



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

TURBÍNOVÁ SKŘÍŇ TURBODMYCHADLA VNT S ODDĚLENÝMI PULSY VE VÝFUKOVÉM POTRUBÍ

TURBINE HOUSING OF TURBOCHARGER VNT WITH SEPARATED PULSES IN EXHAUST MANIFOLD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Polášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Jan Polášek
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Turbínová skříň turbodmychadla VNT s oddělenými pulsy ve výfukovém potrubí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá návrhem turbínové skříně turbodmychadla s oddělenými pulsy výfukových plynů před turbínou. Hlavní díly projdou pevnostní kontrolou. Součástí práce je vytvoření 3D modelů skříně a 2D výkresové dokumentace konstrukčního návrhu.

Cíle diplomové práce:

Rešerše dané problematiky

Rešerše vhodných výpočtových a experimentálních metod pro ověření konstrukčního návrhu

Konstrukční návrh skříně

Pevnostní kontrola skříně

Zpracování 2D a 3D technické dokumentace

Seznam literatury:

HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. ISBN 156091-734-2.

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3. vyd. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. ISBN 0768004950.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne 1. 2. 2018

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem turbínové skříně turbodmyhadla VNT pro přívod oddělených tlakových pulzů od výfukového potrubí. Následně práce obsahuje pevnostní kontrolu navržené turbínové skříně. Cílem práce je vytvoření komponentů pro přívod oddělených tlakových pulzů co nejbližší k turbíně. Dále také úprava stávající turbínové skříně a posouzení funkčnosti VNT mechanismu po této úpravě a pevnostní kontrole. Poslední z cílů této práce je vytvoření 2D a 3D technické dokumentace nově navržených a upravovaných dílů.

KLÍČOVÁ SLOVA

VNT, lopatka, turbínová skříň, tlakové pulzace, teplotní roztažnost

ABSTRACT

This master thesis deals with the design of the turbine housing of turbocharger VNT for supplying separated pressure pulses from the exhaust manifold. Subsequently, the work includes strength analysis of the designed turbine housing. The aim of the thesis is to create components for the supply of separate pressure pulses as close as possible to the turbine. Furthermore, the modification of the existing turbine housing and the assessment of the functionality of the VNT mechanism after this modification and strength analysis. The final aim of this thesis is the creation of 2D and 3D technical documentation of newly designed and modified parts.

KEYWORDS

VNT, vane, housing of turbocharger, pressure pulses, thermal expansion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLÁŠEK, J. *Turbinová skříň turbodmyhadla VNT s oddělenými pulzy ve výfukovém potrubí*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 77 s. Vedoucí diplomové práce Pavel Novotný.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Pavla Novotného a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 22. května 2018

.....

Jan Polášek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji doc. Ing. Pavlu Novotnému, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracovávání diplomové práce. Dále děkuji Ing. Petru Škarovi a Ing. Janu Kohoutkovi společnosti Honeywell, s.r.o. za odbornou pomoc a poskytnutí podkladů, které mi pomohly při tvorbě této práce. Poděkování patří také mým rodičům a přátelům za morální podporu.

OBSAH

Úvod	10
1 Turbodmychadlo.....	11
1.1 Způsoby regulace turbodmychadel	11
1.1.1 Regulace obtokovým ventilem	11
1.1.2 Regulace natačení rozváděcích lopatek turbíny	12
1.1.3 Regulace změnou šířky statoru turbíny	13
1.1.4 Dvoustupňové přepřňování	15
1.1.5 Regulace elektrickým pohonem	16
2 Impulsní a rovnotlaké přepřňování	17
2.1 Impulsní přepřňování	17
2.2 Rovnotlaké přepřňování	20
3 Výpočtové a experimentální metody pro ověření konstrukčního návrhu.....	21
3.1 Metoda konečných prvků.....	21
3.1.1 Pojem konečného prvku	22
3.1.2 Interpolační funkce	24
3.2 Teplotní snímače.....	25
3.2.1 Kontaktní snímače	25
3.2.2 Bezkontaktní snímače.....	28
3.3 Tlakové snímače	32
3.3.1 Snímače s elektrických výstupem	32
3.4 Snímače otáček	37
3.4.1 Kapacitní snímače otáček	38
3.4.2 Indukční snímače.....	39
3.4.3 Magnetoelektrické snímače	40
4 Konstrukční návrh skříně	41
4.1 Konstrukční návrh verze 1	41
4.2 Konstrukční návrh verze 2	44
4.3 Konstrukční návrh verze 3	47
5 Pevnostní kontrola turbínové skříně.....	50
5.1 Volba materiálu.....	50
5.2 MKP síť testovaných součástí	51
5.2.1 MKP síť vymežovače vůle	51
5.2.2 MKP síť podložky vymežovače	52
5.2.3 MKP síť dělicího disku.....	52
5.2.4 MKP síť rozváděcí lopatky.....	53

5.3	Teplotní analýza.....	54
5.3.1	Okrajové podmínky	55
5.3.2	Počáteční podmínky	56
5.4	Deformační analýza	57
5.4.1	Okrajové podmínky	58
5.4.2	Deformace Vymezovače vůle.....	59
5.4.3	Deformace podložky vymezovače.....	60
5.4.4	Deformace rozváděcí lopatky	61
5.4.5	Deformace dělicího disku	62
5.4.6	Posouzení funkčnosti VNT lopatek.....	63
5.5	Napěťová analýza	63
5.5.1	Napětí v dělicím disku.....	64
5.5.2	Výpočet bezpečnosti	65
5.6	Optimalizace napěťové analýzy.....	66
5.6.1	Aplikace vhodnějšího materiálu	66
5.6.2	Optimalizované napětí v dělicím disku	66
5.6.3	Výpočet bezpečnosti po optimalizaci	67
	Závěr.....	69
	Seznam příloh.....	74
	Seznam obrázků.....	75
	Seznam tabulek.....	77

ÚVOD

Již od počátku mechanizace se člověk snažil u svých strojů zlepšovat jejich výkon, životnost, efektivnost, využití a jiné parametry. Pro tyto účely vymýšlel různá pomocná zařízení, kterými by dané stroje více zdokonaloval.

S rostoucími požadavky na účinnější spalování v pístových motorech bylo do současné doby navrženo a používáno velké množství rozdílných typů turbodmychadel. Jejich rozdíly jsou definované především použitím v různých motorech. Turbodmychadla se v současnosti vyrábějí v různých velikostních variacích podle typu aplikace na daný motor. Mohou být použity pro lodní, stacionární, železniční nebo automobilové motory. Jejich variabilita je také v použitém regulačním mechanismu, díky kterému lze turbodmychadlo ovládat a tím i řídit výkon motoru a jeho jiné parametry. Jedním z nich je technologie použití tzv. VNT mechanismu (Variable Nozzle Turbine) firmy Honeywell Garrett. Její velký pokrok nastal v roce 1990. Díky této technologii bylo možné přesně nastavovat plnicí tlak podle požadavků motoru. Tato technologie využívá natáčení rozváděcích lopatek v turbínové části turbodmychadla. Její velká přednost je v tom, že se nejedná o ztrátovou regulaci, což znamená, že nedochází k přepouštění výfukových plynů před turbínou.

Při konstrukci dnešních automobilů a jejich různých komponentů se stále více používají různé simulační programy. Využitím těchto programů dochází ke zrychlení vývoje a šetření finančních prostředků. Tyto programy dnes dokážou provádět různé druhy analýz. Jedna z těchto analýz byla využita i v této diplomové práci. Jedná se o strukturální simulaci (Static Structure), kde je mimo jiné možné pozorovat deformace různých komponentů v závislosti na jejich materiálu, zatížení a vzájemného uložení.

V úvodní části této diplomové práce jsou uvedeny obecné poznatky ohledně funkce turbodmychadel a hlavně jednotlivé způsoby regulace. Dále jsou zde zmíněny druhy přeplňování a jejich vzájemné porovnání. V další kapitole jsou popsány experimentální a výpočtové metody, které nastiňují např. jak se u namáhaných komponentů dají reálně měřit jejich deformace. V hlavní části této práce je ukázán průběžný postup návrhu turbínové skříně turbodmychadla VNT s oddělenými pulzy ve výfukovém potrubí. Na závěr je uvedena deformační analýza zmíněné turbínové skříně, v závislosti na teplotním a tlakovém namáhání. Zde jsou popsány deformace upravených a nově navrhnutých součástí s ohledem na zvolené tolerance vzájemného uložení a v neposlední řadě posouzení jejich funkčnosti.

1 TURBODMYCHADLO

Jedná se v podstatě o plynový, turbínový motor skládající se z odstředivého kompresoru, zvaném dmychadlo a dostředivé turbíny. Společně jsou pevně spojeny hřídelí. Dmychadlo je roztáčeno přes hřídel do turbíny, čímž saje vzduch a tlačí jej dále po směru proudění do spirální skříně, která slouží jako tzv. bezlopatkový difuzor. Stlačený vzduch je poté nasáván s palivem do spalovacího prostoru motoru, kde se vše spálí. Po vykonání pracovního cyklu motoru se přes výfukový ventil proud spalín dostává na turbínu turbodmychadla, kterou začne pohánět a poté do výfukového potrubí.

1.1 ZPŮSOBY REGULACE TURBODMYCHADEL

Aby byla umožněna správná funkce turbodmychadla a vůbec celé spalovací jednotky vozidla je nezbytné řízení otáček turbíny dmychadla. V současné době je možné se setkat s různými druhy regulací. Každá z nich disponuje svými výhodami i nevýhodami. Některé jsou konstrukčně složité, ale jsou naopak tzv. bezztrátové. Jiné jsou zase ztrátové, ale jednoduché a spolehlivé.

Potřeba regulace turbodmychadla je z důvodu zvyšujícího se množství vzduchu proudícího společně s palivem do spalovacího prostoru. Tím roste plnicí tlak, a tedy i spalovací tlak. Dochází k většímu a nežádoucímu namáhání ostatních komponentů motoru jako je např. píst a kliková hřídel. Dalším omezujícím faktorem je detonační hoření u zážehových motorů. Vyšší otáčky a teploty také moc neprospívají samotné turbíně turbodmychadla. Se zvyšující se teplotou nad přípustnou mez by turbína ztratila svou pevnost a poškodit nejen sebe, ale i jiné komponenty. Nemluvě o vyšších otáčkách, při kterých vzrůstají odstředivé síly rotujících součástí. Proto je žádoucí funkci turbodmychadla regulovat, a to jak z důvodu samotné životnosti pohonné jednotky ale i k docílení vyšší otáčkové i momentové charakteristiky pístových motorů. [1]

1.1.1 REGULACE OBTOKOVÝM VENTILEM

Jednou z velice využívaných metod regulace je právě použití obtokového ventilu. Jedná se velice jednoduchý princip odpouštění plynů, které do spalovacího motoru vstupují nebo vystupují.

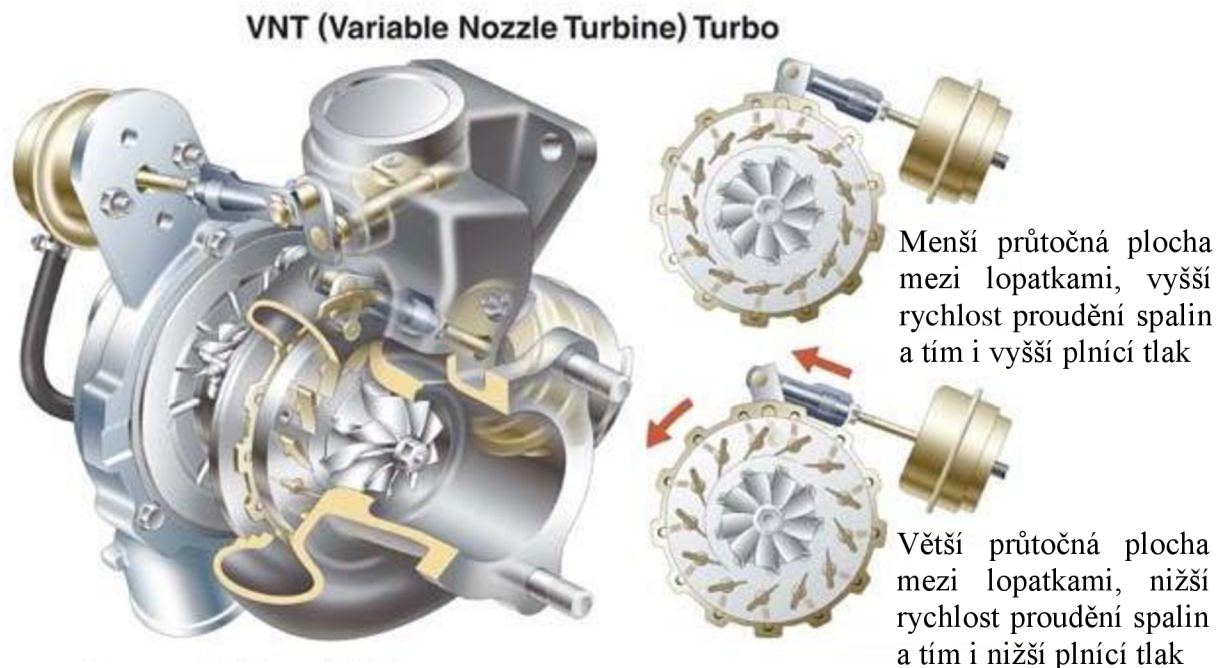
Existují dva základní typy této regulace [1]:

- 1) Odpouštění přebytku stlačeného vzduchu v kompresoru
- 2) Odpouštění výfukových plynů před turbínou [1]

Odpouštění přebytku vzduchu v kompresorové části turbodmychadla je zajištěno tzv. Blow-off ventilem (BOV). [2] Ten má za následek rychlejší regulaci turbodmychadla než odpouštění výfukových plynů před turbínou. Je to způsobeno tím, že množství vzduchu v sání motoru je řízeno okamžitě. Jinými slovy, motor po spálení směsi dodá turbíně turbodmychadla takové množství energie, aby nedocházelo k jejímu přetáčení nebo přehřívání. [1] Tento odfukový ventil je spojen podtlakovou hadicí za škrťací klapkou. V případě, že je škrťací klapka uzavřená tak relativní tlak v sání klesne pod úroveň atmosférického tlaku. Na obou stranách pístku ventilu je rozdílný tlak, ventil se otevře a vypustí přebytečný vzduch do atmosféry. V opačném případě při otevřené škrťací klapce je tlak na obou stranách pístu odfukového ventilu stejný a ventil se uzavře. [2] Primárním důvodem aplikace blow-off ventilu např. u tuningových automobilů je zvukový efekt. [3] Nicméně se jedná o ztrátovou regulaci turbodmychadla. Část

Přestože tento způsob regulace je bezztrátový může se tento mechanismus potýkat s jítými problémy. Nejčastější z nich je obecně zaseknutí rozváděcích lopatek. Tento problém je způsoben usazováním karbonu na rozváděcím mechanismu. Pokud toto množství karbonu přesáhne určité množství, dojde k neschopnosti lopatek se pootáčet a regulovat proud spalin. Obzvláště to nastane, pokud je vozidlo používáno na krátké vzdálenosti, kde není možné, aby motor dosáhl své provozní teploty. Příčina tohoto problému může být také způsobena použitím nekvalitního paliva. [5]

Jako způsob pro samotné natáčení lopatek je v dnešní době zajištěno např. krokovým nebo lineárním elektromotorem. Použití VNT mechanismu lze najít převážně u vznětových motorů, ale už v současné době se jejich pole působnosti dostalo i do zážehových motorů. [4]

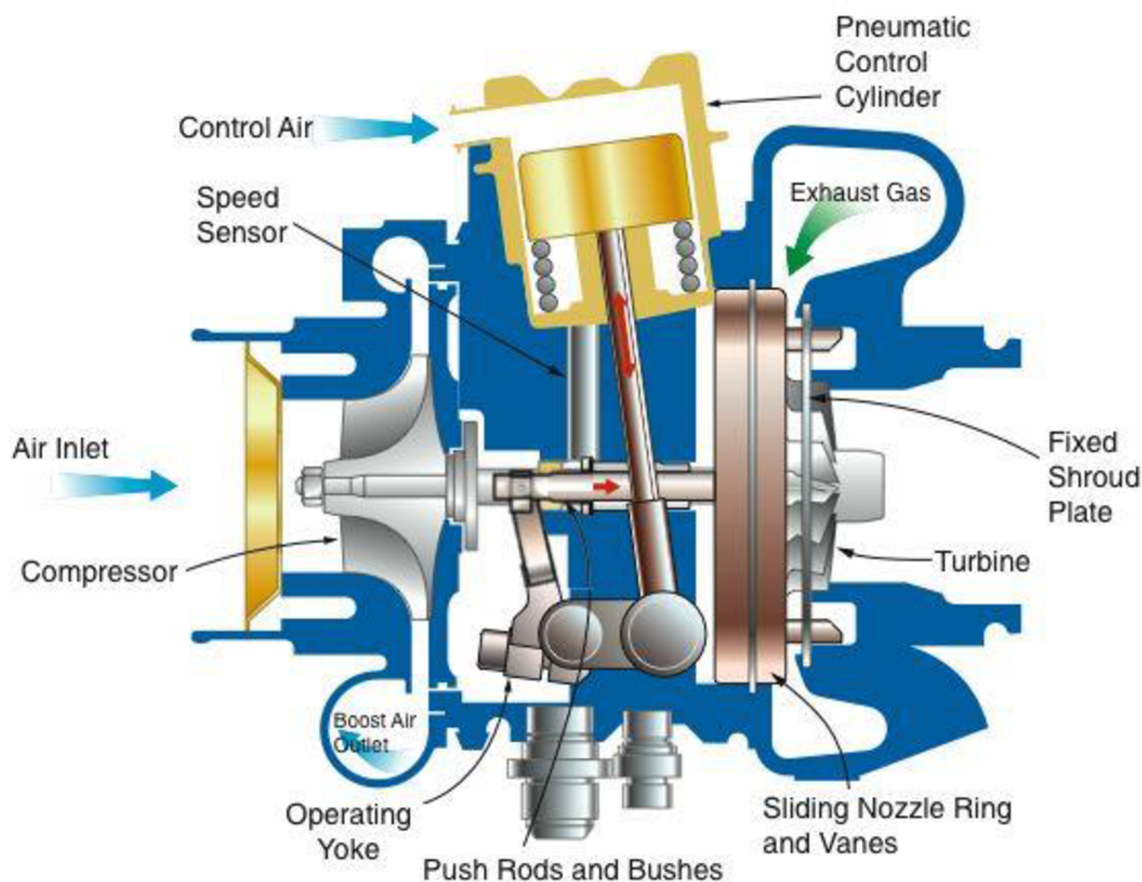


Obr. 2 Turbodmychadlo s rozváděcími lopatkami [4]

1.1.3 REGULACE ZMĚNOU ŠÍŘKY STATORU TURBÍNY

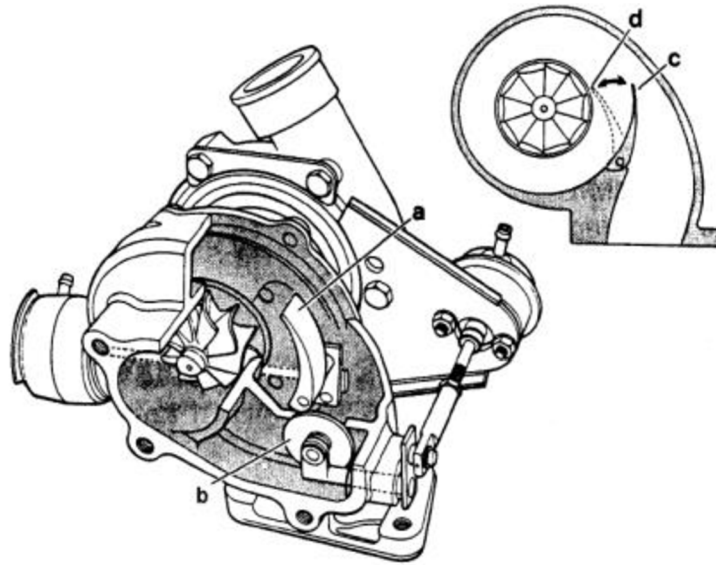
Jedná se o podobný způsob regulace turbodmychadla jako v případě použití VNT mechanismu. Rozdíl spočívá v rozváděcím kole s lopatkami, které je jako celek axiálně posouváno v turbínové skříni. [6] Rozváděcí lopatky jsou v tomto případě pevně spojeny s výsuvným rozváděcím kolem, a tudíž v této konstrukční koncepci není umožněno jejich pootáčení. Díky axiálnímu pohybu rozváděcího kola se lopatky zasouvají do protilehlého prstence, který disponuje otvory stejného profilu jako lopatky. [7] Zasunutím zmíněného rozváděcího kola do protilehlého prstence, a tím zmenšení průtočné plochy mezi lopatkami, se zvýší rychlost proudících plynu na turbínu. Tím je dosaženo vyššího kroutícího momentu a rychlejší odezvy při nízkých otáčkách motoru. [8]

Ovládání axiálního posuvu je zajištěno pomocí pohybu malého pístu řízeného tlakem z brzdového systému vozidla. Tento konstrukční prvek zaručuje vyšší ovládací síly, kterých by nebylo docíleno při použití membránové jednotky využívající tlak z výstupu kompresoru. Zvětšené mechanické ztráty jsou však způsobeny pouze nárůstem třecích ploch mezi statorem a rotorem turbíny při náhlém rozšíření průtočného kanálu. Tento způsob regulace byl poprvé použit pro větší turbodmychadla užitkových vozů Iveco Cursor. V současnosti je již zakomponovaný i v zážehových motorech osobních automobilů. [6]



Obr. 3 Turbodmychadlo se změnou šířky satoru turbíny VGT [9]

Jak už název napovídá, jedná se o kombinaci několika konstrukčních prvků umožňující regulaci otáček turbodmychadla. V této koncepci je k regulaci použita směrová klapka **a** s obtokovým ventilem **b**. [7] Směrová klapka má stejnou funkci jako rozváděcí lopatky VNT mechanismu, jedná se však pouze o levnější variantu nasměrování výfukových plynů k turbíně. [11] Obtokový ventil naopak přispívá k regulaci tím, že odpouští přebytečné spaliny před turbínou a tím snižuje jejich tlak a teplotu. Turbínové kolo je navíc zkonstruováno tak, aby mělo pokud možno minimální obvod a tím i hmotnost. Díky této úpravě bylo docíleno slabšího turboefektu a tím zvýšení akceleraschopnosti vozidla. Zmíněný způsob regulace byl poprvé použit ve vozu Peugeot 405 T16 pomocí turbodmychadla Garrett VAT 25. [7]



Obr. 4 Turbodmychadlo Garrett VAT 25 [6]

1.1.4 DVOUSTUPŇOVÉ PŘEPLŇOVÁNÍ

Dvoustupňovým přeplňováním se rozumí aplikace dvou turbodmychadel pro daný motor. Důvod použití této koncepce je dosažení vyšších tlakových poměrů. V současnosti jsou kompresorová kola převážně vyráběna ze slitin hliníku a jsou schopny docílit tlakových poměrů přibližně 4,5. Nicméně jejich použití je limitováno hranicí obvodové rychlosti 520 m/s. Po překročení této mezní hodnoty obvodové rychlosti by došlo k jejich poškození. K dosažení vyšších tlakových poměrů (5 a více) se používají kompresorová kola zhotovená ze slitin titanu, které odolávají i vyšším obvodovým rychlostem. Proto pro motory se středním efektivním tlakem 3 MPa a více byla nutná aplikace právě dvoustupňového přeplňování. [12]

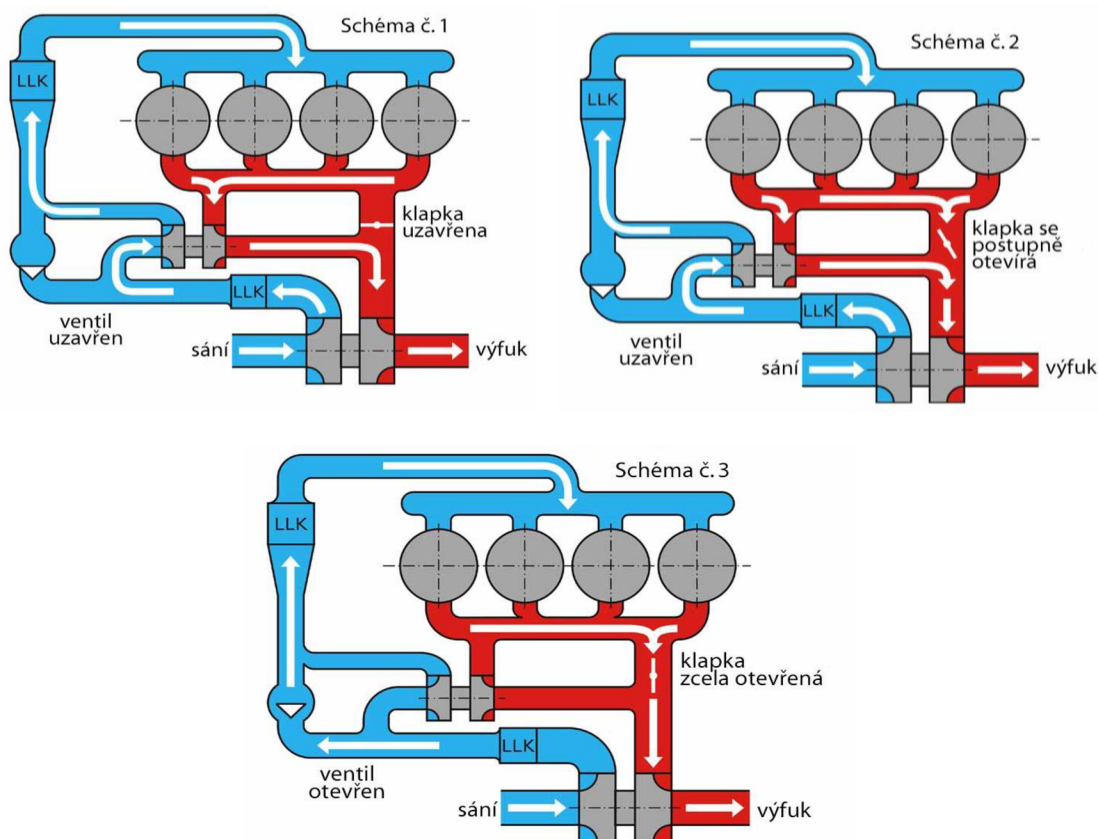
DVOUSTUPŇOVÉ PŘEPLŇOVÁNÍ NEREGULOVATELNÉ

Neregulovatelné dvoustupňové přeplňování je používáno převážně u nízkootáčkových dvoudobých motorů a motorů s požadavkem na nižší spotřebu paliva. Aplikací dvou sériově řazených turbodmychadel je dosaženo vyššího plnicího tlaku a tedy i středního efektivního tlaku. Tím je docíleno i rozšíření kompresorových a turbínových map. Plnicí účinnost motoru sice s rostoucím tlakovým poměrem klesá, ale v tomto případě je tlakový poměr rozdělen mezi dvě turbodmychadla. Výraznou nevýhodou zmíněné konstrukční koncepce je delší odezva na plynový pedál. Proud výfukových plynů pohání dvě turbíny, proto je zde nárůst turboefektu. Dalšími nevýhodami jsou vyšší pořizovací cena, větší hmotnost a rozměry. [12]

DVOUSTUPŇOVÉ PŘEPLŇOVÁNÍ REGULOVATELNÉ

System dvoustupňového přeplňování je složen z malého vysokotlakého a velkého nízkotlakého turbodmychadla. Na rozdíl od koncepce neregulovatelného dvoustupňového přeplňování je zde přítomen elektronicky řízený regulační ventil, který přepouští výfukové plyny do nízkotlakého turbodmychadla. Za nízkých provozních otáček motoru proudí všechny výfukové plyny do vysokotlaké turbíny, která se díky své velikosti rychle roztočí a generuje požadovaný plnicí tlak. V této chvíli neproudí žádné výfukové plyny na nízkotlakou turbínu. Při zvýšení otáček motoru se následně otevírá regulační ventil a do činnosti se zapojuje i nízkotlaké turbodmychadlo a obě pracují zároveň. Díky tomuto uspořádání a použití dvou

různých turbodmychadel s regulačním ventilem mají motory daleko rychlejší odezvu na plynový pedál. Schéma zmíněného způsobu přeplňování lze vidět na obr. 5 [12]



Obr. 5 Regulační režimy ve voze Opel Vectra OPC Twin Turbo [10]

1.1.5 REGULACE ELEKTRICKÝM POHONEM

Pro zvýšení akcelerační schopnosti turbodmychadla vyvinula kalifornská firma Turbodyne ve spolupráci s firmou Garrett odstředivé dmychadlo s elektrickým pohonem přednostně pro vznětové a zážehové motory osobních vozidel [7]. Elektrickým pohonem zajišťuje asynchronní motor, který odebírá energii z alternátoru nebo přídavného akumulátoru. Elektromotor pracuje pouze při nutnosti rychlé akcelerace po dobu několika sekund a může odebrat z elektrické sítě automobilu až 2 kW [4]. Ten by se při ustálené jízdě po dálnici mohl dobíjet i tím, že by elektromotor pracoval jako generátor a při brzdění rotoru turbodmychadla přepřesňoval regulaci plynového tlaku [7].

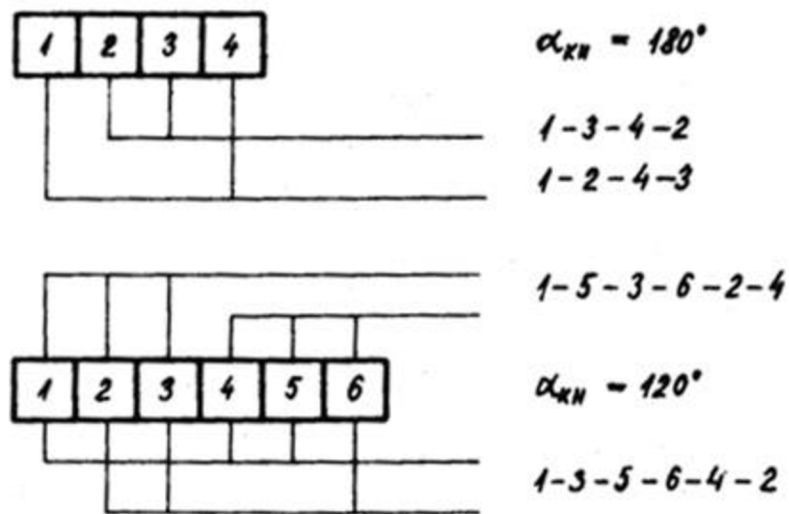
2 IMPULSNÍ A ROVNOTLAKÉ PŘEPLŇOVÁNÍ

Přeplňování můžeme rozdělit na impulsní a rovnotlaké podle toho, jestli přivádíme výfukové plyny k turbíně ve formě tlakových a teplotních impulsů nebo s konstantním či ustáleným tlakem a teplotou.

2.1 IMPULSNÍ PŘEPLŇOVÁNÍ

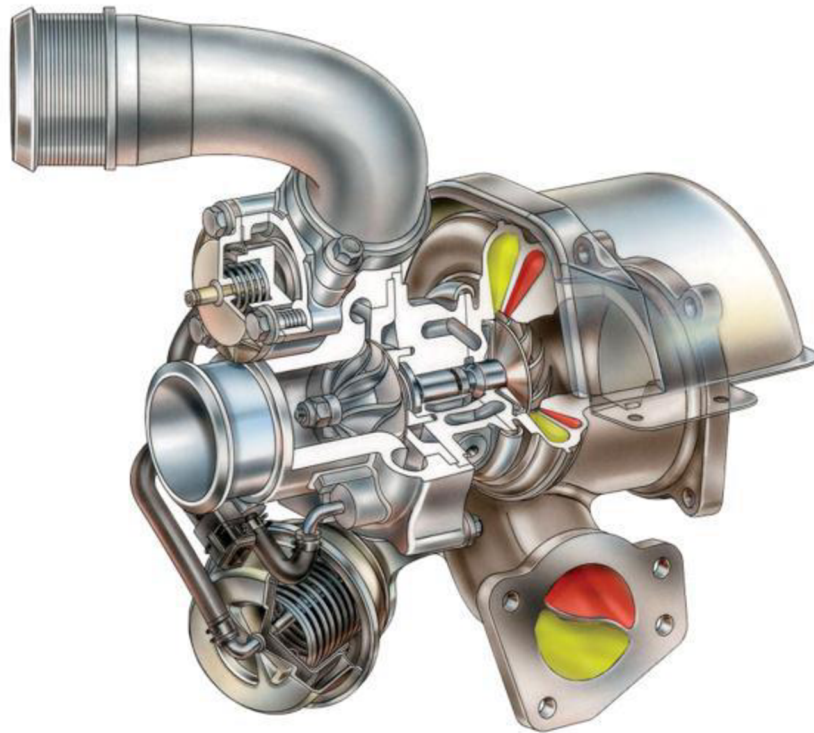
Cílem zmíněného typu přeplňování je použití tlakových a teplotních pulsů přiváděných na turbínu turbodmychadla. Aplikace tohoto řešení vyžaduje různé konstrukční úpravy a požadavky na výfukové potrubí mezi motorem a turbínou a současně turbínovou skříní. [7] Patří mezi ně:

- Malý objem výfukového potrubí, což zahrnuje jak jeho průměr, tak i délku. [13]
- Oddělené přívody od skupin válců a jejich následné spojení do určitých sekcí, přičemž nesmí docházet v jedné sekci k interferenci tlakových pulsů. To je docíleno spojením jednotlivých válců s rozestupem 240° otočení klikové hřídele u čtyřdobého motoru a 180° u dvoudobého motoru. Avšak do jedné sekce je možné připojit výfukové svody maximálně ze 3 válců. Při jejich vyšším počtu by už docházelo k jejich rušení tlakových vln. [13] Pokud by motor byl osmiválcový a více, je nutné použít větší počet takových turbodmychadel. [4] Schéma zapojení válců a do sekcí a návaznost tlakových pulsů lze vidět na obr. 6 a obr. 10.



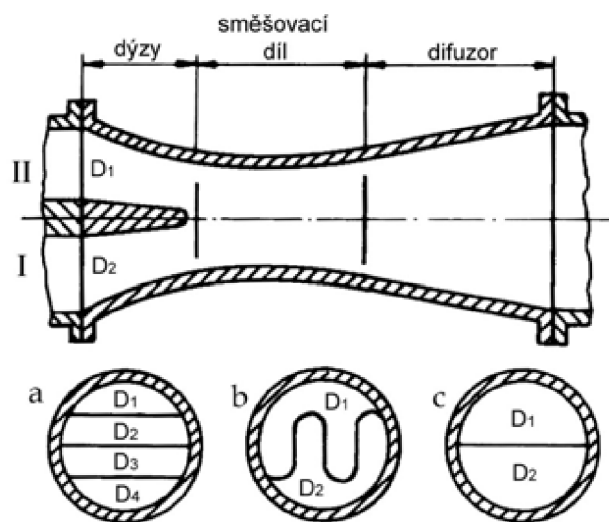
Obr. 6 Schéma zapojení válců do sekcí [7]

- Turbínová skříň je takovému druhu přeplňování přizpůsobena tak, že i přívod výfukových plynů je zde rozdělen do dvou sekcí, a nikoliv do jedné. Turbodmychadlo s takto dělenou turbínovou skříní se nazývá tzv. Twin-scroll, které zle viděl na obr. 7 [14]



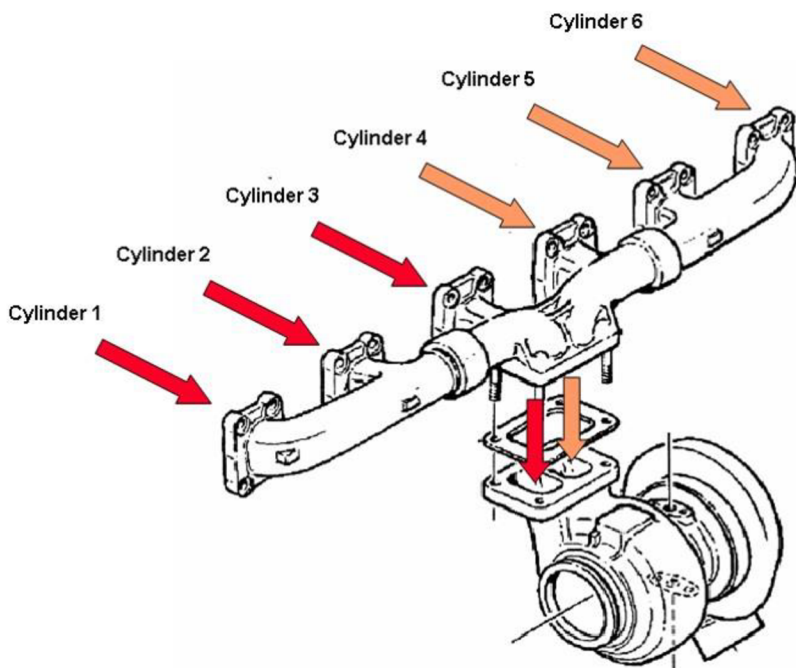
Obr. 7 Turbodmychadlo s dělenou turbinovou skříní Twin-scroll [14]

Aby se zabránilo vzájemné interference tlakových impulsů se před vstupem do turbíny, je použito spojení potrubní větve použitím tzv. Pulse-Convertoru na obr. 8. Tímto způsobem je možné sjednotit až tři větve na jeden vstup do turbíny. Sloučení všech větví do jedné je následně realizováno tzv. Multi-Pulse-Convertorem. [13]

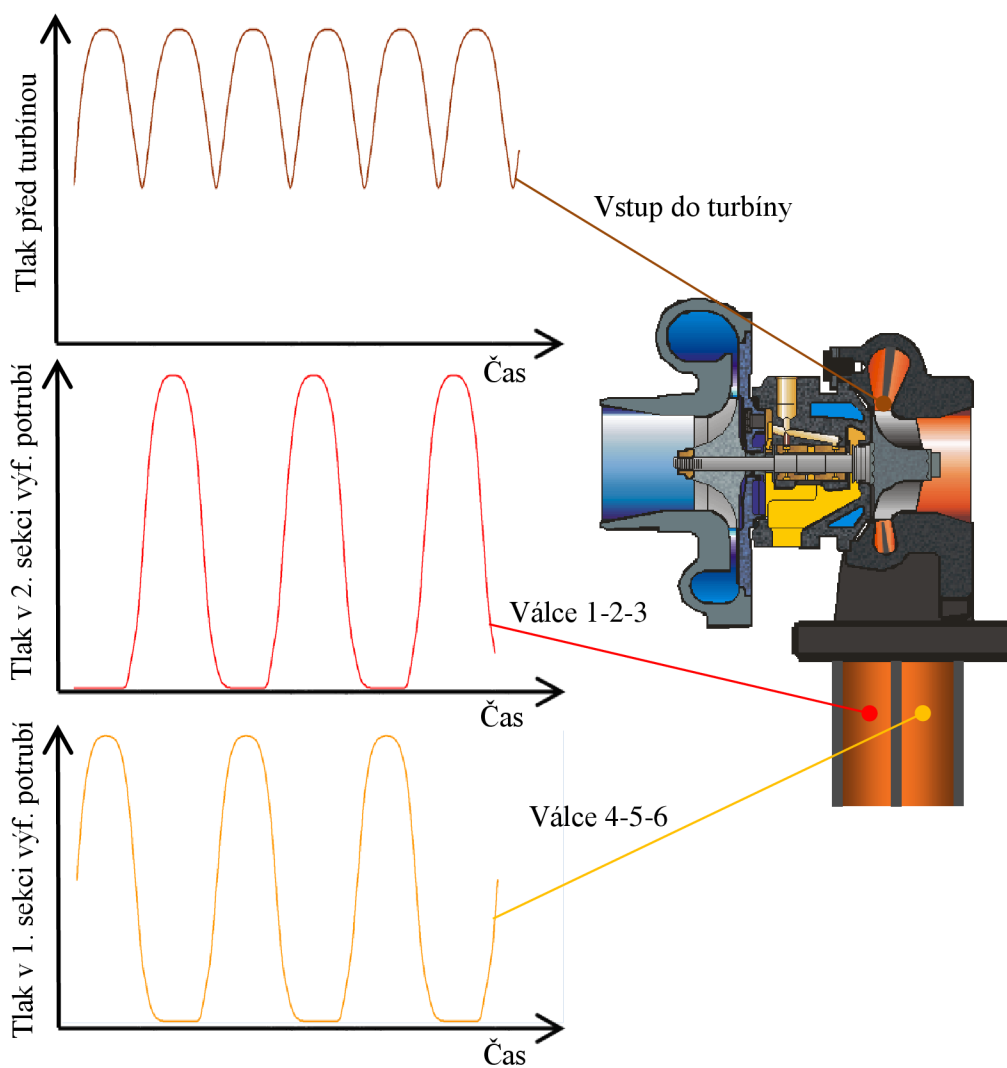


Obr. 8 Schéma řešení Pulse-Convertoru [13]

Impulsního přeplňování se hojně používá v motorech s nízkými plnicími tlaky. Dále také u vysokotlacených přeplňovaných motorů při částečných nebo malých zatíženích, kde jsou kladeny nároky na rychlou reakci turbíny při změně zatížení, tzn. především vozidlové a železniční motory. [4]



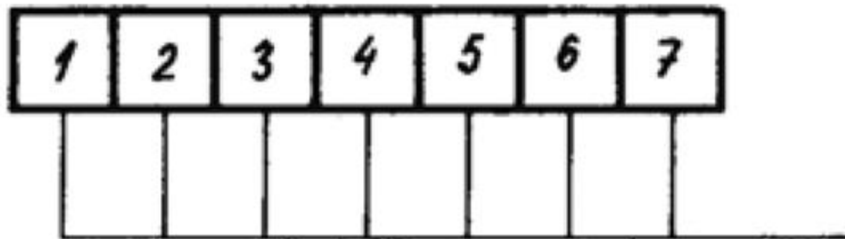
Obr. 9 Přívod tlakových pulzů od motoru do turbodmychadla [15]



Obr. 10 Interference tlakových pulzů před turbínou [15]

2.2 ROVNOTLAKÉ PŘEPLŇOVÁNÍ

Při rovnotlakém přeplňování se využívá především potenciální a tepelné energie výfukových plynů [13]. Turbína tedy pracuje s neměnným nebo ustáleným tlakem. Výfukové svody všech válců motoru jsou spojeny do jednoho potrubí, které je konstruováno, aby disponovalo velkým průřezem a objemem. Tím je docíleno potlačení kmitů v potrubí a výfukové plyny zde mají nižší průtokové rychlosti, a tedy i menší průtokové ztráty. Při výtoku plynů z válce takto vznikají pouze nepatrné tlakové vlny a díky interferenci pulzů z ostatních válců se vyruší [4]. Turbína má v tomto případě jen jeden vstup, takže dochází k rovnoměrnému přívodu výfukových plynů po celém obvodu rozváděcího ústrojí, a tedy k plnému ostříku oběžného kola turbíny [7]. Při rovnotlakém přeplňování se mění podstatná část energie neúplné expanze motoru na kinetickou energii a ta se vlivem víření mění na tepelnou. Rovnotlaké přeplňování je určeno zejména pro stacionární a lodní motory. Tyto motory pracují při konstantních nebo málo se měnících otáčkách a zatížení [13].



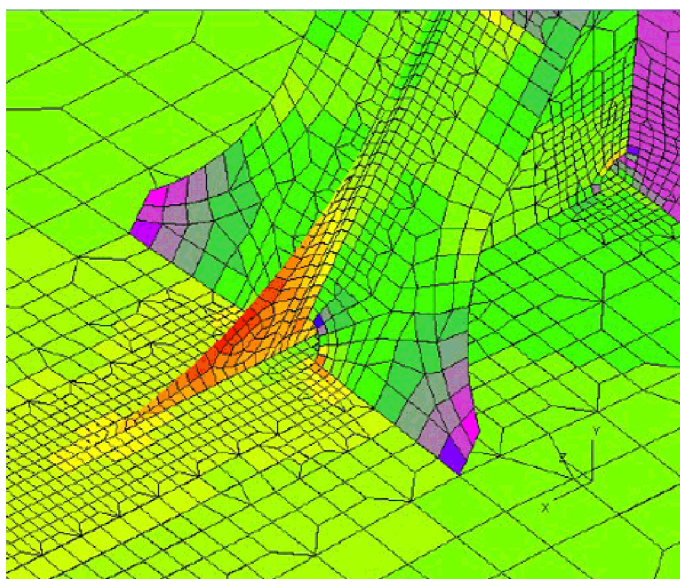
Obr. 11 Spojení válců při rovnotlakém přeplňování [7]

3 VÝPOČTOVÉ A EXPERIMENTÁLNÍ METODY PRO OVĚŘENÍ KONSTRUKČNÍHO NÁVRHU

V dnešním světě navrhování a konstruování různých výrobků je v drtivé většině doprovázeno i jejich testováním. Než je daný výrobek uveden na trh prochází několika simulacemi, které zajistí jeho bezpečnost, kvalitu, spolehlivost a trvanlivost. Konstrukční návrhy výrobků se nejprve ověřují pomocí různých výpočtových metod. Díky nim lze snadněji předpovědět jejich chování za daných provozních podmínek, a tedy i předpovědět možné poruchy jednotlivých součástí výrobku a jejich následky. V současnosti existují ve výpočetní technice různé programy jako ANSYS Workbench, Siemens NX, SOLIDWORKS Premium, Autodesk Inventor Professional, Pro/Engineer a další, které dokážou analyzovat chování produktu při definovaných testovacích podmínkách a umožní se tak přiblížit výsledkům jako v reálných situacích. Tyto programy dokážou simulovat velkou spoustu odlišných fyzikálních jevů. Jedná se například o různé pevnostní výpočty, modální analýzy, dynamické a kinematické simulace, proudění kapalin nebo třeba i vstup tepla.

3.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin atd. na vytvořeném fyzikálním modelu. Tato výpočtová metoda je užívána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického místa konstrukce. Ačkoliv jsou principy této metody známy již delší dobu, k jejímu masovému využití došlo teprve s nástupem moderní výpočetní techniky [16]. Základní myšlenkou MKP je rozdělení skutečné konstrukce na konečné prvky, které zcela vyplňují délku, plochu nebo objem. Tyto prvky se stýkají v bodech, v čarách a plochách. Styčné body, průsečíky dvou čar a společné body tří ploch se nazývají uzly. Charakteristickými veličinami prvku jsou uzlové parametry známé jako stupně volnosti. Mezi ně mohou patřit například posuvy těchto uzlů. Výhodou MKP je, že mřížka testovaného modelu nebo sestavy může být pro jednotlivé komponenty nebo plochy jiná. Správná volba velikosti a tvaru prvku dané mřížky je klíčová a rozhodujícím způsobem ovlivňuje pracnost a přesnost řešení. [17].



Obr. 12 2D síť pro MKP analýzu žebra, síť je jemnější v místech u objektu zájmu [18]

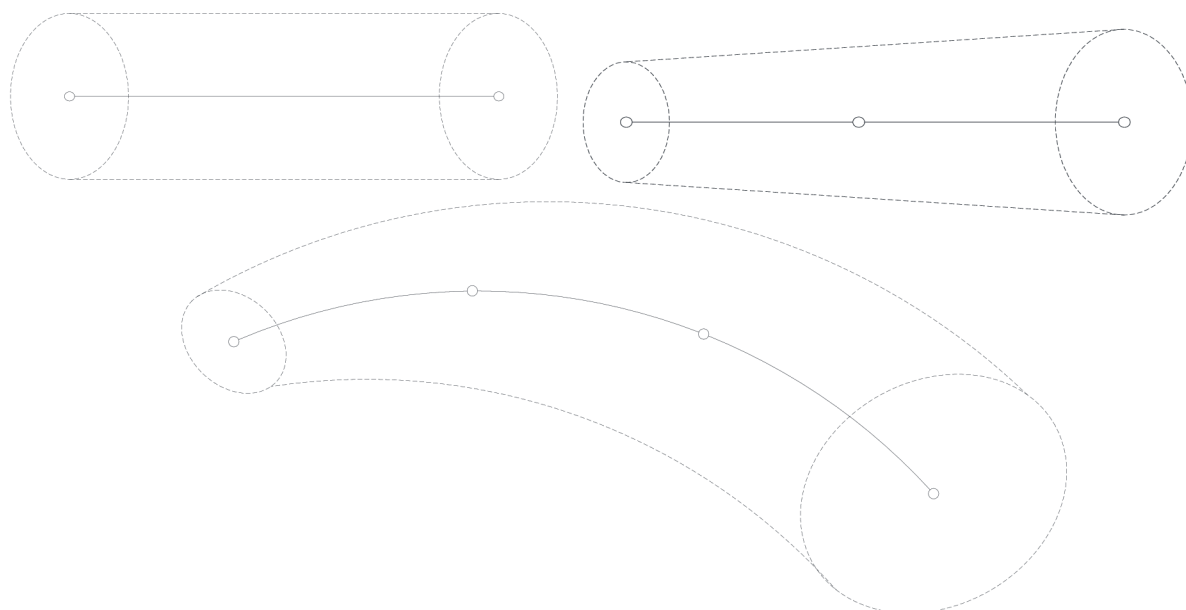
Metoda MKP má mnoho výhod oproti jiným výpočtovým metodám:

- 1) Materiálové konstanty jednotlivých prvků mohou být různé. Metoda je použitelná pro konstrukce obsahující části z různých materiálů.
- 2) Nepravidelné geometrické tvary mohou být snadno aproximovány větším počtem menších prvků a přímými (rovinnými) hranicemi nebo dokonce prvky omezenými křivkami (plochami), které přesně vystihují geometrii součásti.
- 3) Velikost prvků se může měnit podle potřeby, prvky nemusí být stejně velké.
- 4) Snadno lze respektovat nespojitosti v zatížení.
- 5) Nehomogenní okrajové podmínky lze respektovat stejně snadno jako homogenní.
- 6) Vytvoření obecných programů pro MKP je snadné.
- 7) Při dodržení jistých pravidel metoda konverguje. [17]

3.1.1 POJEM KONEČNÉHO PRVKU

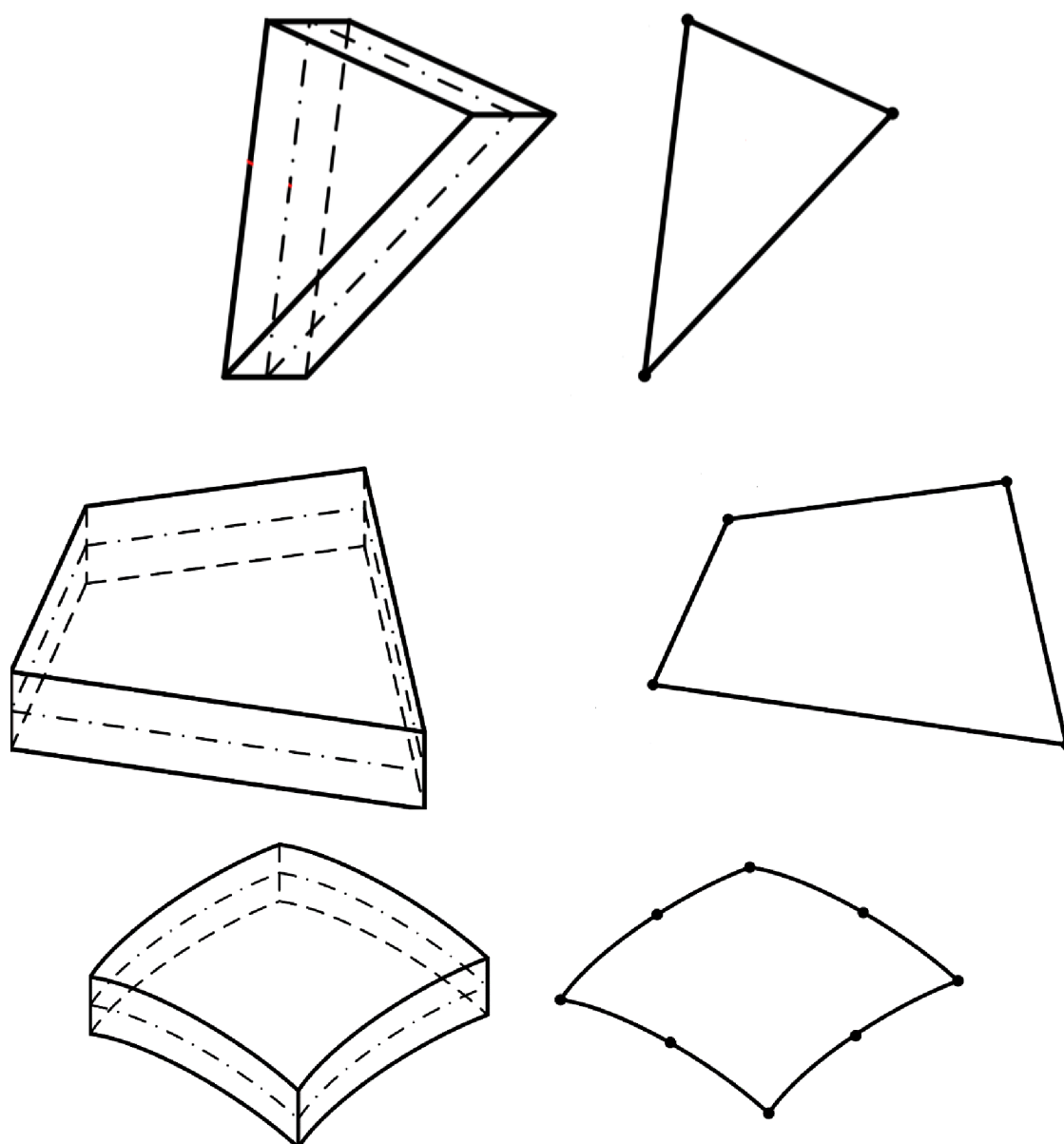
V MKP mohou být užity nejrůznější prvky. Rozdělují se především podle geometrie na jedno, dvoj nebo trojrozměrné [17].

Jednorozměrný prvek je nejjednodušší. Všechny jeho vlastnosti jsou funkcí jediné souřadnice. Může disponovat dvěma i více uzly, taktéž může reprezentovat člen, který ve skutečné konstrukci má konstantní nebo proměnný průřez, přímou nebo křivou střednici. [17] Jednorozměrné prvky se ve výpočetní technice hojně využívají jako např. pruty v rámových konstrukcích. [19]



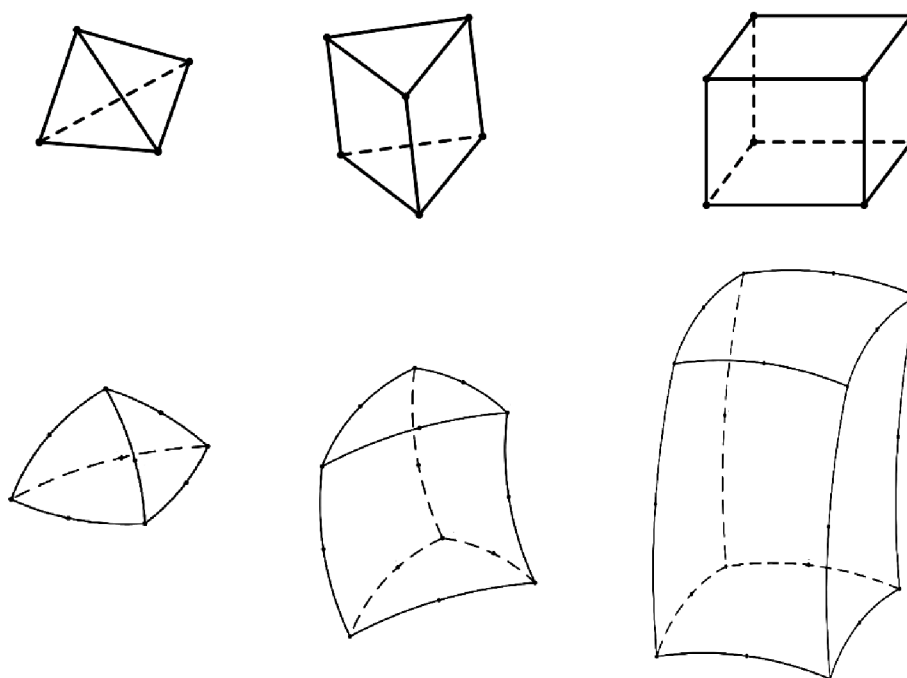
Obr. 13 Typy jednorozměrných prvků [15]

Dvourozměrný prvek je obvykle trojúhelník nebo čtyřúhelník se stranami rovnými nebo zakřivenými, s uzly ve vrcholech, uvnitř stran i uvnitř samotného prvku. [17] Pokud se 2-D prvek vyznačuje zakřivenými stranami tak se označuje jako isoparametrický. V tomto případě je rovnice hraniční křivky a aproximační funkce pro posuvy stejné povahy jako např. kvadratická parabola. [19]



Obr. 14 Typy dvourozměrných prvků [17]

Trojrozměrný prvek je například čtyřstěn, pětistěn nebo šestistěn omezený rovinami nebo plochami a obsahující počet uzlů ležících ve vrcholech, uvnitř hran i stěn. [17] I v případě 3-D prvku je možné, aby element disponoval zakřivenými hranami a stěnami, a tedy byl isoparametrický. [19]



Obr. 15 Typy trojrozměrných prvků [17]

3.1.2 INTERPOLAČNÍ FUNKCE

MKP je založena na nahrazení skutečného průběhu spojité veličiny (teplota, napětí, posuv) interpolační funkcí nazývané jako konečný prvek. Interpolační funkce je obvykle polynom, protože je to funkce, která [17] :

- umožňuje snadné provedení početních operací, zejména derivování a integrování
- umožňuje dosáhnout předem zvolené přesnosti [17]

Řada skutečných průběhů hledaných veličin (např. průhyb nosníku) je vyjádřena polynomem [15].

POŽADAVKY NA INTERPOLAČNÍ FUNKCI Z HLEDISKA KONVERGENCE

V MKP stejně jako v jiných přibližných metodách je požadováno, aby získané řešení konvergovalo ke skutečným hodnotám. Tuto vlastnost řešení nejvíce ovlivňuje použitá interpolační funkce, která musí splňovat následující požadavky [17] :

- 1) Interpolační funkce musí být spojitá uvnitř prvku a musí zaručovat slučitelnost funkčních hodnot a obecně i jejich derivací na hranicích sousedních prvků. První část požadavku je splněna tím, že jako interpolační funkci použijeme polynom. Druhá část požadavku souvisí s nutností integrace interpolační funkce při sestavování základní rovnice MKP. Aby byl integrál obsahující n -tou derivaci hledané funkce derivován, musí být tato funkce spojitá až do $(n - 1)$ - ní derivace. Bude-li to čtvrtá derivace ($n = 4$), musíme požadovat spojitost funkčních hodnot a všech derivací až do třetí včetně na hranicích prvků. [17]
- 2) Interpolační funkce musí také zahrnovat posuvy konečného prvku jako tuhého tělesa, tj. musí zajistit konstantní hodnoty posuvů všech vnitřních bodů prvku, pokud jsou

posuvy jeho uzlů stejné. Tímto požadavkem je zaručeno, že přibližné řešení nebude odporovat základní vlastnosti přesného řešení. [17]

- 3) V úlohách z elastomechaniky se doplňuje předchozí požadavek nutností vyjádřit stav konstantního přetvoření prvku. [17]

Při použití polynomů jako interpolačních funkcí pro splnění posledních dvou požadavků stačí, aby obsahovaly konstantní a lineární členy. [17]

Kromě požadavků konvergence by interpolační funkce neměla záviset na volbě lokálního souřadnicového systému, tak např. při záměně os x , y by se funkce neměla kvantitativně měnit. Pro rovinný model se lze při volbě polynomu řídit následující obdobou Pascalova trojúhelníka (obr. 16). [17]

			1	konstantní polynom
	x		y	lineární polynom
	x ²	xy	y ²	kvadratický polynom
x ³	x ² y	xy ²	y ³	kubický polynom

Obr. 16 Pascalův trojúhelník [17]

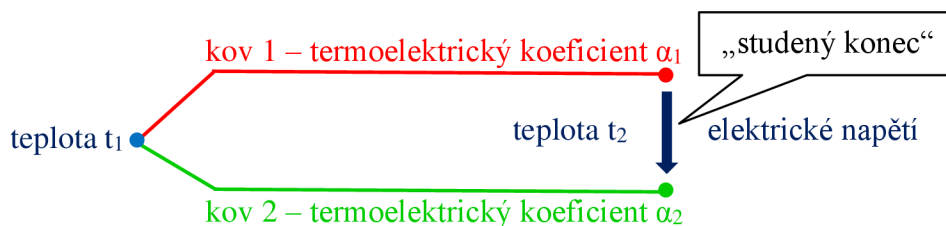
3.2 TEPLOTNÍ SNÍMAČE

K experimentálnímu ověřování konstrukčních koncepcí výrobků jsou dnes využívány různé metody, testovací standy, přípravky a zkušebny. Díky nim lze zjistit praktické informace o chování zhotovených produktů. V případě testování turbodmychadel se používají specializované zkušebny, ve kterých je možné najít mnoho odlišných snímačů na získávání dat za zkušebního provozu turbodmychadla. Jednou skupinou používaných snímačů jsou teplotní.

Měření samotné teploty může být uskutečněno mnoha způsoby. Měřicí přístroje lze primárně rozdělit na kontaktní a bezkontaktní. Mezi kontaktní metody měření patří například použití různých termočlánků, termistorů, odporových a polovodičových snímačů. Naopak bezkontaktní metody využívají k měření teploty infračervené záření produkované sledovaným objektem. Mezi ně lze zařadit různé bodové a plošné snímače tzv. termokamery. [20]

3.2.1 KONTAKTNÍ SNÍMAČE

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, patří do této skupiny mnoho druhů snímačů. Každý disponuje jistými výhodami, cenou ale i limity svého použití. Ve zkušebnách turbodmychadel je možné se setkat převážně s termočlánky. Vyrábějí se v mnoha provedení – od „holých drátů“ až po zapouzdržené sondy [20]. Termočlánek pracuje na principu termoelektrického neboli Seebeckova jevu. Jedná se v podstatě o přeměnu teplotního rozdílu mezi dvěma různými kovy na elektrické napětí [21], kde jednotky napětí se pohybují v řádu μV na $^{\circ}\text{C}$. Princip funkce zmíněného termočlánků je vidět na obr. 17. [20]



Obr. 17 Princip funkce termočlánku

Termočlánky se mezi sebou liší nejen na první pohled svým vzhledem, respektive svou velikostí, kdy jejich velikost může sahát do velmi miniaturních rozměrů [20] (až o $\varnothing 25 \mu\text{m}$ měřicího hrotu [22]), ale hlavně kombinací dvojice kovů. Volba obou kovů je prováděna tak, aby byla zajištěna dostatečná nelineární závislost termoelektrického napětí na teplotě, odolnost vůči chemickým vlivům a korozi. [23] V široké praxi se lze setkat již s osvědčenými kombinacemi kovů. Tyto kombinace jsou označeny písmeny a každý typ je vhodný pro určité aplikace, ale přednostně pro daný rozsah měřitelných teplot viz. tabulka 1. [20]

Mezi obecné specifikace termočlánků je na místě zmínit i jejich nevýhody. Vyplývají z převodu a zpracování měřeného signálu, protože primárně měřenou veličinou je napětí a nikoli teplota. Chyba měření poté nastává vlivem algoritmu zpětného převodu elektrického napětí na teplotu. Dalším kritickým místem vzniku nepřesností je samotný referenční spoj. Korektnost naměřené teploty je zde významně ovlivněna již z důvodu přesnosti a stálosti teploty v tomto spoji. Navíc, jelikož se jedná o kovové materiály, může docházet v některých prostředích ke vzniku koroze, a tedy nepříznivého ovlivnění naměřených hodnot. [24]

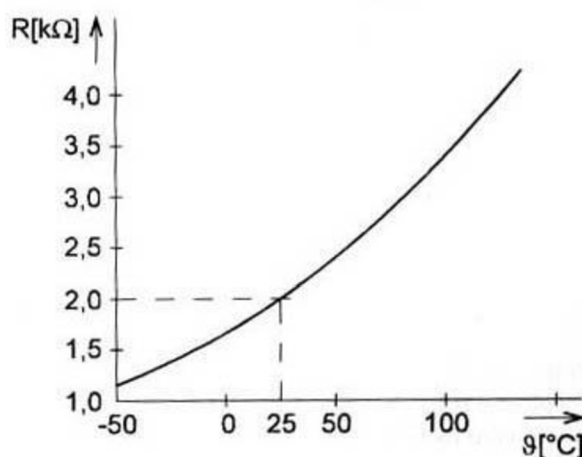
Tab. 1 Označení a kombinace kovů v termočláncích [20]

označení	+ přívod	- přívod	teplotní rozsah v (°C)	rozsah v (mV)
J	Fe	Cu – Ni	-210 °C - 1200 °C	-8,1 – 69,5
K	Ni - Cr	Ni - Al	-270 °C – 1372 °C	-6,4 – 54,9
T	Cu	Cu – Ni	-270 °C – 400 °C	-6,2 – 20,8
R	Pt (13%) – Rh (13%)	Pt	-210 °C - 1200 °C	-0,2 – 21
G	W	W (26%) – Re (26%)	-50 °C – 1768 °C	0 – 38,5
D	W (3%) – Re (3%)	W (25%) – Re (25%)	0 °C - 2320 °C	0 – 39,5
E	Ni – Cr	Cu - Ni	0 °C - 2320 °C	-9,8 – 76,4

Mezi další typ kontaktních snímačů patří termistory, které patří do skupiny polykrystalických polovodičových senzorů s nelineární závislostí teploty na elektrickém odporu. [25] Rozlišují se dva druhy termistorů, a to PTC a NTC. PTC je termistor s pozitivním teplotním koeficientem. Znamená to, že se zahřátím této součástky jeho odpor narůstá. Díky této vlastnosti je často označován jako pozistor. U NTC termistoru se lze však setkat s opačnými

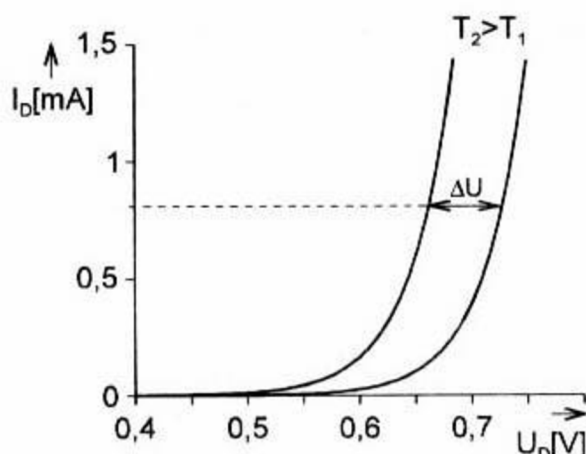
vlastnostmi. Jedná se tedy elektrotechnickou součástku s negativním teplotním koeficientem, kdy se zvyšující teplotou jeho elektrický odpor klesá. [26] Vlastnosti těchto druhů termistorů jsou způsobeny změnou hustoty volných elektronů v polovodiči při změně teploty. [21] Termistory jsou vyráběny práškovou metalurgií ze směsi dvou oxidů. [20] NTC termistor se používá jako teplotní čidlo, je ale nutné znát jeho voltampérovou charakteristiku. Měření teploty touto elektrotechnickou součástkou se provádí tzv. můstkovou výchylkovou metodou. [26] Čidla pro tyto termistory jakožto teplotní snímače jsou invazivní jehly, kdy samotný termistor je na špičce této jehly. [21]

Do další kategorie patří polovodičové senzory monokrystalické. Rozdělují se na snímače využívající voltampérové charakteristiky P-N přechodu a bez P-N přechodu. [20] Pro realizaci měření teploty využívají snímače bez P-N přechodu materiály jako germanium, křemík nebo galium-arzenid. Snímače s kombinací materiálů galium-arzenit se používají v teplotním rozsahu od 3 až 300 K. Disponují slabší citlivostí na magnetické pole než germaniove senzory, avšak závislost elektrického odporu na teplotě mají velmi podobnou. Průběh závislosti elektrického odporu na teplotě lze vidět na obr. 18, kde se konkrétně jedná o charakteristiku křemíkového snímače. [25]



Obr. 18 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě [27]

K podskupině snímačů s P-N přechodem patří diody vyráběné taktéž z křemíku, germania a galium-arzenidu, které pracují v teplotním rozsahu 1 až 400 K. Velmi přínosnou vlastností polovodičových diod je lineární závislost konečné termometrické veličiny na teplotě, kterou je možné vidět na obr. 19. [25]

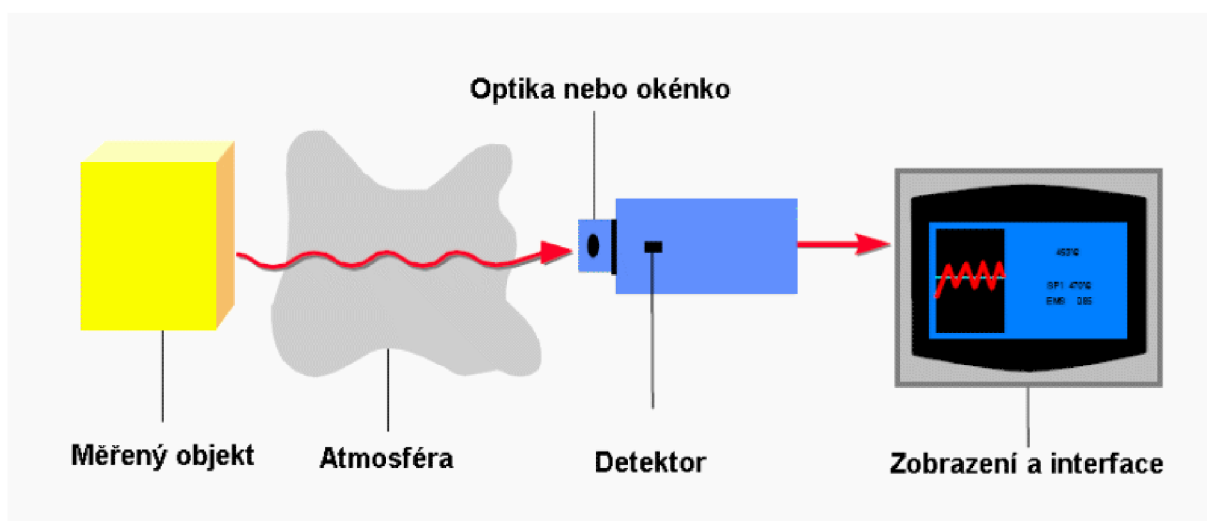


Obr. 19 Graf lineární závislosti konečné termometrické veličiny na teplotě [27]

3.2.2 BEZKONTAKTNÍ SNÍMAČE

Měření teploty různých těles může být uskutečněno i bezdotykovým způsobem. K tomuto účelu slouží různé infrateploměry, mezi které patří termokamery a pyrometry. Jejich funkce je založena na snímání emisivity, neboli infračerveného záření vydávané pozorovaným objektem. Pojem emisivita se udává jako poměr vyzářené energie konkrétního povrchu při dané teplotě k energii vyzářené absolutně černým tělesem, které se pokládá jako ideální zářič při shodné teplotě. V případě reálných těles je nutné vzít zřetel i k jejich průhlednosti a odrazivosti. [21] Snímané infračervené záření senzorem bezdotykového snímače je následně převedeno na elektricky měřitelnou veličinu, která poté zpracována na obdobně jako u dotykových snímačů. Tento princip zmíněného měření umožňuje měřit jen povrchovou teplotu objektu a pouze v dané části objektu, ve které je snímač nasměrován. [28] Bezdotykové měření teploty podléhá několika kritériím, díky kterým by nebylo možné přesně zjistit radiaci daného objektu a patří mezi ně [20]:

- Zorný pozorovací úhel (velikost dané součásti a její vzdálenost od snímače)
- Emisivita povrchu objektu
- Vliv okolního prostředí (odrážené záření jiných zdrojů, pohltivost atmosféry) [20]



Obr. 20 Schéma principu měření teploty bezkontaktními snímači [28]

Nutné je i zmínit výhody a nevýhody bezdotykového měření teploty:

Výhody:

- Je velmi rychlé (v milisekundovém rozsahu).
- Umožňuje měření teploty pohybujících se objektů (rotujících součástí, výrobků na dopravnících atd.)
- Bezpečné měření na nebezpečných nebo těžce dostupných objektech (součásti pod elektrickým napětím, pohyblivé součásti, vzdálené objekty).
- Lze bez problémů měřit i velmi vysoké teploty (nad 1300 °C).
- Není zde žádné ovlivnění měřeného objektu (není z něho při měření odebírána žádná tepelná energie zapříčiňující jeho ochlazení)
- Není zde riziko kontaminace a nejsou zde žádné mechanické účinky na povrch měřeného objektu. Nedochází např. k poškrábání lakovaných povrchů a je možné měřit i plastické povrchy součástí. [29]

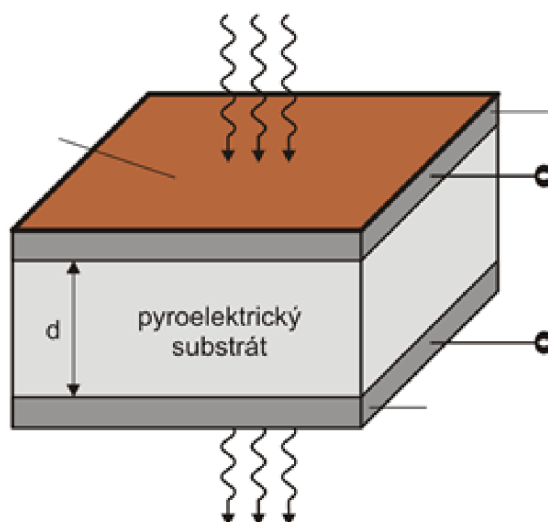
Nevýhody:

- Měřený objekt musí být pro infračervený teploměr opticky (infračerveně) viditelný. (vysoké úrovně kouře nebo prachu snižují přesnost měření)
- Pevné překážky, jako jsou uzavřené kovové reakční nádoby, dovolují pouze povrchová měření (vnitřní teplota v nádobě nemůže být takto měřena)
- Optika čidla musí být chráněna před prachem a kondenzujícími kapalinami.
- Je možné měřit pouze povrchovou teplotu, přičemž je nutno brát v úvahu různou emisivitu jednotlivých materiálů. [29]

K samotnému měření povrchové teploty se dnes používají mnohé snímače založené na odlišných principech jejich funkce. Některé z nich jsou konstruované na to, aby snímali teplotu pouze v malém plošném rozsahu tzv. bodové snímače a někdy je zapotřebí plošných snímačů teploty k detekci např. tepelného ovlivnění součástí v komplexních sestavách, které jsou na toto namáhání choulostivé např. z důvodu použití jiných materiálů.

PYROELEKTRICKÉ SNÍMAČE

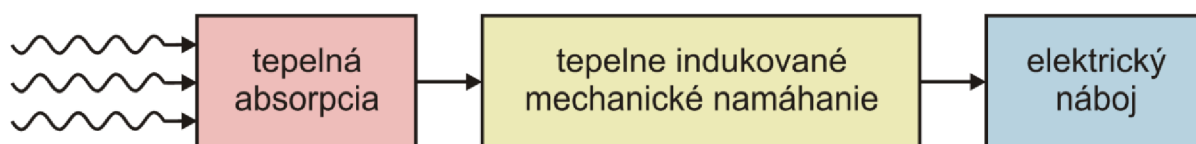
Tyto snímače patří do skupiny bodových snímačů teploty. Jejich princip je založen, jak už název napovídá na pyroelektrickém jevu. V tomto případě je tepelné záření zachyceno pyroelektrickým materiálem, který následně generuje elektrický náboj a následně je měřen. Popsaný jev vykazují pouze pyroelektrika s trvalou polarizací a některé feroelektrika. [28] Změny teploty vyvolávají změnu polarizačního vektoru daného materiálu. Toto je doprovázené posuvnými proudy a změnami napětí. Pyroelektrický je velmi úzce spjatý s piezoelektrickým jevem. Podobně jako piezoelektrický senzor je taktéž i pyroelektrický senzor vyráběn jako tenká destička s elektrodami na detekování tepelně indukovaného náboje viz. Obr. 21. [30]



Obr. 21 Tenká destička pyroelektrického senzoru [30]

Tento typ senzoru je ve své podstatě podobný jako kondenzátor. Ke své činnosti nepotřebuje žádné vnější napájení. Pyroelektrický materiál vytváří elektrický náboj v důsledku změny teploty, tj. když je teplota konstantní není schopen vykonávat svou funkci. Když na pyroelektrický materiál působí tepelný tok, pak se na jeho elektrodách začne generovat elektrický náboj. [30]

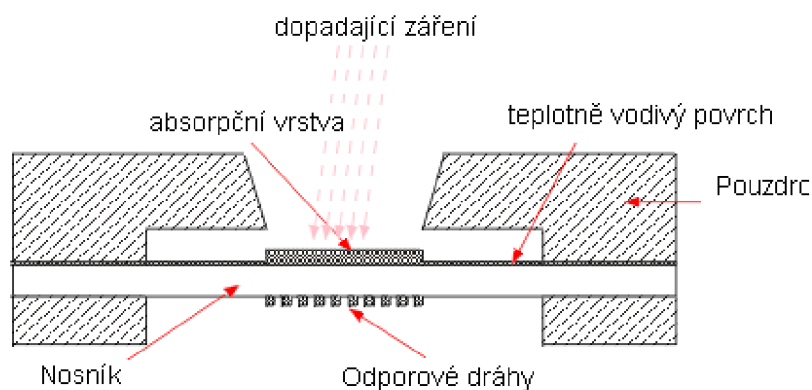
Pyroelektrický materiál si lze představit jako materiál s velkým množstvím částic reprezentujících náhodně orientované elektrické dipóly. V případě, že na tento materiál působí teplota, která je vyšší než tzv. Curieova teplota, tak zmíněné dipóly následně ztrácejí svou elektrickou orientaci (dipólový moment). Schéma principu funkce pyroelektrického snímače je možné vidět na obr. 22. [30]



Obr. 22 Schéma principu funkce pyroelektrického snímače [30]

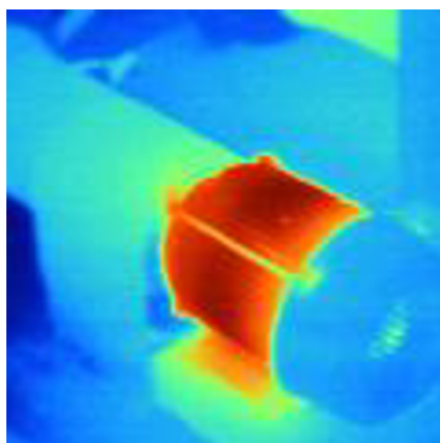
BOLOMETRICKÝ SNÍMAČ

Tento druh snímače funguje taktéž na principu pyrometrie, tj. měření tepelného toku prostřednictvím infračerveného záření. [31] Důležitou součástí bolometrického snímače je citlivá snímací plocha, která je načerněná. Při průniku tepelného záření dochází k ohřevu dané plochy, která je poté měřena změnou vodivosti odporových drátů viz. obr. 23 (termokonduktivní jev). [28]



Obr. 23 Konstrukce snímací plochy bolometrického snímače [28]

Bolometry se hojně používají pro náročné bezkontaktní měření teploty v případech, kde nelze aplikovat pyroelektrické detektory nebo infratermočlánky. Nejčastěji se bolometry vyskytují jako integrované obvody s desítkami, stovkami nebo i tisíci bolometrů uspořádaných do matice a označované jako mikrobolometry. Díky tomuto zapojení jsou mikrobolometry schopné měřit infračervené snímání obrazu celého předmětů, tj. plošně, a nikoliv čistě bodově viz. obr. 24. [31]



Obr. 24 Snímání tepelného záření pomocí mikrobolometrů [28]

Bolometrické snímače disponují několika základními vlastnostmi, díky kterým si našli nezpochybnitelné místo na trhu:

- Jsou rychlé - krátká časová konstanta (až 1 ms)
- Velká citlivost
- Spektrální citlivost 1.6 až 5000 μm
- Velký pracovní teplotní rozsah senzorů (-40°C až 100°C)
- Lze bez problémů měřit vysoký rozsah teplot měřeného objektu (i nad 1500°C).
- Malé rozměry (u mikrobolometrů jen desítky μm)
- Není zde žádné ovlivnění měřeného objektu
- U mikrobolometrů velký počet snímačů (i přes 80 tisíc) na malé ploše => infračervené snímání obrazu s rozlišením až 320x240 pixelů
- Vysoká cena
- U některých typů je nutné chlazení [28]

3.3 TLAKOVÉ SNÍMAČE

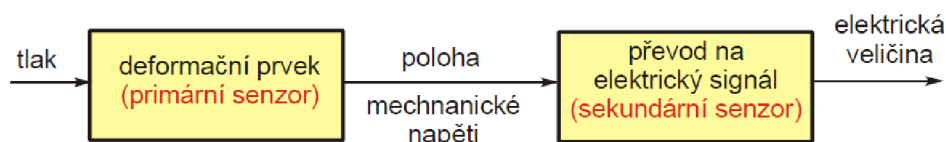
Tlakové snímače jsou jednou z velmi různorodých skupin měřicích zařízení. Aplikace jejich použití lze nalézt v široké škále v automobilovém, leteckém, výrobním a komerčním odvětví, ale také v zdravotnictví. [32] Obecně v technické praxi je možné se setkat s pojmy snímač tlaku a převodník tlaku. Termínem snímač tlaku se běžně označuje tlakoměr, respektive jako měřicí člen v regulačním obvodu sloužící jako automatizační prvek. Převodník tlaku má sice velmi podobný význam jako snímač tlaku, ale ve skutečnosti se jedná o elektronické zařízení, které detekovanou fyzikální veličinu, v tomto případě tlak, převede na elektrický signál a dopraví ho k dalšímu zařízení. V následujících podkapitolách je věnován prostor výhradně snímačům s elektrickým výstupem, u kterých je velkou výhodou dálkový přenos naměřených hodnot a jejich navazující zpracování ve výpočetní technice. [33]

3.3.1 SNÍMAČE S ELEKTRICKÝCH VÝSTUPEM

Konstrukce těchto snímačů spočívá v kombinaci několika senzoru (čidel), které na sebe svým principem činnosti navazují a dochází tak k získání potřebných dat. První ze senzorů těchto snímačů bývá některý z deformačních tlakoměrných elementů. Na deformační prvek (membránu, trubici) navazuje čidlo s elektrickým výstupem, tedy sekundární sensor. Ten vyhodnocuje změnu deformace primárního prvku, respektive změnu mechanického napětí, případně změnu polohy. Z toho důvodu se k převodu na elektrický signál s oblibou využívají čidla [33]:

- polohy (potenciometrické, indukčnostní, kapacitní, optické)

- mechanického napětí (tenzometrické, rezonanční, piezoelektrické) [33]

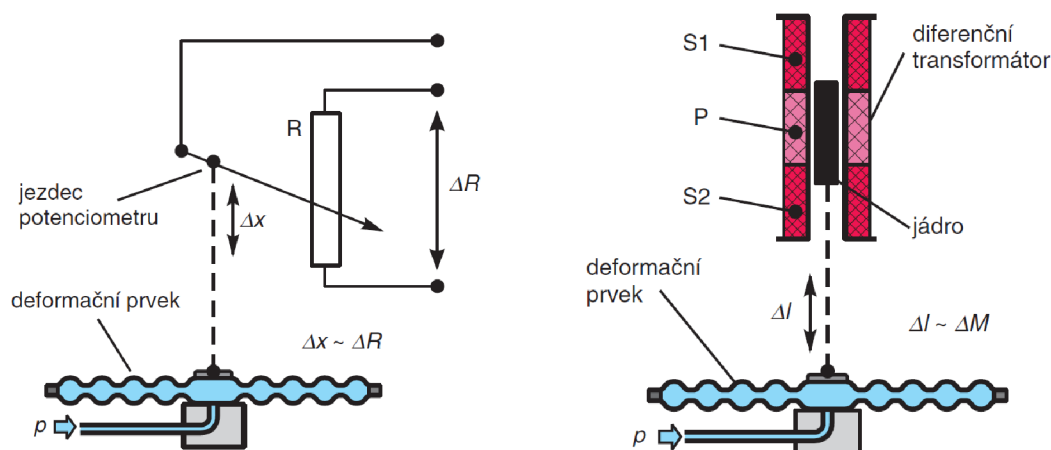


Obr. 25 Schéma snimače tlaku s elektrickým výstupem [33]

TLAKOMĚRY S POTENCIOMETRICKÝM A INDUKČNOSTNÍM SENZOREM POLOHY

Použitím potenciometrických senzorů lze velmi jednoduše získat elektrický výstup z deformačních tlakoměrných prvků. Tyto senzory pracují na principu změny polohy tzv. jezdce, který je pevně spojen s deformačním elementem. Vyvolaná deformace Δx způsobí změnu polohy jezdce, která je následně vyhodnocena jako změna elektrického odporu ΔR . Konstrukce tohoto typu snímače je velmi jednoduchá. Není zde také potřeba aplikace zesilovače elektrického signálu a v neposlední řadě i nízká pořizovací cena. Mezi nevýhody bohužel patří velká hystereze, senzitivita na vibrace a mechanické opotřebení určitých dílů, což vše přispívá k zvýšení nepřesnosti měření. Indukčnostní senzory fungují na velmi podobném principu jako potenciometrické. Využívají také principu změny polohy vyvolanou jistým pružným elementem, který je deformován přítomným měřeným tlakem. Rozdíl oproti potenciometrickým senzorům spočívá v konstrukci převodníku na elektrický signál. Zde se využívá změny pozice feromagnetického jádra v diferenčním transformátoru. Tato změna polohy způsobí změny indukčnosti mezi primárním a sekundárním vinutím. Dochází tak ke

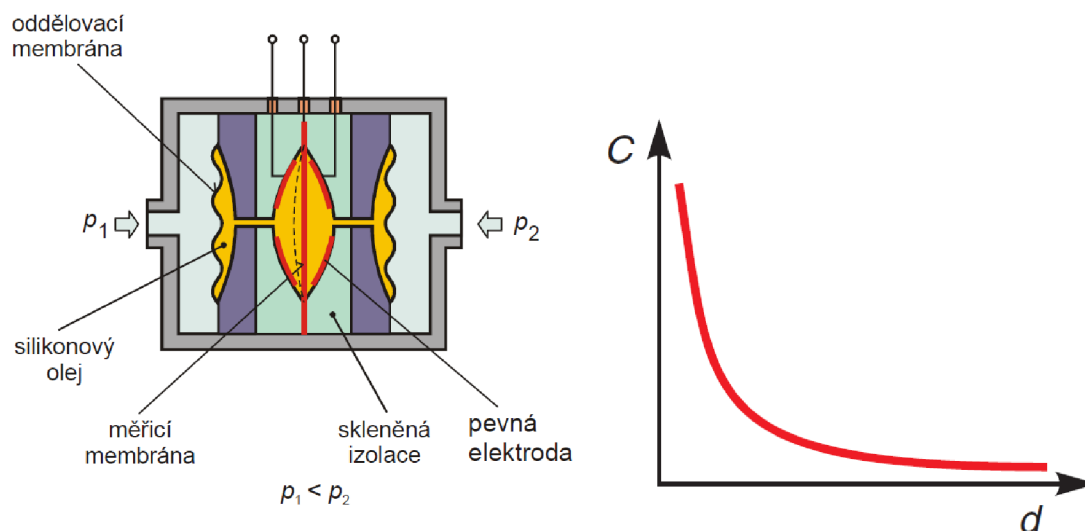
změně napětí na sekundárních vinutích, které je přímo úměrné změně polohy Δl . [33]



Obr. 26 Potenciometrické (vlevo) a indukční snímání deformace měřícího prvku [33]

KAPACITNÍ SNÍMAČE

Tyto snímače, jak už název napovídá, pracují na principu změny kapacity diferenčního kondenzátoru v závislosti na měřeném tlaku. [34] Základním konstrukčním prvkem moderních kapacitních snímačů je víceelektrový systém, kdy se jeho parametry mění v důsledku působení měřené veličiny. [33] Senzorem vyspělejších kapacitních snímačů bývá zpravidla keramická membrána, jež je zabudovaná v keramické tlakoměrné buňce. Tato buňka disponuje dvěma deskovými kondenzátory s jednou pevnou a jednou pohyblivou elektrodou. Princip činnosti a graf citlivosti kapacitního čidla lze vidět na obr. 27. [33]



Obr. 27 Princip činnosti kapacitního čidla (vlevo) a graf citlivosti kapacitního čidla (vpravo) [34]

Na zmíněném obrázku je vidět působení tlaku p_1 a p_2 přes oddělovací membránu a kapalinovou naplň na pružnou měřicí membránu. Ta se pod vlivem silového působení deformuje dle tlakového rozdílu. Dále jsou zde vidět dvě pevné elektrody situované souměrně k měřicí membráně [34], a které jsou součástí základního keramického tělesa. [33] Výhody těchto snímačů je jejich vysoká rozlišovací schopnost [32], odolnost, rychlá odezva a nízká

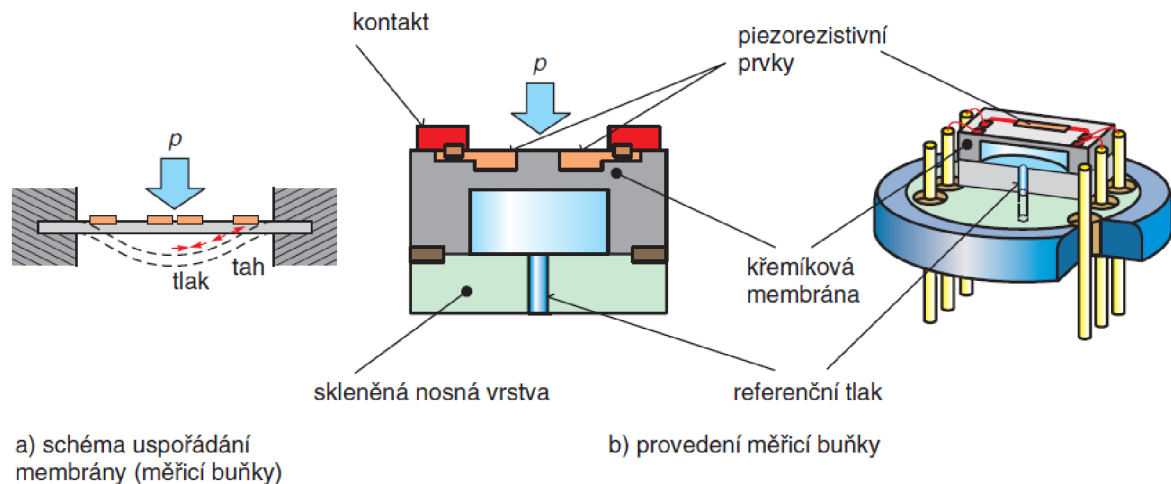
citlivost na změnu teploty. Avšak mezi jejich nevýhody patří citlivost na parazitní kapacity přívodu a nežádoucí vibrace ostatních zařízení. [33]

SNÍMAČE S ODPOROVÝMI TENZOMETRY

U kovových vodičů nebo polovodičů vznikají během mechanického namáhání v oblasti pružných deformací jisté změny jejich elektrického odporu. Tento jev se nazývá tzv. piezorezistivní, na jehož principu fungují i snímače s odporovými tenzometry. Princip zmíněného jevu je v přetvoření geometrických rozměrů, a tedy změnám krystalografické orientace ve struktuře vodičů a polovodičů při jejich deformaci. Kovové odporové tenzometry se vyrábějí z odporových drátů o průměrech 0.02 až 0.05 mm. Drátek je nalepen ve tvaru vícenásobné vlásenky na tenký podklad z papíru nebo z plastu. Obě zakončení daného drátku je následně připájeno na vývody většího průměru. Zhotoveny tenzometricky snímač se pote lepí speciálním lepidlem na testovanou součást. [35]

Naopak polovodičové snímače vyráběné převážně z křemíku se vyznačují nelineární závislostí odporu na deformaci i na teplotě, jak již bylo popsáno v podkapitole kontaktních snímačů v kapitole teplotních snímačů. V moderních snímačích lze přednostně najít právě tyto polovodičové tenzometry, u kterých dochází působením mechanického namáhání v jisté krystalografické ose monokrystalu nebo v difuzní vrstvě polovodiče ke změně elektrické vodivosti. [35]

Odporové tenzometry patří mezi senzory s velmi skvělou přesností a dynamickými vlastnostmi. Avšak získaná informace tímto druhem snímače o daném zatížení může být nepřesněná mnoha vedlejšími rušivými vlivy, mezi které patří např. teplota nebo množství procházejícího proudu. Odporové tenzometry jsou využívány v široké škále experimentálního měření velkých, ale i malých deformací, mechanických napětí a z nich vyvozených sil, momentů a jiných veličin. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, v současnosti se hojně používají tlakoměrné buňky, které pracují jako kapacitní snímače. Nicméně s tímto typem snímače se lze setkat i s aplikací polovodičového tenzometru zhotoveného difuzní technologií. Základem je opět měřicí buňka, která převádí deformaci způsobenou tlakem na signál jako změnu elektrického odporu. Významným konstrukčním prvkem této buňky je křemíková membrána na jejichž povrchu jsou umístěny polovodičové tenzometry a která současně funguje jako pružný prvek na snímání tlaku. Jedná se o kruhovou membránu průměrem okolo 6 mm, a která je po svém obvodu zafixovaná. Schéma uspořádání membrány a konstrukční provedení měřicí buňky je možné vidět na obr. 28. [33]

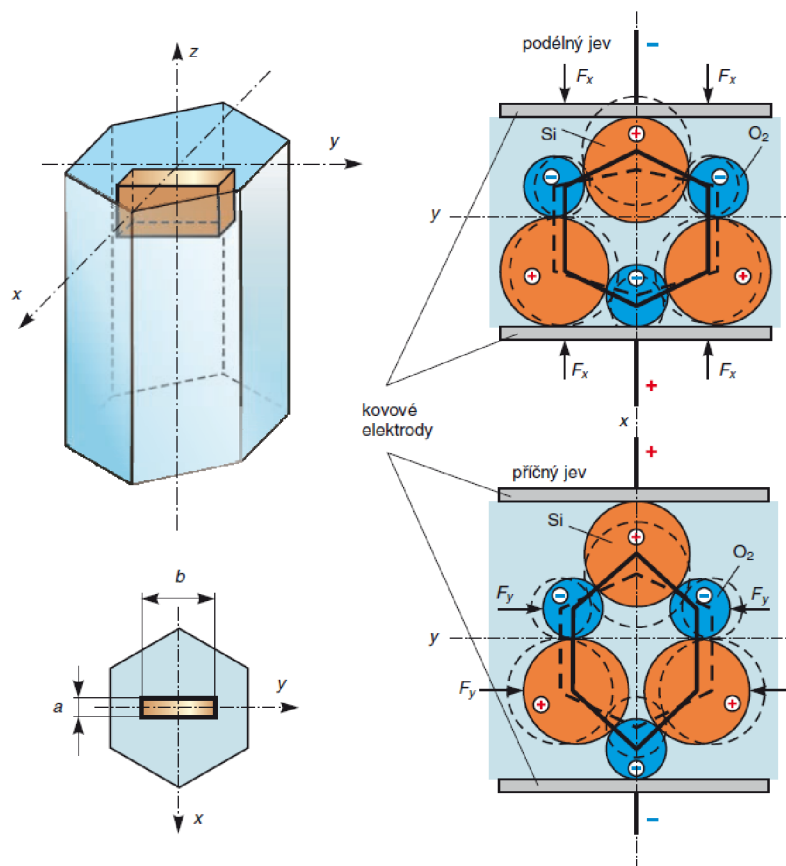


Obr. 28 Schéma uspořádání membrány (vlevo) a konstrukční provedení měřicí buňky (vpravo) [33]

Důvod použití křemíkové membrány jako deformačního elementu je platnost Hookova zákona ve velkém rozptylu deformací. Je aplikovatelná i při vysokých teplotách a má velmi dobrou chemickou odolnost. Navíc díky fyzikálním vlastnostem křemíku disponuje i zanedbatelnou hysterezi. Použití křemíku jako chemického prvku je v oblasti měřicích snímačů mechanického namáhání velmi rozšířené, a to z několika důvodů. Prvním z nich je dokonalá pružnost materiálu v dostatečném rozsahu. Ideální deformační prvek snímačů nemůže být plasticky deformován. Křemík v praxi navíc nevykazuje prokluzování ani zmíněnou hysterezi. Dalším důvodem je poměr možného zatížení k hmotnosti křemíkového měřicího prvku, který je pětkrát větší než u oceli. [33]

PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE

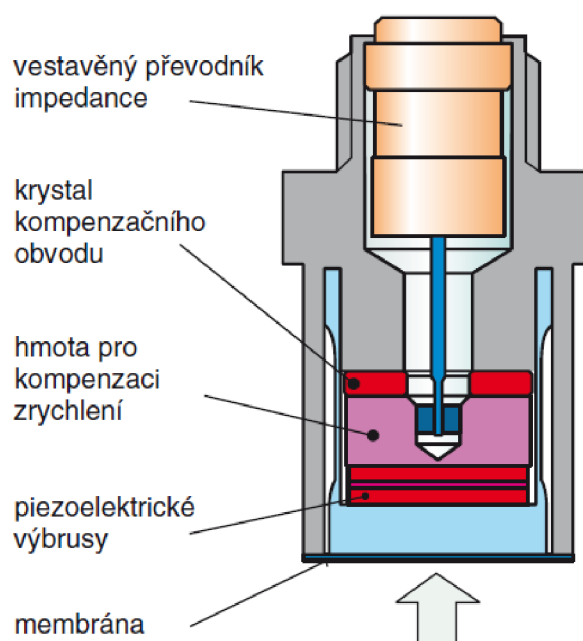
Některé materiály jako křemen, titaničitan barnatý [34], titaničitan olovnatý, Seignettova sůl atd. [33] disponují zajímavou vlastností, a tou je produkce elektrického náboje při působení vnější síly, a tedy následně deformace. Tento jev se nazývá piezoelektrický a jeho principu je také využíváno u jedné ze skupin tlakových snímačů. [34] Zmíněný jev je také reciprokový. Jinými slovy je možné ho převrátit. Za předpokladu zapojení střídavého elektrického pole např. na křemen, se daný krystal mechanicky rozkmitá. Piezoelektrický element je získán vyříznutím destičky např. z křemene, jejichž hrany jsou rovnoběžné s osami krystalu, jak lze vidět na obr. 29. [33]



Obr. 29 Krystal křemene s piezoelektrickým jevem [33]

V případě, že se křemenná destička začne deformovat v ose x , jedná se o tzv. podélný piezoelektrický jev a elektrický náboj je detekován na plochách kovových elektrod. Naopak příčný piezoelektrický jev lze pozorovat v případě, že vnější zatížení bude působit ve směru osy z . Nicméně v obou případech bude elektrický náboj detekován na plochách kolmých k rovině xy . Rozdíl bude pouze v opačné polaritě, pokud způsobená deformace na krystal bude v ose x nebo y , jak lze vidět na zmíněném obr. 29. [35]

Konstrukce piezoelektrického čidla tlaku je primárně tvořeno spojením vícero disků z piezokeramiky. Snímač jako celek se vyznačuje malými rozměry. Na obrázku 30 je možné vidět dva piezoelektrické výbrusy tvarované do disku a paralelně zapojené, aby se jimi vzniklé elektrické náboje sčítaly. Snímač je dále vybaven membránou, která slouží k přenosu tlakové síly na krystaly. Na piezoelektrické výbrusy následně navazuje obvod pro kompenzaci vlivu zrychlení, který se sestává z přidané hmoty a piezoelektrickým krystalem opačné polarizace. [33] Krytování snímače je vodivě spojeno s vnějšími elektrodami obou krystalů a vytvářelo tak účinné elektrické a magnetické stínění. [35]

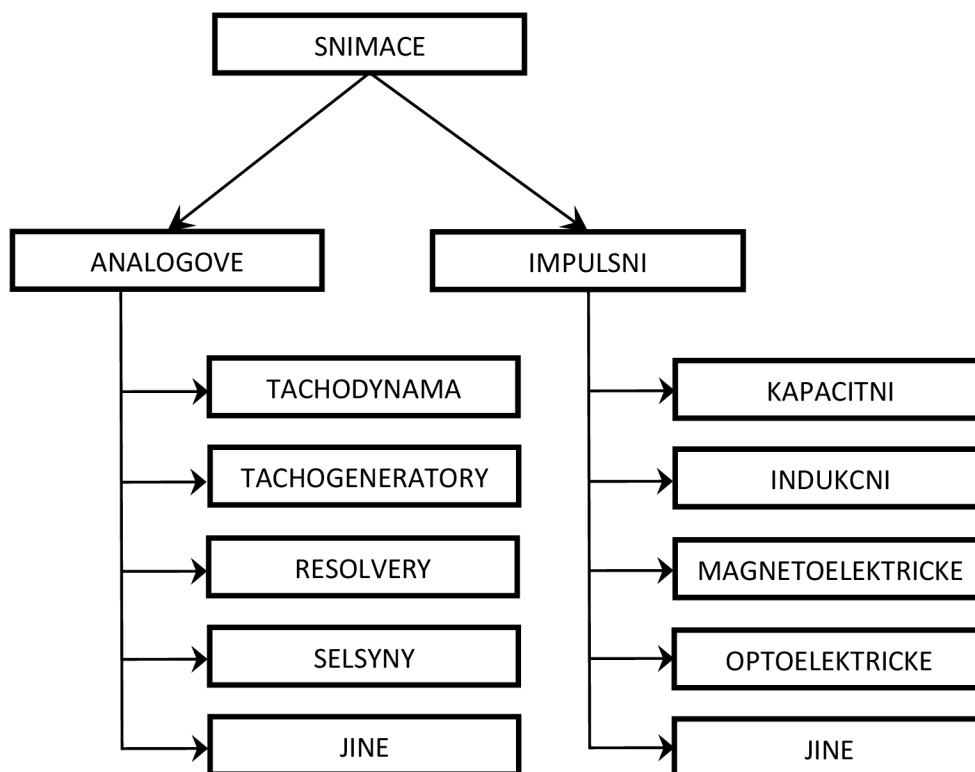


Obr. 30 Schéma piezoelektrického snímače [33]

Mezi velmi významné výhody jejich aplikace patří schopnost pracovat ve vysokých teplotách za do 500 °C a tlacích 100 MPa. Odezva u těchto snímačů, která činí řádově několik mikrosekund, patří také k jejich velkým pozitivům. Díky této vlastnosti jsou velmi žádané v aplikacích, kde je nutné měřit rychlé děje nebo časově proměnné tlaky jako např. tlakové pulzace v motorech, kompresorech nebo turbodmychadlech. Zajímavou nevýhodou je, že je nelze použít k měření statického tlaku. Důvodem je vniklý elektrický náboj, který se však po zatížení snímače tlakem vybijí vlivem nedokonalosti izolace a napětí na elektrodách klesne. Piezoelektrické snímače tlaku lze i lehce miniaturizovat až do řádu několik milimetrů. [33]

3.4 SNÍMAČE OTÁČEK

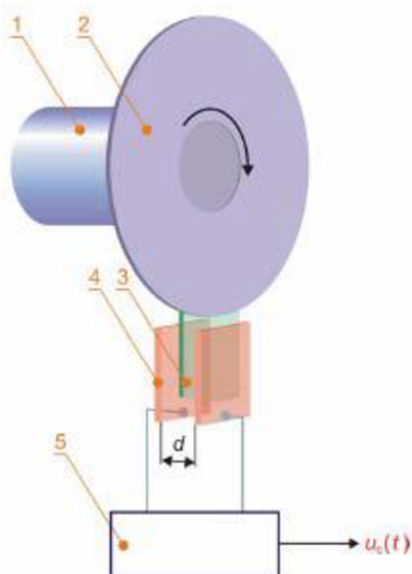
V různých průmyslových aplikacích je požadováno sledování otáček nebo klidový stav posuzovaných komponentů. Snímače otáček jsou v hojnosti používány pro spolehlivou detekci zvýšené a snížené rychlosti pohonu, klidového stavu nebo také přetržení pásu na dopravnících. Lze se s nimi setkat v odvětvích jako jsou automobilový, potravinářský, ocelářský a těžební průmysl. Tyto snímače neumožňují pouze měření rychlosti, ale také i monitorování. Moderní snímače otáček pracují většinou na induktivním nebo magnetickém principu. Čidlo detekuje kovové plochy na rotujících částech stroje a integrovaným vyhodnocovacím zařízením ho převádí na otáčky. [36] Podle fyzikálních principů, lze snímače rozdělit do dvou základních skupin, a to na analogové a impulsní. Výstupní parametr analogových snímačů je elektrické napětí, které je přímo úměrné frekvenci otáčení. Naopak impulsní snímače, jak už sám název napovídá, mají výstupní signál tvořený ve tvaru impulsu. Ten se následně elektronicky zpracovává na požadovanou fyzikální veličinu. Přehled jednoho z možných rozdělení snímačů lze vidět na obr.???. [38] V následujících kapitolách budou však popsány pouze některé z nich, a to ze skupiny impulsních snímačů. Důvodem je nemožná aplikace analogových snímačů na měření vysokých otáček turbodmychadla, které dosahují rychlosti otáček minimálně 25 000 min⁻¹ a za přítomnosti vysokých teplot a vibrací.



Obr. 31 Graf přehledu rozdělení snímačů otáček [38]

3.4.1 KAPACITNÍ SNÍMAČE OTÁČEK

Princip těchto snímačů pro měření frekvence je založen na změně kapacity kondenzátoru. Schéma principu činnosti lze vidět na obr. 32. Výstup je tvořen např. kovovou destičkou 3, která je pevně zafixovaná s kotoučem 2 na hřídeli 1. Čidlem, jak již bylo na začátku naznačeno, je deskový kondenzátor 4. [38]

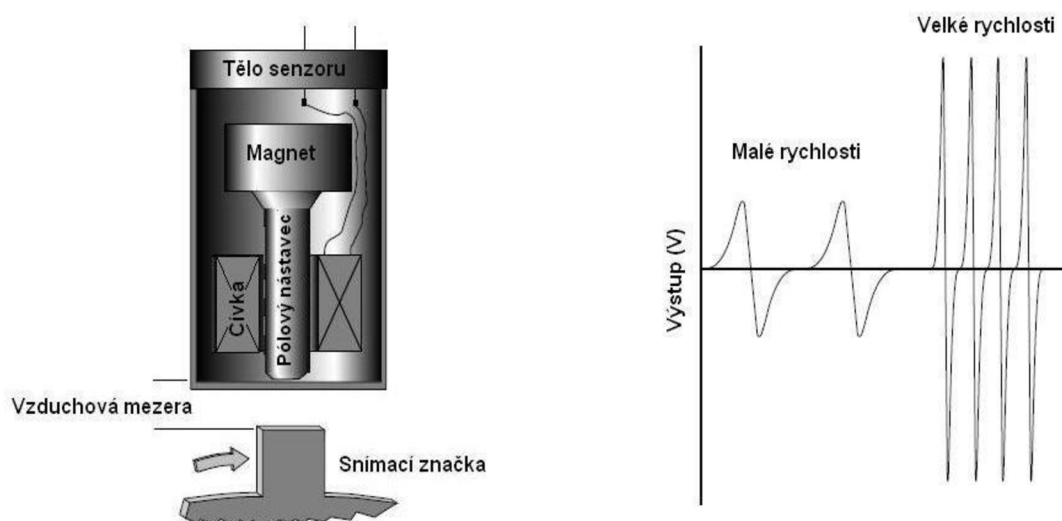


Obr. 32 Princip činnosti funkce kapacitního snímače otáček [38]

Měření otáček probíhá tak, že při otáčení hřídele se kovová destička v určitém okamžiku dostane do prostoru mezi desky kondenzátoru, tím nastane změna dielektrika na hodnotu $\epsilon + \Delta\epsilon$ a kondenzátor změní svou kapacitu na hodnotu $C + \Delta C$. Tento jev je ve snímači zaznamenán jako jeden impuls. Při dalším otáčení hřídele jsou zaznamenávány další impulzy a snímač poté vyhodnocuje aktuální frekvenci otáčení. [38] Výhodou kapacitních snímačů je možnost detekce nejenom magnetických, ale i nemagnetických materiálů jako jsou kapaliny, plastické hmoty, sklo, keramika, dřevo, kámen, aglomerované materiály, práškové hmoty apod. Pro optimální přizpůsobení pro nejrůznější aplikace jsou snímače vyráběny v kovových nebo plastových pouzdrech se snímací vzdáleností od 0.5 do 15 mm. [39]

3.4.2 INDUKČNÍ SNÍMAČE

V současnosti jsou indukční snímače konstruovány z tyčového magnetu a magneticky měkkým pólovým nástavcem, na kterém je umístěna indukční cívka s dvěma vývody. [40] Činnost tohoto typu snímače je založena na změně indukčnosti cívky, kdy se, obdobně jako v předchozí kapitole, mění poloha určitého výstupku na ozubeném kole nebo hřídeli. [37] Pokud se výčnělek dostane do oblasti snímané cívkou, začne se v ní indukovat přibližně sinusové elektrické napětí. Schéma konstrukce a typické výstupní signály lze vidět na obr. 33. [40]



Obr. 33 Schéma snímače otáček (vlevo) a typické výstupní signály (vpravo) [38]

Na trhu je dispozici mnoho konstrukčních provedení těchto snímačů. Níže jsou popsány tři základní provedení pro průmyslové aplikace [37]:

- Koncepce s celkovým zakrytím celého snímače, které neumožňuje případné poškození senzoru během elektromechanické montáže nebo při samotném používání. Tato skutečnost umožňuje jejich aplikaci do prostředí s vysokými teplotami. [37]

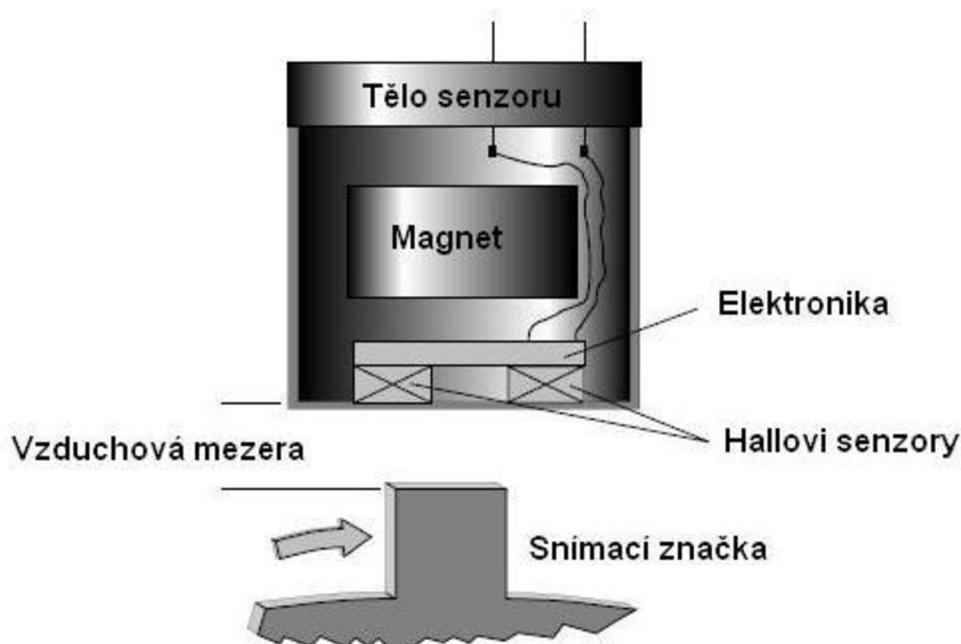
- Druhé konstrukční provedení disponuje malou štěrbínou v těle senzoru. Tato malá spára slouží k potlačení vířivých proudů, které zpomalují rychlost změny magnetického toku

skrz senzor. Tím je zajištěna vyšší přesnost daného čidla, nicméně je potlačena sensitivita při použití k detekci vyšších otáček. [37]

- Poslední základní typ spočívá v odkrytování čelní plochy senzorového těla s magnetickým jádrem. Tato úprava zaručuje větší citlivost snímání vyšší otáček rotoru, avšak za zhoršené citlivosti pro nízké rychlosti. [37]

3.4.3 MAGNETOELEKTRICKÉ SNÍMAČE

Magnetoelektrické snímače fungují na principu Hallova jevu, což znamená jinými slovy vznik elektrického napětí na polovodičové destičce protékané elektrickým proudem za přítomného působení magnetického pole. Jedná se tedy o aktivní snímač, která potřebuje funkci napájecí napětí, čímž se liší od pasivního snímače indukčního. Princip Hallova snímače, je možné vidět na obr. 34. [40]



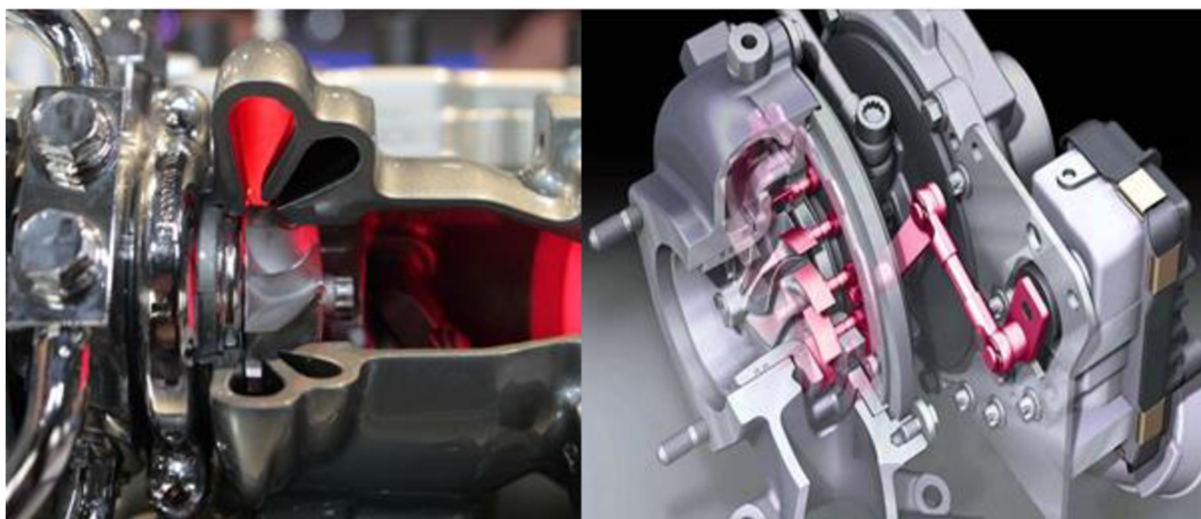
Obr. 34 Princip funkce magnetoelektrického snímače otáček [38]

V tomto případě je jako výstupek použit permanentní magnet upevněný na rotující součásti. Čidlo je právě zmíněná polovodičová destička napájena elektrickým proudem. V případě, že se otáčející permanentní magnet (výstupek) objeví v poloze, kde jeho magnetické pole působí kolmo na polovodičovou destičku, přes kterou protéká proud, je produkováno Hallovo napětí. [37] Nicméně toto zmíněné napětí je velmi nízké (v řádech milivoltů), proto je žádoucí, aby bylo se před samotným vyhodnocením zesíleno a vytvarováno do použitelného impulsu. Nesmírnou výhodou Hallova snímače v porovnání s indukčním je fakt, že dokáže detekovat rychlost otáček blízkou nule. Je možné ho také použít ke sledování klidové polohy určité součásti, která se nachází v jedné poloze a jistým podnětem se posune do druhé polohy. [40]

4 KONSTRUKČNÍ NÁVRH SKŘÍNĚ

Jedním z hlavních cílů této diplomové práce je konstrukční návrh turbínové skříně, která by kombinovala princip pulzního přeplňování tzv. *twin scroll* s regulačním systémem variabilní geometrie lopatek „VNT“ (Obr. 35). Hlavní požadavek na danou konstrukční úpravu je, aby byly tlakové pulzace výfukových plynů z přívodních kanálů dopraveny, pokud možno co nejdříve k turbíně. Důvod tohoto požadavku je zajištění vyšší využitelnosti tlakových pulzů přivedených k turbíně. Kdyby tyto pulzace nebyly oddělené, docházelo by k jejich vzájemnému rušení tzv. *interferenci* a celková účinnost pohonu turbíny by se snížila. Mezi další sledované parametry patří:

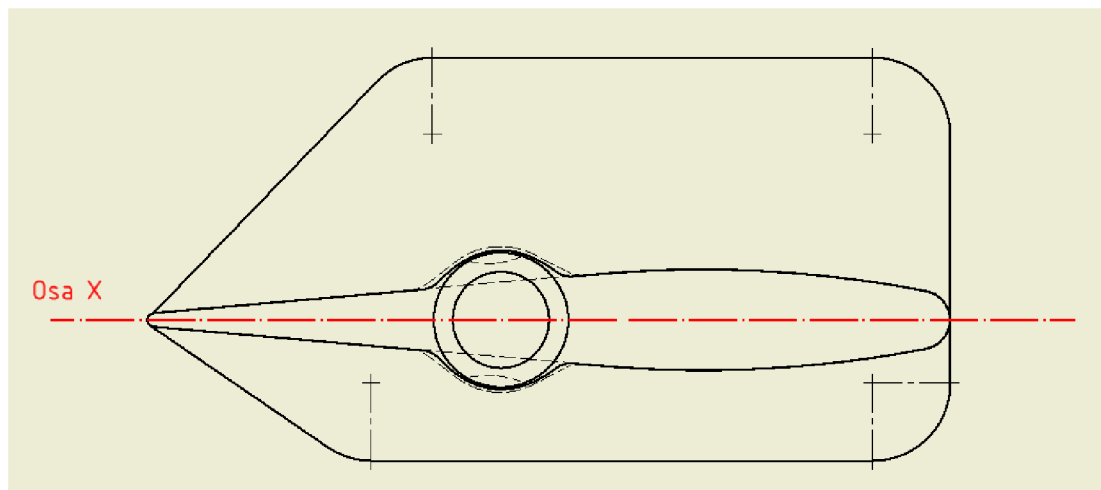
- Vyrobiteľnosť daných komponentů
- Nenáročnost montáže turbínové skříně
- Funkčnost ovládání rozvodových lopatek
- Pevnost daných komponentů



Obr. 35 Princip pulzního přeplňování (vlevo), variabilní geometrie lopatek „VNT“ (vpravo) [14]

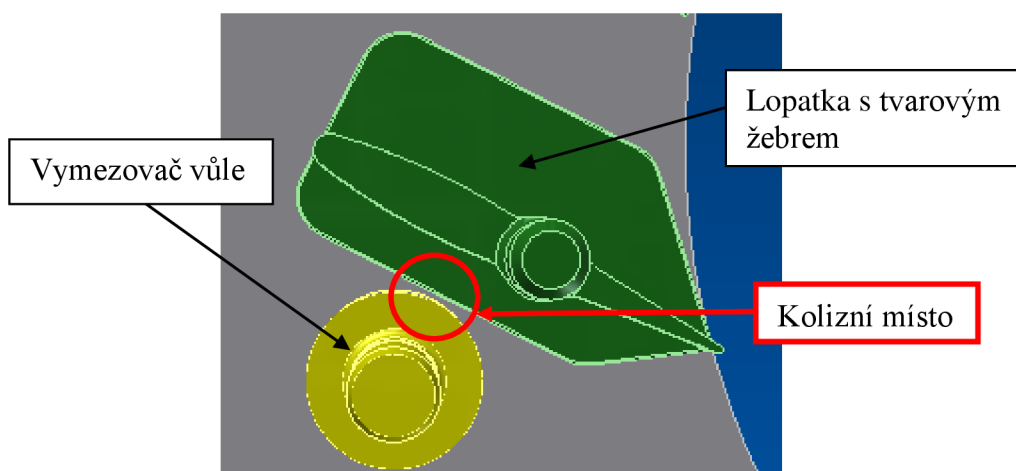
4.1 KONSTRUKČNÍ NÁVRH VERZE 1

První verze konstrukčního návrhu spočívá v úpravě rozváděcích lopatek variabilní geometrie. Na lopatkách byly přidány tzv. *tvarová žebra*, které by zajišťovaly oddělení tlakových pulzů (Obr. 38). Tvar žebra lopatky je možné vidět na obr. 36. Hlavní rozměry žebra byly navrženy s ohledem na případná kolizní místa (Obr. 37), které by mohly nastat při pootáčení rozváděcí lopatky, kdy tloušťka žebra byla zvolena na 2 mm a je umístěno přesně uprostřed tloušťky lopatky. Délka žebra je stejná jako délka celé lopatky tedy 20,8 mm. Celková šířka žebra byla navržena o velikosti 10,45 mm. Z již zmíněného důvodu vzniku kolizních míst bylo nutné upravit oblast žebra ústící ke špičce lopatky. Z toho důvodu byly navrženy 2 rozdílná zkosení, a to pod úhlem 46° a 34° . Úhel 46° byl zvolen z důvodu zabránění kolize žebra s turbínou při pootáčení rozváděcí lopatky. Druhý úhel (34°) by naopak zamezil střetu žebra s žebrem sousední lopatky. Důvod volby zmíněného 34° zkosení je stejný jako asymetrická konstrukce žebra vůči x-ové ose lopatky, kdy na jedné straně má žebro šířku 6,8 mm a na druhé 3,65 mm.

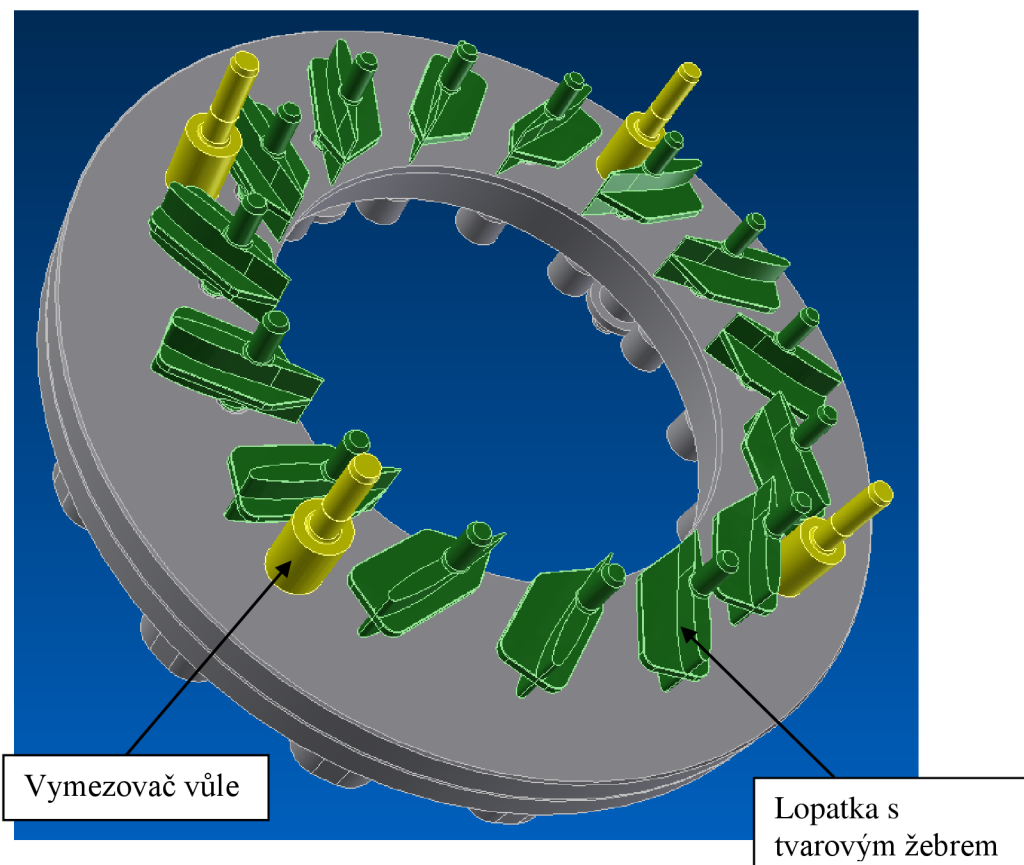


Obr. 36 Tvarové žebro rozváděcí lopatky

Tato konstrukční úprava je velice jednoduchá, co se týče výroby těchto upravených lopatek, které se vyrábí buď odléváním nebo spékáním ocelového prášku ve formě za přítomnosti vysoké teploty a tlaku. Tyto tvarová žebra by zajistila určitou míru separace tlakových pulzů, ale ne však dostačující. Navíc geometrie těchto žebíř by se musela upravovat na různé druhy a velikosti turbodmychadel z důvodu odlišného počtu rozváděcích lopatek, a tedy i rozdílného počtu možných kolizních míst mezi samotnými tvarovými lopatkami, lopatkou a vymezořačem vřele nebo lopatkou a turbínou (Obr. 38).



Obr. 37 Příklad kolizního místa mezi žebrem lopatky a vymezovačem vřele



Obr. 38 Konstrukční návrh verze 1

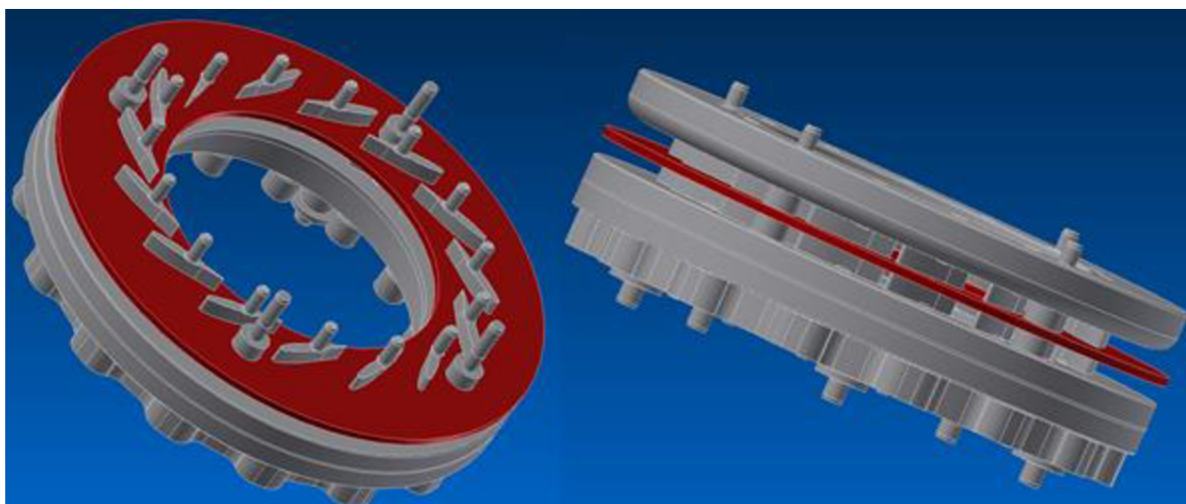
I když tato konstrukční koncepce vyhovuje několika sledovaným parametrům tak její účinnost separace tlakových pulzací až k turbíně je velmi nízká viz. Tab. 2.

Tab. 2 Splnění sledovaných parametrů konstrukčního návrhu verze 1

<u>Splnění sledovaných parametrů</u>	
Vyrobitelnost daných komponentů	✓
Nenáročná montáže turbínové skříně	✓
Funkčnost ovládání rozvodových lopatek	✓
Pevnost daných komponentů	✓
Účinnost separace tlakových pulzů	✗

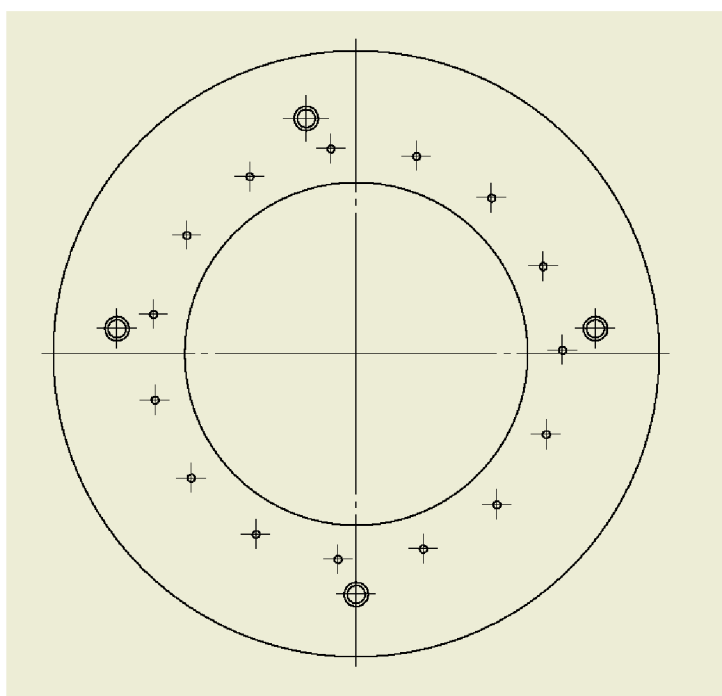
4.2 KONSTRUKČNÍ NÁVRH VERZE 2

Pro efektivnější separaci tlakových pulzací byl v rámci druhé konstrukční koncepce navrhnout dělicí (červený) disk (Obr. 39). Tento disk o tloušťce 2 mm je uložen v polovině celkové výšky rozváděcích lopatek. Toto konstrukční řešení umožňuje velmi účinné oddělení tlakových pulzací a jejich přivedení od samotného počátečního místa vtoku výfukových plynů do turbínové skříně až k lopatkám turbíny.



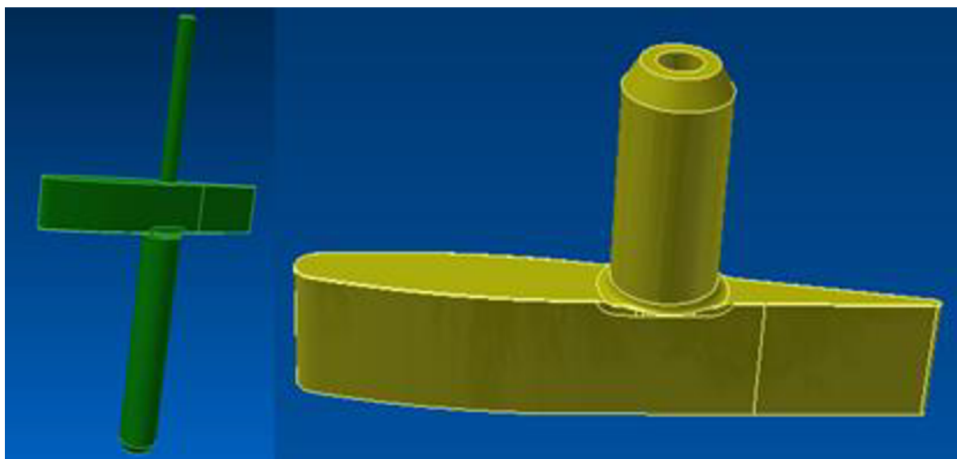
Obr. 39 Umístění dělicího disku v sestavě

Dělicí disk má vyvrtaných 15 děr o průměru 1,75 mm pro čepy lopatek a 4 díry o průměru 4 mm pro čepy vymezovačů vůle. Vnější průměr dělicího disku byl navržen o velikosti 134,5 mm a vnitřní průměru 76,2 mm tak, aby byl zajištěný dostatečný prostor pro montáž turbínového kola (Obr. 40).

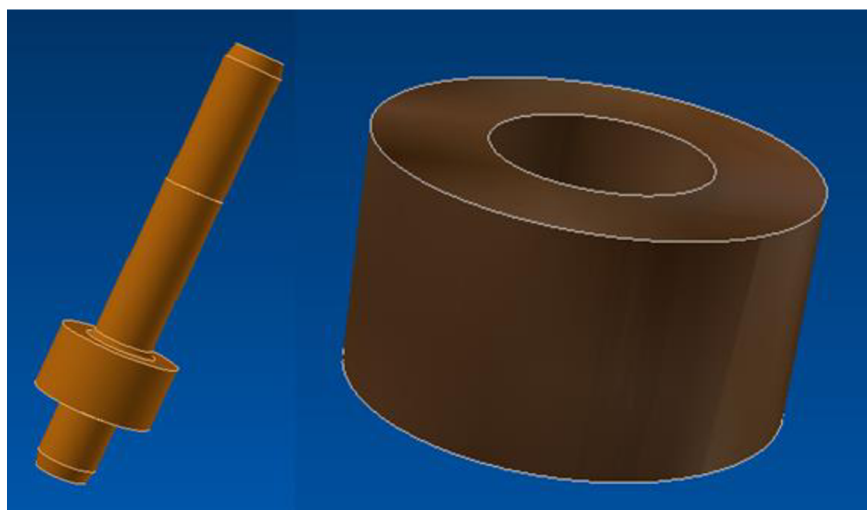


Obr. 40 Dělicí disk

Nicméně tento návrh zahrnuje i několik konstrukčních kompromisů. Jedním z nich je rozdělení samotné lopatky na dvě části. První část lopatky (zelená) obsahuje dva čepy, kdy koncem jednoho čepu o průměru 3,49 mm je uchycena ve vnějším kroužku turbínové skříně k ovládacím mechanismu. Další čep o průměru 1,7 mm slouží k nasazení druhé části lopatky (žlutá), která je taktéž vybavena čepem (průměr 3,49 mm) k přichycení do vnitřního kroužku a dírou o průměru 1,75 mm pro uchycení první části lopatky (Obr. 41). Hlavní důvod této úpravy je samotná montáž těchto lopatek do dělicího disku, vnějšího a vnitřního kroužku turbínové skříně. Další konstrukční modifikací je úprava vymezovačů vůle, respektive jeho rozdělení taktéž na dvě části, které lze vidět na obr. 42.



Obr. 41 První část lopatky (zelená), druhá část lopatky (žlutá)



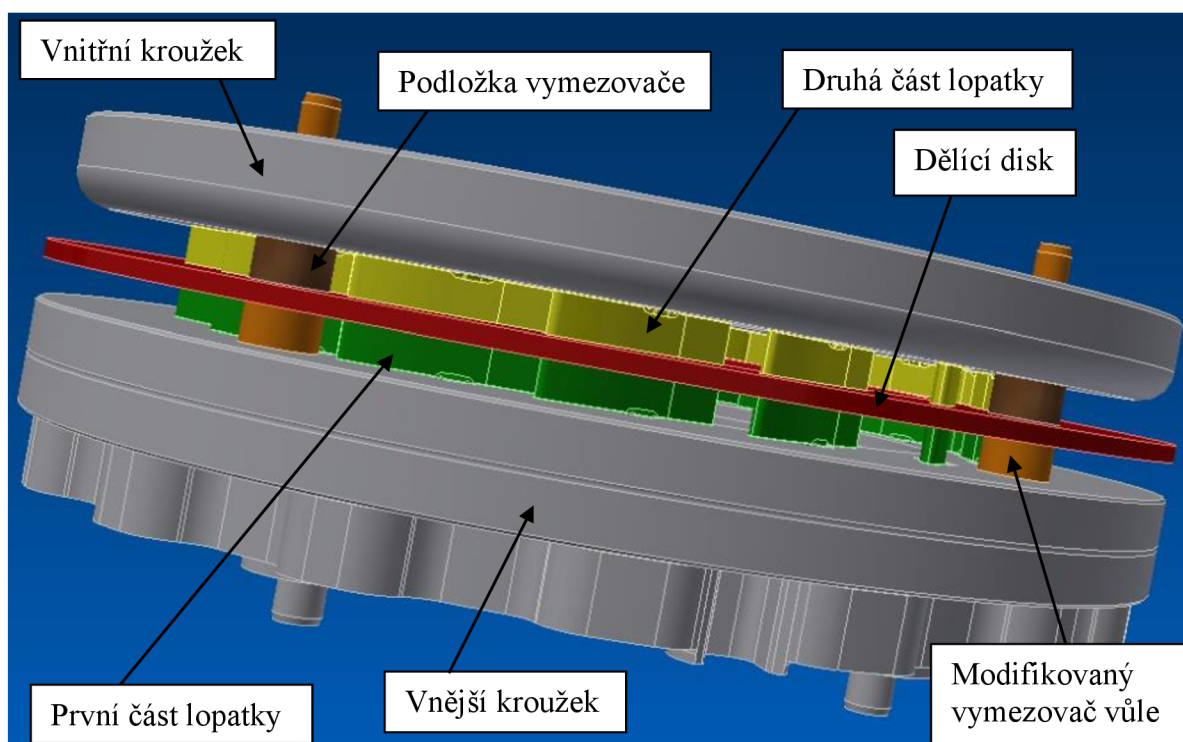
Obr. 42 Modifikovaný vymezovač vůle (oranžová), podložka vymezovače (hnědá)

Důvod jeho rozdělení je dán jeho samotnou funkcí. Původní vymezovač vůle slouží k zabránění sevření rozváděcích lopatek mezi vnějším a vnitřním kroužkem. Tepelné dilatace v axiálním směru, na kterou nejsou rozváděcí lopatky uzpůsobené a poškodily by se, je zajištěna právě zmíněnými vymezovači vůle. Nyní však kvůli přítomnosti dělicího disku je nutné vymežit vůli mezi dvěma sekcemi, a to mezi:

- Vnější kroužkem a dělicím diskem
- Dělicím diskem a vnitřním kroužkem

U modifikovaného vymezoavače vůle byla pouze zkrácena výška vymezoavací příruby na 4,43 mm, která by sloužila k zabránění sevření rozváděcích lopatek v jedné sekci. Ostatní rozměry čepu vymezoavače zůstaly nepozměněny. Bylo však potřeba navrhnout vymezoavací podložku, která by plnila stejnou funkci i v druhé sekci. Tato podložka má stejné rozměry jako příruba vymezoavače, a to vnější průměr 8 mm a výšku 4,43 mm. Disponuje také dírou pro montáž na čep vymezoavače o průměru 4,08 mm.

Avšak i tato konstrukční varianta má několik zásadních problémů. První z nich se týká zajištění radiálního pootočení druhé (žluté) části VNT lopatky vůči první (zelené) části lopatky. Tato lopatka je pouze nasazena na čep první (zelené) části lopatky, a tedy není přímo uchycena svarovým spojem s ramenem ovládacího mechanismu jako to je právě u první (zelené) části lopatky (Obr. 43). Toto zajištění proti radiálnímu pootočení by bylo velmi komplikované a časově náročné v montážním procesu. Dalším problémem se vyskytl v místě uložení lopatky v dělicím disku, kde čep první (zelené) části lopatky má pouze 1,7 mm v průměru. Tento malý průměr čepu by s největší pravděpodobností nevydržel celkové namáhání od tlakových pulzací výfukových plynů. Jako poslední problém se ukazuje celková složitost montážního procesu VNT mechanismu do turbínové skříně.



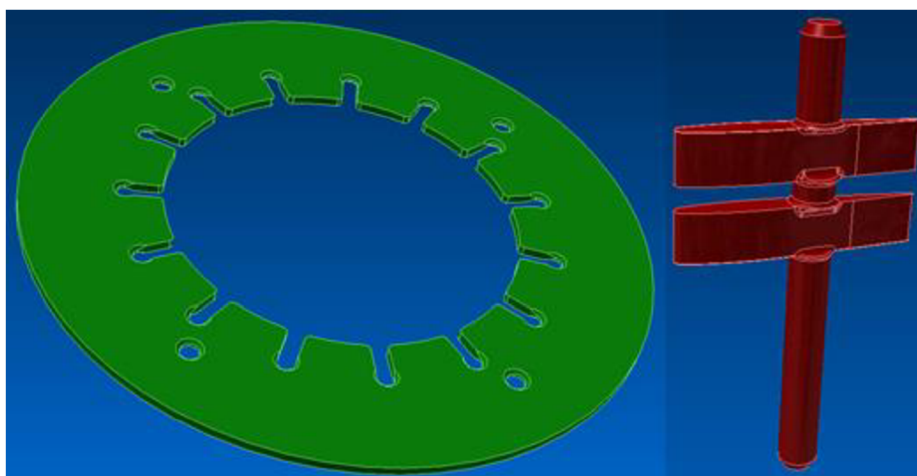
Obr. 43 Konstrukční návrh verze 2

Tab. 3 Splnění sledovaných parametrů konstrukčního návrhu verze 2

<u>Splnění sledovaných parametrů</u>	
Vyrobitelnost daných komponentů	✓
Nenáročnost montáže turbínové skříně	✗
Funkčnost ovládání rozvodových lopatek	✗
Pevnost daných komponentů	✗
Účinnost separace tlakových pulzů	✓

4.3 KONSTRUKČNÍ NÁVRH VERZE 3

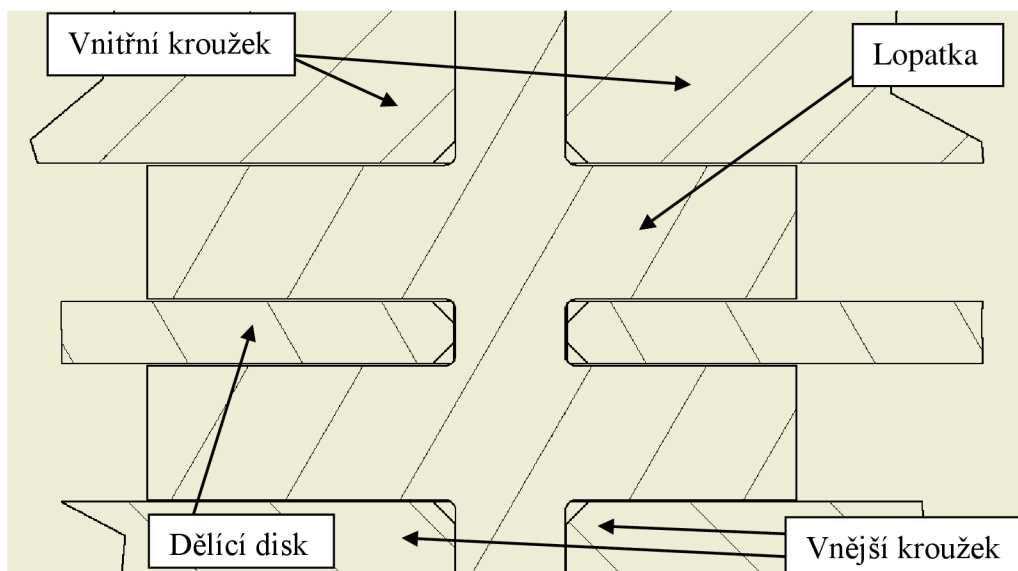
Pro odstranění výše zmíněných problémů konstrukčního návrhu verze 2 byla nutná úprava dělicího disku a rozváděcích lopatek (Obr. 44). Pro poslední konstrukční návrh byla pouze ponechána koncepce elementů vymežujících vůli v daných sekcích. Jak již bylo zmíněno, první úprava se týká dělicího disku, který místo pouze vyvrtaných děr pro čepy lopatek má tentokrát 3,6mm montážní drážky zakončené dírou o stejném průměru. Do těchto drážek se čep lopatky pouze zasune na požadované místo. Pro tento postup montáže lopatky byl modifikován i její samotný design. Lopatka VNT mechanismu již není rozdělená na dvě části, ale tvoří jeden celek. Tím, že je rozváděcí lopatka jednotná, není již potřeba zajišťovat radiální pootočení druhé části lopatky vůči první části, jako to bylo v předešlé konstrukční koncepci.



Obr. 44 Dělicí disk s drážkami pro čepy lopatek (vlevo), rozváděcí lopatka verze 3 (vpravo)

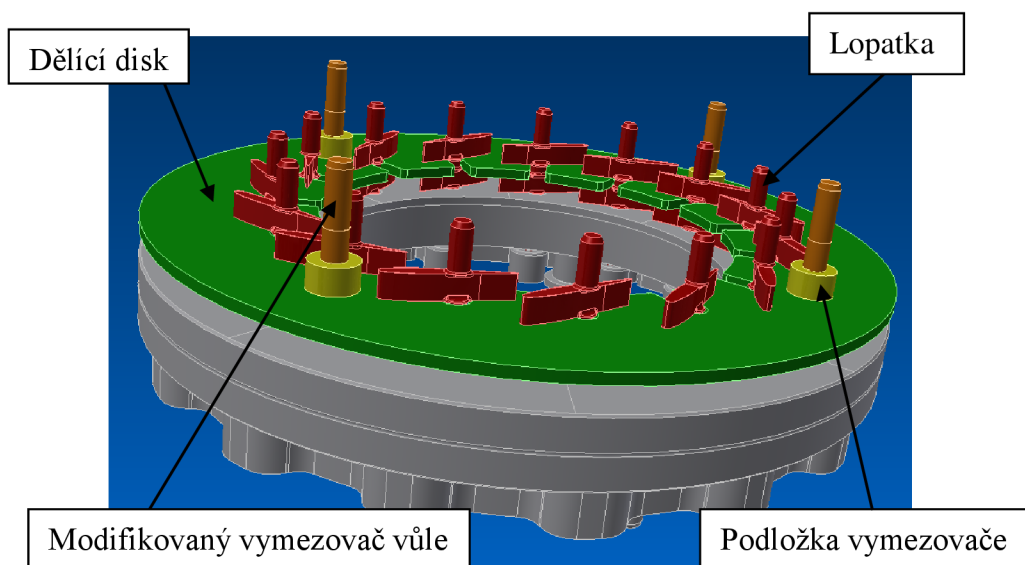
Na následujícím obrázku je možné vidět část lopatky v podélném řezu uloženou ve vnitřním kroužku (nahore), ve vnějším kroužku (dole) a v dělicím disku (uprostřed). Na obr. 45 lze vidět i velikost výšky každé části lopatky v obou sekcích (necelých 4,28 mm) a současně i velikosti vůle (necelých 0,08 mm) mezi:

- Lopatkou a vnitřním kroužkem
- Lopatkou a dělicím diskem na obou stranách
- Lopatkou a vnějším kroužkem



Obr. 45 Podélný řez v místě uložení lopatky

Úpravou prošel i čep lopatky v místě uložení v dělicím disku, kdy se jeho průměr zvětšil na 3,49 mm, což by už měl dosahovat dostatečné pevnosti vůči tlakovým pulzacím. Navíc místa přechodů z čepu na lopatku a naopak jsou opatřeny několika zaobleními, které by eliminovali velikost koncentrace napětí a tím i náchylnost k praskání nebo jiné destruktivní deformace lopatky.



Obr. 46 Konstrukční návrh verze 3

Tento konstrukční návrh by již vyhovoval všem sledovaným parametrům. V další kapitole následuje ověření, zda zvolené rozměry jednotlivých upravovaných součástí a tolerance uložení těchto komponentů vůči sobě opravdu vyhovují a nedochází k velkým deformacím a problémům v oblasti jejich funkce.

Tab. 4 Splnění sledovaných parametrů konstrukčního návrhu verze 3

<u>Splnění sledovaných parametrů</u>	
Vyrobitelnost daných komponentů	
Nenáročnost montáže turbínové skříně	
Funkčnost ovládání rozvodových lopatek	
Pevnost daných komponentů	
Účinnost separace tlakových pulzů	

5 PEVNOSTNÍ KONTROLA TURBÍNOVÉ SKŘÍNĚ

Zvolená konstrukční koncepce byla testována v programu ANSYS Workbench. Pozorovány byly především samotné deformace upravovaných komponentů s ohledem na jejich funkci. Samotný konstrukční návrh byl testován na kombinaci teplotní roztažnosti a tlakových pulzací. Nicméně v rámci této deformační simulace je nutné si předem definovat několik důležitých parametrů vstupujících do výpočtu.

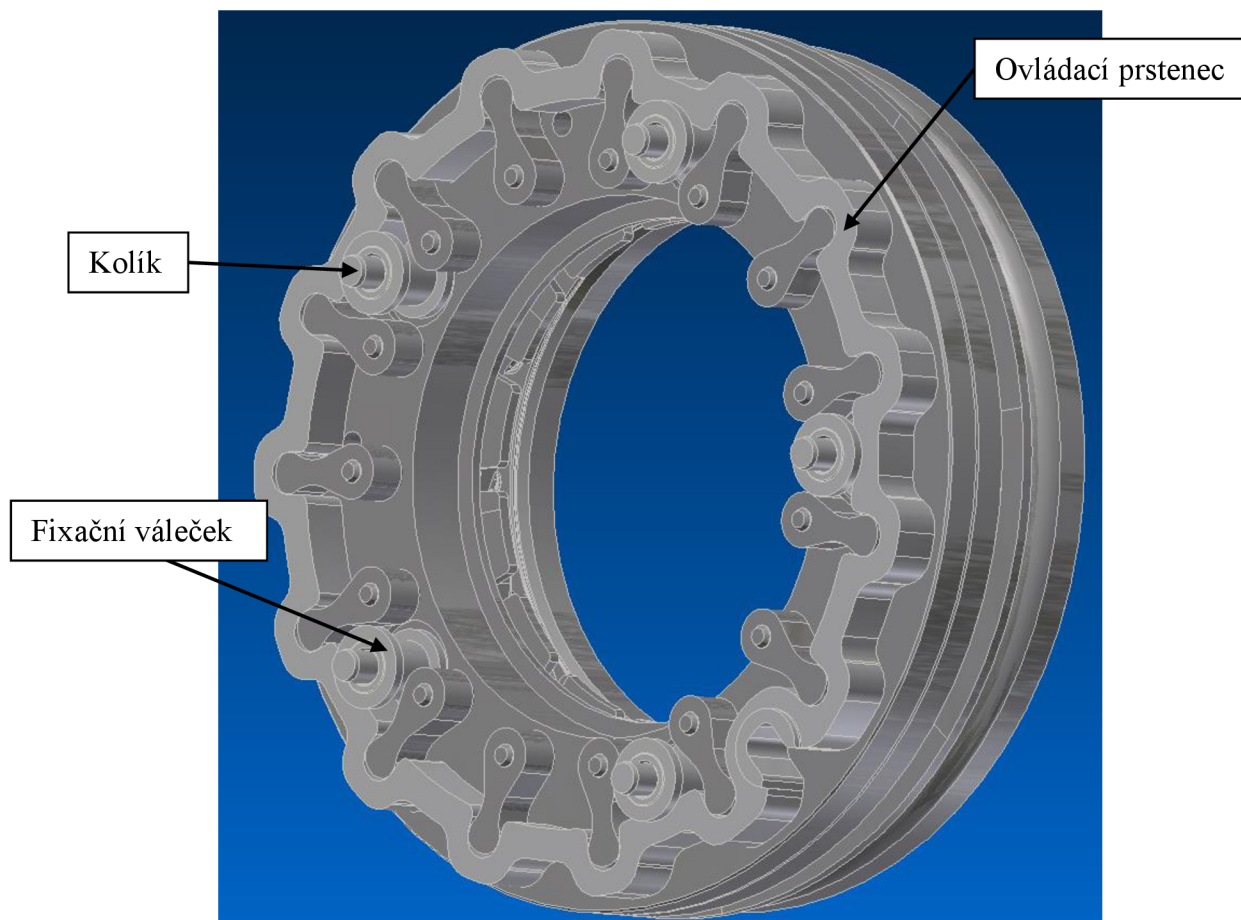
5.1 VOLBA MATERIÁLU

Volba materiálu vychází přednostně z předešlého poznání, a to zejména z požadavků, které jsou kladeny na materiál samotného VNT mechanismu rozvodových lopatek. Regulační VNT mechanismus a turbína turbodmychadla se nacházejí v prostředí o teplotách od 700 do 900 °C, kdy se při těchto podmínkách výrazně snižuje pevnost daných komponentů. Díky těmto teplotám a přítomnosti výfukových plynů, které obsahují molekuly CO₂, O₂, NO_x aj. se tedy i nacházejí ve velmi korozivním prostředí a docházelo by k jejich oxidaci. Mimo jiné z důvodu přítomnosti jistého množství pevných částic ve výfukových plynech je ohrožena i funkce ovládní rozvodových lopatek a docházelo by k jejich zadírání. V neposlední řadě jsou zde i tlakové pulzace, které mohou dosahovat svých maxim až 0,2 MPa. Pro tyto účely byla zvolena ocel ČSN 17 255 (DIN 1,4845; X12CrNi25) s danými vlastnostmi (Tab. 5). Jedná se o žáruvzdornou nerezovou ocel s vysokým obsahem chromu (24–26 %) a niklu (19–22 %). Tento materiál odolává v oxidační atmosféře teplotám do 1100 °C. V oxidujícím prostředí za přítomnosti sloučenin obsahujících síru je horní hranice použitelnosti 1000 °C. V redukčních uhlíkatých zplodinách odolává teplotám do 1000 °C. Taktéž dobře snáší i atmosféry obsahujících dusík i při nízkých obsazích kyslíku.

Tab. 5 Vlastnosti zvolené oceli ČSN 17 255

Vlastnosti zvolené oceli ČSN 17 255	
Mez kluzu	207 MPa
Mez pevnosti	586 MPa
Koeficient tepelné roztažnosti	$17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Pro jednoduchost byla tato ocel použita u drtivé většiny testovaných komponentů. Výjimku tvořili pouze ovládací prsteneček, kolíky a fixační válečky pro zmíněný prsteneček (Obr. 47), u kterých byla ponechána standardní konstrukční uhlíková S235JR.



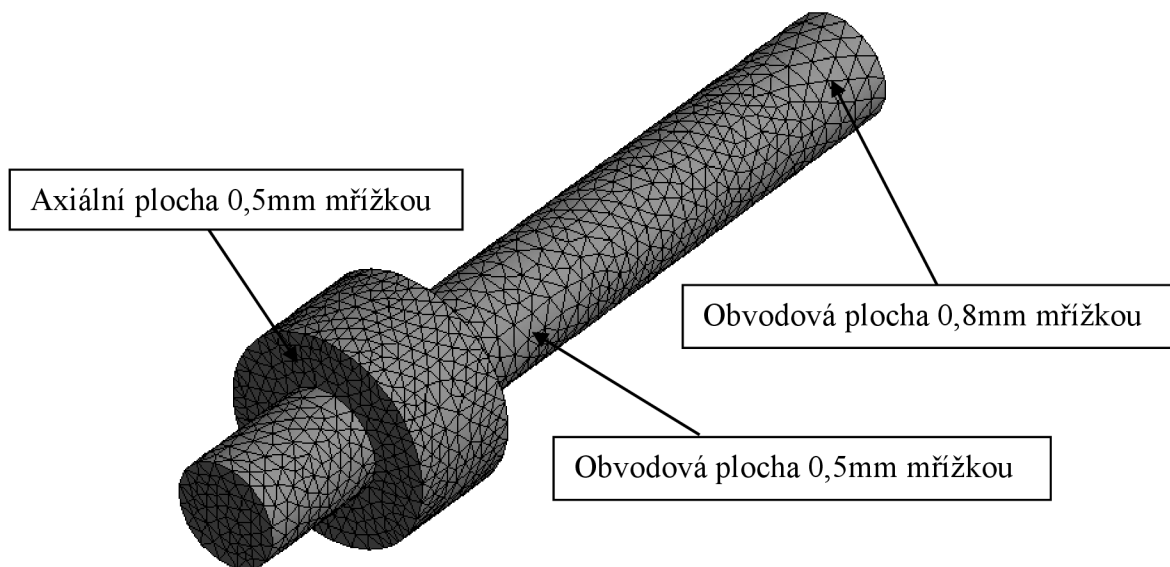
Obr. 47 Výjimka použité oceli S235JR na daných komponentech

5.2 MKP SÍŤ TESTOVANÝCH SOUČÁSTÍ

Pro jednotlivé testované komponenty byly zvoleny různé typy a velikosti prvků mřížky. Druh a rozměr segmentů mřížky záležel na geometrické složitosti daných součástí a pochopitelně i jejich velikostí.

5.2.1 MKP SÍŤ VYMEZOVAČE VŮLE

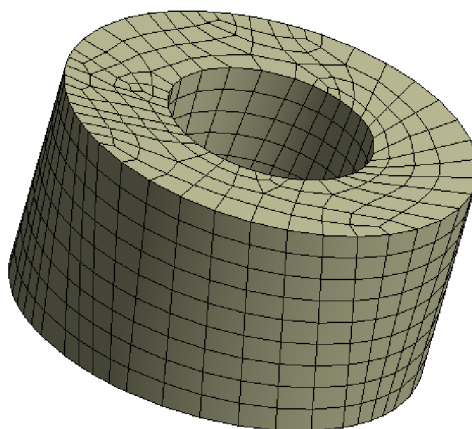
Základní rozměr elementu mřížky vymezovače vůle je 0,8 mm. Zájem pozorování výsledků deformace je však větší na axiálních plochách v místě jeho rozšířeného průměru a v části obvodové plochy, kde je umístěna podložka vymezovače. Nicméně pro korektnější výpočet byla na tyto plochy aplikována kontaktní mřížka o velikosti 0,5 mm. Jelikož je vymezovač vůle v blízkém kontaktu se spoustou ostatní součástí sestavy, lze tuto 0,5mm mřížku vidět téměř na celé součásti. Výjimkou je pouze obvodová plocha na jednom konci vymezovače viz. obr 48.



Obr. 48 Mřížka vymezovače vůle

5.2.2 MKP síť PODLOŽKY VYMEZOVAČE

Obdobně jako u vymezovače vůle je zde pozorování deformace zaměřeno na čelní plochy této podložky ale také i na obvodovou plochu díry. Obdobně zde byla použita kontaktní mřížka na zmíněných sledovaných plochách, a to o velikosti 0,5 mm. Jelikož se jedná o velmi malou součást tak se také jedná o základní velikost mřížky celé vymezovací podložky viz. obr. 49.

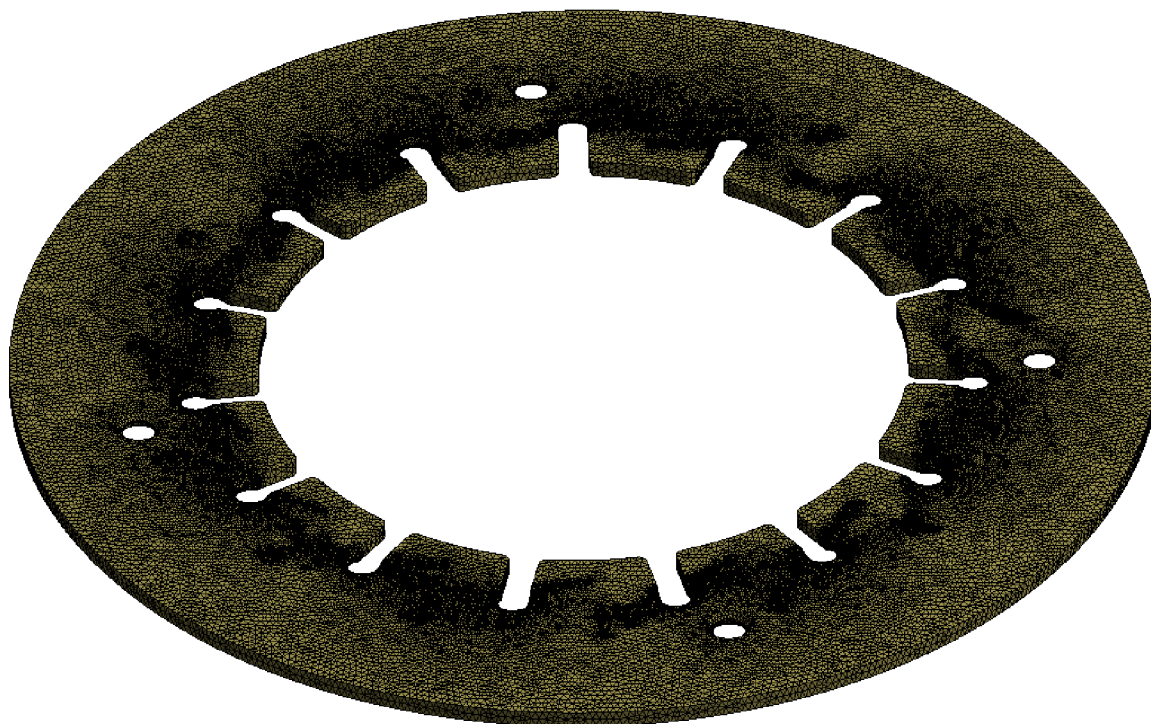


Obr. 49 Mřížka podložky vymezovače

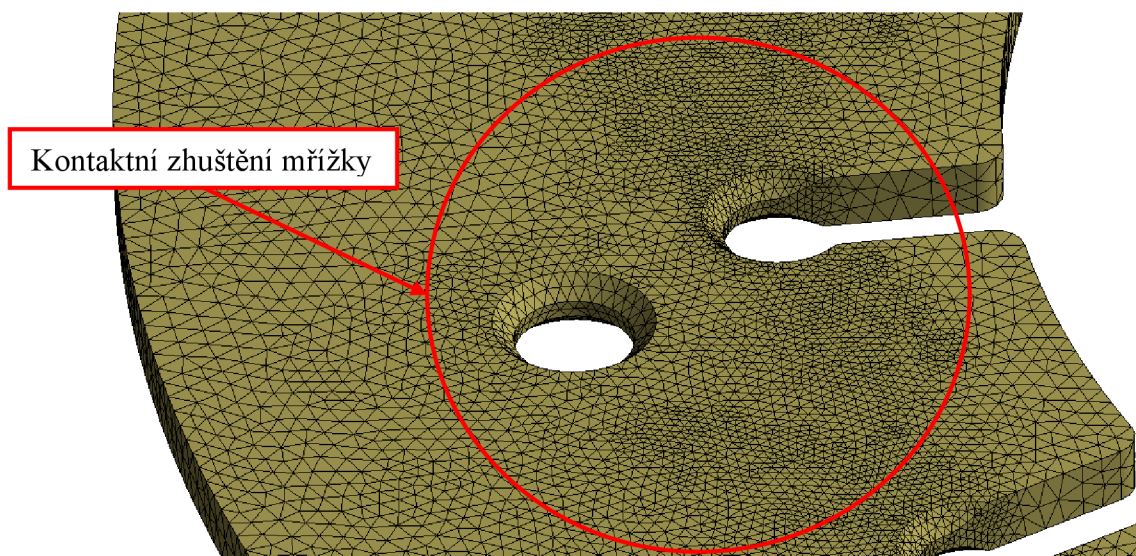
5.2.3 MKP síť DĚLÍČÍHO DISKU

Mřížka děličícího disku je velmi složitá. Je to z důvodu velmi velkého počtu různých zaoblení, zkosení, děr a drážek. Tyto zmíněné prvky zapříčiňují lokální zhuštění mřížky a horší návaznost jednotlivých elementů, které lze vidět na obr. 51. Nicméně i u této součásti byla použita základní velikost elementu mřížky 0,8 mm. V oblastech, kde dochází ke kontaktu s lopatkou nebo s vymezovacími prvky byla opět použité kontaktní mřížkování. Velikost výpočtových prvků v oblasti kontaktu s vymezovačem vůle nebo jeho podložkou je 0,5 mm. Naopak kontaktní plochy s lopatkami jsou nastaveny na o velikosti elementů na 0,3 mm.

Detailnější rozlišení výpočtové sítě v místech, kde dochází k dotyku ostatních komponentů je možné vidět na obr. 51.



Obr. 50 Mřížka dělicího disku

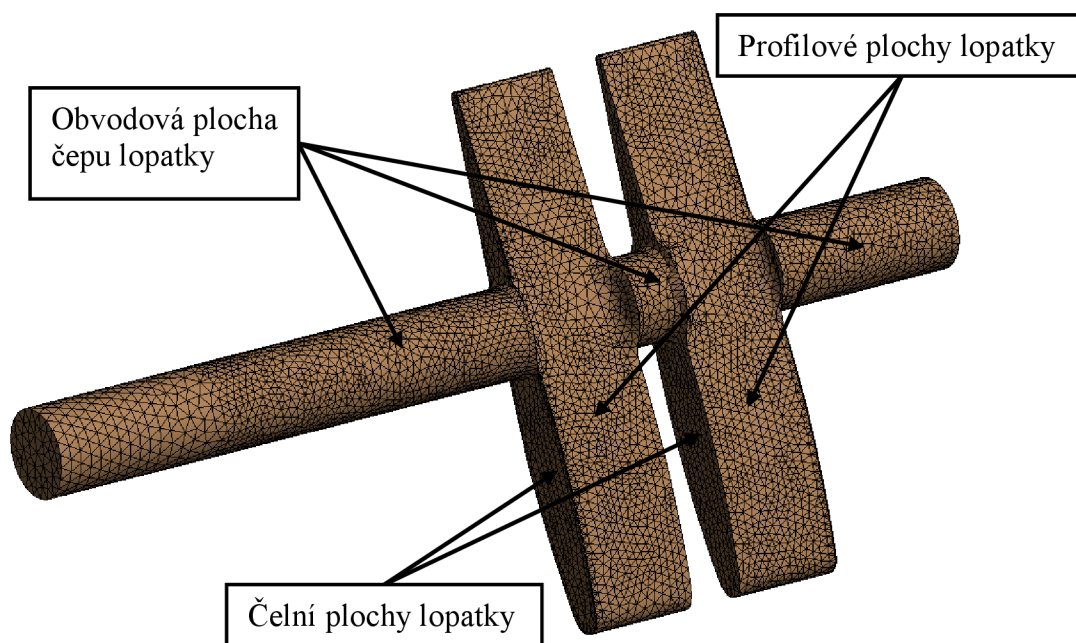


Obr. 51 Detail aplikované velikosti elementů v oblasti styku ostatních součástí

5.2.4 MKP SÍŤ ROZVÁDĚCÍ LOPATKY

Obzvláště problematická je mřížka samotné rozváděcí lopatky. Tato součást má mnoho složitých tvarových prvků. Nicméně využití velmi husté mřížky s malou velikostí elementů by dokázala umožnit vykreslení dostatečně přesných výsledků. Velikost prvků se na drtivé většině ploch je 0,3 mm. Jedná se o čelní a profilové plochy lopatky a obvodové plochy čepu lopatky, na nichž je zaměřena pozornost. Odlišnou velikost elementů mřížky je vidět na spodní části,

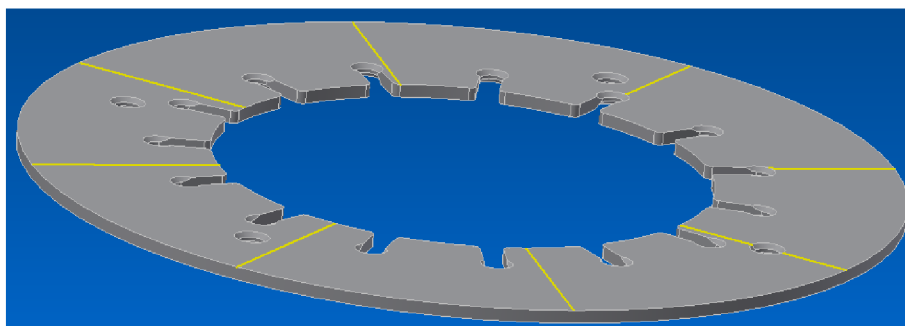
kteřá je uložena do ovládacího ramena lopatky. Zde však zájem pozornosti není zaměřen, i když je s ním lopatka v kontaktu. Nicméně tato kontaktní plocha má velikosti výpočtových prvků 0,5 mm. Prvky by zde sice mohli být většího rozměru, aby se ušetřil výpočtový čas, ale ve viditelném přechodu by mohlo docházet k ne příliš korektnímu výpočtu po celé délce čepu lopatky viz. Obr 52.



Obr. 52 Mřížka rozvodové lopatky

5.3 TEPLOTNÍ ANALÝZA

Aby bylo možné simulovat teplotní dilataci jednotlivých součástí, je potřeba provést nejprve jejich ohřev. Výfukové plyny se do turbínové skříně dostávají nikoliv z jednoho určitého místa, ale naopak z jisté části jejího vnitřního obvodu. To znamená, že ani celkové rozložení teploty není konstantní, a tedy některé součásti jsou více nebo méně těmito teplotními vlivy namáhané. Z tohoto důvodu nebylo možné použít symetrie pro výpočet testované sestavy a tím i ušetřením výpočtového času. Pro aplikaci různých teplot ohřevu jednotlivých součástí turbínové skříně byl vnější, vnitřní kroužek a dělicí disk rozdělen na 8 částí v axiálním směru. Způsob rozdělení je takový, že každá dělicí rovina prochází počátkem souřadného systému sestavy a je od sousední roviny vychýlena o úhel 45° (Obr. 53). Každé osmině bylo poté přidělena daná hodnota teploty.

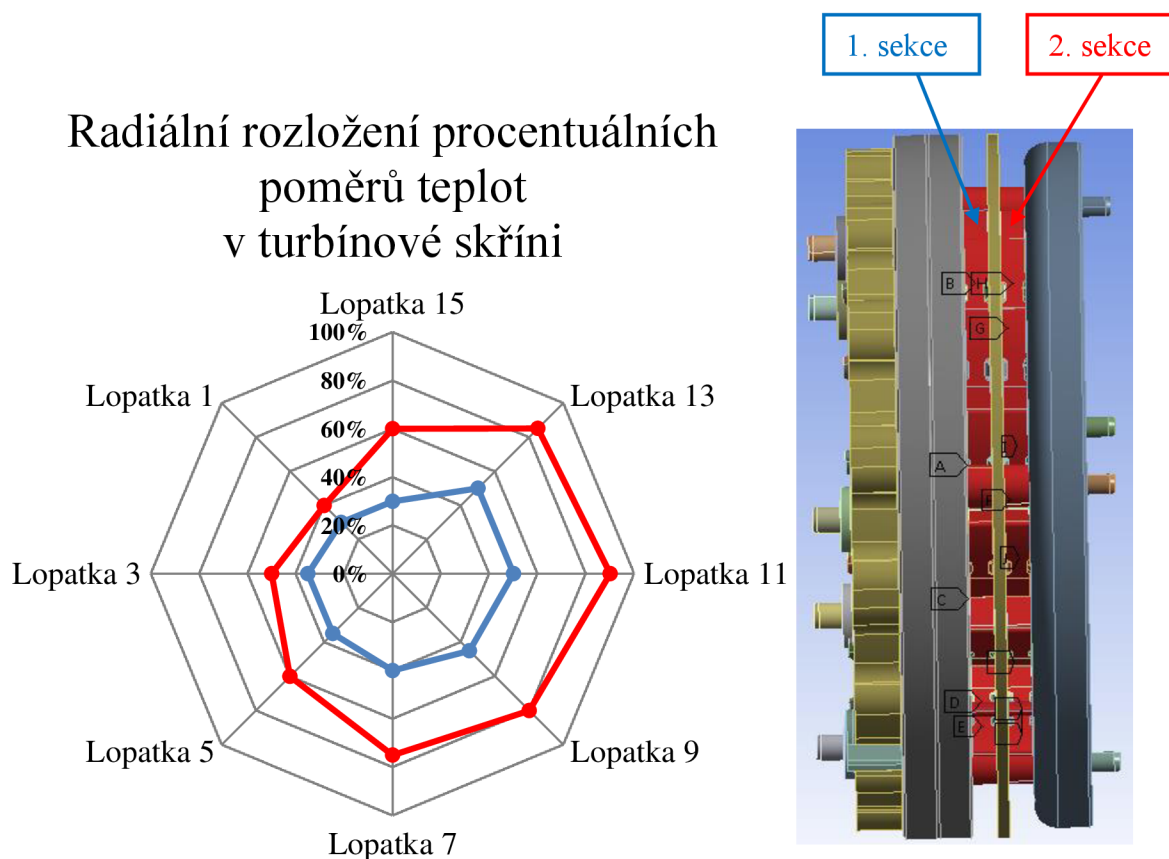


Obr. 53 Příklad rozdělení dělicího disku

Výpočet teplotní analýzy byl proveden v projektu *Steady - State Thermal*. Jedná se tudíž o ustálenou teplotní úlohu, kde se simuluje stabilizovaný stav teplotního rozložení v testované sestavě. Jelikož samotné turbodmychadlo může reálně pracovat v několika různých režimech tak v tomto případě se jedná o režim při plném zatížení.

5.3.1 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Hlavní okrajovou podmínkou této úlohy je pochopitelně počáteční teplotní namáhání, které však není konstantní na všech plochách testované sestavy. Na obr. 54 lze vidět 2 grafy procentuálních poměrů teplot, které reprezentují namáhání vnějšího a vnitřního kroužku a které byly také přiděleny obou sekcím rozdělující tlakové pulzace. Oba grafické průběhy byly pro tento účel poskytnuty od firmy Honeywell a jelikož se jedná o citlivé informace zmíněné firmy tak nemohou být vyobrazeny jako explicitní hodnoty ve °C. Další okrajovou podmínkou vnesenou do výpočtu je koeficient přestupu tepla nastavený na $2000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Jelikož jsou všechny součásti v obou sekcích ovlivněny proudem horkých spalin z motoru, jedná se tedy o realističtější reprezentaci teplotního namáhání. Tento koeficient přestupu tepla byl aplikován na plochy všech součástí vyskytujících se v obou sekcích. Jedná se tedy o profilové plochy lopatek, axiální plochu vnějšího a vnitřního kroužku, obě čelní plochy dělicího disku a obvodové plochy vymezočů vůle a vymezočacích podložek.



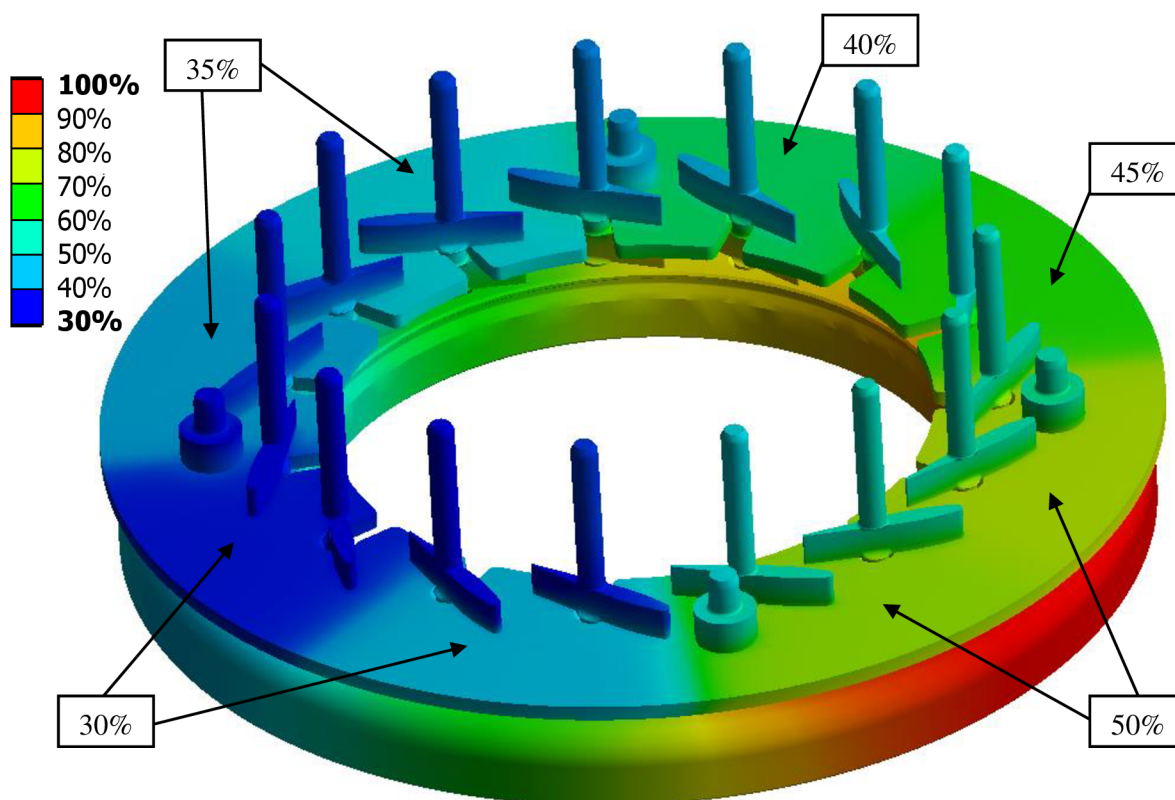
Obr. 54 Graf radiálního rozložení procentuálních poměrů teplot v turbínové skříní

5.3.2 POČÁTEČNÍ PODMÍNKY

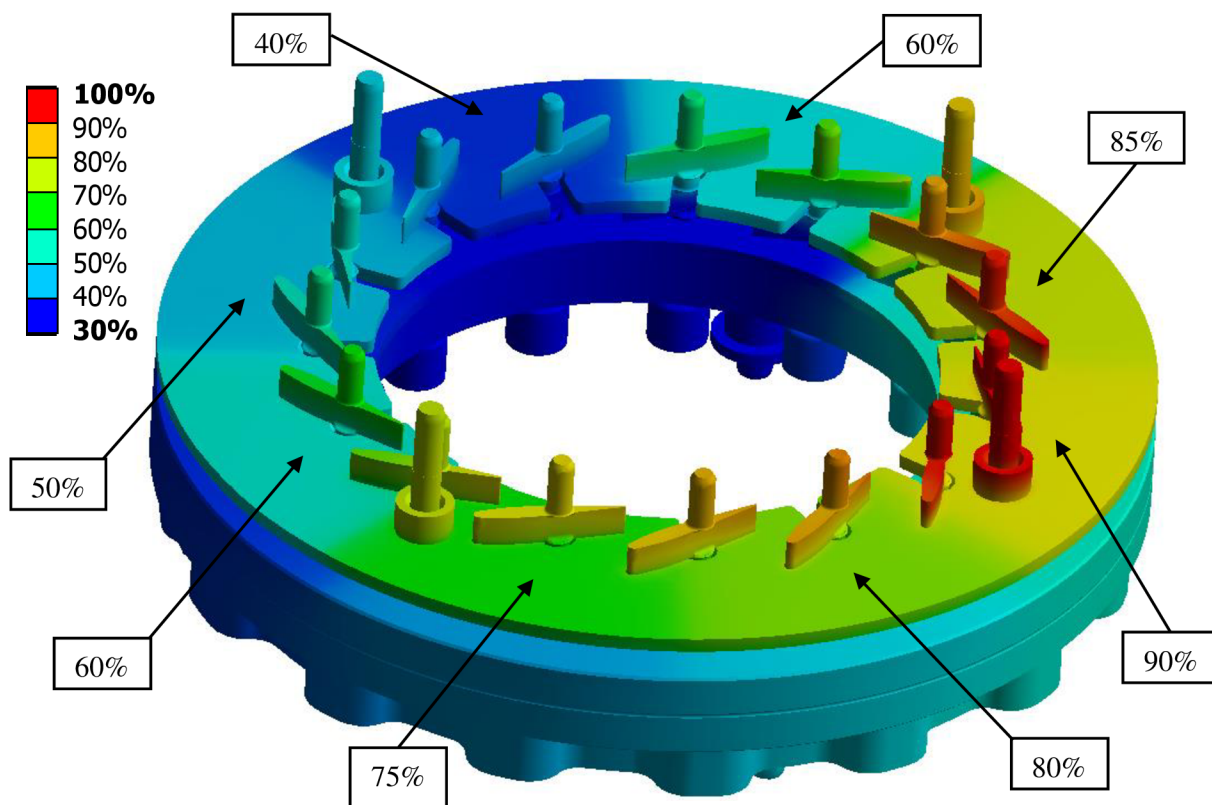
Dalším krokem je nutné si definovat počáteční podmínky vstupující do výpočtu. První z nich je počáteční teplota, která byla nastavená na 22 °C. Aby byla zajištěna i adekvátnost rychlosti řešení a přesnost dané úlohy, je žádoucí zajistit i přiměřený počet výpočtových kroků. Ten byl nastaven na 12 kroků. V rámci jednoho daného kroku bylo také nastaveno tzv. automatické krokování pomocí mezikroků, kde jejich maximální počet byl 20 a minimální 5.

Step Controls	
Number Of Steps	12,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	5,
Minimum Substeps	5,
Maximum Substeps	20,

Obr. 55 Nastavení počtu výpočtových kroků a mezikroků



Obr. 56 Rozložení procentuálních poměrů teplot v 1. sekci

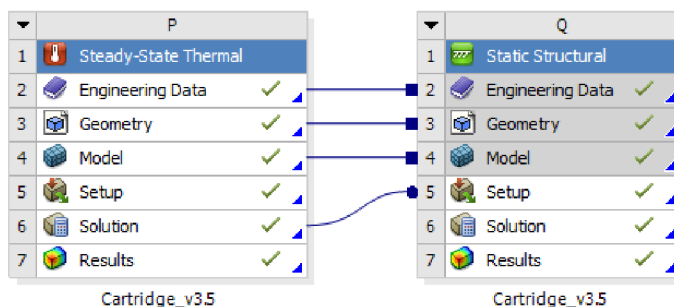


Obr. 57 Rozložení procentuálních poměrů teplot ve 2. sekci

Z teplotní analýzy je viditelné, že plochy s největším obsahem jako je např. dělicí disk jsou díky teplotní konvekci silněji ovlivněné než například rozváděcí lopatky, které vykazují stále ještě vysokou teplotu. Dále je zřetelné na dělicím disku určité teplotní přechody mezi jednotlivými částmi reprezentované procentuální hodnotou vloženého teplotního namáhání. Tento aspekt bude do jisté míry způsobovat určité zvýšení napětí v materiálu. Obzvláště pokud tento teplotní rozdíl bude mezi částmi, kde bude nejvyšší teplotní gradient a současně i drážka pro umístění lopatky.

5.4 DEFORMAČNÍ ANALÝZA

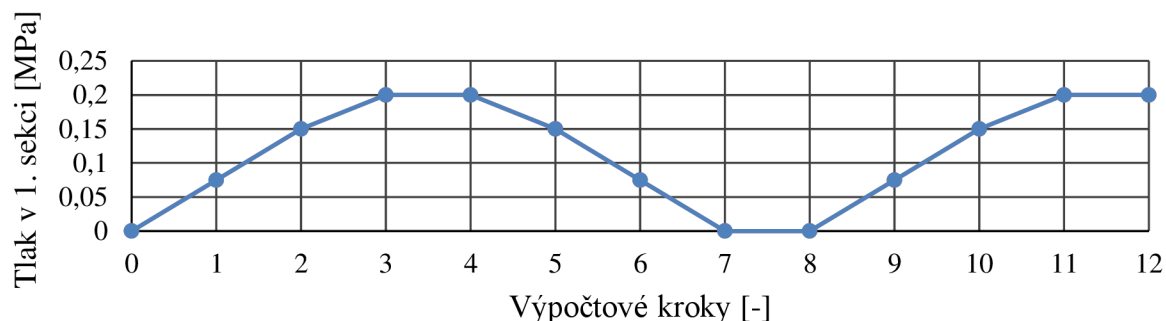
Deformační a napěťová analýza byla provedena v projektu *Static Structural*. Jedná se tedy opět o stacionární úlohu, ve které se hledal ustálený stav při plném zatížení turbodmychadla, a tedy s maximálními hodnotami deformací na posuzovaných komponentech. Před samotným definováním okrajových a počátečních podmínek bylo však nezbytné provázat termální úlohu se strukturální. Dojde tak ke vložení již předchozího nastavení jako jsou samotné komponenty, jejich MKP síť a definovaný materiál.



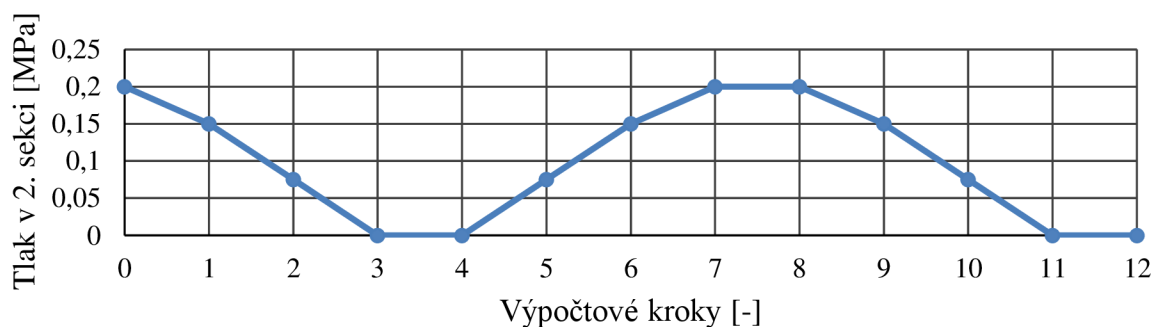
Obr. 58 Provázání termální a strukturální analýzy

5.4.1 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

První z okrajových podmínek je samotné tepelné zatížení jako výsledek termální analýzy, který byl vložen do této analýzy při provázání obou projektu. Další okrajovou podmínkou bylo vnesení tlakových pulzů jakožto další z vlivů ovlivňující výsledné deformace. Aby bylo možné vidět průběh deformace v celé sestavě, a tedy i posoudit v jakém stavu dochází k největším deformacím, bylo nutné nasimulovat krokový průběh tlakových pulzů pro každou sekci zvlášť. Průběh působení tlakových pulzů byl zaveden pomocí tabulky a definován 12ti výpočtovými kroky. Důvod zavedení právě 12ti kroku byl ten, že bylo nutné zjistit, ve kterém intervalu dochází k maximálním deformacím. Tvar zmíněného tlakového průběhu byl zvolen přibližně jako sinusová funkce s krátkými ustáleními v krajních hodnotách. Ohled byl brán na to, aby když v jedné sekci je minimální hodnota tlaku (0 MPa) tak v druhé je maximální (0,2 MPa). Tlakové pulzy byly aplikovány na stejné plochy v obou sekcích jako procentuální poměr teplotního rozložení. Grafické průběhy tlakových pulzů lze vidět na obr. 59 a 60.

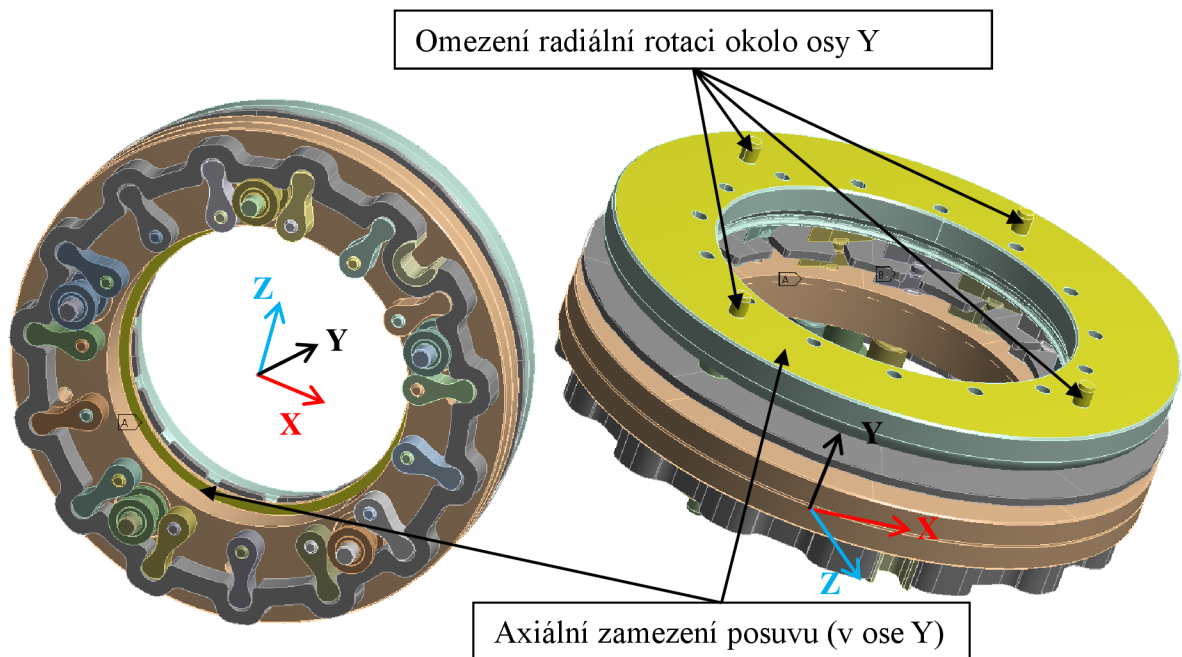


Obr. 59 Průběh tlakové pulzace v 1. sekci



Obr. 60 Průběh tlakové pulzace v 2. sekci

Poslední okrajovou podmínkou je zamezení posuvu a rotaci v rámci globálního souřadného systému dané sestavy neboli odebrání stupňů volnosti. Tato okrajová podmínka byla aplikována na vyobrazených plochách obr. 61. Na zmíněném obrázku lze vidět 2 plochy, jimž byl odebrán stupeň volnosti posuvu v ose Y. První z nich je čelní plocha vnitřního kroužku a druhá je čelní plocha vnitřní příruby na vnějším kroužku, kde se opírá příruba turbínového kola. Další stupeň volnosti byl odebrán jako radiální pootočení okolo axiální osy Y. Toto zamezení rotace bylo aplikováno na koncích čepů vymezovačů vůle vyčnívajících z vnitřního kroužku.



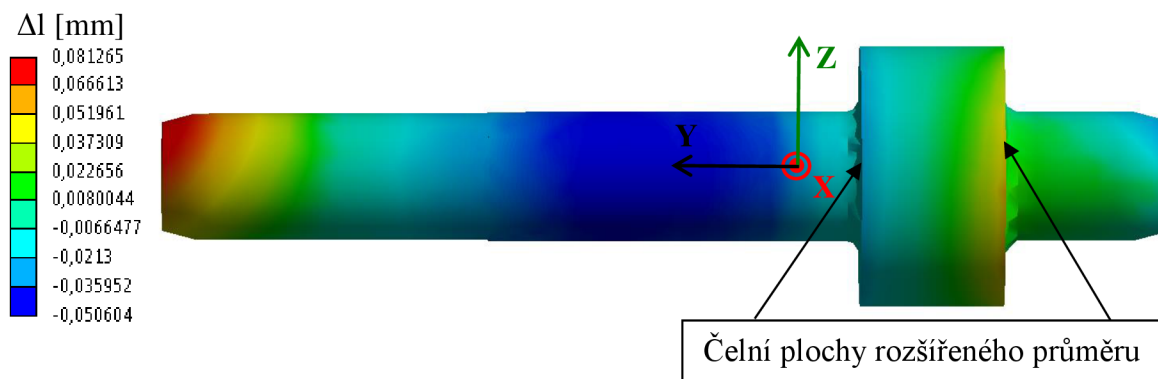
Obr. 61 Okrajová podmínka odebrání stupňů volnosti

Samotné posouzení, zda byly dané komponenty navrhnutы se správnými rozměrovými tolerancemi, bylo provedeno na součástech, které byly nejvíce ovlivňované tepelnou roztažností a působením tlakových pulzů v daném výpočtovém kroku, kde byly detekovány jejich maximální deformace. Tyto deformace byly největší v 7. a 8. výpočtovém kroku, kde tlak v 2. sekci dosáhl svého maxima a tlak v 1. sekci svého minima. Současně také v oblasti nejvyšší teploty v 1. sekci (50%) a v 2. sekci (90%). V následujících kapitolách jsou popsány výsledné deformace zatěžovaných komponentů.

5.4.2 DEFORMACE VYMEZOVAČE VŮLE

Oblast pozorování deformace vymezovače vůle byla zaměřena na posuv v ose Y na čelních plochách v místě jeho rozšířeného průměru. Zde je vymezovač v kontaktu s dělicím diskem a vnějším kroužkem. Deformace v tomto zmíněném místě je 0,07 mm. Avšak tato deformace je tlaková, což znamená, že se délkový rozměr v místě rozšířeného průměru vymezovače zmenšuje. Tato poměrná prodloužení jsou však lokální, tedy jsou pouze na jedné části obvodu. Ostatní deformovaná místa v této oblasti se pohybují od 0,01 do 0,02 mm a jsou také tlakové. Stejně hodnoty deformace by se měli nacházet i na kontaktních plochách zmíněných komponentů. Další pozorovanou deformační oblastí vymezovače vůle je obvodová plocha v místě, kde se nachází podložka vymezovače. Průměr vymezovače se zde působením zatěžovacích vlivů zvětší o 0,05 mm. Jelikož je vymezovač namáhán i tlakovými pulzy, dochází i k jeho zalomení ve směru osy Z. Hodnota deformace tohoto zalomení není však tak velká

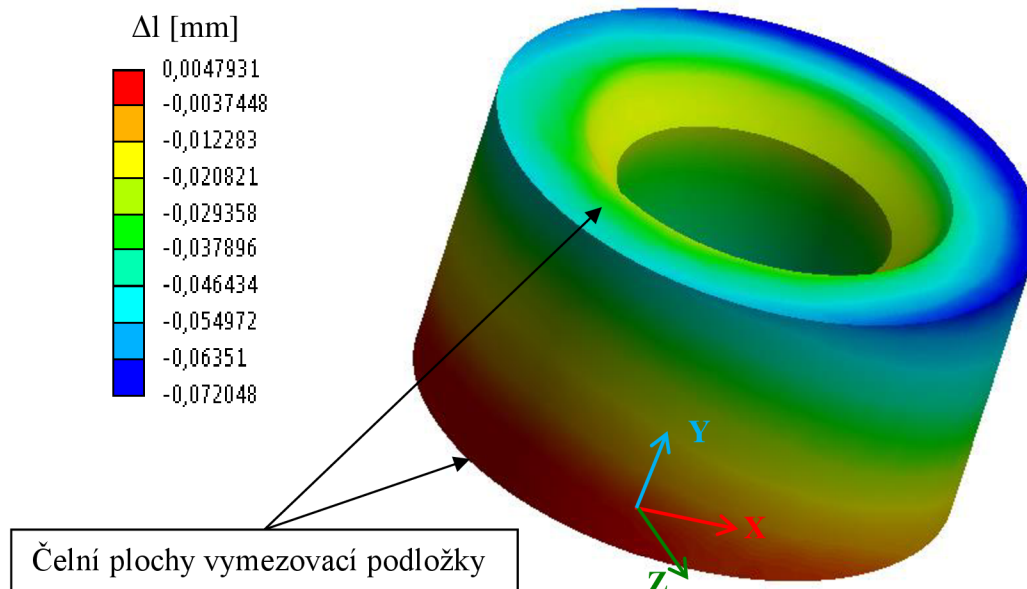
a pohybuje se o velikosti 0,03 mm na celé délce vymezovače. Navíc hlavní funkce vymezovače vůle je zabránění příliš velkým deformacím vnějšího kroužku a dělicího disku v ose Y. Tento jev by způsobil sevření rozváděcích lopatek a tím i znemožnění jejich pootáčení. Co se týká prodloužení vymezovače vůle ve směru osy Y, tak se pohybuje v hodnotě necelé 0,1 mm.



Obr. 62 Deformace vymezovače vůle

5.4.3 DEFORMACE PODLOŽKY VYMEZOVAČE

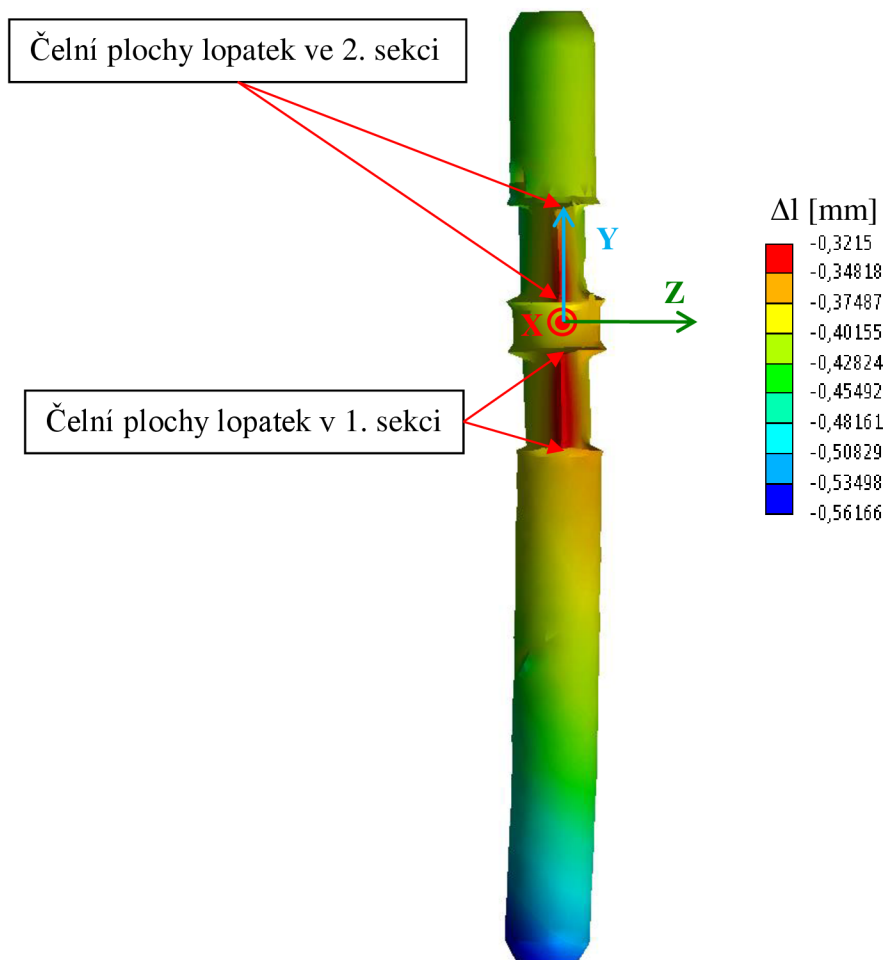
Stejně jako u vymezovače vůle, byl cíl pozorování deformace zaměřen na posuv čelních ploch vymezovací podložky v ose Y. Funkce této podložky se stejná jako u vymezovače vůle s rozdílem, že zajišťuje dostatečnou vůli v druhé sekci, a to mezi vnitřním kroužkem a dělicím diskem. Maximální deformace ve směru zmíněné osy vymezovací podložky je 0,04 mm. Tato deformace je také tlaková. Další deformace v ose Y na jiných místech této součásti se pohybují okolo 0,02 mm. Tuto tlakovou deformaci lze vidět na obr. 63, kde je vidět i lokální rozšíření vnějšího průměru na obou koncích podložky. Co se týče průměru díry podložky vymezovače tak její rozměr se zvětší o 0,05 mm.



Obr. 63 Deformace podložky vymezovače

5.4.4 DEFORMACE ROZVÁDĚCÍ LOPATKY

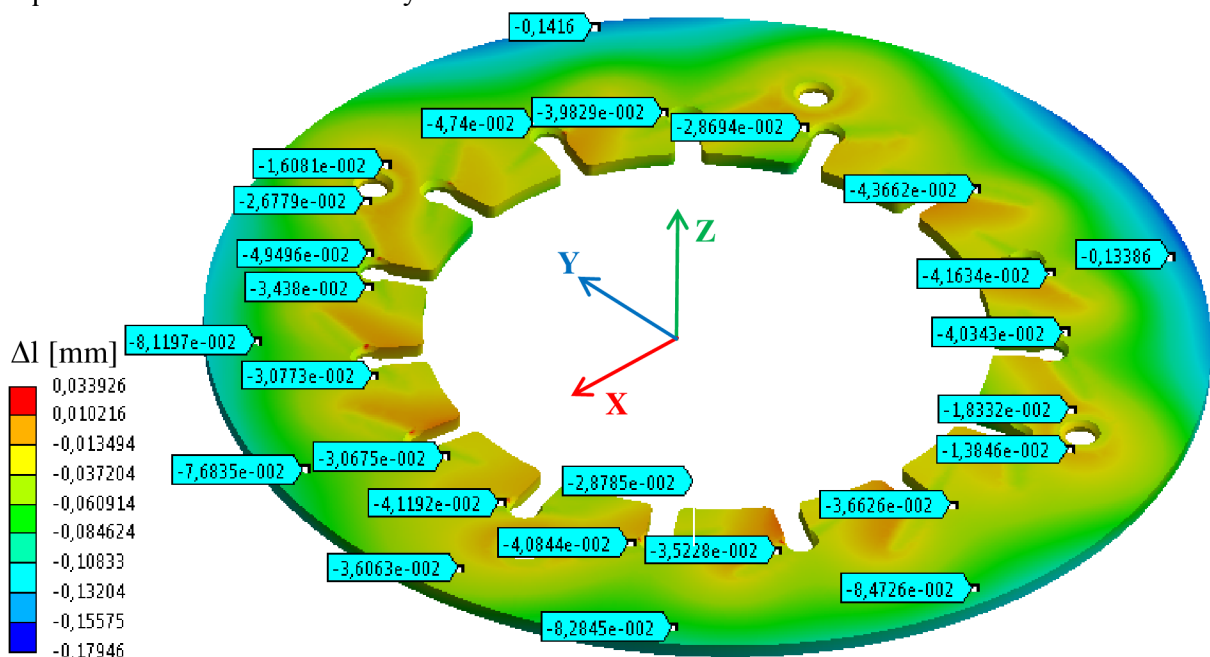
Nejdůležitější součástí v rámci pozorování deformace je rozváděcí lopatka. Je to z důvodu, že lopatka není statický člen turbodmychadla, ale slouží k usměrňování proudu výfukových plynů na turbínu, tedy musí být zajištěno její pootáčení. První ze sledovaných deformací je opět poměrné prodloužení v ose Y na čelních plochách lopatky, které jsou však různé na dolní (v 1. sekci) a horní (v 2. sekci) části lopatky. Je to dáno z důvodu odlišné míry tepelného namáhání v jednotlivých sekcích. Dolní část lopatky je v místě své špičky deformována 0,02 mm a v zadní části se poměrné prodloužení pohybuje okolo 0,04 mm. Opět se jedná o tlakovou deformaci. Co se týká horní části lopatky umístěné v druhé sekci tak její deformace jsou rovněž tlaková. Na špičce lopatky má hodnotu 0,03 mm a v zadní části dosahuje hodnot necelých 0,03 mm. Současně dojde i k jistému posunu lopatky ve zmíněné ose lokálního souřadného systému, a to o maximální hodnotu 0,2 mm. Další pozorovanou deformací je zalomení čepu lopatky a to o 0,05 mm v celé funkční délce daného čepu (Obr. 64). Na obrázku lze také vidět barevnou legendu deformovaných oblastí dané součásti, kde je možné vidět i jejich hodnoty ve směru osy Z. Tyto hodnoty poměrného prodloužení jsou v záporných číslech. Je to způsobeno orientací lokálního souřadného systému dané lopatky a výsledkem tepelné dilatace celé sestavy. Osa Z je nasměrována do středu turbínové skříně, ale tepelná roztažnost způsobuje, že se poloha lopatky od zmíněného středu vzdaluje. To je také důvod, proč hodnoty v legendě nejsou skutečnými hodnotami deformace samotné lopatky. Reálné velikosti poměrných prodloužení lze získat odečtením dvou hodnot deformací na protilehlých plochách.



Obr. 64 Deformace rozváděcí lopatky

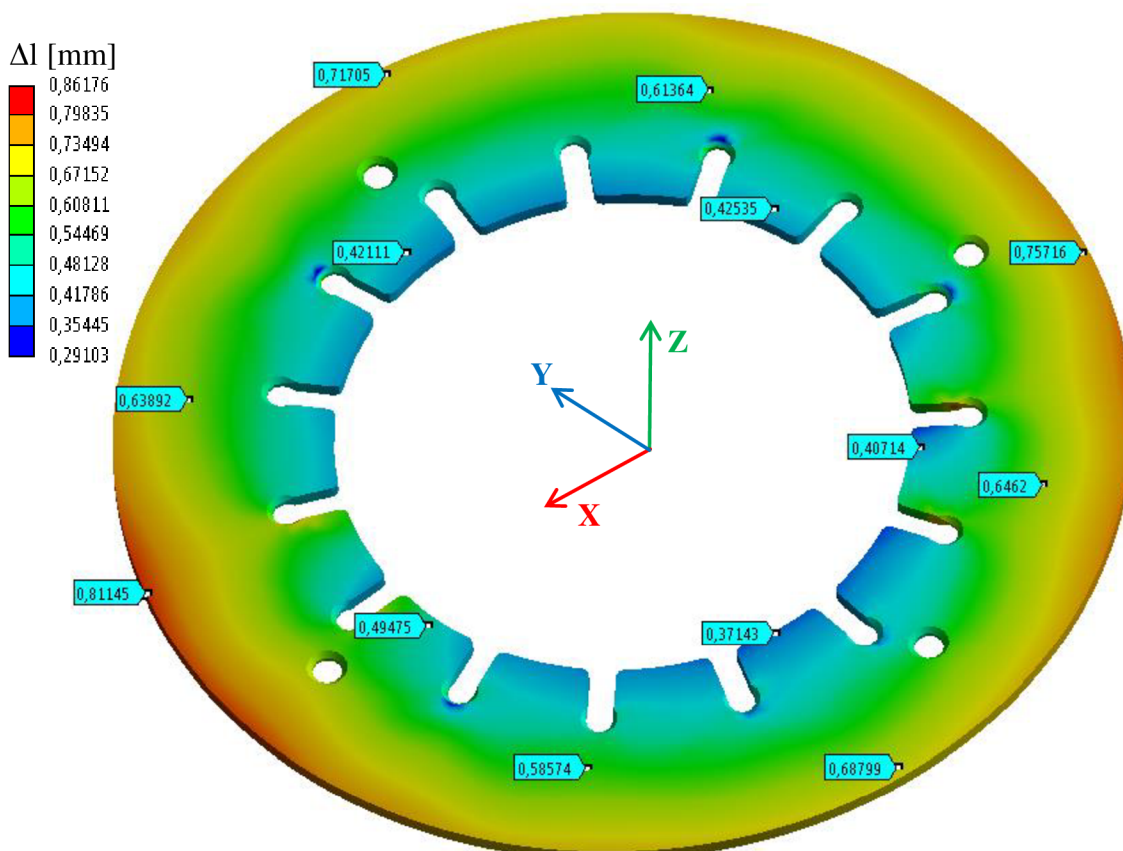
5.4.5 DEFORMACE DĚLÍČÍHO DISKU

Dělicí disk patří mezi jedny z nejzatěžovanějších částí turbínové skříně. Sice patří mezi statické prvky, ale je nepřetržitě namáhán tlakovými pulzy střídavě na obou čelních plochách. Navíc je celá součást vystavena teplotnímu namáhání. Na dělicím disku byly pozorovány deformace na plochách ve směru osy Z. Důvodem bylo zajištění spolehlivé funkce lopatek. Deformace na těchto čelních plochách by měly korespondovat s deformacemi na axiálních plochách lopatek, což je vidět na obr. 65. Velikosti těchto poměrných prodloužení v místech uložení lopatky se pohybují v intervalu od 0,03 do 0,05 mm. Tento rozptyl je dán různými teplotami ohřevu a tím i odlišnými deformacemi.



Obr. 65 Deformace dělicího disku v axiální směru

V pozicích, kde jsou uloženy vymežovače vůle a podložky vymežovače se deformace pohybují v nižších hodnotách, a to mezi 0,01 mm a 0,03 mm. Navíc je na zmíněném obrázku vidět, že členy vymežující vůli opravdu fungují a zamezují větším deformacím dělicího disku. Lze to vidět jako žluté oblasti sahající až téměř ke vnějšímu okraji daného disku. Největší deformace ve směru osy Z vznikají v oblastech na vnějším obvodu, kde není v žádné blízkosti umístěn právě zmíněný člen vymežující vůli. Je možné je vidět jako světle modré oblasti, kde se poměrné prodloužení pohybuje okolo 0,14 mm. Další pozorovanou oblastí jsou díry pro vymežovače vůle a rozváděcí lopatky. Díra pro vymežovač vůle zvětší svůj průměr o 0,06 mm. Podobně je to i u díry pro lopatku s hodnotou deformace 0,04 mm. Co se týče poměrných prodloužení dělicího disku v radiálním směru tak jeho maxima se pohybují okolo 0,8 mm na vnějším obvodu (červená oblast). Minimální hodnoty radiální deformace je možné najít naopak na vnitřním obvodě o velikostech přibližně 0,42 mm (Obr. 66).



Obr. 66 Deformace dělicího disku v radiálním směru

5.4.6 POSOUZENÍ FUNKČNOSTI VNT LOPATEK

Po vyhodnocení všech deformací je nutné posoudit, zda by rozváděcí lopatky VNT mechanismu stále plnily svůj účel. K tomuto účelu slouží následující tabulka 6, která vyjadřuje výsledné vůle mezi danými komponenty. Tyto hodnoty byly naměřeny při režimu turbodmychadla při plném zatížení.

Tab. 6 Výsledné vůle mezi VNT lopatkou a ostatními komponenty

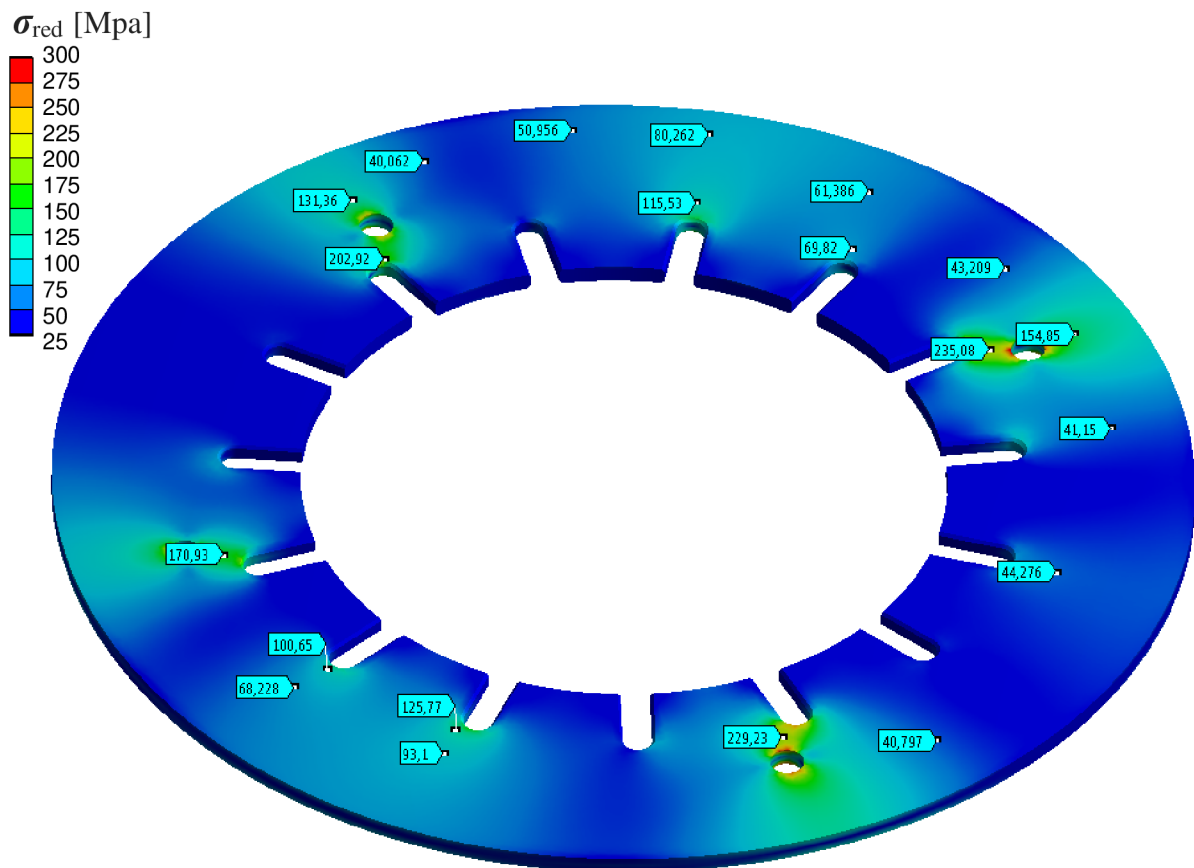
Výsledné vůle mezi VNT lopatkou a ostatními komponenty	Výsledné vůle
Vnější kroužek / Lopatka v 1. sekci	0,07 mm
Lopatka v 1. sekci / Dělicí disk	0,07 mm
Dělicí disk / Lopatka v 2. sekci	0,07 mm
Lopatka v 2. sekci / Vnitřní kroužek	0,06 mm
Čep lopatky / Díry v dělicím disku, vnějším a vnitřním kroužku	0,03 mm

5.5 NAPĚŤOVÁ ANALÝZA

V rámci této analýzy bylo přednostně posuzováno redukované napětí dané součásti. Analýzou jsou provedeny čistě klíčové součásti, u kterých by bylo velké riziko jejich překročení meze pružnosti, a tedy počátek plastické deformace.

5.5.1 NAPĚTÍ V DĚLÍCÍM DISKU

Jelikož se jedná o zcela novou komponentu zaimplementovanou do dané sestavy, je potřebné vědět, kde nastávají kritická místa vzniku případných plastických deformací. Na obr. 67 je vidět, že místa na dělicím disku v okolí umístění podložek a vymezovačů vůle jsou velmi ovlivněna, což se dalo předpokládat. Redukované napětí ve zmíněné lokalizaci stoupá až k hodnotám okolo 300 MPa, kde aplikovaný materiál již překročil svou mez pružnosti a dochází zde k plastické deformaci. Avšak tento aspekt může být způsoben nepřesným výpočtem v oblasti kontaktu s některým z vymezovacích prvku vůle.



Obr. 67 Redukované napětí dělicího disku

Dalším výsledkem napěťové analýzy dělicího disku je skutečnost, že umístění děr pro vymezovače vůle nejsou zcela adekvátní. Redukované napětí se zde prolíná a napětím vzniklým v drážce pro rozváděcí lopatku. Vzniká tedy jakýsi napěťový most, ve kterém redukované napětí dosahuje hodnot v rozmezí od 170 do 235 MPa a který by mohl způsobovat vážnější problémy v oblasti plastické deformace. Lze si také povšimnout, že v určitých drážkách pro lopatky je koncentrace napětí vyšší než u ostatních drážek. U některých se pohybuje okolo 110 MPa a u některých zase v hodnotách 50 až 70 MPa. Je to způsobeno právě vyšším teplotním gradientem mezi jednotlivými částmi dělicího disku. Z toho důvodu je nutné zvážit nejen příhodnější umístění děr pro vymezovače vůle v radiálním směru, ale také jejich radiální pootočení, aby se nekombinovala malá vzdálenost mezi dírou pro vymezovače a drážkou pro lopatku současně s místem výskytu teplotního gradientu.

5.5.2 VÝPOČET BEZPEČNOSTI

Pro adekvátnější posouzení z hlediska pevnostní kontroly slouží výpočet koeficientu bezpečnosti. Vzorec pro výpočet součinitele bezpečnosti je dán následujícím vztahem.

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{red}}$$

kde:

R_e [MPa] mez kluzu daného materiálu

σ_{red} [MPa].....redukované napětí

$k[-]$ koeficient bezpečnosti

V první řadě se bezpečnost měřila v místě vzniku napěťového mostu, tedy mezi dírou pro vymezovače vůle a drážkou pro uložení čepu lopatky. Jelikož jsou zde 4 takto kritická místa tak pro každé z nich byla spočítána bezpečnost.

$$k_1 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{207}{235} = 0.88$$

$$k_2 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{207}{229} = 0.90$$

$$k_3 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{207}{203} = 1.02$$

$$k_4 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{207}{171} = 1.21$$

Z výsledku výpočtu je patrné, že 2 tato místa, kde byly spočítány koeficienty bezpečnosti k_1 a k_2 nevyhovují z hlediska bezpečnosti a vzniká zde plastická deformace materiálu. Zbylé součinitele k_3 a k_4 se naopak pohybují mírně nad hraniční hodnotou 1. Zmíněný výpočet byl proveden na hranici meze kluzu, kde daný materiál přechází z elastické tzv. vratné deformace na plastickou. Proto, jak již bylo zmíněné v předchozí kapitole, je nutné zvážit vhodnější pozice děr pro vymezovače vůle, aby nevznikala tato nežádoucí koncentrace napětí nebo aplikovat vhodnější materiál s vyššími hodnotami meze kluzu a pevnosti, a tím dosáhnout určité optimalizace v rámci napěťové analýzy.

Dalším místem vhodným pro provedení výpočtu bezpečnosti jsou drážky pro čepy lopatek, které však nejsou v blízkém okolí s dírou pro vymezovače vůle. Pro tento účel byly vybrány opět 4 nejkritičtější místa, tedy s rostoucími hodnotami redukovaného napětí.

$$k_5 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{207}{125} = 1.66$$

$$k_6 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{207}{115} = 1.80$$

$$k_7 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{207}{100} = 2,07$$

$$k_8 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{207}{70} = 2,96$$

Součinitel bezpečnosti v těchto místech se blíží k hodnotě okolo 2 z čehož vyplývá, že dané oblasti svou geometrií při daném zatížení vyhovují pevnostní kontrole.

Co se týká redukovaného napětí dělicího disku na místech, kde nevzniká její vyšší nebo nadměrná koncentrace, tak se průměrně pohybuje od 40 do 50 MPa. Znamená to tedy, že podle výpočtu bezpečnosti tyto plochy zcela vyhovují.

$$k_9 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{207}{50} = 4,14$$

5.6 OPTIMALIZACE NAPĚŤOVÉ ANALÝZY

Z důvodu překročení meze kluzu a tím pádem i koeficientu bezpečnosti bylo nutné optimalizovat napěťovou analýzu. Jako jednou z variant se nabízí aplikace vhodnějšího materiálu.

5.6.1 APLIKACE VHODNĚJŠÍHO MATERIÁLU

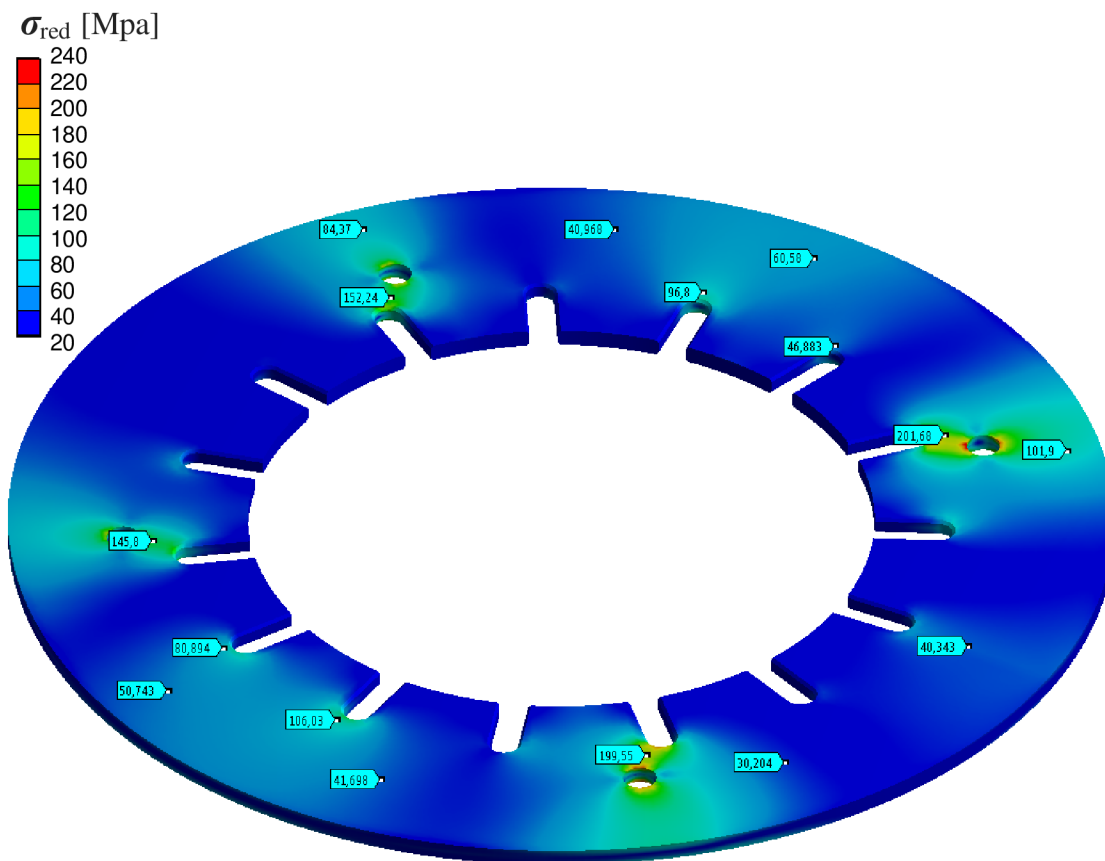
Pro tento účel byl zvolen materiál ČSN 17 248 (DIN 1,4828; X15CrNiSi20-12). Jedná se o austenitickou žáruvzdornou ocel, která v oxidační atmosféře odolává teplotám do 950 °C. Za přítomnosti síry se však tato horní hranice použitelnosti snižuje na 850 °C. V prostředí redukčního charakteru s obsahem síry se žáruvzdornost oceli rapidně snižuje na aplikovatelnou hranici 750 °C. Tato ocel také dobře snáší i prostředí obsahující dusík i při nízkých hodnotách kyslíku. V následující tabulce, lze vidět další vlastnosti zvoleného materiálu viz. tab. 7.

Tab. 7 Vlastnosti zvolené oceli ČSN 17 248

Vlastnosti zvolené oceli ČSN 17 248	
Mez kluzu	230 MPa
Mez pevnosti	550-750 MPa
Koeficient tepelné roztažnosti	$18 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

5.6.2 OPTIMALIZOVANÉ NAPĚTÍ V DĚLÍCÍM DISKU

Na následujícím obrázku 68 lze vidět vykreslení redukovaného napětí v dělicím disku, na kterém byla aplikována zmíněná ocel. Napěťové mosty mezi dírou pro vymezovače vůle a drážkou pro čep VNT lopatky opětovně vznikají, nicméně hodnoty naměřeného napětí jsou nižší než při použití původního materiálu. Redukované napětí se zde pohybuje v rozmezí přibližně od 150 do 200 MPa. Obdobně i místa jako jsou drážky pro lopatky vykazují nižší hodnoty koncentrace redukovaného napětí (50 až 100 MPa).



Obr. 68 Napětí v dělicím disku po optimalizaci napěťové analýzy

5.6.3 VÝPOČET BEZPEČNOSTI PO OPTIMALIZACI

Opětovně se bezpečnost měřila v místech vzniku napěťového mostu. Z následujících rovnic lze vidět, že aplikace vhodnější oceli do výpočtu změnila hodnoty koeficientů bezpečnosti a dané lokální koncentrace napětí již vyhovují v rámci kontroly bezpečnosti. V těchto už nevznikají žádné plastické deformace a materiál se deformuje elasticky, tedy pouze do hodnoty meze kluzu.

$$k_1 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{230}{202} = 1.14$$

$$k_2 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{230}{200} = 1.15$$

$$k_3 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{230}{203} = 1.51$$

$$k_4 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{230}{171} = 1.58$$

Co se týká výpočtu bezpečnosti v drážkách pro čepy VNT lopatek, tak pochopitelně i zde byly zjištěny nižší hodnoty redukovaného napětí. Koeficienty bezpečnosti se v nejkritičtějších lokalitách pohybovali v rozmezí hodnot přibližně od 2 do 3 a taktéž vyhovují pevnostní kontrole

$$k_5 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{230}{106} = 2.17$$

$$k_6 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{230}{97} = 2.37$$

$$k_7 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{230}{81} = 2.84$$

$$k_8 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{230}{47} = 4.90$$

Redukovaná napětí dělicího disku na ostatních místech, které nejsou tak kritická se pohybuje průměrně od 50 do 30 MPa. Respektive dosahují podobných hodnot jako v předešlé napěťové analýze.

$$k_9 = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{207}{50} = 4.14$$

ZÁVĚR

Při návrhu bylo vycházeno z konvenční turbínové skříně VNT, která byla upravena tak, aby dokázala zachovat tlakové pulzy proudící z výfukového potrubí v oddělené formě až na turbínové kolo. Tato konstrukční úprava byla dosažena použitím dělicího disku uloženého mezi vnější a vnitřní kroužek. Dělicí disk byl opatřen dírami pro čepy lopatek a vymezoavače vůle. Z montážních důvodů byl disk vybaven také drážkami pro uložení čepů lopatek. Použitím zmíněného dělicího disku bylo potřebné upravit i ostatní komponenty jako jsou rozváděcí lopatky a vymezoavače vůle. Geometrie lopatky byla upravena tak, aby byla umožněna její montáž do dělicího disku, vnějšího a vnitřního kroužku a současně zajištěna její funkčnost, jak je popsáno v kapitole 4.3. Další konstrukční úpravou prošel původní vymezoavač vůle, který byl rozdělen na 2 části. Důvod tohoto rozdělení je opět použití dělicího disku. Ve finální konstrukční verzi je tedy použito nového (modifikovaného) vymezoavače vůle a podložky vymezoavače.

Dalším cílem této práce je pevnostní kontrola konečného konstrukčního návrhu s ohledem na navržené tolerance uložení a funkčnost jednotlivých součástí. Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.6, cílem bylo nalezení stavu, ve kterém se pozorované součásti nejvíce deformují. Následně posouzení, zda stále dokážou plnit svůj účel. Jedná se především o rozváděcí lopatky, kde bylo nutné zjistit funkčnost jejich pootáčení. Všechny posuzované součásti byly pozorovány v oblasti největšího teplotního ohřevu, kde docházelo k největším dilatacím.

Z výsledků teplotní a deformační analýzy a následně posouzení funkčnosti VNT lopatek byly zjištěny výsledné vůle (tab. 6). Tyto vůle se sice nepatrně zmenšily, ale stále jsou dostačující, aby nedocházelo k výraznému zadírání čelních ploch lopatek o ostatní komponenty. To znamená, že všechny prvky vymezující vůli v obou sekcích plnily svou funkci a zamezily velkým axiálním deformacím dělicího disku, vnějšího a vnitřního kroužku. Čelní plochy těchto zmíněných komponentů se díky teplotním dilatacím dělicího disku, vnějšího a vnitřního kroužku tlakově zdeformovaly průměrně v hodnotě 0,04 mm. Díky tlakovým pulzacím došlo také k nepatrné tlakové deformaci čelních ploch lopatek, jejichž velikost se pohybuje okolo 0,02 mm. Dalším důležitým výsledkem pevnostní kontroly bylo zalomení čepu lopatky ve celé jeho funkční délce (v ose Y) o hodnotu 0,04 mm (kapitola 5.6.3). Díky této skutečnosti se i výrazně zmenšila vůle mezi dírami, ve kterých je čep lopatky uložen. Výsledná vůle v této pozorované oblasti je při největším zatížení lopatky 0,03 mm, což by stále ještě umožňovalo její pootáčení. Další zkoumanou deformací je radiální poměrné prodloužení dělicího disku, které se z důvodu teplotního zatížení roztáhlo o 1,56 mm na svém průměru. Díky této zjištěné deformaci by bylo nutné patřičně upravit litinový housing turbínové skříně, aby nedocházelo ke kolizím s již zmíněným diskem. Následující problém zvolené konstrukce by jistě byla ovládací síla samotného VNT mechanismu. Je to způsobeno větším množstvím stykových ploch lopatky s ostatními komponenty, a tím i větším třením mezi nimi. Tedy elektrický člen, který řídí rozváděcí lopatky a reguluje proud spalin by musel na daný mechanismus působit větším kroutícím momentem.

V rámci napěťové analýzy dělicí disk měl určitá místa, kde vznikala velká koncentrace napětí. Jednalo se především o lokality, kde je v blízkosti umístěna drážka pro uložení čepu lopatky vůči díře pro čep vymezoavače vůle. Zde docházelo k překročení bezpečnosti a tvorbě plastických deformací. Tyto místa by bylo nutné následně optimalizovat např. zvětšením vzdálenosti mezi danými geometrickými prvky nebo aplikací vhodnějšího materiálu. Ostatní

lokality, kde vnikaly také vyšší hodnoty napětí, už vyhovovali a koeficient bezpečnosti se pohyboval v hodnotách okolo 2 a vyšší.

Další kapitola se věnovala optimalizaci napěťové analýzy, kde byl vnesena ocel s vyššími hodnotami meze kluzu a pevnosti. Následně se opakovala kontrola bezpečnosti, ve které již dané lokality s vysokými koncentracemi redukovaného napětí již vyhovovali pevnostnímu výpočtu. Nedocházelo k překročení meze kluzu a daná komponenta se deformovala pouze v oblasti elastické deformace.

Tato práce poskytuje potřebné informace a data pro návrh turbínové skříně VNT s oddělenými pulzy ve výfukovém potrubí. Upozorňuje také na jisté problémy a komplikace, díky kterým by bylo potřeba upravit ostatní části turbodmyhadla, které jsou ovlivněny danou konstrukční úpravou.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HEISLER, Heinz. *Advanced engine technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. ISBN 156091-734-2.
- [2] *Blow off ventil* – Wikipedie, Otevřená Encyklopedie. [online] Dostupné na URL: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Blow-off_ventil> [cit. 2017-10-19]
- [3] *Sportovní autodoplňky.cz* – Blow off ventily [online] Dostupné z URL: <<https://www.sportovniautodoplňky.cz/motor/blow-off-ventily>> [cit. 2017-10-19]
- [4] CETKOVSKÝ, M. *Simulace silového zatížení rozváděcího VNT mechanismu turbodmychadla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura.
- [5] *Turbotechnics* – VNT Turbos. [online] Dostupné z URL: <<http://www.turbotechnics.com/turbochargers/vnt-turbos/>> [cit. 2017-10-25]
- [6] *AUTOZNALOSTI.CZ* – Turbodmychadlo. [online]. 2008. Dostupné z URL: <www.autoznanosti.cz/index.php/motor/8-turbodmychadlo.html> [cit. 2017-10-25]
- [7] HOFMANN, K. *Alternativní pohony*. Studijní opory, VUT FSI Brno, 2003. 73s.
- [8] NUNNEY, M. J. *Light and Heavy Vehicle Technology*. 4. vyd. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007. 671 s. ISBN 978-0750680370
- [9] Cummins forum – General diesel discussion. Time for a new VGT thread. [online]. Dostupné z URL: < <http://www.cumminsforum.com/forum/general-diesel-discussion/1906-time-new-vgt-thread.html> >
- [10] *AUTO.CZ* - Opel Twin Turbo: dva stupně ke zlaté. [online]. 2004. Dostupné z URL: <<http://www.auto.cz/opel-twin-turbo-dva-stupne-ke-zlate-17089>> [cit. 2016-11-1]
- [11] SVOBODA, R. *Současné trendy ve zvyšování výkonu zážehových a vznětových motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.
- [12] HIERETH, Hermann a P PRENNINGER. *Charging the internal combustion engine*. New York: Springer, 2007, 268 s. ISBN 978-3-211-33033-3
- [13] BARTONÍČEK, L. *Přepřehování pístových spalovacích motorů*. [online]. Studijní opory, Technická univerzita v Liberci, 2004, 76 s. [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <<http://www.ksd.tul.cz/studenti/texty/PZP-preplnovani-PSM.pdf>>.
- [14] *Autolexikon.cz* – Turbo High pressure. [online]. Dostupné z URL: < <http://cs.autolexikon.net/articles/thp-turbo-high-pressure/>> [cit. 2017-11-16]
- [15] *Pulzní přepřehování*. Honeywell, firemní materiály.

- [16] *Metoda konečných prvků* – Wikipedie, Otevřená Encyklopedie. Dostupné na URL: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF> [cit. 2017-1-24]
- [17] APETAUR, M. *Výpočtové metody ve stavbě motorových vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 1984. 145s.
- [18] *EngiSSol* – analysis libraries. [online]. Dostupné z URL: <<http://www.engissol.com/analysis-libraries.html>> [cit. 2017-1-25]
- [19] VRBKA, J. *Aplikovaná mechanika*. Učební text, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 46 s.
- [20] *SNIMACE PRO MERENI TEPLoty* – Experimentální metody. Výukové prezentace, Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní [online]. Dostupné z URL: <http://www.kst.tul.cz/podklady/experimentalnimetody/prednasky/p%2010_snimace_teploty.pdf>
- [21] Mereni teploty – Wikiskripta. [online]. Dostupné z URL: <https://www.wikiskripta.eu/w/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD_teploty>
- [22] *Telemeter Electronic* – Miniaturní termočlánky. [online]. Dostupné z URL: <<https://telemeter.info/cz/miniaturni-termoclanky>>
- [23] ČERNÝ, M. *Termoelektrické články*. Praha: Ústav pro výzkum a využití paliv, 1985.
- [24] VAJDÁK, M. *Metody měření teploty spalin před turbodmychadlem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 66 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
- [25] *Polovodičové sensory teploty*. Projekty, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informačních technologií, 2004. [online]. Dostupné z URL: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/bmms/projekty_2004/Benes/soubory/pols.html>
- [26] *Termistor* – Wikipedie, Otevřená Encyklopedie. [online]. Dostupné na URL: <<https://cs.wikipedia.org/wiki/Termistor>>
- [27] *Edumat.cz* – Teplota. [online]. Dostupné z URL: <<http://www.edumat.cz/texty/teplota.pdf>>
- [28] *Automatizace.hw.cz* – Přehled principů el. měření teploty 2. díl. [online]. Dostupné z URL: <<https://automatizace.hw.cz/rehled-principu-el-mereni-teploty-2-dil-bezdotykove>>
- [29] *Automatizace.hw.cz* – Radiační pyrometry. [online]. Dostupné z URL: <<https://automatizace.hw.cz//clanek/2005101401>>
- [30] *Senzorika.leteckafakulta.sk* – Termoelektrické principy snímačů. [online]. Dostupné z URL: <<http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/241>>

- [31] *Automatizace.hw.cz* – Co jsou BOLOMETRY a MIKROBOLOMETRY? [online]. Dostupné z URL: < <https://automatizace.hw.cz//clanek/2005111601> >
- [32] *Snímače tlaku* – Senzorika a senzorické soustavy. Výukové prezentace, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství [online]. Dostupné z URL: < <http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-713/vyuka/senzorika/prednasky/prednaska10-tlak.pdf> >
- [33] KADLEC, K. Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 1, 2, 3). Automa, 2007 [online]. Dostupné z URL: < <http://automa.cz> >
- [34] *Snímače tlaku* – Veřejné lekce, Elektronická učebnice. [online]. Dostupné z URL: < <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/961> >
- [35] *Měření tlaku* – Technologická měření, Elektronická učebnice. [online]. Dostupné z URL: < <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/MRT/F4/F4-ram.htm> >
- [36] *Snímače otáček* – Sensory pro kontrolu pohybu. [online]. Dostupné z URL: < https://www.ifm.com/cz/cs/category/015/015_020 >
- [37] JEHLÁŘ, Z. *Vliv externích elektromagnetických polí na funkci snímačů otáček*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 61 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.
- [38] FROLLO, I. HALAJ, M. *Meranie frekvencie otáčania v technické meranie*. Zväzok II. Viedeň, Rakúsko, 2005. ISBN 80-89112-04-8. S. 436- 454.
- [39] *Ajptech.cz* – Kapacitní snímače. [online]. Dostupné z URL: < <http://www.ajptech.cz/produkty/prumyslove-senzory/baumer-senzory/snimace/kapacitni-snimace/> >
- [40] *Spszengrova.cz* – Snímače otáček, Snímače spalovacích motorů. [online]. Dostupné z URL: < https://www.spszengrova.cz/texty/texty/AUE/AUE_snimace_spalovacich_motoru_JAM.pdf >

SEZNAM PŘÍLOH

P1 Model turbínové skříně	digitální data CD
P2 Výkres dělicího disku	I
P3 Výkres rozváděcí lopatky	II
P4 Výkres vymežovače vůle.....	III
P5 Výkres podložky vymežovače.....	IV

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Turbodmychadlo s obtokovým ventilem [4]	12
Obr. 2 Turbodmychadlo s rozváděcími lopatkami [4]	13
Obr. 3 Turbodmychadlo se změnou šířky statoru turbíny VGT [9]	14
Obr. 4 Turbodmychadlo Garrett VAT 25 [6]	15
Obr. 5 Regulační režimy ve voze Opel Vectra OPC Twin Turbo [10]	16
Obr. 6 Schéma zapojení válců do sekcí [7]	17
Obr. 7 Turbodmychadlo s dělenou turbínovou skříní Twin-scroll [14]	18
Obr. 8 Schéma řešení Pulse-Convertoru [13]	18
Obr. 9 Přívod tlakových pulzů od motoru do turbodmychadla [15]	19
Obr. 10 Interference tlakových pulzů před turbínu [15]	19
Obr. 11 Spojení válců při rovnotlakém přeplňování [7]	20
Obr. 12 2D síť pro MKP analýzu žebra, síť je jemnější v místech u objektu zájmu [18]	21
Obr. 13 Typy jednorozměrných prvků [15]	22
Obr. 14 Typy dvourozměrných prvků [17]	23
Obr. 15 Typy trojrozměrných prvků [17]	24
Obr. 16 Pascalův trojúhelník [17]	25
Obr. 17 Princip funkce termočlánku	26
Obr. 18 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě [27]	27
Obr. 19 Graf lineární závislosti konečné termometrické veličiny na teplotě [27]	28
Obr. 20 Schéma principu měření teploty bezkontaktními snímači [28]	28
Obr. 21 Tenká destička pyroelektrického senzoru [30]	30
Obr. 22 Schéma principu funkce pyroelektrického snímače [30]	30
Obr. 23 Konstrukce snímací plochy bolometrického snímače [28]	31
Obr. 24 Snímání tepelného záření pomocí mikrobolometrů [28]	31
Obr. 25 Schéma snímače tlaku s elektrickým výstupem [33]	32
Obr. 26 Potenciometrické (vlevo) a indukčnostní snímání deformace měřícího prvku [33] ...	33
Obr. 27 Princip činnosti kapacitního čidla (vlevo) a graf citlivosti kapacitního čidla (vpravo) [34]	33
Obr. 28 Schéma uspořádání membrány (vlevo) a konstrukční provedení měřící buňky (vpravo) [33]	35
Obr. 29 Krystal křemene s piezoelektrickým jevem [33]	36
Obr. 30 Schéma piezoelektrického snímače [33]	37
Obr. 31 Graf přehledu rozdělení snímačů otáček [38]	38
Obr. 32 Princip činnosti funkce kapacitního snímače otáček [38]	38
Obr. 33 Schéma snímače otáček (vlevo) a typické výstupní signály (vpravo) [38]	39
Obr. 34 Princip funkce magnetoelektrického snímače otáček [38]	40
Obr. 35 Princip pulzního přeplňování (vlevo), variabilní geometrie lopatek „VNT“ (vpravo) [14]	41
Obr. 36 Tvarové žebro rozváděcí lopatky	42
Obr. 37 Příklad kolizního místa mezi žebrem lopatky a vymezořovačem vřele	42
Obr. 38 Konstrukční návrh verze 1	43
Obr. 39 Umístění dělicího disku v sestavě	44
Obr. 40 Dělicí disk	44
Obr. 41 První část lopatky (zelená), druhá část lopatky (žlutá)	45
Obr. 42 Modifikovaný vymezořovač vřele (oranžová), podložka vymezořovače (hnědá)	45
Obr. 43 Konstrukční návrh verze 2	46
Obr. 44 Dělicí disk s drážkami pro čepy lopatek (vlevo), rozváděcí lopatka verze 3 (vpravo)	47

Obr. 45 Podélný řez v místě uložení lopatky.....	48
Obr. 46 Konstrukční návrh verze 3	48
Obr. 47 Výjimka použité oceli S235JR na daných komponentech	51
Obr. 48 Mřížka vymezače vůle.....	52
Obr. 49 Mřížka podložky vymezače	52
Obr. 50 Mřížka dělicího disku.....	53
Obr. 51 Detail aplikované velikosti elementů v oblasti styku ostatních součástí.....	53
Obr. 52 Mřížka rozvodové lopatky.....	54
Obr. 53 Příklad rozdělení dělicího disku	54
Obr. 54 Graf radiálního rozložení procentuálních poměrů teplot v turbínové skříni	55
Obr. 55 Nastavení počtu výpočtových kroků a mezikroků	56
Obr. 56 Rozložení procentuálních poměrů teplot v 1. sekci	56
Obr. 57 Rozložení procentuálních poměrů teplot ve 2. sekci.....	57
Obr. 58 Provázání termální a strukturální analýzy	58
Obr. 59 Průběh tlakové pulzace v 1. sekci	58
Obr. 60 Průběh tlakové pulzace v 2. sekci	58
Obr. 61 Okrajová podmínka odebrání stupňů volnosti.....	59
Obr. 62 Deformace vymezače vůle	60
Obr. 63 Deformace podložky vymezače	60
Obr. 64 Deformace rozváděcí lopatky.....	61
Obr. 65 Deformace dělicího disku v axiální směru.....	62
Obr. 66 Deformace dělicího disku v radiálním směru.....	63
Obr. 67 Redukované napětí dělicího disku.....	64
Obr. 68 Napětí v dělicím disku po optimalizaci napěťové analýzy	67

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Označení a kombinace kovů v termočláncích [20]	26
Tab. 2 Splnění sledovaných parametrů konstrukčního návrhu verze 1	43
Tab. 3 Splnění sledovaných parametrů konstrukčního návrhu verze 2	47
Tab. 4 Splnění sledovaných parametrů konstrukčního návrhu verze 3	49
Tab. 5 Vlastnosti zvolené oceli ČSN 17 255	50
Tab. 6 Výsledné vůle mezi VNT lopatkou a ostatními komponenty	63
Tab. 7 Vlastnosti zvolené oceli ČSN 17 248	66