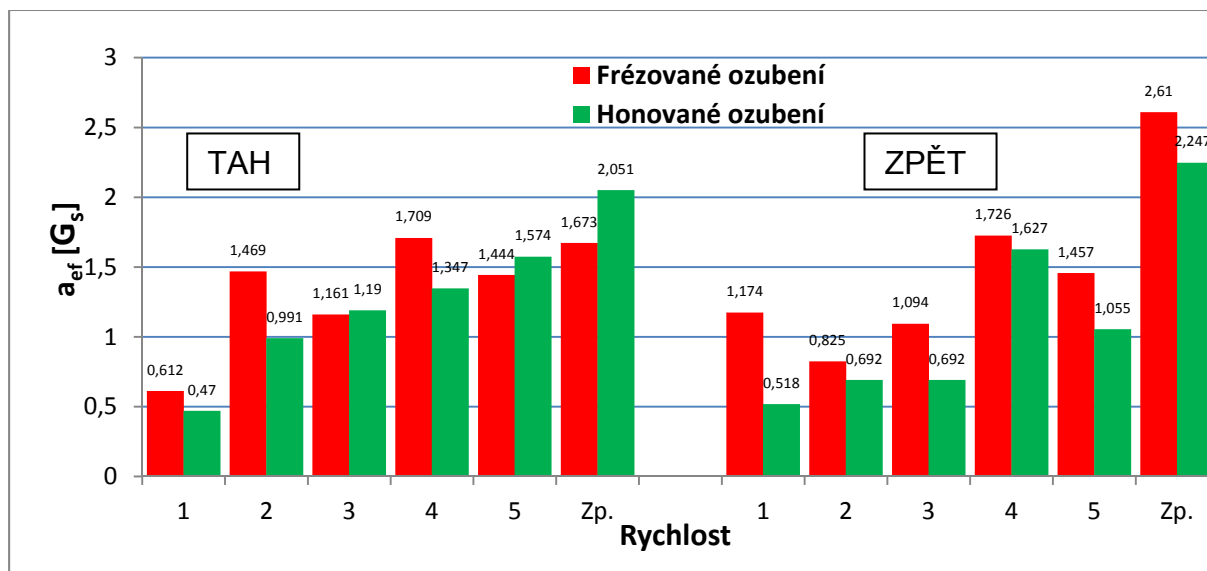


Obr. 34 Frekvenční spektrum vibrací převodovky MQ100 při 5. rychlosti na ZPĚT (horní obr. frézované ozubení - $a_{0\ fzs} = 0,696\text{ g}$, dolní obr. honované ozubení - $a_{0\ fzs} = 0,195\text{ g}$ => honování je o 72% menší).

Porovnáním efektivních hodnot zrychlení vibrací došlo u honovaného ozubení oproti frézovanému v režimu ZPĚT k snížení celkových hodnot zrychlení vibrací ve všech rychlostech. V režimu TAH se u honovaného ozubení zvýšily vibrace v třetí, páté a zpětné rychlosti (tab. 21 a obr. 35).

Tab. 21 Výsledné celkové efektivní hodnoty zrychlení vibrací a_{ef}

Rychlost	Frézované ozubení a_{ef} – frekvenční analýza		Honované ozubení a_{ef} – frekvenční analýza	
	TAH	ZPĚT	TAH	ZPĚT
1	0,612	1,174	0,470	0,518
2	1,469	0,825	0,991	0,692
3	1,161	1,094	1,190	0,692
4	1,709	1,726	1,347	1,627
5	1,444	1,457	1,574	1,055
Zp.	1,673	2,610	2,051	2,247

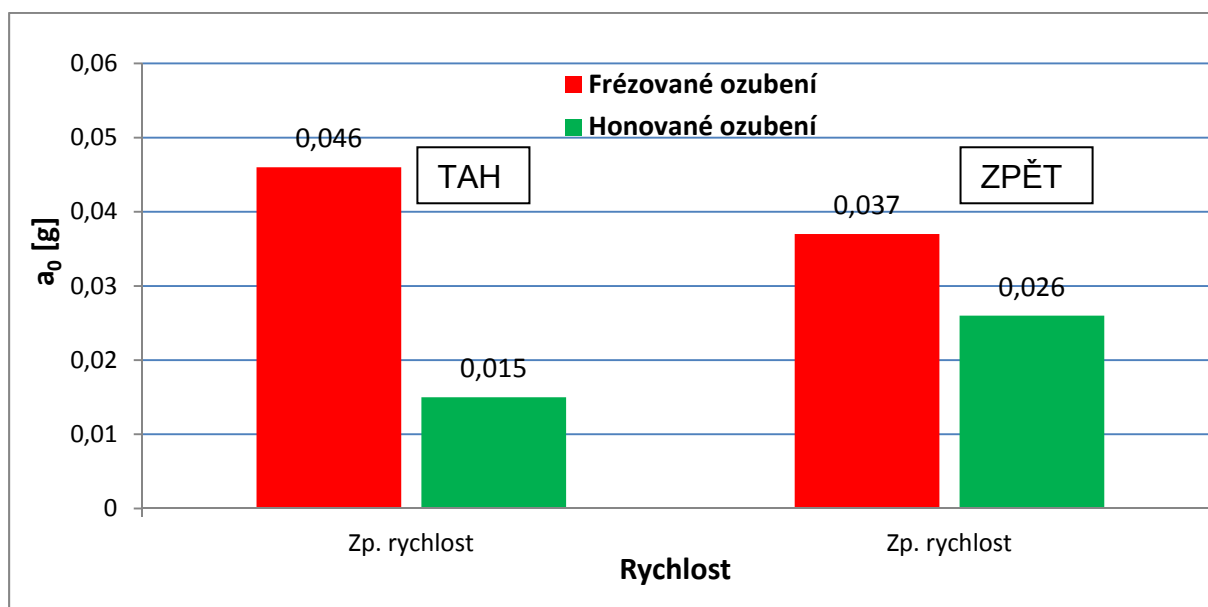


Obr. 35 Porovnání celkových efektivních hodnot zrychlení vibrací frézovaného a honovaného ozubení z tab. 21

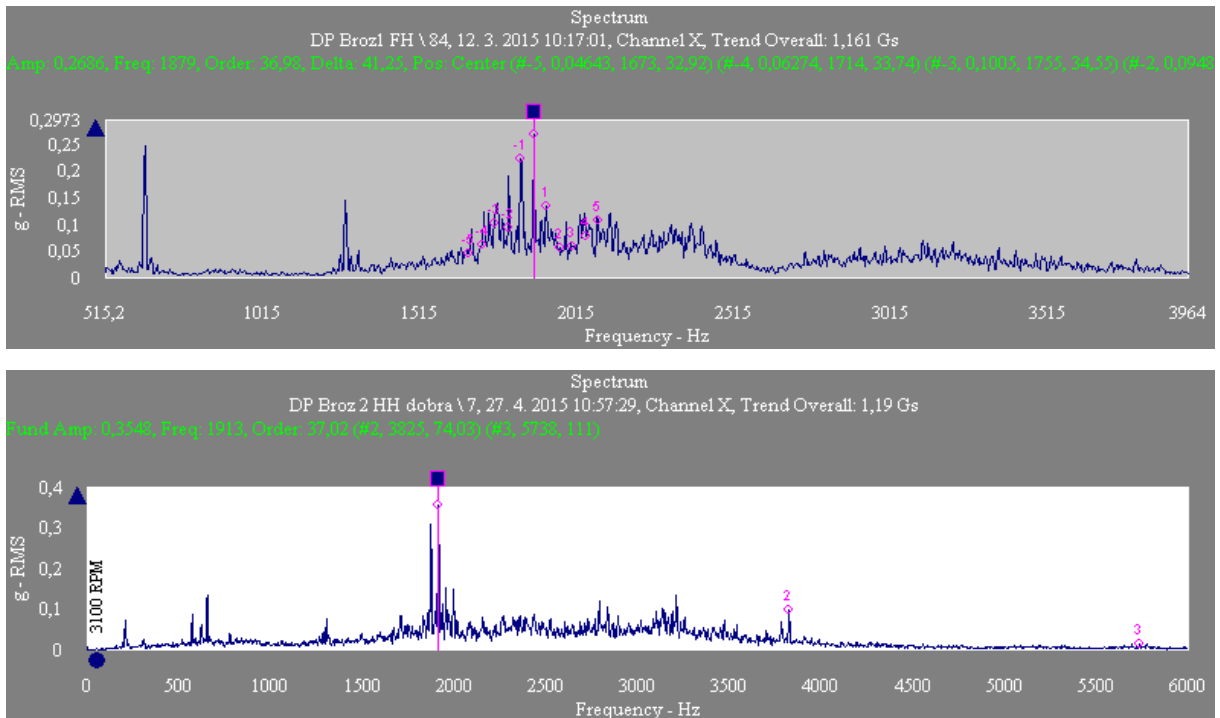
U zpětné rychlosti na honovaném ozubení došlo ke snížení amplitudy zrychlení zubové frekvence v obou režimech TAH i ZPĚT (tab. 22 a obr. 36).

Tab. 22 Výsledné hodnoty amplitud zrychlení pro frekvenci f_z

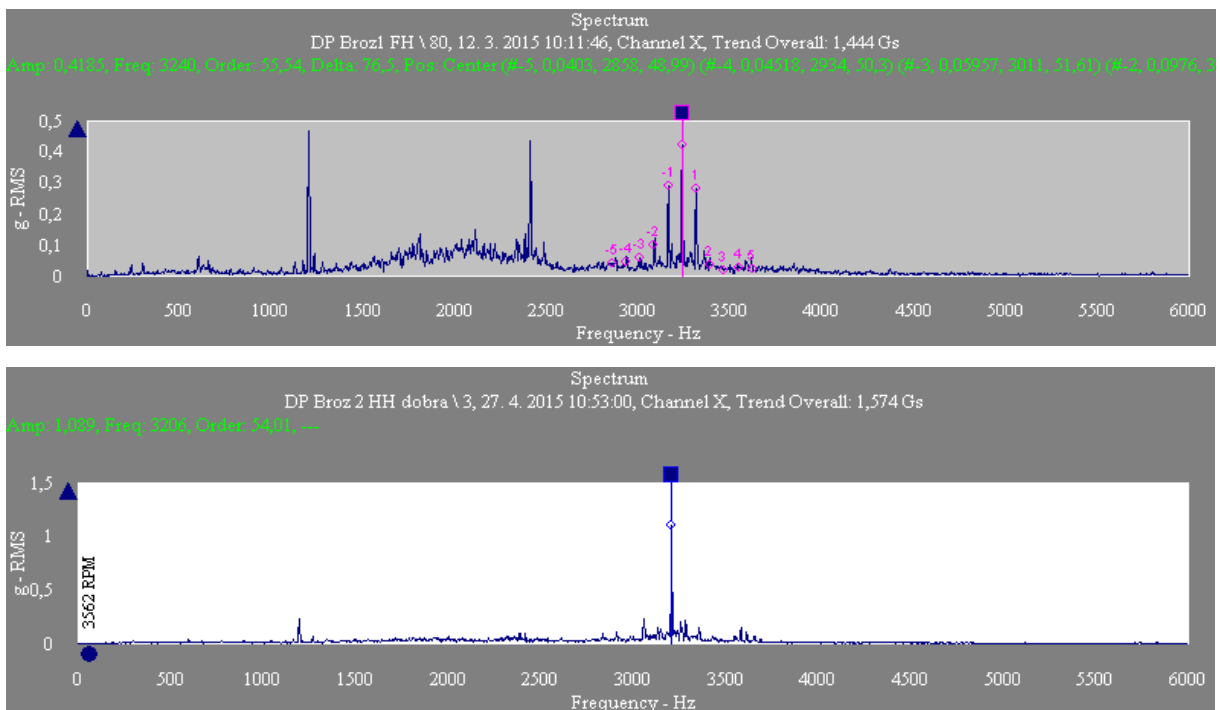
Rychlost	Frézované ozubení $a_0(f_z)$ – frekvenční analýza		Honované ozubení $a_0(f_z)$ – frekvenční analýza	
	TAH	ZPĚT	TAH	ZPĚT
Zp. rychlost	0,046	0,037	0,015	0,026



Obr. 36 Porovnání amplitud zrychlení frézovaného a honovaného ozubení z tab. 22



Obr. 37 Frekvenční spektrum vibrací převodovky MQ100 při 3. rychlosti v TAHU v zubové frekvenci Zoom => Vznik modulací s frekvencí 40 Hz tj. rotorová frekvence výstupního hřídele u frézovaného ozubení (horní obr.). Honované ozubení bez výskytu modulací (dolní obr.).



Obr. 38 Frekvenční spektrum vibrací převodovky MQ100 při 5. rychlosti v TAHU v zubové frekvenci => Vznik modulací s frekvencí 75 Hz tj. rotorová frekvence výstupního hřídele u frézovaného ozubení (horní obr.). Honované ozubení bez výskytu modulací (dolní obr.).

9. ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala snížením výsledné hlučnosti zpětné rychlosti převodovky MQ 100 jak vlivem různého způsobu opracování ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele, tak vlivem úpravy rozměru Mdk.

Nejprve byla měřena a analyzována spektra vibrací unášecích a obráběcích vřeten jednotlivých obráběcích strojů, zda neovlivňují výrobu ozubení zpětného kola a ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele. Jako jediné jevilo známky poškození ložisko lunety frézy elektrovřetena (E3). Po výměně ložiska se hlučnost na zabíhacím stavu snížila ve spektrech zpětné rychlosti v 32. řádu v synchronním kanálu SK2 o cca 10 dB (viz kap. 5.1). V řádových spektrech pro 1. - 5. rychlost v kanálu MIX se hlučnost nijak neprojevila. Ostatní kontrolovaná ložiska a vřetena u všech strojů byla bez známek poškození.

Na zabíhacím stavu byla v řádové analýze hodnocena hlučnost frézovaného ozubení zpětné rychlosti bez úprav rozměru Mdk. Poté následovala demontáž hnacího hřídele a vloženého kola zpětné rychlosti, výměna za honované ozubení hnacího hřídele a ozubení vloženého kola zpětné rychlosti (oba díly s úpravou Mdk – viz kap. 6). Pro obě technologie výroby ozubení byla hodnocena hlučnost jak řádovou analýzou na zabíhací stanici, tak frekvenční analýzou pro všechny rychlostní stupně v režimech TAH i ZPĚT. Pro oba způsoby opracování ozubení hřídele byly v měrovém středisku porovnány naměřené hodnoty. Analýzou spekter vibrací ve frekvenční analýze ani výpočtem frekvencí ložisek nebyla zjištěna žádná poškození ovlivňující hlučnost převodovky.

Frekvenční analýzy, které byly provedeny 12. 3. 2015 a 27. 4. 2015 potvrdily předpoklad, že na celkovou hlučnost převodovky mají vliv opětovné montáže jednotlivých komponentů převodovky. Porovnáním příloh č. 6 a 7, se při druhém měření na zabíhací stanici s honovaným ozubením zpětné rychlosti hřídele v některých případech zhoršily amplitudy zubové frekvence a zubové frekvence stálého převodu. Projevil se zde vliv opětovné, ručně provedené montáže, při které pravděpodobně došlo během montáže k jiným vůlím a předpětí ložisek. Z tohoto důvodu doporučuji, aby v případě dalších zkoušek byla prováděna montáž převodovky strojní montáží. Dále se na frézovaném ozubení v 3. a 5. rychlosti v TAHU v zubové frekvenci vyskytly modulace s frekvencí 40 Hz a 75 Hz tj. rotorová frekvence výstupního hřídele u frézovaného ozubení (obr. 37, 38). V případě

honovaného ozubení se výskyt modulací ve všech rychlostech a obou režimech neprojevil. Modulace je definována jako „systematická modifikace časového průběhu signálu (nosná vlna) vzhledem k charakteristice jiného signálu (modulační signál)“. V ozubení je záběrová zubová frekvence nosnou frekvencí a otáčky ozubených kol modulátorem [1].

Největší vliv na snížení celkové hodnoty hluku zpětné rychlosti převodovky MQ 100 se projevil při frekvenční analýze spekter vibrací u honovaného ozubení hřídele s úpravou rozměru Mdk pro ozubení hřídele a kola zpětné rychlosti (viz kap. 8, tab. 20, obr. 32-34), kde došlo ke snížení amplitud zrychlení, nejvíce v 4. rychlosti na ZPĚT o 79%. Dále porovnáním řádivých analýz na zabíhací stanici se hlučnost snížila u honovaného ozubení hřídele s kombinací úpravy Mdk ve vyšších řádech až o cca 5 – 15 dB (viz kap. 8, obr. 31). Nižší řády jsou srovnatelné s frézovaným ozubením. Přechodem z technologie frézovaného ozubení zpětné rychlosti hřídele na honované ozubení s kombinací úprav rozměru Mdk na zpětném ozubení hřídele a vloženém kole směrem k horní hranici tolerance se celková hlučnost převodovky snížila především ve vyšších řádech.

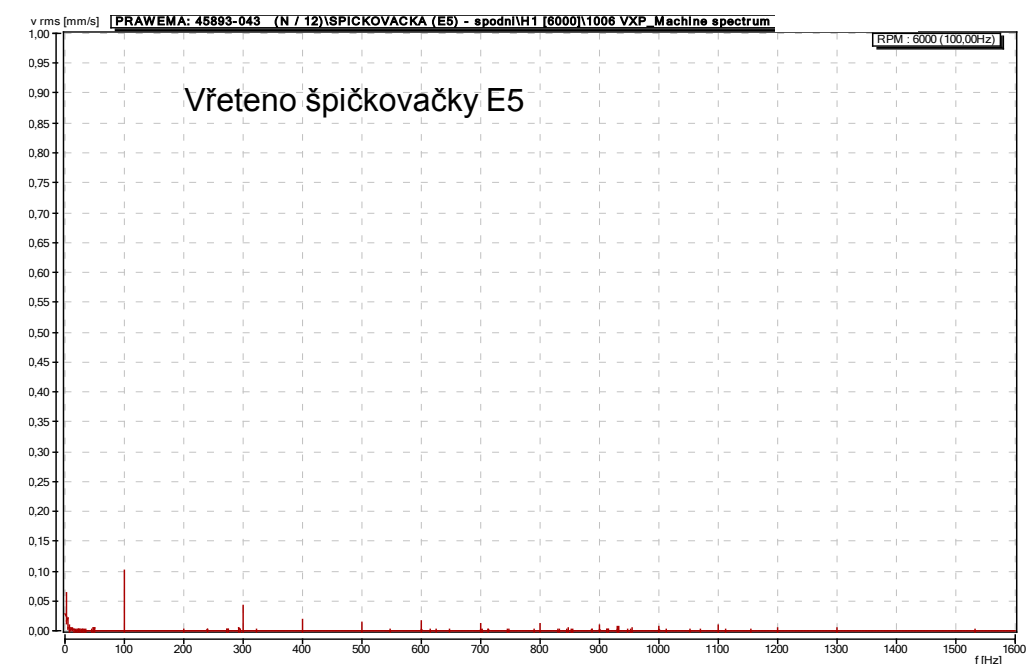
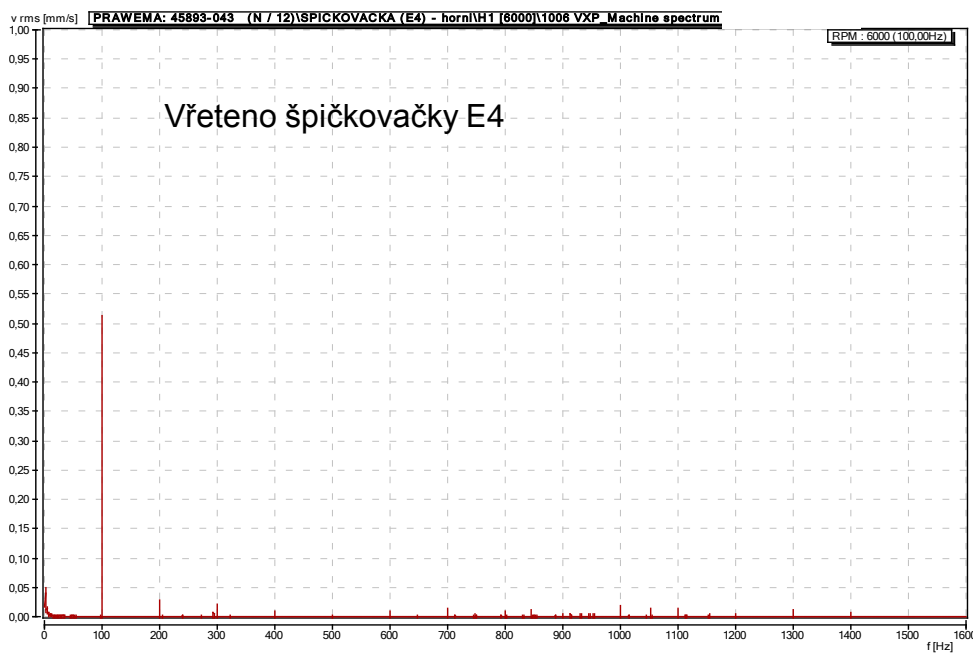
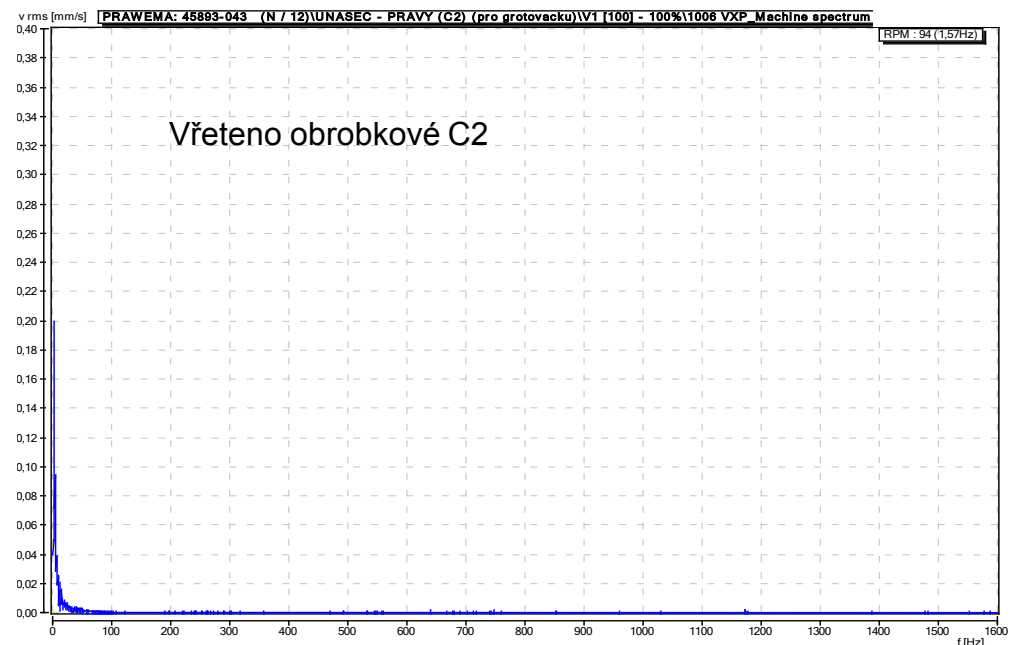
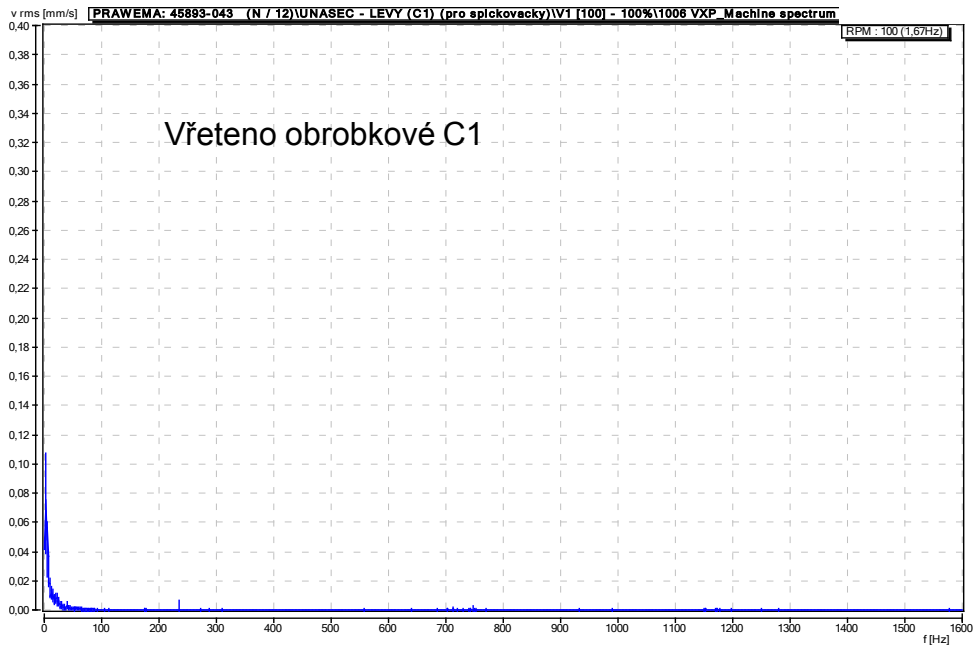
Sériové nasazení těchto dvou navržených opatření, na kterých jsem spolupracoval, vedlo ke snížení "rachtavého" hluku zpětné rychlosti ve všech rychlostech způsobeného trvalým záběrem ozubení hnacího hřídele s ozubením kola zpětné rychlosti. Tento stav, jenž byl nasazen od 11/2014 trvá i nadále v současnosti. Vzhledem k odpadnutí operace dvoubokého odvalu (Linnenbrink), nedošlo k výrazné změně pracnosti přidáním operace honování na hnacím hřídeli. Podmínkou zavedení opatření snížení zubové vůle (úpravou Mdk) je ponechání operace honování z důvodu požadované přesnosti výroby ozubení. Z tohoto důvodu další snížení zubové vůle nedoporučuji. Pokud by se v budoucnu jevila tato opatření jako nedostačující, doporučuji zabývat se konstrukční změnou počtu zubů z důvodu zvýšení součinitele délky trvání záběru.

Seznam použité literatury

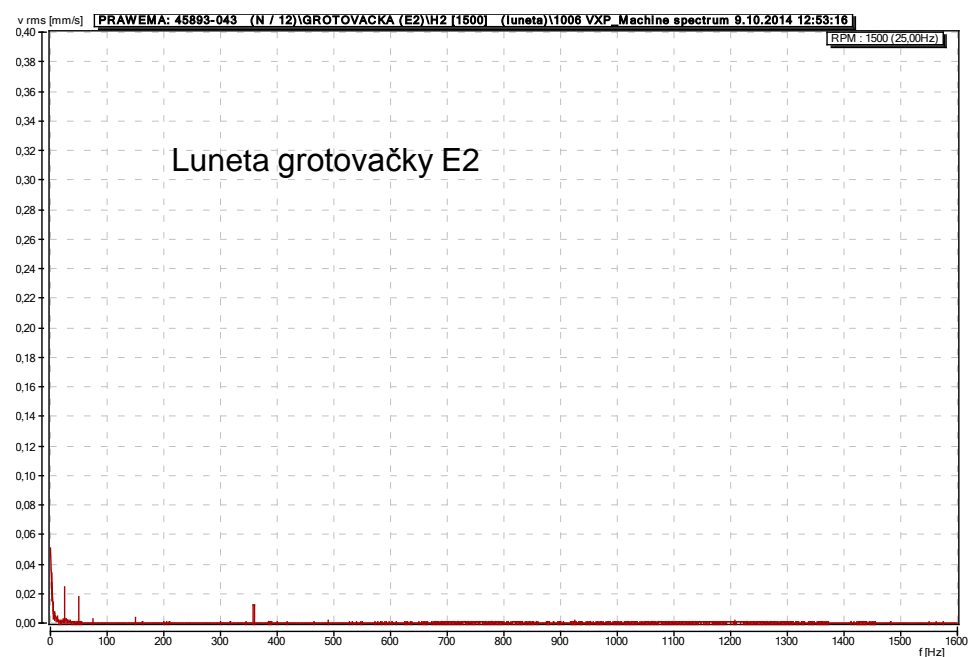
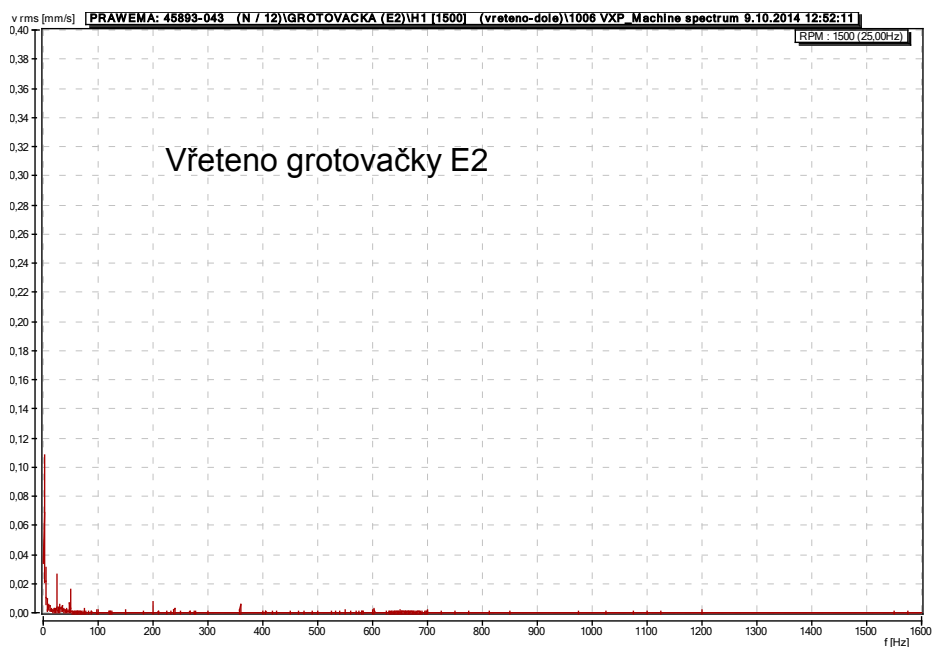
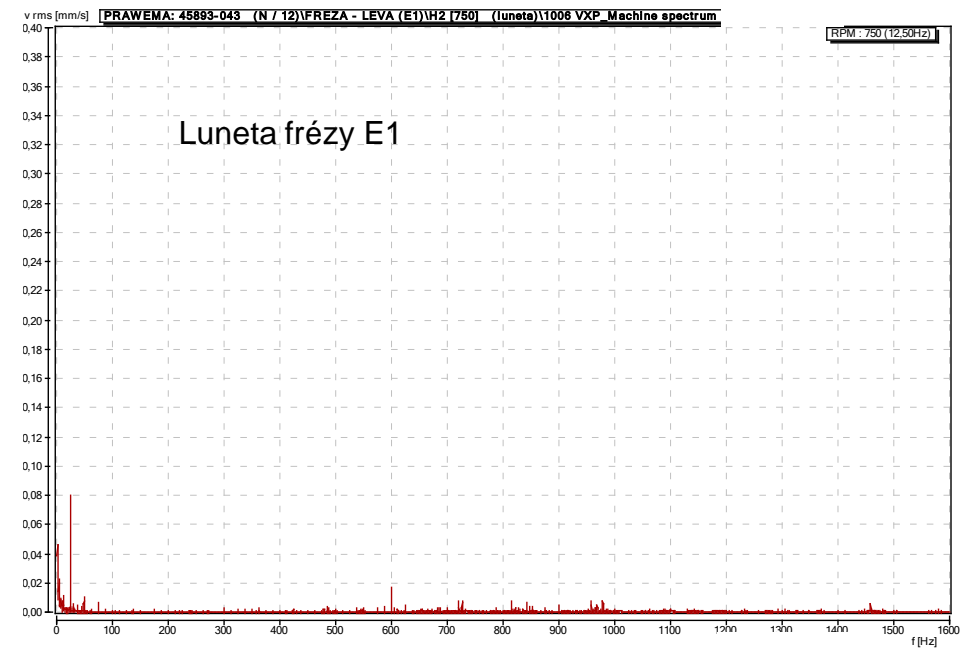
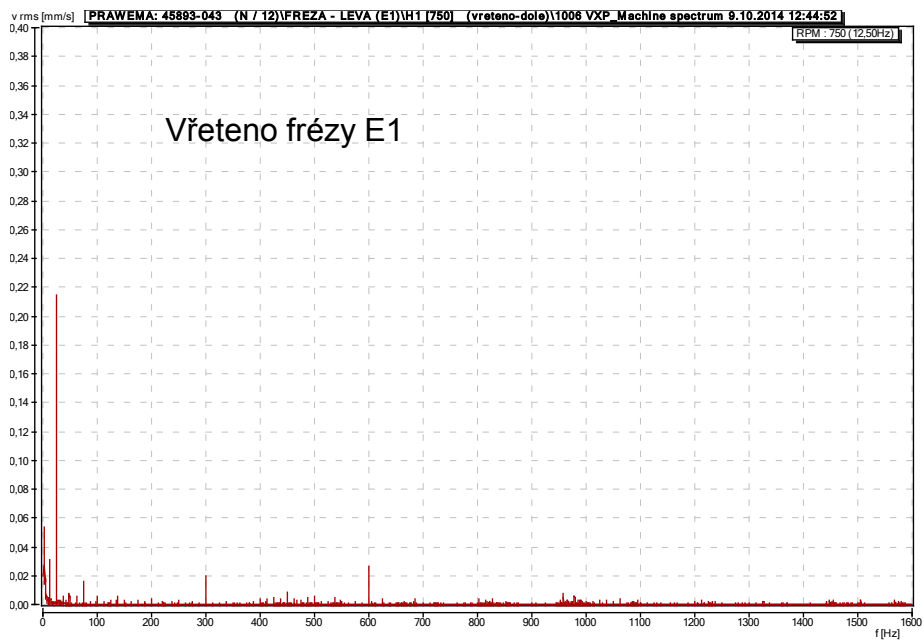
- [1] Tomeh, E.: Technická diagnostika: vibrační diagnostika strojů a zařízení. TU v Liberci 2015.
- [2] Tomeh, E.: Hlučnost a vibrace automobilových převodovek v souvislosti s identifikovanými závadami obráběcích strojů. Habilitační práce TU v Liberci 2008.
- [3] Tomeh E.: Hodnocení hlučnosti automobilových převodovek měřením vibrací. In DIAGO 2003
- [4] Tomeh, E.: Diagnostic Methodology of Rolling Element and Journal Bearings. TUL Liberec 2007
- [5] Němeček P.: Hluk v technické praxi I., TU v Liberci 1998
- [6] Janoušek I., Kozák J., Taraba O. a kolektiv: Technická diagnostika, Praha 1988
- [7] Příručka Brüel & Kjaer – Měření chvění
- [8] Vlk F.: Převodová ústrojí motorových vozidel, Brno 2000
- [9] Tůmová G.: Mechanická převodná ústrojí, Liberec 1999
- [10] Dílenská příručka k převodovce MQ 100
- [11] Příručka Discom
- [12] Příručky k údržbě a obsluze strojů PRÄWEMA a GLEASON



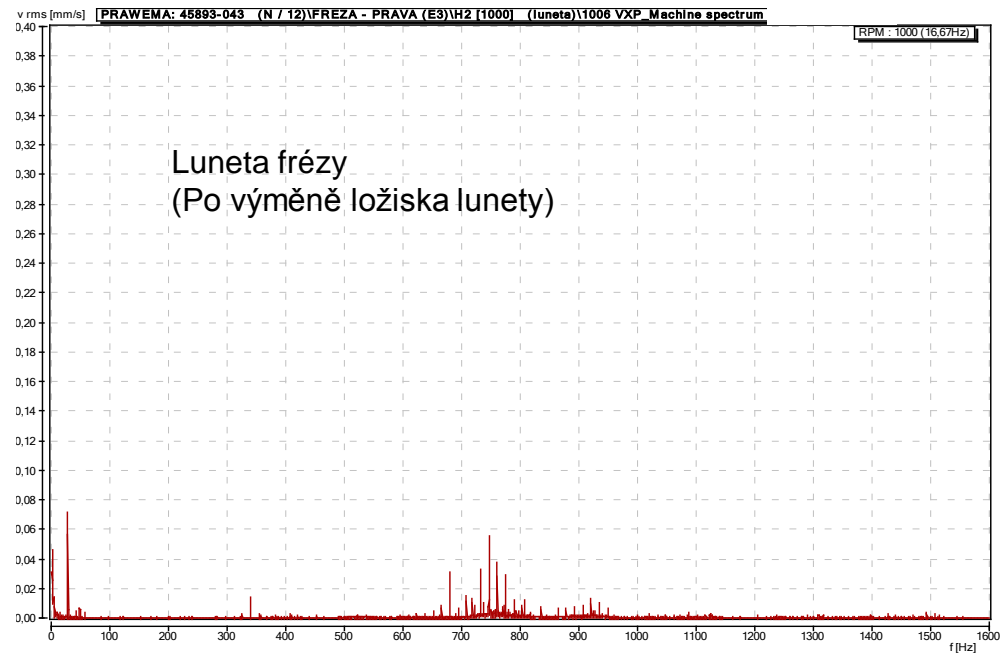
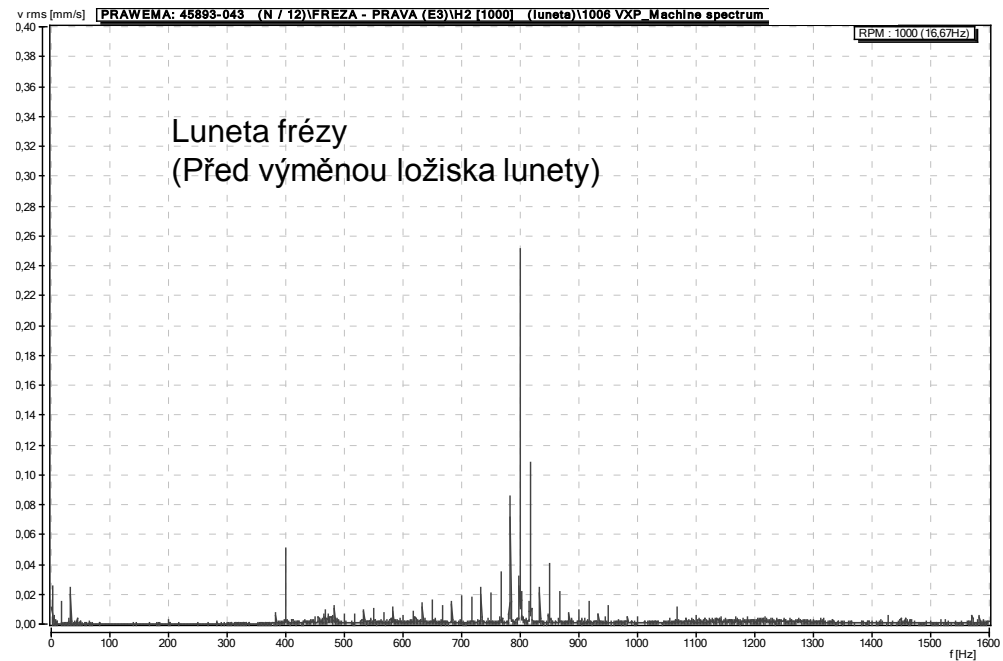
PŘÍLOHY



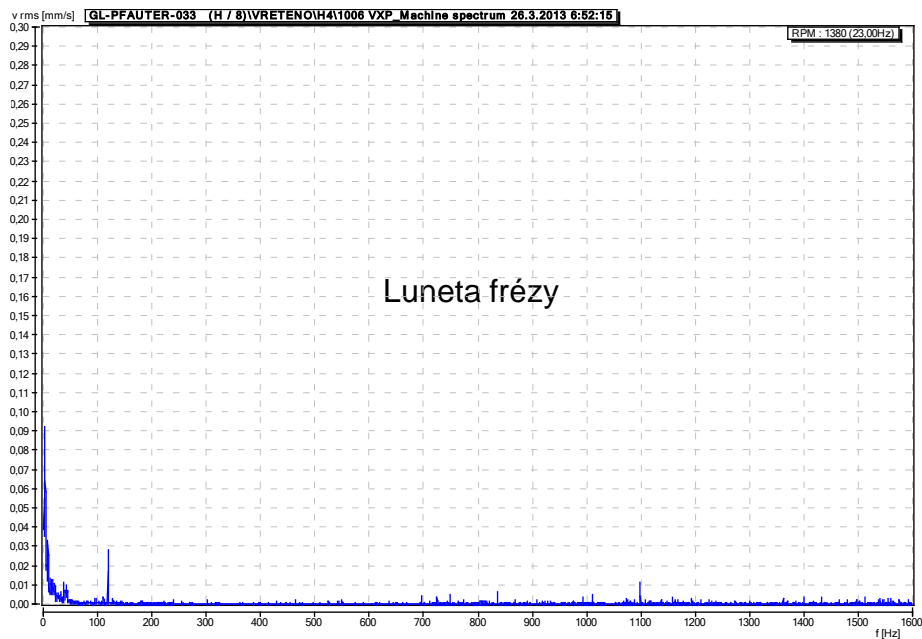
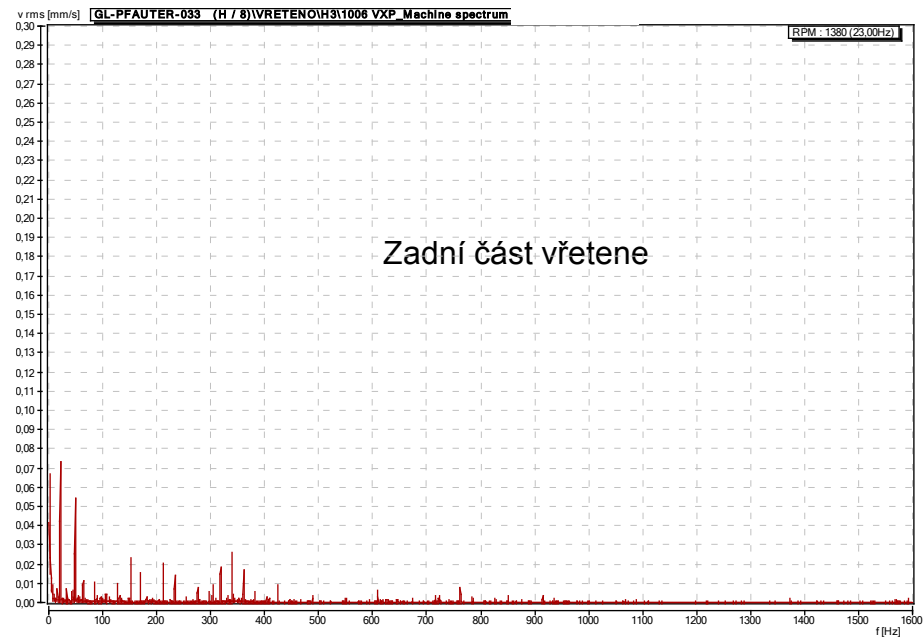
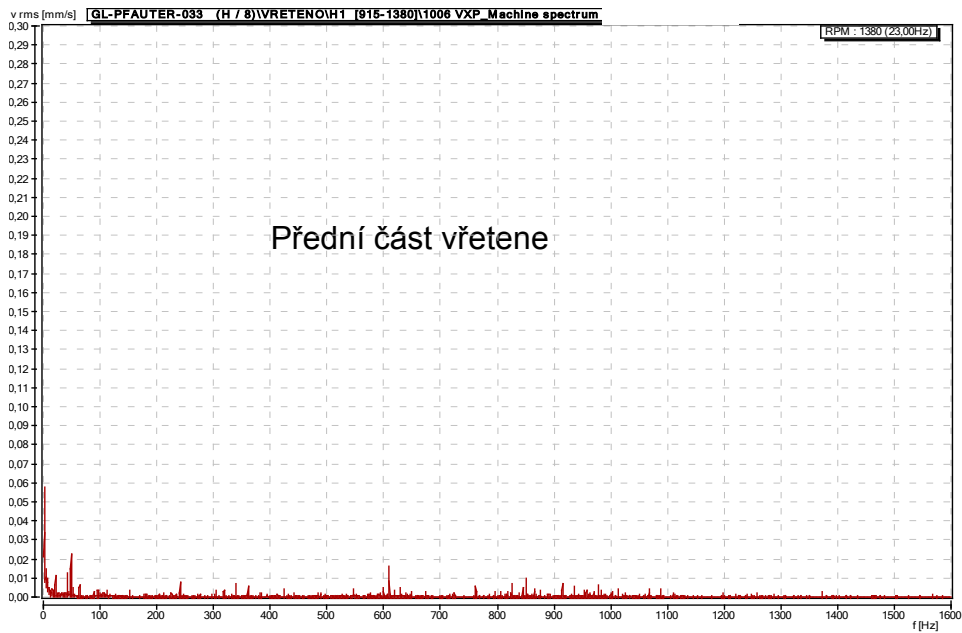
Příloha č. 1 Spektra rychlosti vibrací pro elektrovřetena obrobková C1, C2 a špičkovací E4, E5



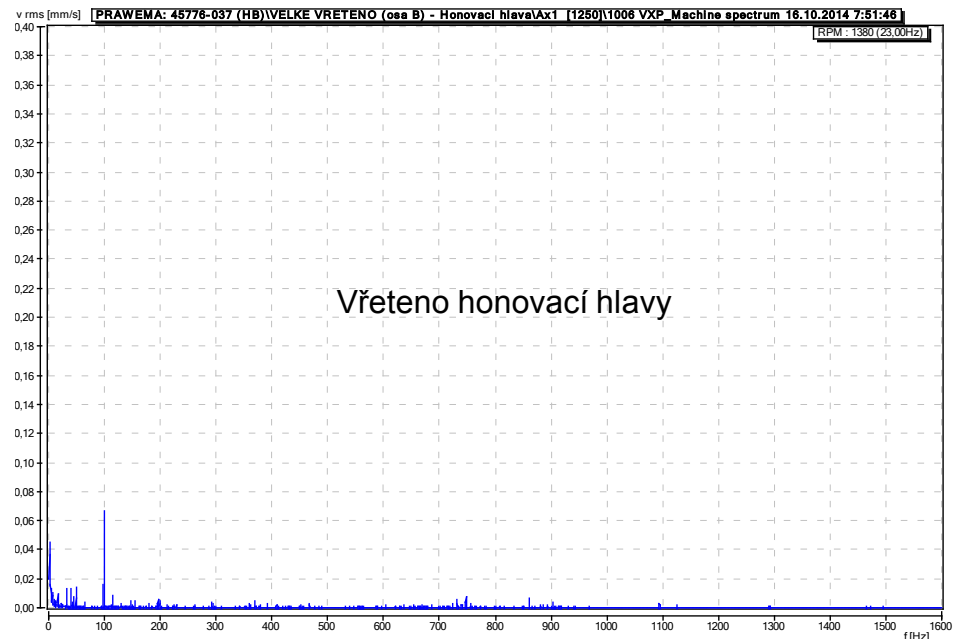
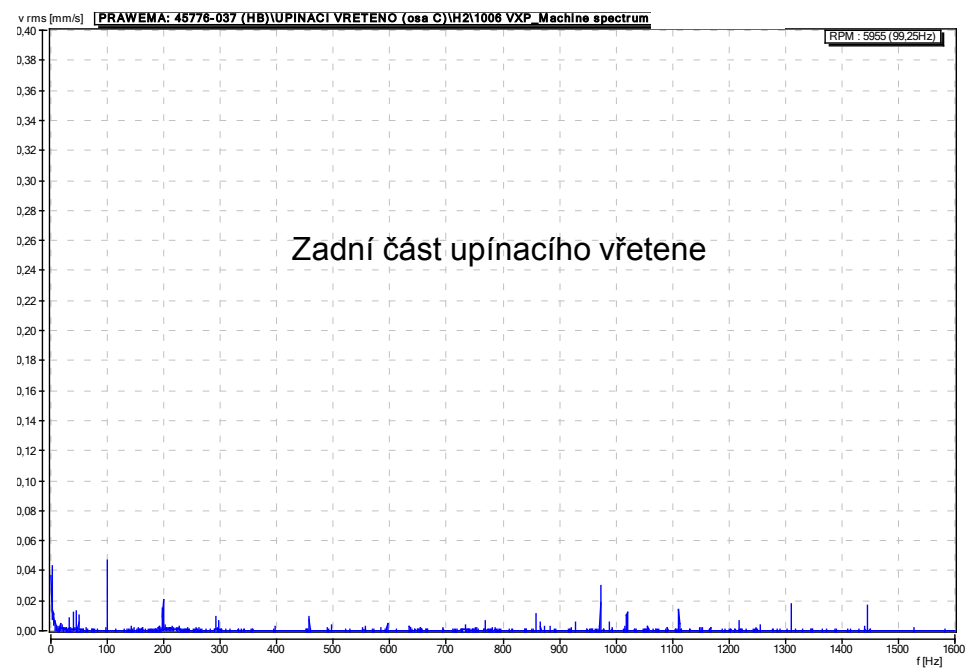
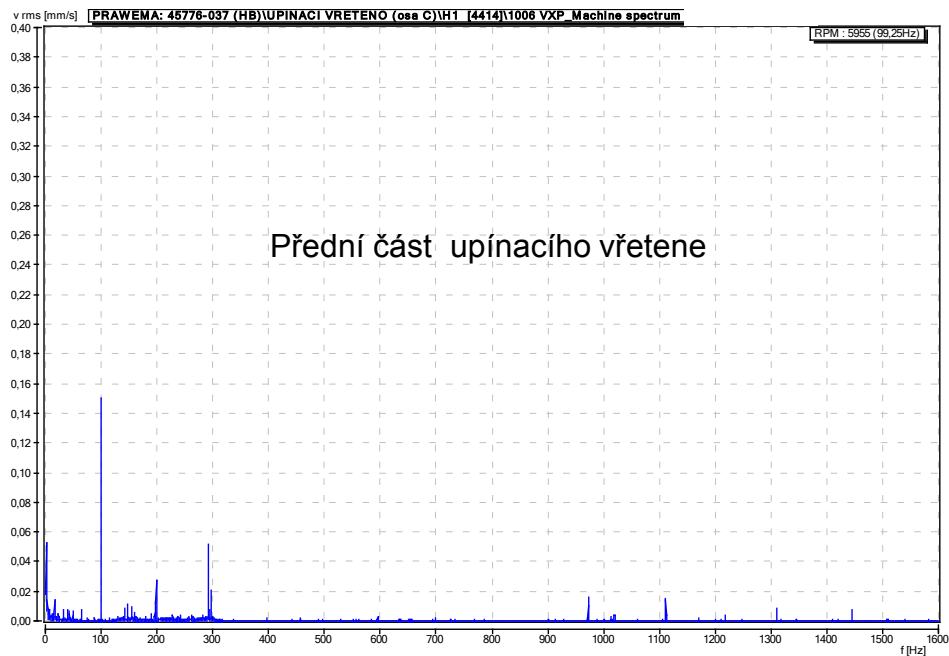
Příloha č. 2 Spektra rychlosti vibrací pro vřetena a lunety frézy na hrubo E1 a grotovačky E2



Příloha č. 3 Spektra rychlosti vibrací pro vřeteno a lunetu frézy načisto E3



Příloha č. 4 Spektra rychlosti vibrací pro vřeteno a lunetu frézy stroje GLEASON



TAH									ZPĚT					
Mk [Nm]	Rychlost		Vstupní hřídel	Výstupní hřídel	Diferen ciál	$a_{O fz}$ [g]	$a_{O fzs}$ [g]	a_{ef} [Gs]	Vstupní hřídel	Výstupní hřídel	Diferen ciál	$a_{O fz}$ [g]	$a_{O fzs}$ [g]	a_{ef} [Gs]
15/-15	1	f_R [Hz]	30,367	8,336	1,732	0,069	0,002	0,612	30,033	8,244	1,713	0,138	0,002	1,174
30/-30	2	f_R [Hz]	61,617	31,525	6,550	0,124	0,078	1,469	38,417	19,655	4,084	0,084	0,020	0,825
40/-40	3	f_R [Hz]	50,8	39,992	8,310	0,269	0,245	1,161	50,767	39,965	8,305	0,428	0,084	1,094
40/-35	4	f_R [Hz]	74,75	77,931	16,193	0,677	0,261	1,709	74,7	77,879	16,183	0,065	0,539	1,726
40/-35	5	f_R [Hz]	60	75,349	15,657	0,419	0,465	1,444	60,467	75,935	15,779	0,222	0,696	1,457
15/-15	Zp	f_R [Hz]	22,083	-	-	0,046	-	1,673	21,883	-	-	0,037	-	2,61

Příloha č. 6: Frézované ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele – frekvenční analýza z 12. 3. 2015 analyzátořem MICROLOG

TAH									ZPĚT					
Mk [Nm]	Rychlost		Vstupní hřídel	Výstupní hřídel	Diferen ciál	a_{ofz} [g]	a_{ofzs} [g]	a_{ef} [Gs]	Vstupní hřídel	Výstupní hřídel	Diferen ciál	a_{ofz} [g]	a_{ofzs} [g]	a_{ef} [Gs]
15/-15	1	f_R [Hz]	34,583	9,494	1,973	0,024	0,004	0,470	31,65	8,688	1,805	0,040	0,001	0,518
30/-30	2	f_R [Hz]	60,5	30,954	6,432	0,250	0,055	0,991	38,217	19,553	4,063	0,050	0,007	0,692
40/-40	3	f_R [Hz]	51,683	40,687	8,454	0,355	0,119	1,19	51,4	40,464	8,408	0,141	0,051	0,692
40/-35	4	f_R [Hz]	73,7	76,836	15,966	0,795	0,387	1,347	74,85	78,035	16,215	0,713	0,111	1,627
40/-35	5	f_R [Hz]	59,367	74,554	15,492	1,089	0,224	1,574	60,55	76,040	15,800	0,295	0,195	1,055
15/-15	Zp	f_R [Hz]	24,5	-	-	0,015	-	2,051	27,4	-	-	0,026	-	2,247

Příloha č. 7: Honované ozubení zpětné rychlosti hnacího hřídele – frekvenční analýza z 27. 4. 2015
analyzátořem MICROLOG