

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody určování výkonu a momentu vzduchové turbíny

Autor: **Vojtěch Koželuh**

Vedoucí práce: **Ing. Marek Klimko**

Akademický rok 2015/2016

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ**

Katedra energetických strojů a zařízení

Akad. rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: Vojtěch Koželuh

Rodné číslo: 921011/2032

Studijní program: B2301

Studijní obor: 2301R016

Téma bakalářské práce: Metody určování výkonu a momentu vzduchové turbíny

Zásady pro vypracování, úkoly.

Cílem bakalářské práce je zpracovat formou rešerše metody měření výkonu a momentu točivých strojů. Na základě detailního rozboru používaných metod (jako v ČR, tak i v zahraničí) navrhnout vhodnou alternativu měření uvedených parametrů, kterou by bylo možné reálně aplikovat na experimentální zařízení KKE - vzduchová turbína VT-400.

1. Analýza jednotlivých alternativ v oblasti měření výkonu a točivého momentu v ČR a zahraničí.
2. Zhodnocení uvedených variant a uvážení vhodnosti použití konkrétní metody na zařízení VT-400.
3. Detailní návrh zařízení určeného k měření výkonu a momentu, které by bylo možné prakticky využít na VT-400 (včetně výkresové dokumentace).
4. Závěr – shrnutí.

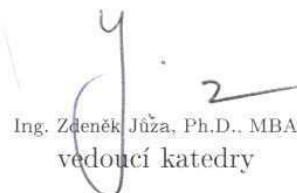
Rozsah grafických prací: **1 výkres**
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran A4**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- **Milčák P.:** Vzduchová turbína VT400 - učební text, ZČU v Plzni, 2012
- **Burianová L. a kol:** Úvod do fyzikálních měření: Technická univerzita v Liberci, 2012, ISBN 978-80-7372-819-9
- **Zikmund J.:** Laboratorní přípravek pro měření otáček, diplomová práce, VUT Brno, 2010
- **Kureková E., Gabko P., Halaj M.:** Technické meranie: Vídeň 2005, ISBN 80-89112-04-8

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Klimko**
Katedra energetických strojů a zařízení
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Petr Milčák, Ph.D.**
Doosan Škoda Power
Datum zadání bakalářské práce: **2. listopadu 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Ing. Zdeněk Jůza, Ph.D., MBA
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2015

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Marku Klimkovi a konzultantovi Ing. Petru Milčákovi, Ph.D. za poskytnuté rady a odbornou pomoc při zpracovávání práce.

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Koželuh	Name Vojtěch	
FIELD OF STUDY	B2301 Mechanical engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Klimko	Name Marek	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Methods of the power and torque measuring of the air turbine		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2016
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	48	TEXT PART	46	GRAPHICAL PART	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis analyses the methods of torque, rotations and power measuring of the rotating machines. There are evaluated suitable variants for the design of the torque and power measuring device in air turbine VT-400, that is a part of experimental measuring device in laboratory of the department of power system engineering. A drawing of the particular device is attached in the graphic part of thesis.
KEY WORDS	Torque measurement, power measurement, dynamometer, air turbine, torque sensor

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Koželuh	Jméno Vojtěch		
STUDIJNÍ OBOR	B2301 Strojní inženýrství			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Klimko	Jméno Marek		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKE			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Metody určování výkonu a momentu vzduchové turbíny			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	48	TEXTOVÁ ČÁST	46	GRAFICKÁ ČÁST	2
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Bakalářská práce analyzuje metody měření momentu, otáček a výkonu točivých strojů. Posouzeny jsou vhodné varianty pro základ návrhu měřicího zařízení výkonu a momentu pro experimentální vzduchovou turbínu VT-400, která je součástí měřicího zařízení v laboratoři KKE. Dále je vypracován konkrétní návrh měřicího zařízení zahrnující grafickou přílohu – výkres sestavy.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Měření momentu, měření výkonu, vzduchová turbína, dynamometr, snímač momentu</p>

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam použitých symbolů.....	10
Úvod	11
1 Experimentální měřící zařízení	12
2 Měření výkonu a momentu u točivých strojů.....	13
2.1 Měření točivého momentu.....	14
3 Snímače točivého momentu	15
3.1 Odporové tenzometrické snímače	16
3.2 Pulzní snímače – měřiče fáze	18
3.3 Magnetoelastické snímače	19
3.4 Magnetoizotropní snímače transformátorové	20
3.5 Snímače inverzní – indukční tenzometr	21
3.6 Kapacitní snímač momentu	22
3.7 Piezoelektrický snímač momentu	22
3.8 Optomechanický snímač momentu	22
3.9 Frekvenční strunový snímač	23
4 Točivé dynamometry.....	23
4.1 Hydraulické dynamometry	26
4.2 Mechanické třecí dynamometry	28
4.3 Vzdušní třecí dynamometr.....	29
4.4 Elektrické dynamometry.....	29
4.4.1 Vířivý dynamometr	29
4.4.2 Práškový dynamometr.....	30
4.4.3 Dynamometr střídavý	31
4.4.4 Stejnoseměrný dynamometr.....	31
4.5 Snímače otáček	32
5 Zhodnocení možností a výběr varianty pro turbínu VT-400.....	32
5.1 Požadavky pro měření na turbíně VT-400	32
5.2 Výběr varianty měřícího zařízení	33
5.2.1 Přírubový snímač TF firmy Magtrol	33

5.2.2	Přírubový snímač DR-2554 s integrovanou spojkou	34
5.2.3	Snímač momentu T40B.....	35
5.2.4	Tenzometrický hřídel T20WN	35
5.3	Porovnání přírubového snímače a tenzometrického hřídele.....	36
6	Návrh měřicího zařízení	38
7	Závěr.....	43
	Použitá literatura	44
	Grafická příloha.....	46

Seznam obrázků

Obr. 1: Pohled na experimentální zařízení v laboratoři KKE	12
Obr. 2: Schéma experimentálního zařízení 1-filtr, 2-turbína, 3- dynamometr, 4-traveser, 5, dýza, 6-tlumič, 7-kompresor, 8-spojka, 9-elektromotor [1]	13
Obr. 3: termodynamické změny v zařízení znázorněné v i-s diagramu (význam indexů: k- kompresor, t- turbína, o- měřeno před stupněm, 1- za rozváděcími lopatkami, 2- za stupněm) [1]	13
Obr. 4: Uložení snímače mezi hnaný a hnací stroj [3]	15
Obr. 5: Zapojení tenzometrů ve Wheatstoneově můstku [4]	16
Obr. 6: Uspořádání tenzometrů na hřídeli [5]	17
Obr. 7: Kontaktní přenos signálu. 1 – deformační člen, 2- stator, 3-kroužek, 4-kartáček, 5- vývod na svorkovnici [6].....	17
Obr. 8: bezkontaktní přenos signálu. 1- indukční napájení, 2 – kapacitní výstup, 3 - magnetický snímač otáček [7]	18
Obr. 9: Namáhání deformačního členu krutem [7]	19
Obr. 10: Pulzní snímač na indukčnostním principu [7]	19
Obr. 11: Magnetoelastický snímač momentu [7]	20
Obr. 12: magnetoelastický křížový torduktor, změna magnetického pole [3]	21
Obr. 13: anizotropní prstencový snímač [6].....	21
Obr. 14: Inverzní snímač momentu [7]	22
Obr. 15: Kapacitní snímač momentu [8].....	22
Obr. 16: frekvenční strunový snímač [2]	23
Obr. 17: Uložení dynamometrů, vpravo konvenční varianta [2]	24
Obr. 18: Pracovní oblast dynamometru, křivky „min“ a „max“ = funkční omezení, n_{MAX} = otáčkové omezení, M_{MAX} = momentové omezení, P_{MAX} - výkonové omezení [2].....	26
Obr. 19: konstrukce hydraulického dynamometru, vpravo pohled v řezu a-a [9]	27
Obr. 20: Kapalínový dynamometr s regulací servoventilem.....	28
Obr. 21: varianta Pronyho brzdy [5]	29
Obr. 22: vířivý dynamometr s kotoučovým rotorem,.....	30
Obr.23: Pracovní oblast stejnosměrného dynamometru pro oba typy chodu [2].....	31
Obr. 24: Přírubový snímač TF od firmy Magtrol [11]	34
Obr. 25: Snímač DR 2554 s integrovanou spojkou [12].....	34
Obr. 26: Digitální snímač typu příruba T40B [14].....	35
Obr. 27: Tenzometrický hřídel T20WN [15]	36
Obr. 28: Membránová spojka ROBA - DS [14].....	38
Obr. 29: pomocný středící disk	39
Obr. 30: příruba hřídele turbíny	40
Obr. 31: příruba pro hřídel dynamometru	41
Obr. 32: Pohled na měřící zařízení.....	42

Seznam použitých symbolů

P	Výkon	[W]
F	Síla	[N]
t	Čas	[s]
\dot{m}	Hmotnostní průtok	[kg/s]
a_T	Měrná práce turbíny	[J/kg]
H^{ST}	Tepelný spád turbínového stupně	[J/kg]
c_p	Měrná tepelná kapacita při stálém tlaku	[J· kg/ K]
T	Termodynamická teplota	[K]
c_0, c_2	Rychlost před stupněm, za stupněm	[m/s]
$\eta_{ts}^{ST}, \eta_{tt}^{ST}$	Účinnost stupně	[%]
M	Moment síly	[Nm]
ω	Úhlová rychlost	[rad/s]
n	Otáčky	[1/min]
L, l	délka	[m]
G	Modul pružnosti ve smyku	[MPa]
r	Poloměr	[m]
d	Průměr	[m]
f	Součinitel smykového tření	[-]
ε	Poměrné délkové prodloužení	[-]
J_p	Polární moment průřezu	[m ⁴]
$\alpha, \varphi, \varphi_z, \alpha$	Úhel natočení, třecí úhel, úhel stoupání závitu	
σ	Normálové napětí	[Mpa]
p_H	Stoupání závitu	[mm]
k	Hydraulický odpor	[kg·m ²]
π	Ludolfovo číslo	[-]

Úvod

Při konstrukci strojů je vždy snaha dosáhnout co největší účinnosti navrhovaného zařízení. V oboru energetiky a konstrukce turbín to platí samozřejmě také a neustálé zlepšování musí podpořeno kvalitním výzkumem. V případě turbínových lopatek se využívá jak softwarové modelování, tak samozřejmě i laboratorní měření na prototypch, které pomáhá výpočty ověřit. Zvýšení účinnosti turbínového stupně díky vylepšené konstrukci reprodukováného do reálné elektrárenské turbíny byt' jen o zlomky procent přináší velké úspory energie a otevírá nové možnosti v energetickém průmyslu. Měřicí zařízení pro testování turbínových lopatek nacházející se v laboratoři KKE představuje vzduchová turbína VT-400. Logickou snahou je i neustálé vylepšování měřících parametrů a podmínek tohoto zařízení pro lepší výsledky v oblasti testování. Tato práce analyzuje metody měření výkonu a momentu u točivých strojů za účelem návrhu zařízení pro zpřesnění současného měření těchto veličin na vzduchové turbíně.

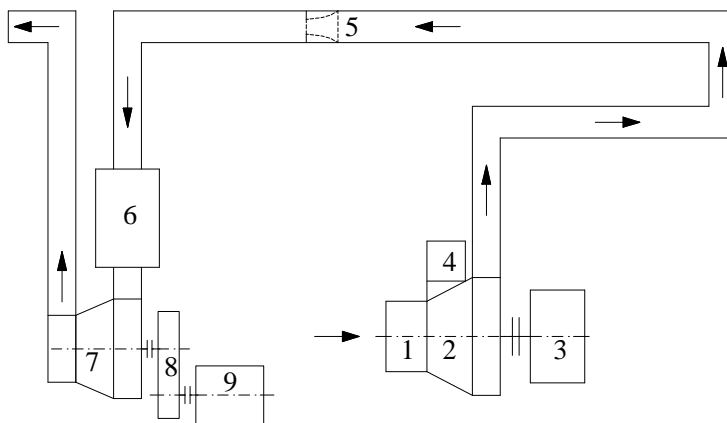
1 Experimentální měřicí zařízení

Parní turbíny patří ke klíčovým strojům v oblasti energetiky a jejich konstrukce je předmětem neustálého výzkumu a vývoje za účelem zvyšování účinnosti. Objektem zkoumání bývají jak geometrické parametry součástí turbíny, tak i vliv proudových podmínek. Vzduchová turbína VT-400, jež je součástí experimentálního zařízení (Obr. 1) nacházejícího se v laboratořích KKE, slouží jako experimentální zařízení k měření dat při vývoji a návrhu nových typů či tvarů lopatek parních turbín.

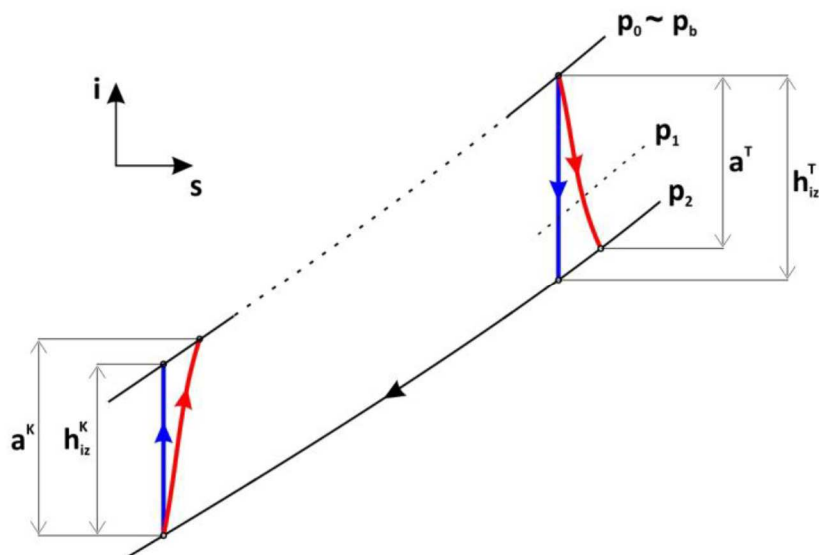


Obr. 1: Pohled na experimentální zařízení v laboratoři KKE

Její konstrukce představuje zmenšený model vysokotlakého stupně parní turbíny, který umožňuje testovat různá konstrukční řešení turbínových stupňů díky snadné vyměnitelnosti rozváděcích i oběžných lopatek. Turbína je umístěna v sání kompresoru, její výhodou oproti testovací parní turbíně je levný provoz a snadné spuštění. Množství vzduchu procházející zařízením je měřeno dýzou, přes hřídel turbíny je připojen stejnosměrný dynamometr měřící otáčky a vyvozovaný kroutící moment. Dále je turbína vybavena otvory pro měření statického tlaku před stupněm, ve stupni a za stupněm vždy na patním i špičkovém průměru, dále zařízením pro pohyb 5-ti otvorové sondy určené ke snímání proudového pole, tzv. traverserem. Rovněž jsou snímány teploty před a za stupněm pomocí odporových teploměrů. Z výtlaku kompresoru odchází vzduch ven z laboratoře. Schéma laboratoře a termodynamické změny při průchodu zařízením jsou znázorněny na Obr. 2 a 3. [1]



Obr. 2: Schéma experimentálního zařízení
1-filtr, 2-turbína, 3- dynamometr, 4-traveser, 5- dýza, 6-tlumič,
7-kompresor, 8-spojka, 9-elektromotor [1]



Obr. 3: termodynamické změny v zařízení znázorněné v i-s diagramu
(význam indexů: k-kompresor, t- turbína, o- měřeno před stupněm,
1- za rozváděcími lopatkami, 2- za stupněm) [1]

2 Měření výkonu a momentu u točivých strojů

Výkon je skalární veličina definována jako podíl práce za jednotku času, jinými slovy určuje množství energie, které stroj v danou chvíli přenáší. Základní vztah pro výkon je tedy tento:

$$P = \frac{W}{t} \quad (1)$$

U točivých strojů je určení výkonu důležité, například u spalovacích motorů se odměřují známé výkonové a momentové charakteristiky v závislosti na otáčkách. V případě turbíny je získání hodnoty výkonu důležité například při určování účinnosti turbínového stupně. V případě turbíny lze výkon určit součinem hmotnostního průtoku média a měrné technické práce stroje, neboli užitečného spádu turbíny

$$P = \dot{m} \cdot a_T \quad (2)$$

Užitečný spád či chcete-li měrnou práci turbíny $a_T = H^{ST}$ lze pak snadno dopočítat, pokud dokážeme změřit veličiny výkonu a hmotnostního průtoku.

$$H^{ST} = \frac{P_{obv}}{\dot{m}_v} = \frac{P + P_{tř}}{\dot{m}_v} = c_p \cdot (T_{0c}^{INT} - T_{2c}^{INT}) \quad (3)$$

Samotná hodnota a_T (H^{ST}) se pak použije k určení obvodové účinnosti stupně, v jejímž matematickém vztahu je jmenovatelem vždy hodnota energie

$$\eta_{ts}^{ST} = \frac{H^{ST}}{H_{iz}^{ST} + \frac{c_0^2}{2}} \quad (4)$$

v případě posledního stupně turbíny

$$\eta_{tt}^{ST} = \frac{H^{ST}}{H_{iz}^{ST} + \frac{c_0^2}{2} - \frac{c_2^2}{2}} \quad (5)$$

v případě jiného, než posledního stupně turbíny

Při měření výkonu u točivých strojů a tedy i u turbín se vychází ze vztahu

$$P = M \cdot \omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \quad (6)$$

Z posledního vztahu je vidět, že nejsnazším řešením je tak měřit kroučící či točivý moment M a otáčky turbíny n . Z těchto dvou veličin se pak snadno dopočte výkon. Točivý moment se obvykle měří na hřídeli točivého stroje, tudíž výkon pomocí jeho hodnoty dopočtený nezahrnuje třecí ztráty v ložiskách, které představují ztracený třecí výkon P_t , jehož součet s naměřeným výkonem dává výkon celkový, jak můžeme vidět ve vztahu pro měrnou práci turbíny. [1]

2.1 Měření točivého momentu

Z hlediska fyzikálního je moment síly definován jako součin síly (F) a délky k ní kolmé ramene (l) na kterém síla působí. Točivý moment namáhá součást mechanismu otáčející se určitou úhlovou rychlostí při přenosu výkonu z hnacího stroje na hnaný. Filozofii měření točivého momentu můžeme rozdělit do dvou typů:

a) Měření snímačem na principu deformace: Hnací stroj → Snímač momentu → Hnaný stroj
Měří se účinek momentu na deformační člen snímače, který se snímá a signál se dále elektricky upravuje.

b) Měření reakčního momentu M_R uvolněného statoru točivého stroje – např. točivého dynamometru Platí princip 3. Newtonova zákona, zákona akce a reakce tj. Hnací moment = reakčnímu momentu:

$$M_H = M_R = F \cdot l \quad (7)$$

Hnací (hnaný) stroj ↔ Dynamometr [2]

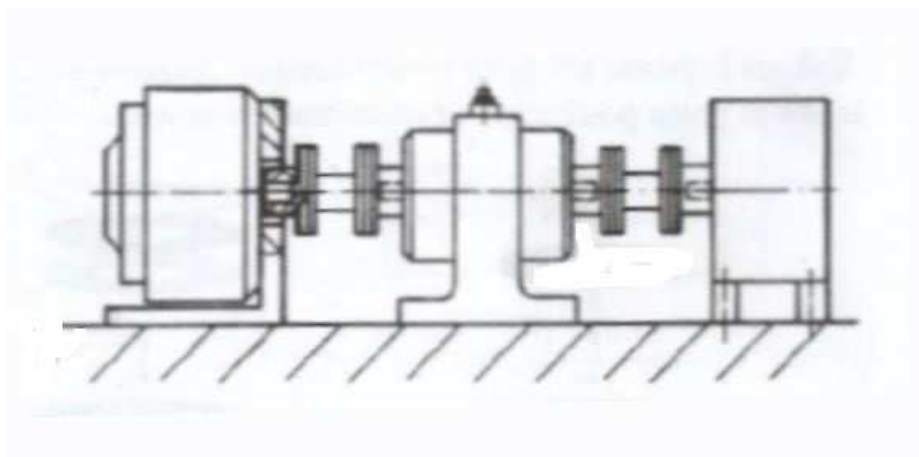
3 Snímače točivého momentu

Prvním způsobem je měření pomocí různých typů snímačů na deformačním členu obvykle kruhového, dutého, méně často hranolovitého průřezu, který je namáhán kroučícím momentem za vzniku deformací, jejichž velikost ovlivňuje měřitelné veličiny, pomocí jejichž změn lze určit velikost namáhání a tím i momentu. Základní principy využívají:

- změny fyzikálních vlastností deformačního členu - nejčastěji magnetických
- mechanická deformace hřídele – měření poměrné deformace povrchu (tenzometricky)
- měření celkové deformace deformačního členu

Možnosti umístění snímače:

- na hřídeli měřeného stroje - tzv. dynamometrický hřídel
- zapojené k hřídeli měřeného stroje – plovoucí či pevné zapojení



Obr. 4: Uložení snímače mezi hnaný a hnací stroj [3]

Snímače jsou umístovány v ose hřídelí hnacího a hnaného stroje, důležité je proto přesné usazení v radiálním směru. Nejznámějšími výrobci jsou firmy Hottinger (HBM) a Magtrol, které nabízejí snímače schopné měření různých rozsahů otáček a momentů.

Konstrukce snímačů jsou dle typů zakomponování do hřídelové soustavy:

- Typ tenzometrického hřídele
- Typ příruby
- Typ měřící spojky

Snímače lze dělit podle snímacího principu na:

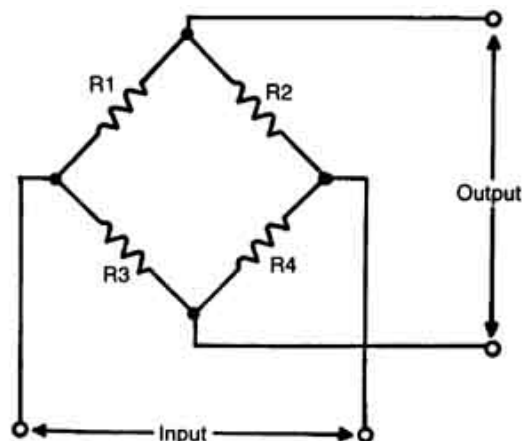
- Mechanické snímače
- Optické snímače
- Elektrické snímače

Dle fyzikálního hlediska můžeme dělit snímače na:

- odporové snímače
- indukčnostní snímače
- kapacitní snímače
- magnetoelastické snímače
- fotoelektrický snímač
- snímač na principu inverze Wiedemannova jevu
- piezoelektrické snímače [2]

3.1 Odporové tenzometrické snímače

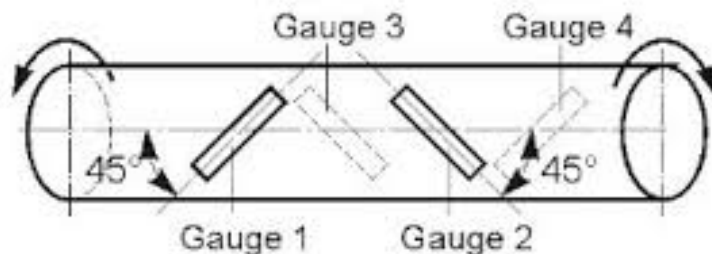
Klasickým odporovým snímačem je tenzometrický snímač momentu, který snímá účinky momentu v podobě deformace povrchu hřídele. Deformace je úměrná změně elektrického odporu tenzometru. Tenzometrický snímač momentu se skládá obvykle ze čtyř tenzometrů zapojených do plného Wheatstoneova můstku (Obr. 5)



Obr. 5: Zapojení tenzometrů ve Wheatstoneově můstku [4]

Pro měření kroutícího momentu jsou na měřící část hřídele nalepeny tenzometry jejichž podélná osa svírá s podélnou osou deformačního členu úhel 45° , tj. směr maximálních smykových napětí. Tímto uspořádáním jsou eliminovány vlivy teploty, ohybového momentu a tahu, je tak rovněž dosaženo největší citlivosti. Jedna dvojice protilehlých tenzometrů je tak namáhána

tahem, druhá tlakem. Dvojice snímačů jsou umístěny na protilehlých stranách deformačního členu viz Obr. 6.

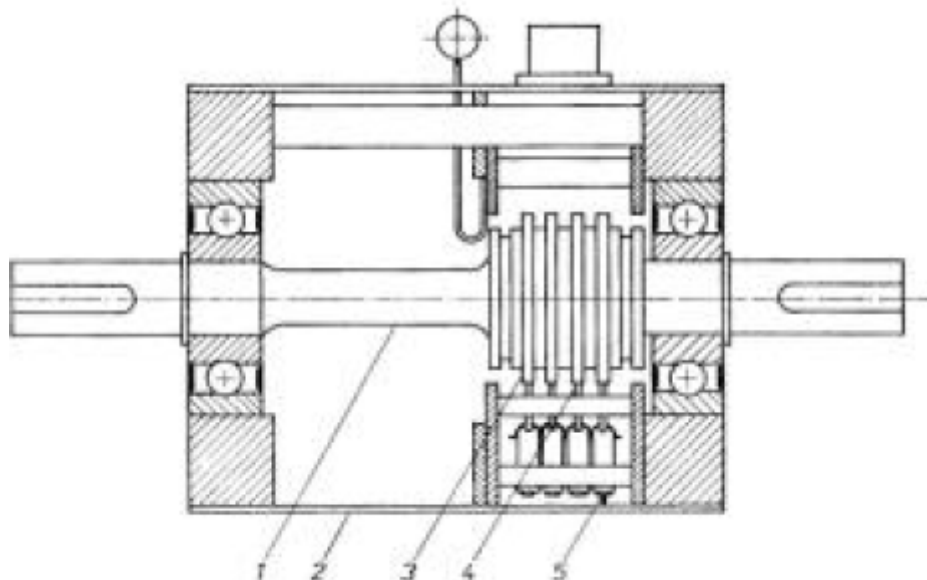


Obr. 6: Uspořádání tenzometrů na hřídeli [5]

Pro zmiňovaný úhel 45° platí:
$$M = \varepsilon \cdot \frac{2 \cdot G \cdot J_p}{r} \quad (8)$$

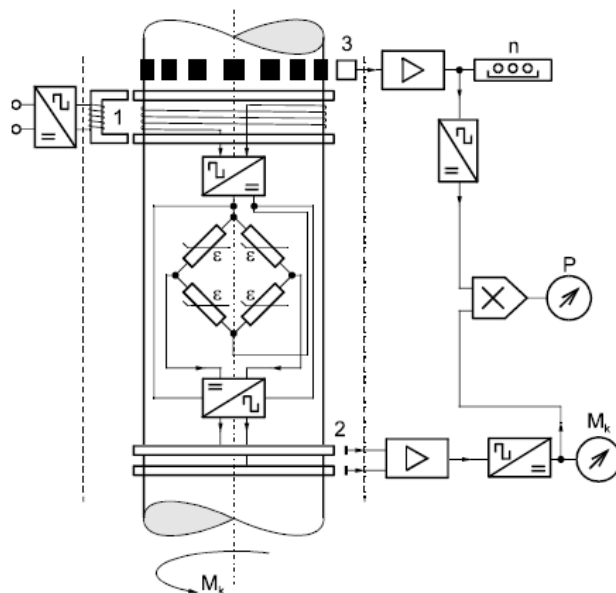
Návrh deformačního členu by měl být kompromisem mezi citlivostí (nízké G , J_p) a dynamickými vlastnostmi, jako požadovanou tuhostí hřídele. Napájení a přenos signálu ze snímače, tj. vazba mezi rotující a pevnou nepohyblivou částí může být veden kontaktním i bezkontaktním způsobem.

Kontaktní způsob zajišťují sběrné kroužky na hřídeli a statické kartáčky snímající signál z kroužků, se kterými jsou v kontaktu. V době kdy se neměří, je možné kartáčky odklonit, aby nedocházelo k opotřebením. Nevýhodou kontaktního měření je možný vznikající signální šum.



Obr. 7: Kontaktní přenos signálu.
1 – deformační člen, 2- stator,
3-kroužek, 4-kartáček, 5-vývod na svorkovnici [6]

Modernější alternativou je bezkontaktní přenos, napájení můstku je indukční na principu transformátoru se vzduchovou mezerou a převodníkem f/U ne stejnosměrné napětí, výstupní napětí je převedeno v převodníku U/f na impulsní signál snímaný kapacitním snímačem do statické části obvodu. Obecně platí, že při napájení můstku ze střídavého zdroje má být jeho frekvence pořád vyšší, než frekvence otáček měřené součásti. Otáčky nutné pro určení výkonu stroje lze např. určit z kmitočtu napětí indukovaného do cívky (č.3 – Obr. 8) při pohybu magnetů upevněných na obvodu.



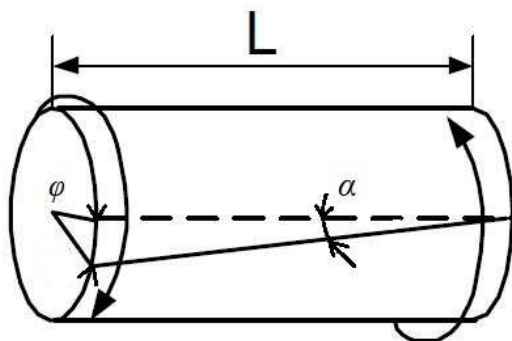
Obr. 8: bezkontaktní přenos signálu.
1- indukční napájení, 2 – kapacitní výstup,
3 - magnetický snímač otáček [7]

Z dalších metod přenosu se vzhledem k dostupnosti miniaturních vysílačů používá vysokofrekvenční přenos, vysílač je napájen z lithiové baterie. Výhodou je snadné umístění vysílače na rotující hřídel. Další možností je přenos výstupního signálu infračerveným zářením snímaným fotodiodou. Velmi často se tenzometry upevňují na hřídel spojující hnací a hnaný stroj, tzv. tenzometrický hřídel. V nabídce výrobců těchto hřídelí jsou měřiče širokého rozsahu od 10 Nm do 100 kNm a otáček až 15000 min^{-1} . Tento typ snímačů na trhu aktuálně převládá [2]

3.2 Pulzní snímače – měřiče fáze

Jsou relativně nejjednodušší ze snímačů měřících celkovou deformaci. Princip spočívá v měření polohy „značek“ ve dvou axiálně posunutých průřezech deformačního členu, která se mění podle velikosti momentového zatížení. Z rozdílu fáze obou signálů lze určit velikost přenášeného momentu. Je-li vzdálenost snímaných průřezů L a poloměr hřídele r , platí při jeho namáhání momentem na krut: [2]

$$r \cdot \varphi = L \cdot \alpha \quad (10)$$



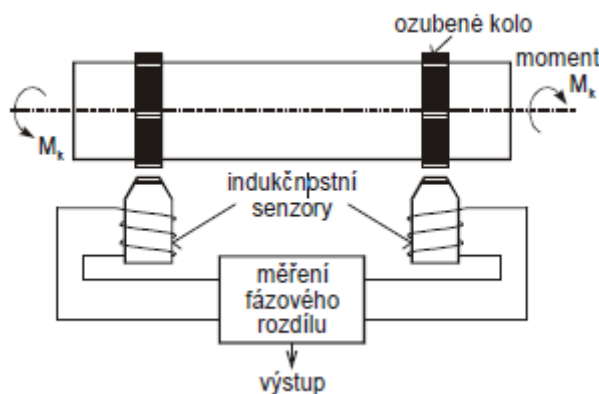
Obr. 9: Namáhání deformačního členu krutem [7]

Pro působící moment M platí závislost na úhlu φ :

$$M = \left(G \cdot \frac{J_P}{L} \right) \cdot \varphi \quad (11)$$

$$M = konst \cdot \varphi \quad (12)$$

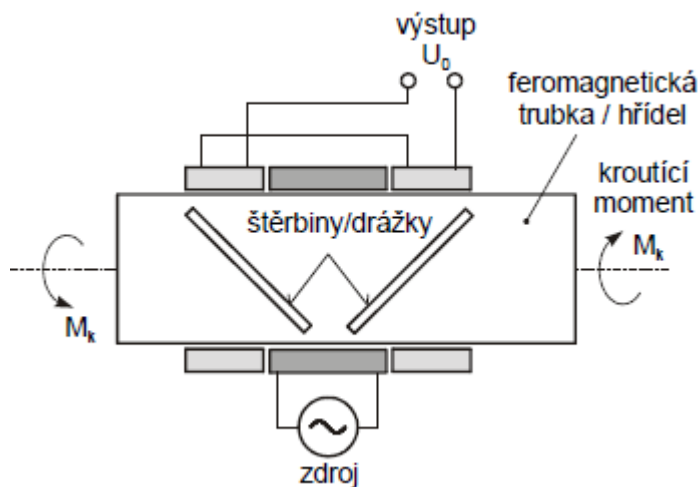
Nejčastěji se používají značky magnetické či indukční, nebo optoelektrické. V prvním případě (Obr. 10) jsou na hřídeli umístěna dvě ozubená kola z feromagnetického materiálu. Ze signálů senzorů polohy o časovém zpoždění a frekvence impulsů se odvodí údaje, potřebné pro výpočet výkonu. V optické variantě lze použít dva optické inkrementální senzory a měřit opět zpoždění mezi sledy impulsů. Předností těchto snímačů je bezkontaktnost, značný měřicí rozsah, přesnost i při vysokých otáčkách. Též se používá varianta s Hallovými senzory



Obr. 10: Pulzní snímač na indukčním principu [7]

3.3 Magnetoelastické snímače

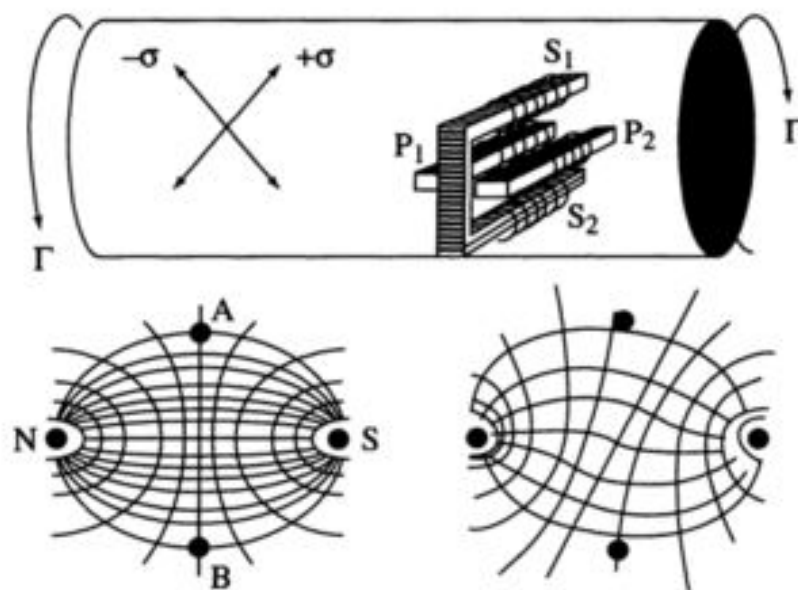
Senzory jsou založeny na magnetoelastickém jevu, spočívajícího ve změně permeability ve směru mechanického napětí. To je samozřejmě spojeno se změnou indukčnosti a magnetického indukčního toku. Deformace hřídele z feromagnetického materiálu se dvěma řadami drážek orientovaných ve směru hlavního napětí způsobí změnu axiální permeability. Sekundární cívky umístěné nad hřídelí proti vzájemně kolmým drážkám snímají indukované napětí z primárního vinutí. Rozdílové napětí sekundárních cívek odpovídá rozdílu směrových permeabilit při deformaci hřídele. [7]



Obr. 11: Magnetoelastický snímač momentu [7]

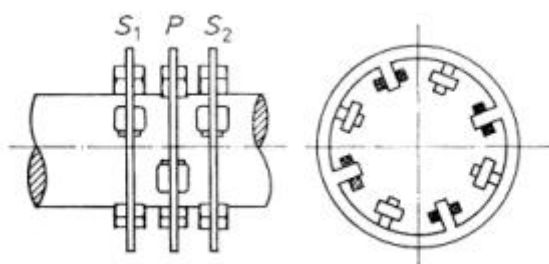
3.4 Magnetoizotropní snímače transformátorové

Tyto snímače využívající magnetoanizotropie, tj. deformace magnetického pole při deformaci feromagnetika, se též nazývají torduktory. Dělí se na křížové, prstencové a cívkové dle uspořádání obvodů. Skládají se ze dvou magnetických obvodů, přičemž jedním z nich protéká budící střídavý proud konstantního kmitočtu a amplitudy. Tím je vytvořeno magnetické pole na povrchu hřídele, které v nezátíženém stavu neprochází sekundárním obvodem. Pokud dojde k zatížení hřídele a tím deformaci magnetického pole, nastane průchod magnetického toku sekundárním obvodem, v kterém se tak indukuje napětí úměrné velikosti momentu síly. Křížový typ snímače je složen ze dvou na sebe kolmých jader se za sebou propojenými budícími cívkami P_1 a P_2 a signálními cívkami S_1 a S_2 . (Obr. 12). Tyto snímače jsou velice citlivé na nehomogenitu hřídel. Kromě popsaného střídavého buzení senzoru existuje taktéž senzor stejnosměrný, využívající magneticky polarizovaných kroužků. [6]



Obr. 12: magnetoelastický křížový torduktor, změna magnetického pole [3]

Prstencové uspořádání snímače (Obr. 13) zahrnuje tři stejné prstence, které mají vyčnívající póly S1, P, S2 a mohou být pro rychlou a snadnou montáž složeny ze dvou polovin. Vinutí cívek na jednotlivých pólových nástavcích jsou zapojena se střídavě opačným smyslem. Jak mezera mezi prstenci, tak i posunutí středního prstence oproti vnějším je rovno polovině pólové rozteče. Střední prstenec představuje buďící magnetický obvod, oba vnější prstence obvod sekundární (měřící). Jejich snímací cívky jsou zapojeny v sérii s opačným smyslem vinutí. Při zatížení hřídele momentem síly dochází ke změně permeability a tím snímání signálu. Tento typ snímače má malé rozměry, především měřící délku, výstupní signál se snímá ze statorové části, není citlivý na prach, vlhkost chvění apod. Vyrábí se pro rozsah 50 Nm až 1 kNm, pro rozsah otáček až do 100 000 ot/min [2]

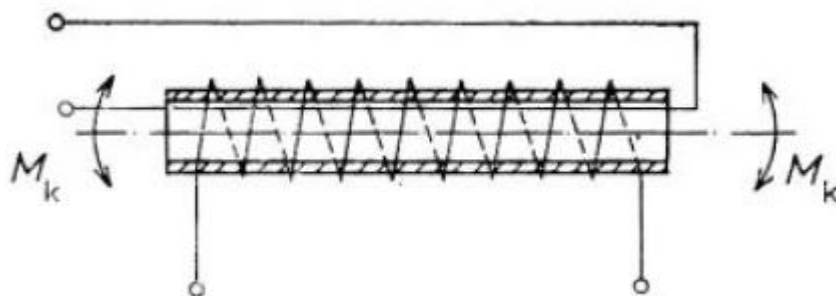


Obr. 13: anizotropní prstencový snímač [6]

3.5 Snímače inverzní – indukční tenzometr

Inverzní snímače fungují na opačném principu tzv. Wiedemannova jevu. Ten spočívá v tom, že pokud vodivým drátem, který je podélně magnetován, prochází proud, dojde k jeho zkroucení. Čili pokud dojde ke zkřutu vodivé tyče při průchodu proudem, dojde ke změně magnetického pole a v cívce nasazené na tyč se indukuje napětí úměrné kroutícímu momentu. Využívá se buď

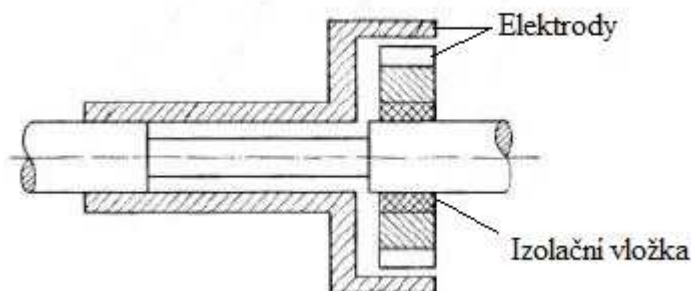
plného či dutého hřídele, v prvním případě prochází budící proud přímo hřídelem. V případě duté trubky je budící vinutí protaženo ve směru osy trubky. Sekundární vinutí tvoří hustá cívka nasunutá na hřídeli. Otázka přenosu proudu do rotujícího budícího vinutí je vyřešena bezkontaktním rotačním transformátorem. Snímač bývá též nazýván induktivním magnetoelastickým. [3]



Obr. 14: Inverzní snímač momentu [7]

3.6 Kapacitní snímač momentu

Princip těchto snímačů závisí na změně kapacity kondenzátoru určené změnou některé veličiny kapacitu určující. Kondenzátor snímače je tvořen dvěma elektrodami zubového tvaru, přičemž jedna z elektrod je od hřídele izolovaná. Přenášený moment zkrucuje měřící část hřídele a tím se změní vzájemná poloha ozubení elektrod, a tím též kapacity kondenzátoru. Signál z kondenzátoru je následně vyveden do statorové části.



Obr. 15: Kapacitní snímač momentu [8]

3.7 Piezoelektrický snímač momentu

Působení síly vyvolává elektrický náboj ve výbrusu krystalu křemene, který může být při určitém uspořádání namáhán i na krut, a proto jej lze použít i pro měření momentu. Tyto snímače vyrábí například firma Kistler. [2]

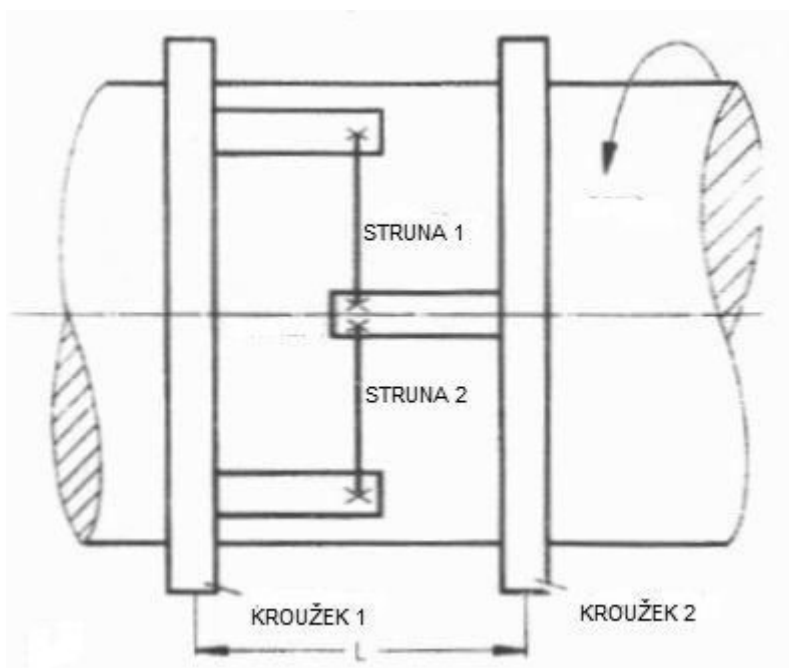
3.8 Optomechanický snímač momentu

Deformační člen je tvořen hřídelem s odrazovou ploškou uloženým v tuhé soustředné trubce se zrcátky na vnitřní stěně. Optický systém má za úkol sledovat natočení dvou průřezů,

odpovídající působícímu momentu. Porovnává polohy odraženého a přímého paprsku na stupnici optické soustavy. [2]

3.9 Frekvenční strunový snímač

Na hřídeli se nacházejí kroužky ustavující předpjaté struny uložené příčně (mimoběžně) k ose rotace a tečně k povrchu hřídele. Měří se změna frekvence kmitání ve dvou průřezech deformačního členu. Působením momentu v jednom směru se napětí jedné struny zvyšuje a druhé snižuje. Rozdíl frekvencí kmitání je úměrný působícímu momentu. Přenos elektrického signálu lze realizovat jak kontaktní, tak bezkontaktní. [2]



Obr. 16: frekvenční strunový snímač [2]

4 Točivé dynamometry

Vedle přímého měření snímači lze využít též měření nepřímé, kdy se točivý moment zkoušeného hnacího stroje měří až jako reakční na statoru stroje hnaného – točivého dynamometru, který zkoušený stroj zatěžuje. Točivý dynamometr je stroj sloužící k ověřování charakteristiky jiného točivého stroje. Umožňuje zatěžování, někdy i též pohánění zkoušeného stroje proměnným momentem a jeho současné měření. Točivým dynamometrem může být obecně jakýkoli točivý stroj, u kterého je možné měření reakčního momentu statoru, který se přenáší do základů stroje. V případě dynamometru se stator uloží do ložiskových stojanů, čímž vznikne tzv. uvolněný stator, čímž je umožněno měřit točivý moment. Ten určuje pomocí měření reakční síly F působící na základy stroje měřené ve vzdálenosti l od osy rotace dynamometru. Aby platila rovnice momentové rovnováhy, kdy moment na měřený na statoru M_S je roven momentu na rotoru dynamometru M_R , je třeba uvážit třecí ztráty v ložiskách statoru M_{LS} , případně ventilační ztráty v důsledku tření rotoru o vzduch M_{VENT} . Rovnováha má pak tento tvar:

$$M_S = M_R - M_{LS} - M_{VENT} \quad (13)$$

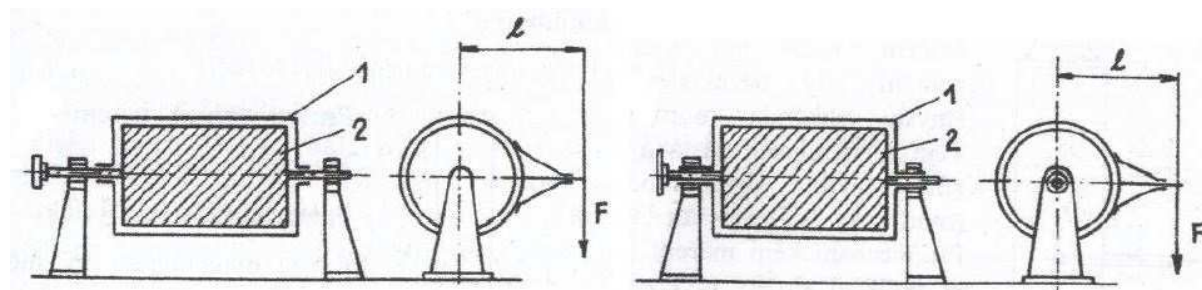
Při používání dynamometrů lze někdy tyto ztrátové momenty zanedbat a poté platí jednoduchý vztah:

$$M_S = M_R = F \cdot l \quad (14)$$

Reakční síla se měří:

- Pružinovým siloměrem
- Mechanismem váhy
- Snímačem síly – tah-tlak

Obvyklé a vhodnější je klasické uspořádání, kdy je rotor uložen v ložiskách statoru a stator v ložiskových stojanech, opačné uložení je ale též možné.



Obr. 17: Uložení dynamometrů, vpravo konvenční varianta [2]

Mezi státorem a rotorem točivého dynamometru mohou působit:

- Síly od mechanického tření
- Hydrodynamické síly
- Elektromagnetické síly

Dynamometry lze dělit na aktivní a pasivní. Pasivní dynamometry jsou zařízení absorbující energii měřeného stroje, někdy též označované jako tzv. výkonové brzdy, z hlediska energetického jsou ztrátové. Termín „brzdy“ je použit proto, že tyto stroje působí proti točivému momentu měřeného stroje známým či měřeným brzdícím momentem opačného směru, čímž je mařena energie stroje, která se přeměňuje na odpadní teplo. Pracují jen jako zatěžující stroj. Aktivní dynamometry dokáží pracovat i v motorickém režimu, tj. mohou sloužit jako pohon pro připojený stroj. V dynamometrickém chodu pracují v režimu elektrického generátoru, čili je možné mařenou energii vracet zpět do sítě v podobě elektrické energie. Podle základního principu činnosti se dynamometry dělí na třecí a elektrické.

Třecí dynamometry:

- mechanické
- kapalinové (hydraulické)
- vzdušní (vrtulové)

Elektrické dynamometry:

- práškové
- vířivé (vířivé proudy)
- střídavé
- stejnosměrné

Třecí dynamometry pracují pouze zátěžově. Elektrické střídavé a stejnosměrné jsou schopny motorického režimu. Práškové a vířivé jsou podobně jako třecí jen ztrátové. Dynamometr by měl být schopen pracovat v obou smyslech otáčení, měření reakční síly musí být nezávislé na směru točivého momentu. Každý dynamometr má svou pracovní oblast danou konstrukcí, která je vymezena soustavou křivek. Jedná se o křivky závislosti momentu točivého stroje na otáčkách, jejichž tvar a tím i pracovní oblast dynamometru je jednoznačně určena konstrukcí, tj. funkčními omezeními a rozsahem regulace stroje. Tato základní (vlastní) charakteristika se nazývá přirozená charakteristika dynamometru. Při různých nastaveních regulačního ovládacího prvku se získá soustava charakteristik, to znamená křivek $M = f(n)$. Pokud by nebylo možné charakteristiku během provozu dynamometru měnit, bylo by možné změřit pouze jeden bod charakteristiky zkoušeného stroje a to ještě za předpokladu, že se charakteristika obou strojů protínají. Do regulace činnosti dynamometru se proto zavádí „zpětná vazba“, čímž se přirozená charakteristika mění na zpětnovazební. Ovládání většiny elektrických i modernějších kapalinových dynamometrů toto umožňují. Nejčastěji se využívají dva typy regulace a to na konstantní otáčky nebo na konstantní moment.

Charakteristika dynamometru se volí podle charakteristiky zkoušeného stroje. Dle charakteristik musí být zajištěna stabilita chodu soustrojí dynamometr – stroj.

Pracovní omezení dynamometru jsou:

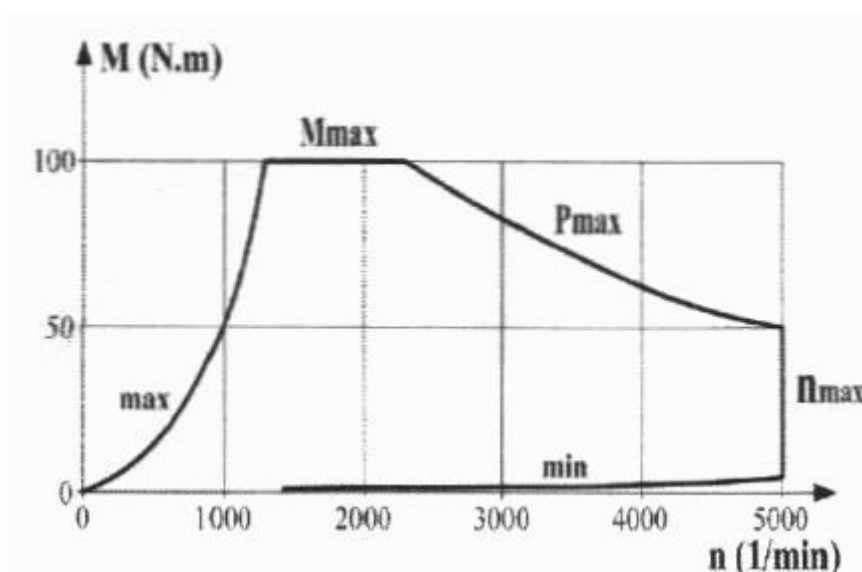
- funkční – pro minimální a maximální nastavení ovládacího prvku dynamometru, např. pro kapalinový dynamometr platí:

$$M = k \cdot n^2 \quad (15)$$

rozsah je mezi k_{\min} a k_{\max}

- pevnostní – tj. namáhání součástí od maximálního momentu M_{\max} či odstředivých sil daných maximálními otáčkami n_{\max}

- tepelné – dané odvodem tepla – schopnost chlazení je dána konstrukcí dynamometru, použitým chladicím médiem, jeho průtočným množstvím a tepelným spádem. Výkon zkoušeného stroje nesmí být proto vyšší než výkon chlazení dynamometru.



Obr. 18: Pracovní oblast dynamometru, křivky „min“ a „max“ = funkční omezení, n_{MAX} = otáčkové omezení, M_{MAX} = momentové omezení, P_{MAX} - výkonové omezení [2]

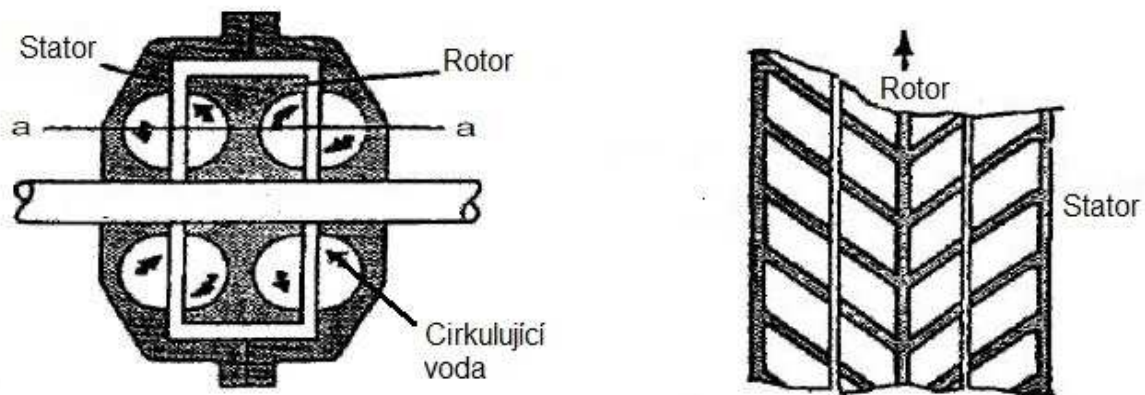
Pracovní oblast dynamometru by měla pokrýt požadavek na celou charakteristiku zkoušeného stroje. Pracovní oblasti se u aktivních elektrických dynamometrů slabě liší pro chod generátorický a motorický. Charakteristiky se obvykle znázorňují v souřadnicích M, n nebo P, n . [2]

4.1 Hydraulické dynamometry

V těchto zařízeních, známých též jako hydraulické brzdy se mění mechanická energie na teplo pomocí vnitřního tření částic vody, která je jak pracovním médiem, tak zároveň médiem chladícím. Její množství ve stroji se reguluje dle brzděného výkonu, přičemž je omezeno dovoleným oteplením vody, které je omezeno teplotou asi 70°C, neboť při vyšší teplotě hrozí nebezpečí kavitace a tvorby kotelního kamene. Proto se doporučuje používat demineralizovanou vodu. Kapalinový dynamometr by se měl zapojovat do uzavřeného chladicího okruhu, kde nehrozí kolísání tlaku vody jako ve veřejném rozvodu, které by způsobilo změnu charakteristiky a nestabilitu provozu. Požadován je konstantní tlak, který je možno docílit např. použitím spádové nádrže. Množství vody potřebné pro chlazení je relativně velké, například na maření výkonu 100 kW je třeba chlazení až o průtoku 100 litrů za minutu.

Dynamometr je tvořen válcovým rotorem otáčejícím se ve vodotěsném statoru. V obou částech jsou vytvořeny vybrání toroidního tvaru, které společně tvoří jakési kapsy, v kterých při rotaci hřídele působícím odstředivou silou na vodu začne kapalina cirkulovat, čímž převádí moment na stator. Ten je však vyvažován výkyvným tělesem, jež se ramenem opírá o siloměrné zařízení

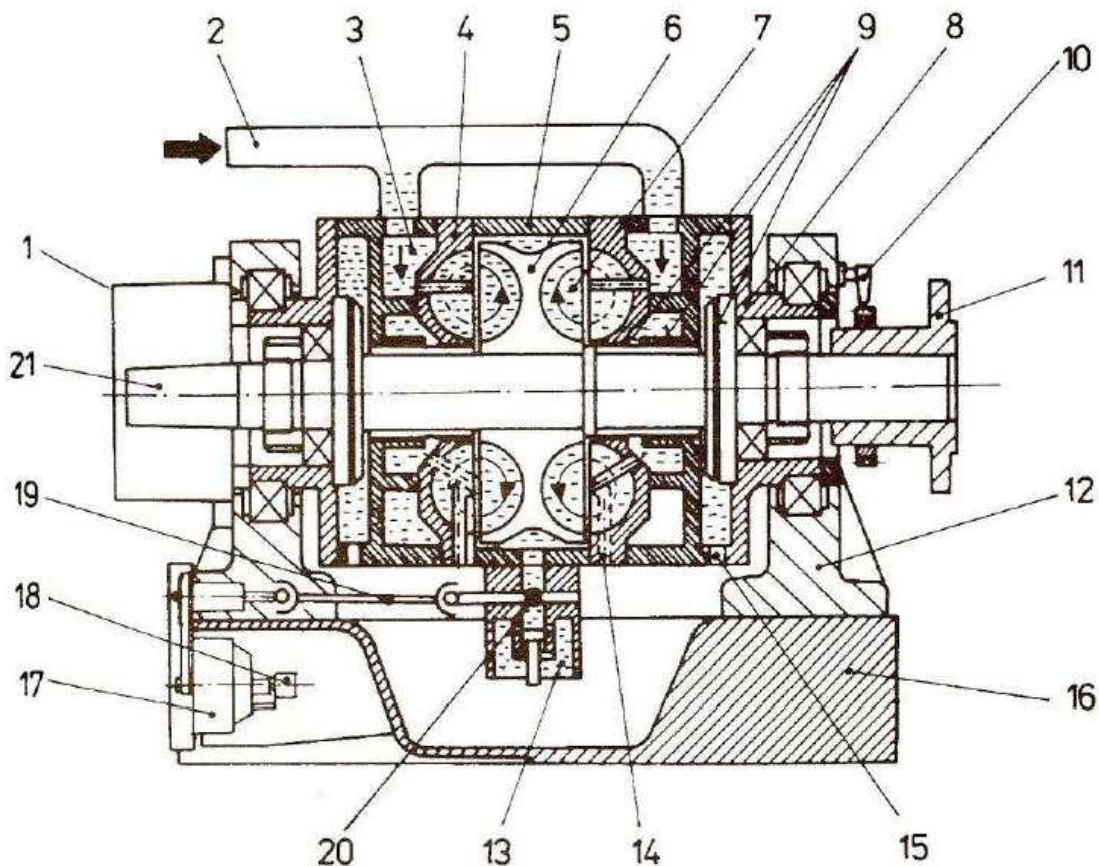
(siloměr, tenzometrický měřič, mechanické váhy). V důsledku vířivého proudění dojde k disipaci energie na teplo. Princip dokreslují následující obrázky.



Obr. 19: konstrukce hydraulického dynamometru, vpravo pohled v řezu a-a [9]

Charakteristiku kapalinových dynamometrů lze regulovat dvěma způsoby, jejich přirozená charakteristika je dána hydraulickým odporem systému

- Kapalinové dynamometry s konstantním plněním - klíčem je omezení cirkulace kapaliny v prostoru mezi rotorem a statorom posuvnými clonami. To jsou tenké desky, které se umístí do zmiňovaného prostoru, tím lze ovládat cirkulační tok vody a použitím různých desek proměnlivě zatěžovat motor. Přirozená charakteristika je kvadratická křivka, jelikož ztráty v proudící kapalině jsou úměrné kvadrátu rychlosti proudění, tj. $M = k \cdot n^2$. Nevýhodou je pomalejší regulace.
- Kapalinové dynamometry s proměnlivým plněním – mění se objem vody v systému, regulování může být dosaženo přepadovou trubicí řídící odtok nebo ventilů ovládaných servomotorem. Ty mohou být jen na výstupu, nebo na vtoku i výtoku zároveň. Tento systém umožňuje rychlejší regulaci a tím efektivnější ovládání brzdného momentu.



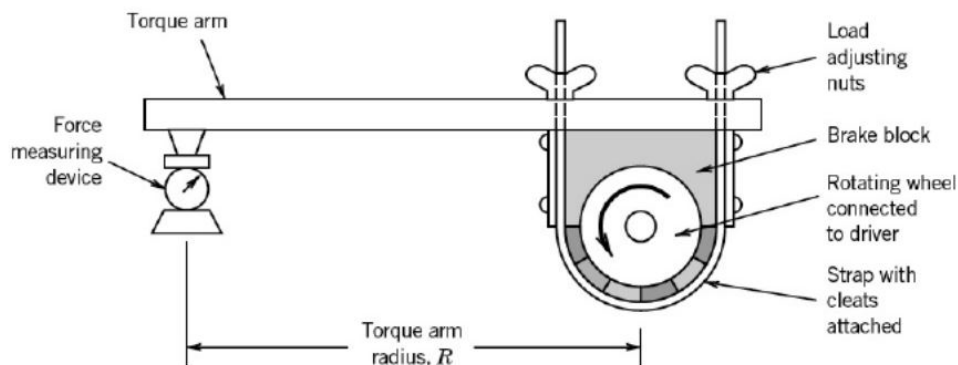
Obr. 20: Kapalinový dynamometr s regulací servoventilem

- 1 – kryt, 2 – přívod kapaliny, 3 – kruhová komora, 4 – stator, 5- těleso brzdy, 6 – symetrický rotor, 7- vířivá komora,
8 – příruba brzdy, 9- labyrintová těsnění, 10 – snímač otáček, 11 – příruba na hřídeli, 12 – ložiskový stojan,
13 - řídicí ventil, 14 – odvzdušňovací prostor, 15 – otvor pro odvod vody, 16 – rám stroje, 17- pohon řídicího ventilu,
18 – potenciometr, 19 – kloubový hřídel, 20 – škrťací klapka, 21 – hřídel rotoru [10]

Kapalinové dynamometry jsou poměrně složité robustní stroje s širokým rozsahem pracovních oblastí. Vyrábí se v různých konstrukčních typech – Froude, Schenck, Hofmann, pro výkonová spektra až do 160 MW a otáčková až do 120000 min⁻¹ [2].

4.2 Mechanické třecí dynamometry

Historicky nejstarší koncept dynamometru, mezi nějž patří například Pronyho brzda, se dnes už téměř nepoužívá. Brzdny moment byl vyvozován třecí brzdou a na rameni bylo umístěno závaží, jehož tíha byla určující silou. Jelikož součinitel tření je závislý na opotřebení a teplotě třecích ploch, není přesnost tohoto měřiče nejlepší.



Obr. 21: varianta Pronyho brzdy [5]

4.3 Vzdušný třecí dynamometr

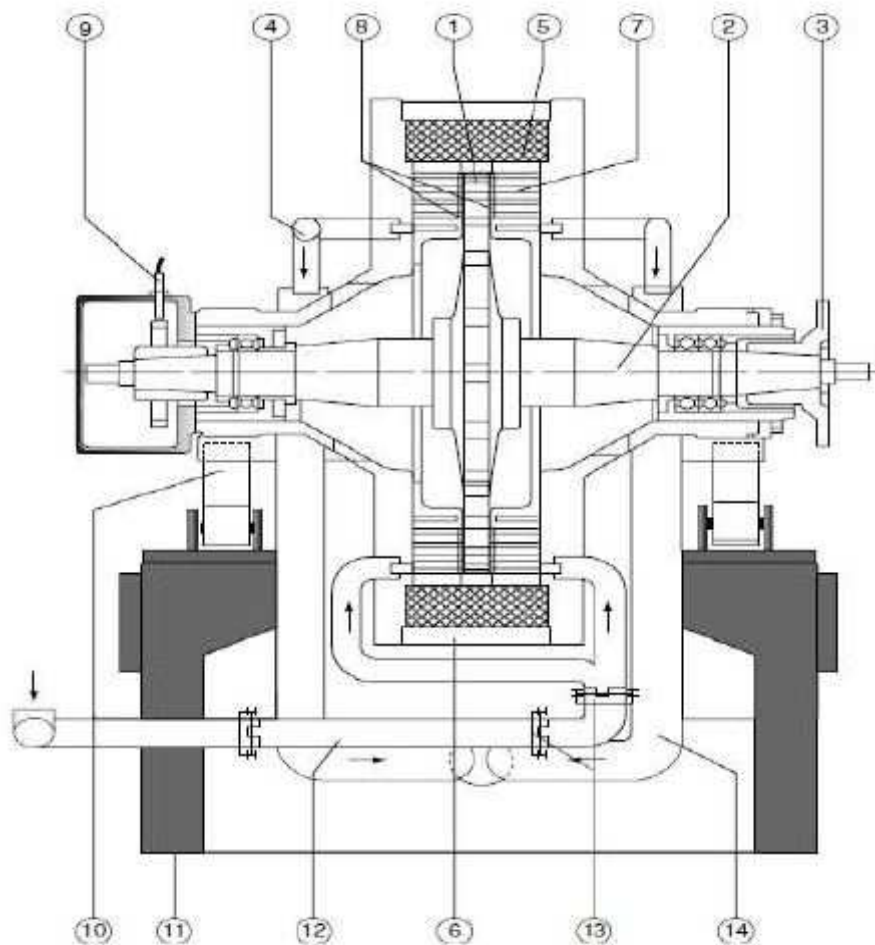
Existuje vrtulový dynamometr využívající k maření energie vzduch. Používá se k měření vrtulí helikoptér, kde není vyžadována velká přesnost.

4.4 Elektrické dynamometry

4.4.1 Vířivý dynamometr

Využívá brzdných účinků vyvolaných Foucaultovými vířivými proudy a elektromagnetickou indukci. Rotor je z oceli ve tvaru ozubeného kola. Stator obsahuje budící cívku, kterou prochází stejnosměrný proud, jenž vytváří v magnetickém obvodu magnetický indukční tok paralelně s osou stroje. Otáčející se rotor vlivem střídání zubu a mezery mění magnetický odpor magnetického obvodu a tím i magnetický indukční tok. Jeho změna způsobuje indukování napětí v magnetickém obvodu, v důsledku čehož začnou obvodem protékat vířivé proudy, jež působí proti momentu rotoru a vytváří brzdný moment, přičemž jeho velikost lze regulovat budícím proudem v cívkce. Konstrukce vířivé brzdy je symetrická a rotor se tak může otáčet oběma směry. Energie vířivých proudů se mění na teplo, proto je potřeba kvalitního chladicího systému. Používány jsou tři způsoby. První, vzduchové chlazení jsou konstrukčně nejjednodušší, chladicí potenciál je však značně limitován. Přímé vodní chlazení není konstrukčně složité, chladicí voda vstupuje shora do statoru, je vedena kolem budící cívky i rotoru a spodní částí statoru je odváděna. Při vyšších otáčkách ovšem rychle vzrůstají ztráty třením o vodu, jež jsou úměrné třetí mocnině rychlosti, a brzdící účinky kapaliny na rotor jsou vyšší než moment způsobený vířivými proudy. Proto se brzdy s přímým chlazením používají zhruba do 7000 otáček za minutu. Pro vyšší rychlosti se používá nejdokonalejší a také nejsložitější systém nepřímého vodního chlazení, kde voda nepřichází do kontaktu s rotorem. Chlazen je stator pomocí rozváděné vody chladicími kanálky do okolí cívky. Tento systém se používá u vířivého dynamometru s axiální vzduchovou mezerou, jenž se vyznačuje úzkým kotoučovým rotorem s menší setrvačností. Druhý typ vířivého stroje je dynamometr s válcovým rotorem neboli radiální vzduchovou mezerou, který má podobné uspořádání jakou běžné točivé stroje a u kterého lze použít oba typy vodního chlazení. Teplota chladicí vody u vířivých dynamometrů je omezena podobně jako u kapalinových, výkon chlazení je dán opět konstrukcí a teplotním spádem. Krátkodobě je však možné dynamometr přetížít. Pracovní oblast vířivých dynamometrů je určena pevnostním i výkonovým omezením. Díky regulaci proudem budící cívky jsou možnosti zpětnovazební regulace velmi široké a křivka

zpětnovazební charakteristiky může být mnoha typů (konstantní, lineární, kvadratická...). Volí se dle typu zkoušeného stroje. Zařízením pro vyhodnocení momentu je váha nebo tenzometrický snímač. Díky možnostem regulace jsou tyto dynamometry oblíbené zejména při zkoušení spalovacích motorů, mezní hodnoty brzdných výkonů se pohybují kolem 3000 kW, hodnoty mezních otáček až 20000 min^{-1} . Uplatňují se ve výrobě a servisních službách. K výrobcům vířivých dynamometrů patří firmy jako Froude, Schenck, Zöllner, Hofmann, z tuzemských výrobců pak např. VÚES. [2]



Obr. 22: vířivý dynamometr s kotoučovým rotorem,

- 1 - kotoučový zubový rotor, 2 - hřídel, 3 - příruba, 4 - odvod vody, 5 - budící cívka, 6 - stator, 7 - okružní chladicí kanál,
8 - axiální vzduchová mezera, 9 - snímač otáček, 10 - pružný stojan, 11 - rám, 12 - přívod vody, 13 - kloub,
14 - odvodová hadice [2]

4.4.2 Práškový dynamometr

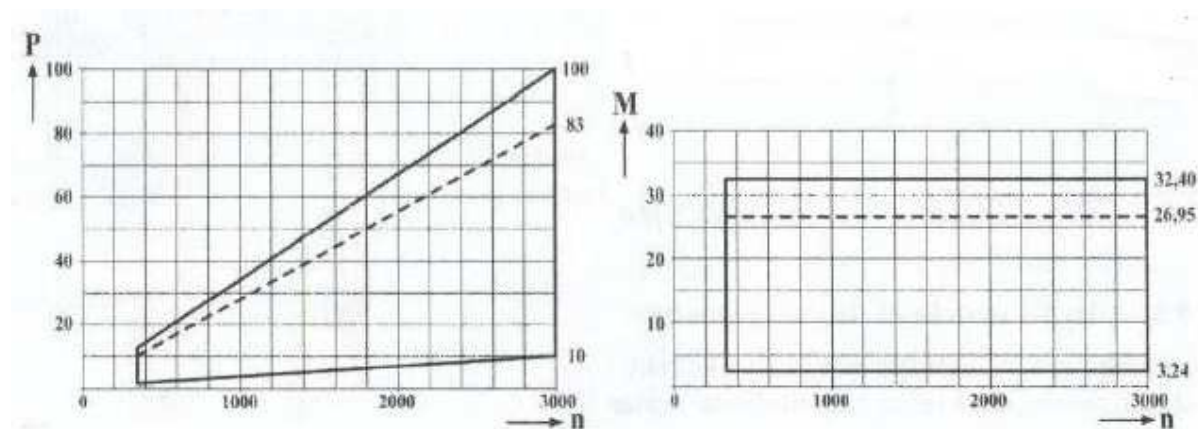
Princip je velmi podobný vířivému, rozdíl je v provedení rotoru. V prostoru mezi státorem a rotorem se nachází feromagnetický prášek, na který působí magnetické pole cívky statoru. Regulačním prvkem je budící proud, práškové dynamometry mají pracovní oblast otáček do 2000 min^{-1} , momenty do 1000 Nm.

4.4.3 Dynamometr střídavý

Je to stroj schopný pracovat jako generátor elektrického proudu i jako regulovatelný klasický asynchronní elektromotor. Princip stroje je stejný jako u třífázového asynchronního motoru. Změna otáček se reguluje změnou frekvence střídavého proudu. Moment lze regulovat změnou budícího napětí, u malých strojů jen kompenzačním transformátorem, u větších se k němu přidává ještě indukční regulátor. Přirozená charakteristika je přímka pro konstantní budící napětí. Pokud pracujeme s absolutními hodnotami výkonu (chod motorický i generátorický v kladných hodnotách), jsou charakteristiky obou chodů lehce rozdílné. Pokud má pracovat jako generátor, je třeba zajistit odběr proudu. Při správném „nafázování“ ho lze připojit do běžné rozvodné sítě. Jelikož činnost střídavého dynamometru není teoreticky ztrátová, pouze se mění energie mechanická na elektrickou, případně naopak, neprojevuje se pracovní oblasti dynamometru výkonové omezení dané výkonem chlazení, které je řešeno jako nucené vzduchové. Omezení je pouze pevnostní dané nejvyššími přípustnými otáčkami a momentem. Tento dynamometr má nižší setrvačnost, oproti ostatním dynamometrům má však malý rozsah otáček. [2]

4.4.4 Stejnoseměrný dynamometr

Jeho hlavní část tvoří stejnosměrný elektromotor. Stejnoseměrný proud procházející rotorovou smyčkou ve statorovém magnetickém poli indukuje vnitřní smyčkové magnetické pole, které je vždy stejné orientace jako vnější magnetické pole a vzniká tak otáčivý pohyb snažící se rotor přetočit do opačné polohy. Pokaždé, kdy se smyčka překlopí, dojde komutátorem ke změně směru proudu a rotor se točí dál. Tyto stroje jsou poměrně robustní, typickými vlastnostmi jsou malý moment setrvačnosti a omezený otáčkový rozsah. Také vyžaduje vyšší úroveň údržby. Stejně jako střídavý, pracuje též v obou režimech. Pokud má být připojen do sítě, potřebuje být vybaven vhodným AC/DC měničem napětí. Tím může být řízený usměrňovač s nízko- či vysokootáčkovým frekvenčním měničem, nebo elektromechanický měnič – Ward-Leonardovo soustrojí jednoduché či zpětnovazební, jež má nízkou účinnost a u starších typů se tak může vyskytnout výkonové omezení pracovní oblasti. V důsledku ztrát není momentové omezení u generátorického a motorického chodu stejné. Jak ukazují následující obrázky, generátorický režim (znázorněn plnou čarou) dovoluje vyšší výkony a momenty než motorický.



Obr.23: Pracovní oblast stejnosměrného dynamometru pro oba typy chodu [2]

U zdrojů s frekvenčním měničem provádí digitální regulační obvody a komunikační linka regulaci otáček a momentu. Standardně na konstantní otáčky, konstantní moment, je možná i obecná závislost momentu na otáčkách. Stejnoseměrné dynamometry jsou univerzálně použitelné stroje k pohonu i zatěžování, díky elektronickému řízení široce regulovatelné včetně nestacionárních režimů. Uplatňují se ve výzkumu a vývoji, jejich výroba je spíše kusová. Podílejí se na ní např. firmy Schenck, AVL, na domácí scéně MEZ servis Vsetín. [2] [5]

4.5 Snímače otáček

Pro určení výkonu je nezbytné znát nejen kroučící moment, ale i otáčky, případně rovnou úhlovou rychlost hřídele. Snímače otáček jsou dnes integrované prakticky ve všech snímačích momentu a dynamometrů, kde lze využít prostě na hřídeli pro ustavení snímače.

Dělíme je například dle výstupního signálu na snímače s neelektrickým výstupem čidla, kam patří magnetické a stroboskopické. Snímače s elektrickým výstupem indukční, kam patří především tachodynamo a tachogenerátor. Dále impulzní, které udávají počtem impulzů natočení hřídele. Zahrnují fotosnímače, indukční a kapacitní snímače, magnetické (s Halloovou sondou). Třetí skupinou jsou speciální čidla. [3]

5 Zhodnocení možností a výběr varianty pro turbínu VT-400

Předchozí dvě kapitoly sumarizují možnosti měření kroučícího momentu, případně výkonu točivých strojů pomocí nejrůznějších typů snímačů a točivých dynamometrů a relativně detailně popisují principy jejich funkce. Z těchto možností lze vycházet pro volbu varianty měřícího zařízení pro určování výkonu a momentu vzduchové turbíny.

5.1 Požadavky pro měření na turbíně VT-400

V současnosti zajišťuje měření momentu a výkonu vzduchové turbíny VT-400 stejnosměrný dynamometr od firmy MEZ Servis Vsetín, typového označení SDS 132 S 601. Dynamometr je spojen přímo s hřídelí turbíny (viz Obr. 1 a 2) pomocí pružné kotoučové spojky. Při měření je využíváno obou režimů dynamometru, to znamená, že při rozběhu je turbína dynamometrem pracujícím v motorickém režimu poháněna, následně při měření pracuje dynamometr v chodu generátorovém a turbínu zatěžuje. Výstupem měření je napěťový signál. Chyba měření dynamometru je 0,5% u měření kroučícího momentu a 0,2% pro měření otáček vždy z naměřené hodnoty. Základním požadavkem by tedy měla být zvýšená přesnost měření otáček a momentu. Dle zdroje [1] je podíl nejistoty měření momentu na celkové nejistotě při určování účinnosti stupně ze všech veličin vstupujících do měření nejvyšší, cca 30 %. Též příspěvek nejistoty měření otáček není zanedbatelný – cca 13%. V úvahu je třeba vzít pracovní oblast hnacího stroje, ve které měření obvykle probíhají. Mezní hodnoty otáček při měření na vzduchové turbíně je zhruba od 1000 do 4000 min⁻¹. Výkonové spektrum je uvažováno od 2 do 10 kW, jako horní momentovou hranici při testování považujeme hodnotu 100 Nm, přičemž průměrná hodnota při měření se pohybuje okolo 20 Nm. Omezením jsou rovněž rozměrové parametry měřícího pracoviště. Laboratoř disponuje určitou plochou, přičemž při současném uspořádání prvků měřícího zařízení je dynamometr umístěn v blízkosti skříně turbíny i stěny místnosti. Při návrhu nové varianty je tak třeba počítat i s omezeným prostorem. Přesuny částí zařízení by byly náročnější, v případě například stojící konstrukce vzduchového potrubí téměř neproveditelné.

5.2 Výběr varianty měřícího zařízení

Při měření na turbíně se hodnoty provozních otáček a generovaného momentu pohybují na relativně nízkých hodnotách, výkon vzduchové turbíny je malý, a proto není třeba mařit velké množství energie, ke kterému by bylo třeba použít robustních dynamometrů. Ač jsou dnes tyto zařízení dostupné s poměrně nízkou hodnotou třídy přesnosti, jejich velký rozsah by se při tomto měření neupotřebil. Jelikož turbína potřebuje být při rozběhu poháněna, tudíž by se musela být realizovaná aplikace dynamometru pouze v kombinaci s motorem. Použití by se mohl aktivní dynamometr, například střídavý, který je v současnosti na trhu z dynamometrů nejdostupnější a postupně nahrazuje vířivé dynamometry. Dnes jsou jeho modely k dispozici v různých výkonových spektrech, existují dokonce verze pro testování malých motorů domácích spotřebičů v rozsahu do 5 kW. Ceny se pohybují od desítek do stovek tisíc korun. Jako nejvhodnější řešení se však jeví použití momentového snímače. Tato moderní snímací zařízení nacházejí velké uplatnění a je jich na trhu k dispozici relativně velké množství různých rozsahů i provedení. Cena je opět řádově v desítkách až stovkách tisíc korun a jejich připojení do testovaného zařízení nebývá složité. Nespornou výhodou snímačů oproti dynamometrům je, že měří moment přímo na hřídeli bez ovlivnění ztrátami v ložiskách jako u dynamometru. Snímače mohou být zakomponovány do měřícího systému v libovolné poloze (vertikálně, horizontálně, šikmo ...) Vybírat lze z rotačního či nerotačního typu, tvarově jsou nejčastější přírubové snímače či tenzometrické hřídele (svěrná spojení) s hřídelovými vývody na obou stranách snímače. Příhodným řešením se zdá být ponechání stejnosměrného dynamometru pro pohon turbíny a použití přírubového momentového snímače, který by bylo možno zakomponovat mezi výstupní hřídele turbíny a dynamometru. Přírubový snímač zároveň šetří místo, jeho použití je vhodné už kvůli vzdálenosti mezi turbínou a dynamometrem, která je okolo jednoho metru. Druhou možností je tenzometrický hřídel, jenž zabírá více místa, ale je schopen velmi přesného měření. Významní výrobci snímačů jsou například firmy HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik), Magtrol či Lorenz-messtechnik, Sensodrive,

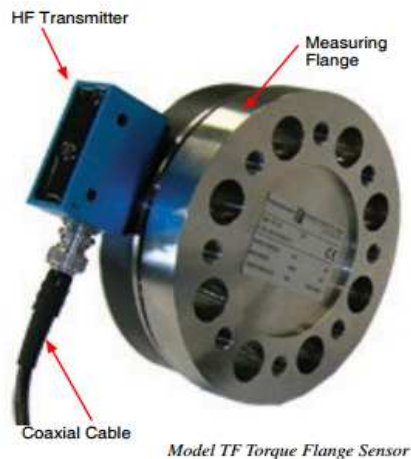
5.2.1 Přírubový snímač TF firmy Magtrol

Výhodou tohoto snímače je především vysoká torzní tuhost, lze jej instalovat přímo na hřídel stroje místo příruby či spojky či na jedné straně, což snižuje náklady i rozměry měřící soustavy. Z druhé strany je nezbytné použít kloubovou či pružnou spojku pro eliminaci radiálních a úhlových odchylek. Snímač je bezkontaktní, bezložiskový, částečně voděodolný a téměř bezúdržbový. Dokáže měřit statický i dynamický moment na hřídeli. Signál z tenzometrického snímače je přenášen telemetricky, v zesilovači umístěném na přírubě je modulován na vysokou frekvenci a induktivním způsobem přenášen přes stacionární anténu do přijímače, kde se mění z digitálního na analogový s napěťovým výstupem do 10 V nebo 4-20 mA (lze volit). Integrovaný je magnetický snímač otáček. Pro modely rozsahové třídy TF 3** do 200 Nm platí tyto parametry:

- Třída přesnosti 0,1%
- Max.otáčky 17000 1/min
- Vysoká tepelná odolnost 125°C
- Kapacita přetížení 200%
- Limit přetížení 400%
- Měřič otáček: TTL výstupní signál, počet zubů měřícího kola 52

Součástí měřiče je vysokofrekvenční přijímač tvořící stator, koaxiální kabel, měřič otáček a přijímač signálů, ten lze propojit s monitorem či PC. Snímač je velice náchylný na nepřesné

zapojení do měřicí soustavy, povolené montážní odchylky při napojování hřídelí jsou velmi malé a důležité je přesné ustanovení polohy a vůle mezi přírubou a stacionárními senzory. [11]



Obr. 24: Přírubový snímač TF od firmy Magtrol [11]

5.2.2 Přírubový snímač DR-2554 s integrovanou spojkou

Bezkontaktní digitální snímač typu příruba o dobré torzní tuhosti vhodný pro vestavění do zkušebních systémů. Hojně je využíván pro dynamická měření v automobilovém průmyslu, například při zkouškách spalovacích motorů a převodovek, kde umožňuje díky své konstrukci zabudování do zkušebních výkonových válcových stolic či do zkušebních brzdových válcových stolic. Vyrábí firma Lorenz-Messtechnik.

- třída přesnosti 0,15%
- jmenovitý rozsah 50, 100,150... – 1000 Nm,
- napěťový výstup max. do 10 V,
- teplotní rozsah 5-45°C,
- maximální otáčky 6800 1/min,
- Zabudovaný volitelný měřič otáček 30 pulsů za otáčku
- Možné měřicí přetížení 200% (statické)
- Provozní zatížení 130% jmenovitého (statické) [12]

Výhodou je nabídka integrované spojky a možnost různých druhů připojení k hřídelím – přírubou, svěrné spoje, pero.



Obr. 25: Snímač DR 2554 s integrovanou spojkou [12]

5.2.3 Snímač momentu T40B

Tento přístroj od firmy HBM disponuje vysokou torzní tuhostí, schopnostmi snášet velké dynamické zatížení, smykové síly i ohýbací momenty. Skládá se ze statoru a rotoru, který obsahuje měřicí aparát s tenzometry. Na vnější obvodu měřicího aparátu se nacházejí cívky pro bezkontaktní přenos signálu. Ten je odeslán a přijímán pomocí anténového prstence, který je ukrytý pod statorovým krytem. Stator obsahuje vstupy pro kabely a také snímač rychlosti založený na magnetickém principu, který snímá signál z magnetického kroužku integrovaného na rotoru. Přenos naměřených hodnot z rotoru na stator se uskutečňuje digitálně. Výstup ze statoru je frekvenční i napět'ový. Pro ochranu před nežádoucím vnějším silovým namáháním je vhodné přírubu propojit s kloubovým hřídelem či vyrovnávací spojkou. Nominální rozsah od ve třídách od 50Nm do 10 kNm. Design měřiče se vyznačuje velmi úzkým provedením, rotor je lehký s malým momentem setrvačnosti. Možno zakoupit i s doporučenou pružnou spojkou. [13]

- Třída přesnosti 0,1%
- Jmenovitý teplotní rozsah 10 - 70°C
- Měřicí přetížení 200-400%
- Rozsah otáček do 20000 min⁻¹
- Výstupní napět'ový signál ± 10V
- Frekvenční výstup 10 kHz



Obr. 26: Digitální snímač typu příruba T40B [14]

5.2.4 Tenzometrický hřídel T20WN

Tento měřič patří do skupiny tenzometrických hřídelů, které se připojují do měřicí soustavy souose mezi hřídele hnaného a hnacího stroje. Pro jejich připojení se používají spojky, výrobcem doporučené jsou pružné spojky vlnovcové se svěrným spojením, které se vyznačuje jednoduchostí a efektivností pro hladké konce hřídelů. V případě, že by pohon nebyl přenášen hnacím hřídelem, ale například řemenovým převodem, postačí spojka jen na straně hnaného

hřídele. Díky kompaktnímu uzavřenému designu jsou tyto snímače odolnější vůči nečistotám prostředí, případně vstřiku vody než přírubové snímače. Oproti přírubovým snímačům jsou též cenově levnější, obecně však méně přesné. Snímač T20WN patří k nejpřesnějším ve své kategorii, dokáže měřit i dynamické momenty. Obsahuje též optický snímač otáček a dokáže měřit i úhel natočení. Lze jej použít jak pro měření na rotujících elementech, tak i pro měření nerotační. Tenzometrické hřídele lze využít zejména pro přesné měření velmi malých momentů, jak dokládá i příklad měřicího rozsahu snímače T20WN, který se vyrábí v rozsahové řadě 0,1 Nm, 0,2 Nm, 0,5 Nm až po 200 Nm. U přírub je nejnižším rozsahem zpravidla 50 Nm. Základní parametry snímače T20WN jsou následující:

- Otáčkový rozsah 10000 min^{-1}
- Třída přesnosti 0,2 %
- Napěťový výstup $\pm 10 \text{ V}$
- Nominální teplotní rozsah 5 až $45 \text{ }^\circ\text{C}$
- V příslušenství měřicí box pro zpracování signálu [15]



Obr. 27: Tenzometrický hřídel T20WN [15]

5.3 Porovnání přírubového snímače a tenzometrického hřídele

Pro konkrétní srovnání hlavních dvou typů snímačů byl vybrán jeden zástupce z každé skupiny od firmy HBM, a to tenzometrický hřídel T20WN a momentová příruba T40B. U obou snímačů je v tabulce uveden výčet parametrů pro modely o jmenovitém rozsahu momentu 50Nm, který se jeví být také nejvhodnějším měření prováděná na vzduchové turbíně VT-400. V úvahu byla brána též aktuální cenová nabídka snímačů od firmy HBM s příslušenstvím, které zahrnuje měřicí kabely, případně snímací box.

	Příruba T40B	Tenzometrický hřídel T40B
Třída přesnosti [%]	0,1	0,2
Měřitelné otáčky [min^{-1}]	20000	3000
Cena s příslušenstvím [Kč]*	212 400	121 500

Délka sestavy snímače [mm]**	293	231
Limit měřitelného momentového přetížení [%]***	400	200
Limit zničení snímače [%]***	800	280
Dovolené zatížení vnějším ohybovým momentem [Nm]	70	10
Dovolené vnější zatížení podélnými silami [kN]	5	5
Torzní tuhost [kNm/rad]	180	14
Moment setrvačnosti rotoru k ose rotace [kg·m ²]****	0,0015	0,0546

Tabulka 1: srovnání snímačů T40B a T20WN [13] [16]

Ze srovnávací tabulky pro dva typy snímačů o stejném jmenovitém rozsahu je vidno, že snímač typu příruba vyniká nad tenzometrickým hřídelem lepšími vlastnostmi z pohledu mechanické odolnosti, má vyšší torzní tuhost a dokáže fungovat ve snímacím režimu i za vysokého momentového přetížení. Vzhledem ke konstrukčnímu provedení má tenzometrický hřídel pochopitelně mnohonásobně vyšší hodnotu momentu setrvačnosti rotoru, ovšem celkový setrvačný moment rotujícího systému se spojkami bude v obou případech vyšší, znatelný rozdíl bude zejména u přírubového snímače. Všechny tyto výhody se samozřejmě projevují v diferenci cen, kde tenzometrický hřídel T20WN vychází řádově o 90 tisíc levněji. Bohužel je však schopen měřit rychlost pouze do hodnoty 3000 otáček za minutu, což je hodnota, kterou lze při praktickém měření na turbíně dosáhnout či lehce překročit, minimálně je však vhodné mít určitou rezervu v horním limitu měření otáček. Co se týče rozměrových vlastností, důležitá je především délka celé měřicí sestavy snímače a spojky. Délka návrhů obou možností je řádově srovnatelná, obojí nepřesahuje délku 300 mm, a proto by neměl být problém případně snímač reálně zakomponovat do laboratorního soustrojí. Pro návrh měřícího zařízení momentu a výkonu vzduchové turbíny VT-400 je tak s ohledem na vhodnější a lepší parametry zvolen přírubový snímač momentu a otáček T40B. Oproti ostatním zmíněným snímačům přírubového typu disponuje příhodnějšími rozměry pro naše konkrétní podmínky, dále výběru dopomohl dostatek dostupných informací o přístroji umožňující snazší návrh zařízení pro zakomponování snímače mezi hřídele vzduchové turbíny a dynamometru. Ačkoliv je snímač typu tenzometrického hřídele podstatně levnější, vzhledem k účelu upotřebení přístroje při výzkumných měření je rozhodující vysoká přesnost snímače, kterou disponuje příruba T40B, a která by měla umožnit zpřesnění hodnot naměřených pomocí dynamometru.

* Ceny jsou zaokrouhlené na tisíce a uvedené bez DPH, do příslušenství nejsou zahrnuty v dodávce se snímačem doporučené spojky.

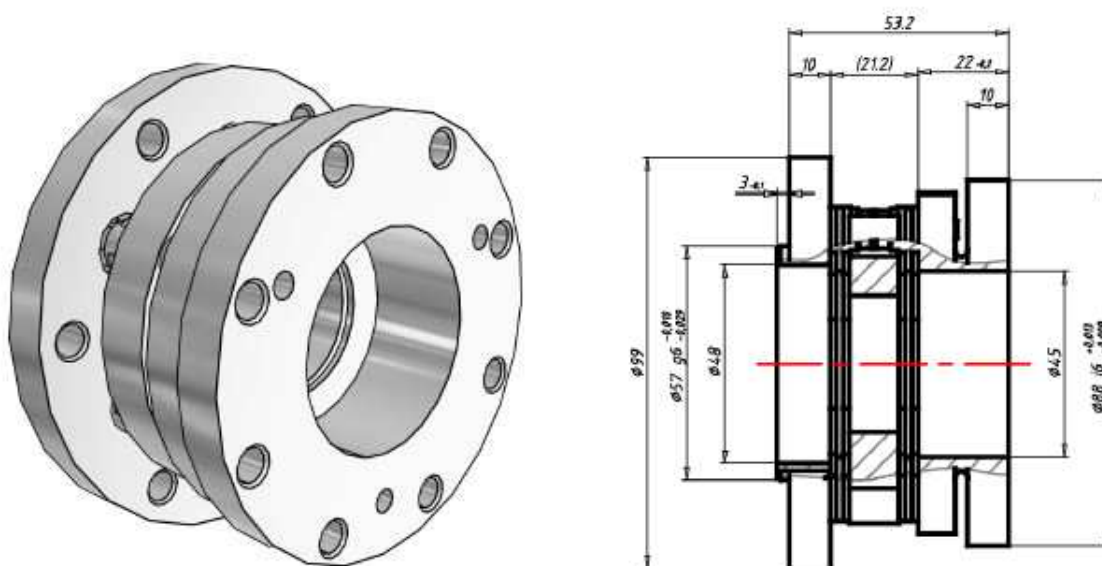
** Délka je uvažována pro použití v návrhu zařízení pro měření momentu na turbíně VT-400 včetně vhodných hřídelových spojek.

*** Platí pouze pro statické zatížení

**** V úvahu je brána hodnota pouze pro rotor snímače bez spojovacích elementů

6 Návrh měřícího zařízení

Vybraným snímačem pro měření momentu a otáček v laboratoři KKE je tedy přírubový snímač T40B. Snímač je vhodný díky malým axiálním rozměrům, takže nebude příliš komplikované jej umístit mezi hřídele turbíny a dynamometru. Podmínky pro připojení jsou takové, že z obou strojů jsou vyvedeny konce hřídelů, mezi které se pomocí spojovacích elementů snímač umístí. Ze stejnosměrného dynamometru vystupuje hřídel o průměru 42 mm, na jejímž konci je pro připojení již předpřipravena drážka pro pero. Výstupní konec hřídele turbíny je o trochu mohutnější, má průměr 55 mm, a také obsahuje již vyfrézovanou drážku pro pero. Jako příhodná možnost spojení se snímačem bude v návrhu zařízení použito spojovacích přírub. Kroutící moment bude přenášen mezi přírubami a hřídeli pomocí drážky a pera. Příruby budou pomocí šroubových spojení připojeny k přírubě snímače, respektive kotouče spojky. Snímač je citlivý na odchylky polohy hřídelů v axiálním i radiálním směru a také úhlové odchylky. Před těmito vlivy snímač ochrání vyrovnávací spojka. Vysoká tuhost a konstrukce snímače dovoluje použití spojky pouze z jedné strany snímače, na rozdíl od tenzometrického hřídele, v jehož případě se doporučuje použití spojek z obou stran, samotná jejich instalace je však jednoduchá, jelikož se spojují hřídele. Ušetření jedné spojky v případě příruby T40B spojení s hřídeli paradoxně neusnadňuje, neboť je třeba propojit hřídel s měřicí přírubou. Firmou dodávající snímač je pro přístroj

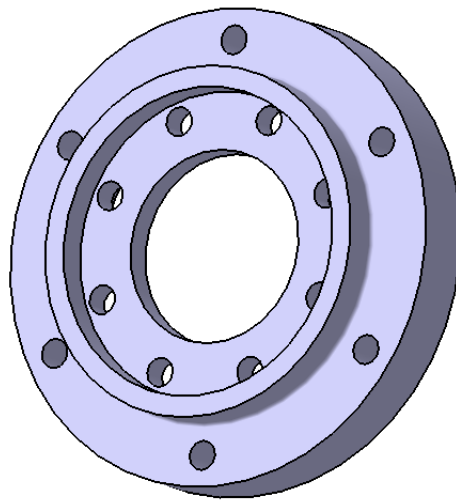


Obr. 28: Membránová spojka ROBA - DS [14]

T40B doporučena membránová spojka ROBA – DS, navržená pro jmenovitý kroutící moment 200 Nm. Tato pružná spojka je složena ze tří kotoučů a mezi nimi vloženými dvěma tenkými kovovými membránami, které jsou ke kotoučům připojeny šrouby. Vnější kotouče spojky určené pro připojení k dalším částem sestavy se velikostně liší. Větší z obou kotoučů je určen pro připojení na tu přírubu rotoru snímače, která není skryta pod anténovým prstencem statoru. Montážní plocha rotorové příruby obsahuje vybrání o průměru 57 mm toleranci H7, do kterého se vystředí osazení na kotouči spojky stejného průměru v toleranci g6 (viz Obr. 28). Na této přírubě se nachází 6 průchozích děr pro šrouby se zápusťnou hlavou a vnitřním šestihranem se

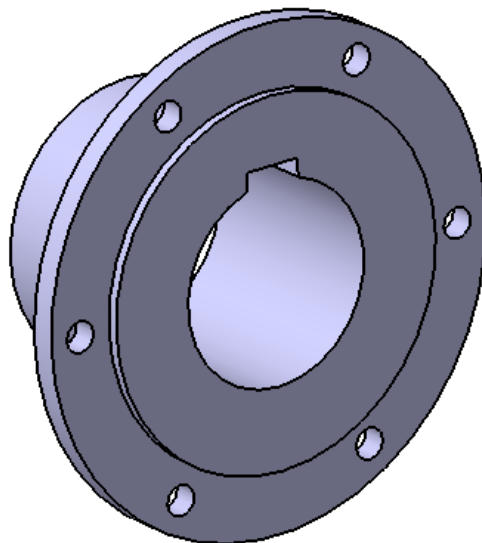
závitem M8x20 ISO 4762 pevnostní třídy 10.9, které se zašroubují do závitových děr většího z krajních kotoučů spojky, který tak plní funkci matice. Pro ochranu proti uvolnění šroubu je výrobcem snímačů dle montážního návodu použit zajišťovač závitů ve formě závitového lepidla. Předepsaný utahovací moment pro upevnění šroubů je 34 Nm. Při splnění těchto podmínek dojde k bezproblémovému přenesení kroutícího momentu pomocí tření spojených ploch spojky a snímače.

Stejnou funkci matice má i druhý vnější kotouč spojky, který slouží k připojení příruby přenášející kroutící moment z hřídele či na hřídel. Tento kotouč obsahuje 8 závitových děr o průměru roztečné kružnice 77 mm pro šrouby M8x16 ISO 4762, vhodné je opět použít lepidla a stejného předepsaného utahovacího momentu jako u spojení protější strany spojky pro docílení bezproblémového třecího přenosu momentu. U tohoto kotouče je tolerovaným



Obr. 29: pomocný středící disk

rozměrem průměr jeho vnější válcové plochy, který má velikost 88 mm s tolerancí j6. Za ten bude vystředěn pomocný disk navržený pro usnadnění spojení spojky s přírubou hnacího hřídele turbíny. Tento disk disponuje 8 průchozími dírami pro výše zmíněné šrouby, které jej připevní ke spojce a osazením pro vystředění se podle vnější plochy kotouče spojky. Dále vně osazení je vyvrtáno 6 průchozích děr o roztečném průměru 118 mm pro spojení s přírubou hřídele turbíny. Středící disk figuruje v návrhu zejména proto, že připojení konce spojky s dírami pro šrouby průměru 8 mm majícími osy na průměru 77 mm přímo k přírubě hřídele turbíny není rozměrově možné, jelikož průměr náboje pro hřídel je 55 mm, navíc s drážkou pro pero, tudíž náboj by svými rozměry neumožňoval realizaci průchozích děr pro šrouby M8x16 ISO 4762. Na protější straně disku, než která je připevněna ke spojce je válcové vybrání o průměru 100 mm tolerance H7, za které se vystředí příruba hřídele turbíny. Ta má rovněž 6 průchozích děr stejných parametrů jako protikus, na ploché straně osazení o vnějším průměru 100mm g6. V náboji je drážka pro pero 10x16 mm. Zajištění polohy k hřídeli je dosaženo pomocí stavěcího šroubu.



Obr. 30: příruba hřídele turbíny

Pro spojení této příruby a středícího kotouče je použita šestice šroubů se šestihrannou hlavou M8x40 ISO 4014 pevnostní třídy 8.8, takže kotouče vlastně představují pevnou kotoučovou spojku. Kroutící moment má za úkol přenášet vnější prstencová plocha pomocí tření, šrouby tedy nejsou namáhané na stříh ale na tah. Pevnostní kontrola šroubů je uvažována pro jmenovitý kroutící moment pružné spojky, tj. 200 Nm.

Třída pevnosti šroubu 8.8

- mez pevnosti $\sigma_p = 800 \text{ MPa}$
- mez kluzu $\sigma_k = 640 \text{ MPa}$
- uvažované dovolené tahové napětí

$$\sigma_D = 0,4 \cdot \sigma_k = 256 \text{ MPa} \quad (16)$$

- tahová síla F_ξ v jednom šroubu:

$$F_\xi = \frac{\frac{F_Q}{f}}{i} = \frac{\frac{2M_k}{D}}{i \cdot f} = \frac{\frac{2 \cdot 200}{0,118}}{6 \cdot 0,15} = 3766 \text{ N} \quad (17)$$

- kontrola minimálního průřezu šroubu vzhledem k dovolenému tahovému napětí:

$$d_{min} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_\xi}{\pi \cdot \sigma_D}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3766}{\pi \cdot 256}} = 4,32 \text{ mm} \quad (18)$$

d_{min} je minimální dovolený průměr jádra šroubu, který se vypočítá jako aritmetický průměr z hodnot malého a středního průměru závitu d_2 a d_3 . Jelikož pro šroub jmenovitého průměru závitu M8 je hodnota malého průměru závitu $d_3 = 6,466 \text{ mm}$, navržený průměr šroubu vyhovuje.

- dále je vhodné určit utahovací moment M_U pro zajištění výše spočtené osové síly ve šroubu. Ten je součtem momentu pod hlavou šroubu M_H a momentu v závitu M_Z .

$$M_H = F_\xi \cdot 0,5 \cdot \frac{D_o + s}{2} \cdot f = 3766 \cdot 0,5 \cdot \frac{0,009 + 0,013}{2} \cdot 0,15 = 3,11 \text{ Nm} \quad (19)$$

$$M_Z = F_\xi \cdot 0,5 \cdot d_2 \cdot \tan(\alpha + \varphi_z) \quad (20)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{p_H}{\pi \cdot d_2}\right) = \arctan\left(\frac{1,25}{\pi \cdot 6,647}\right) = 3^\circ 26' \quad (21)$$

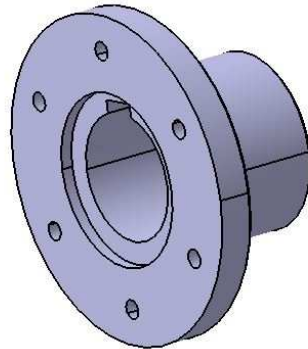
$$\varphi_z = \arctan(f_z) = \arctan(0,1) = 5^\circ 43' \quad (22)$$

$$M_z = 3766 \cdot 0,5 \cdot 6,647 \cdot 10^{-3} \cdot \tan(3^\circ 26' + 5^\circ 43') = 2,01 \text{ Nm} \quad (23)$$

Výsledný utahovací moment pro nastavení potřebné osové síly je

$$M_U = M_H + M_z = 3,11 + 2,01 = 5,12 \text{ Nm} . \quad (24)$$

Poslední částí zařízení je příruba od hřídele dynamometru, která je přímo šrouby spojená s přírubou rotoru snímače. Připojení je realizováno šesti šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem M8x25 ISO 4762 – 10.9 namontovaných za stejných podmínek jako ostatní šrouby této třídy, tj. utahovací moment 34Nm a použití lepidla. Příruba je s rotorem vystředěna pomocí válcového vybrání, do kterého zapadá osazení na rotoru o průměru 57 mm s tolerancí g5. Přenos

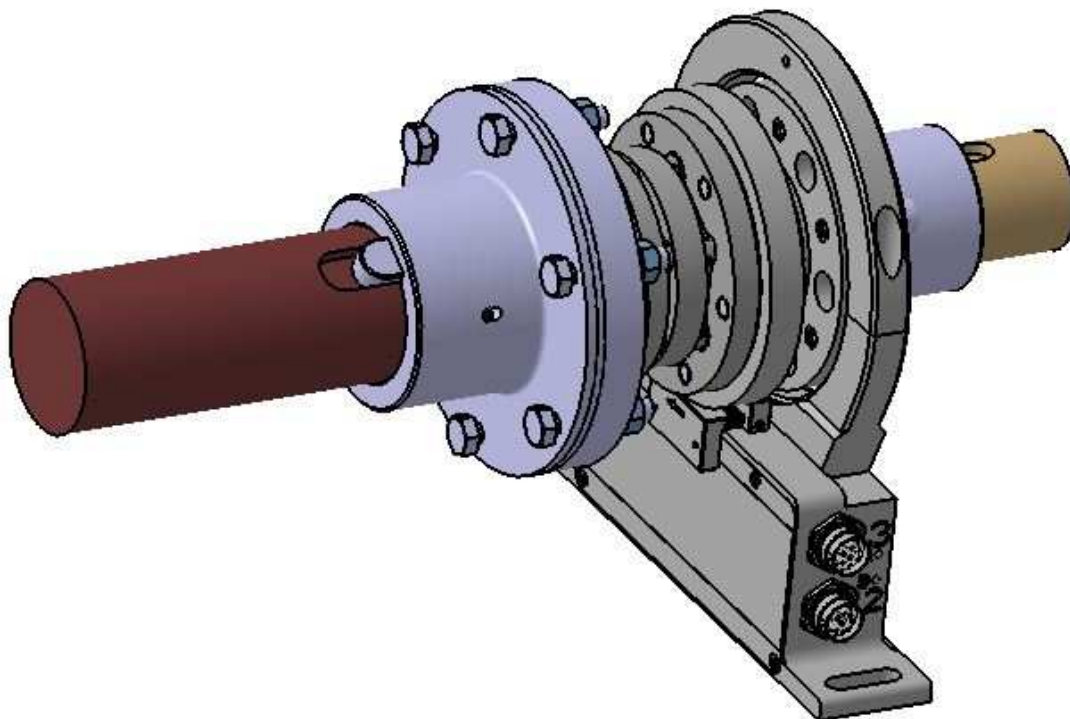


Obr. 31:příruba pro hřídel dynamometru

momentu mezi hřídelem a přírubou je zajištěn perem a drážkou, poloha příruby na hřídeli je vymezena stavěcím šroubem.

Navržené příruby a disk pro realizaci zabudování snímače a spojky mezi hřídele jsou jednoduché komponenty, pro jejichž výrobu lze použít klasický polotovary typu kruhová tyč.

V návrhu je pro ně vybrán materiál ocel 12 060. Pohled na sestavu zařízení včetně označení hnaného a hnacího hřídele je na Obr 32.



Obr. 32: Pohled na měřící zařízení

7 Závěr

Úkolem této práce bylo představit možnosti měření výkonu a momentu točivých strojů v souvislosti s návrhem měřicí varianty zmíněných veličin pro experimentální zařízení nacházející se v laboratoři KKE, které zahrnuje i vzduchovou turbínu VT-400, na které se testuje například účinnost tvarů lopatek. Úvodní část práce popisuje experimentální zařízení, jeho funkci, části a současný stav měřicího zařízení. Pomocí matematických vztahů je popsána role měřených veličin, tj. momentu a výkonu při určování hodnoty účinnosti turbínového stupně.

Prostřední část podává rešerši metod měření, které jsou rozděleny podle principu měření do dvou hlavních skupin. První z nich jsou snímače založené na principu měření vlivu krouťícího momentu na deformační člen, jsou popsány různé principy funkce těchto snímačů. Tyto snímače mají velký potenciál díky své přesnosti a malým rozměrům. Druhou hlavní skupinou jsou měřiče reakčního momentu, tzv. dynamometry. Je zde uveden přehled jednotlivých typů těchto strojů, včetně popisů jejich principu a konstrukce. Dynamometry při měření maří energii měřeného stroje, používají se zejména k měření výkonu spalovacích motorů a určování jejich momentových charakteristik.

Z metod a měřičů uvedených v rešeršní části jsou pak vybrány vhodné varianty uplatnitelné pro návrh měřicího zařízení pro vzduchovou turbínu VT- 400, s ohledem na přesnost měření, momentové a otáčkové rozsahy a pracovní oblast turbíny. Vhodnými se ukázali být momentové snímače, dynamometry se pro konkrétní parametry turbíny příliš nehodí. Detailněji je uvedeno několik modelů snímačů, na dvou z nich je provedeno srovnání mechanických parametrů a také ceny dvou hlavních typů snímačů, kterými jsou tenzometrický hřídel a přírubový snímač. Pro návrh byl vybrán dražší, ale za to přesnější přírubový snímač T40B, který má lepší mechanické parametry a pro výzkumná měření rozhodující vysokou přesnost.

Závěrečná část obsahuje návrh zapojení snímače mezi vzduchovou turbínu a stejnosměrný dynamometr. Je navrženo spojení hřídelů obou strojů pomocí přírub s kotouči pružné spojky a rotoru přírubového snímače. Výkres sestavy měřicího zařízení je uveden v grafické příloze práce.

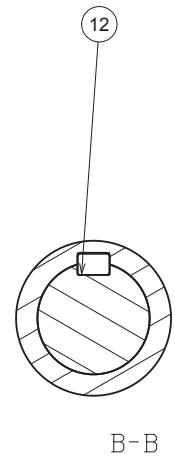
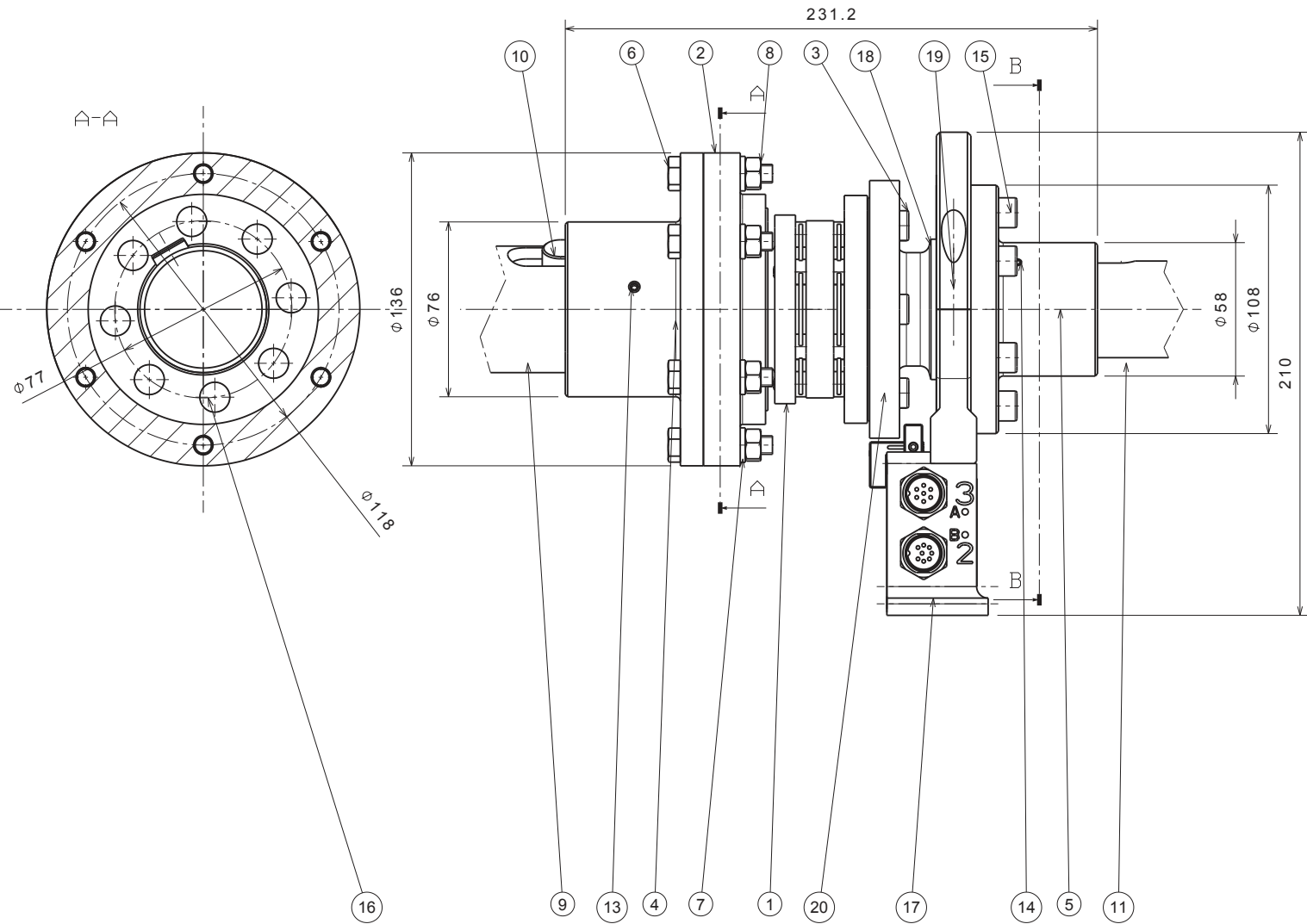
Použitá literatura

- [1] P. Milčák, „Vzduchová turbína VT400 - učební texty,“ ZČU v Plzni, Plzeň, 2012.
- [2] B. Remek, P. Hatschbach a J. Vávra, Experimentální metody a měření v dopravní technice, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [3] J. Kuneš, Měřicí Technika, Plzeň: VŠSE v Plzni, 1991.
- [4] Aremag motor test , „Snímače kroutícího momentu,“ mericipristroje.cz, 2013. [Online]. Available: <http://www.mericipristroje.cz/SnimaceKroucicihoMomentu.html>.
- [5] C. T. Evers, „Certificate for Excellence in Teaching and Learning Project Report“.
- [6] „Základní principy měřičů momentu síly,“ 2013. [Online]. Available: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/moment/ramce_moment.htm. [Přístup získán Duben 2016].
- [7] ČVUT, „Senzory kroutícího momentu,“ [Online]. Available: http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/10_Sila%20tlak%20hladina%20prutok%20_text.pdf.
- [8] J. Jenčík a J. a. k. Volf, Technická měření, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000.
- [9] T. Mikulášek, Zařízení na měření výkonu spalovacích motorů, Brno, 2014.
- [10] M. Kršek, Metody stanovení parametrů motoru a jejich vliv na provoz vozidla, Brno, 2007.
- [11] M. Inc., „Magtrol torque flange TF manual,“ Magtrol Inc., 2009. [Online]. Available: <http://www.magtrol.com/manuals/tfmanual.pdf>.
- [12] Lorenz- Messtechnik, „Rotating Torque sensor DR 2554,“ [Online]. Available: http://www.testsysteme.cz/download/katalog_pro/000221/000136_080641g_DR-2554.pdf.
- [13] HBM, „T40B Torque flange Data Sheet,“ [Online]. Available: http://www.hbm.cz/index_top.htm?http://www.hbm.cz/snimace-krouticiho-momentu.htm.

- [14] HBM, „T40B Torque transducer,“ [Online]. Available:
<http://www.hbm.com/en/3004/t40b-torque-transducer-with-a-rotational-speed-measuring-system/>.
- [15] HBM, „T20WN torque sensor,“ HBM, [Online]. Available:
<http://www.hbm.com/en/2383/t20wn-torque-transducer-torque-flange-with-cylindrical-shaft-stub/>. [Přístup získán 8 květen 2016].
- [16] HBM, „T20WN Datasheet,“ [Online]. Available:
<http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b0673.pdf>.
- [17] L. Burianová a a. kol., Úvod do fyzikálních měření, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012.

Grafická příloha

Výkres sestavy návrhu měřícího zařízení



SEZNAM POLOŽEK

ČÍSLO	POLOŽKA	materiál	hmotnost	ks
1	SPOJKA_1_4411_0110			1
2	Příruba hřídele turbíny	12 060	1,237kg	1
3	ŠROUB M8x20 ISO 4762			6
4	spojkový kotouč	12 060	1,735kg	1
5	příruba hřídele dynamometru	12 060	1,083kg	1
6	ŠROUB M8x40 ISO 4014 - 8.8			6
7	PODLOŽKA 8 ČSN 02 1740			6
8	MATICE M8 ISO 4032			6
9	hřídel turbíny			1
10	PERO 16 x 10 x 45 ČSN 02 2562	11 600	0,071kg	1
11	hřídel dynamometru			1
12	PERO 12 x 8 x 40 4SN 02 2562	11 600	0,032kg	1
13	ŠROUB M5x12 ČSN 02 1187			1
14	ŠROUB M5x12 ČSN 02 1187			1
15	ŠROUB M8x25 ISO 4762 - 10.9			6
16	ŠROUB M8x16 ISO 4762 - 10.9			8
17	Stator snímače			1
18	Statorový kryt snímače			1
19	SROUB M6x20 DIN 912			2
20	Rotor snímače			1

KRESLIL: VOJTĚCH KOŽELUH		ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA FAKULTA STROJNÍ KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ		I	-
DATUM: 11.5.2016				H	-
Kontroloval:		NÁZEV ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ MOMENTU A VÝKONU		G	-
DATUM:				F	-
VELIKOST A3		CISLO VYKRESU BP - 01/01		E	-
MÉRITKO 1:1	HMOTNOST (kg) 5,79			D	-
		LIST 1/1		C	-
				B	-
				A	-