



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# PEVNOSTNĚ DEFORMAČNÍ ANALÝZA UCHYCENÍ FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC NA TRAKTORU ZETOR FORTERRA

STRESS-STRAIN ANALYSIS OF DIESEL PARTICULATE FILTER SUPPORT ON TRACTOR  
ZETOR FORTERRA

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PETR KUČERA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. RADIM DUNDÁLEK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Petr Kučera

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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:

**Pevnostně deformační analýza uchycení filtru pevných částic na traktoru Zetor Forterra**

v anglickém jazyce:

**Stress-strain Analysis of Diesel Particulate Filter Support on Tractor Zetor Forterra**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte pevnostně deformační analýzu uchycení filtru pevných částic na traktoru. Posuďte chování stávající konstrukce ve frekvenční doméně. Navrhněte způsoby pro nápravná opatření.

Cíle diplomové práce:

Získání znalostí o zadané problematice. Osvojení používání výpočtových programů pro analýzu metodou konečných prvků. Provedení pevnostně deformační a modální analýzy stávající konstrukce. Posouzení konstrukčního řešení. Navržení nápravných opatření.

Seznam odborné literatury:

- [1] Koehler, E.: Verbrennungsmotoren, Vieweg ferlag, Braunschweig 1998
- [2] Rauscher, J.: Vozidlové motory, studijní opory, FSI VUT Brno 2003
- [3] HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.
- [4] Baumruk, P.: Příslušenství spalovacích motorů, ČVUT Praha, 1996
- [5] SKOTSKY, Alexander A. Automotive Engines. Springer Verlag, 2009, ISBN 978-3-642-00163-5.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 25.11.2013

L.S.

---

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty



## ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce je MKP analýza konstrukce uchycení filtru pevných částic na traktoru Zetor Forterra. V úvodu práce je krátká rešeršní část zabývající se problematikou emisí u vznětových motorů a způsoby jejich snižování. Následuje část s popisem tvorby výpočtového modelu. Poté je v rámci výpočtů v programu ANSYS Workbench řešena statická pevnostně deformační analýza, modální analýza a také únava. Na základě získaných výsledků je v závěru posouzena bezpečnost celé konstrukce z hlediska mezních stavů, které mohou nastat během provozu traktoru.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Emise, pevné částice, filtr pevných částic, uchycení filtru pevných částic, MKP, pevnostně deformační analýza, modální analýza, únava.

## ABSTRACT

The subject of this master's thesis is the FEM analysis of the construction of the diesel particulate filter support on the tractor Zetor Forterra. The introduction of this thesis is about the theoretical part dealing with the issue of emissions from diesel engines and ways to reduce them. The following part describing the creation of the computational model. Then, the static stress-strain analysis, modal analysis and fatigue analysis are solved in the ANSYS Workbench software. The assessment of the safety of the structure in terms of limit states, that may occur during the operation of the tractor, based on the results of calculations is in the conclusion of the thesis.

## KEYWORDS

Emissions, particulate matters, diesel particulate filter, diesel particulate filter support, FEM, stress-strain analysis, modal analysis, fatigue.



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KUČERA, P. *Pevnostně deformační analýza uchycení filtru pevných částic na traktoru Zetor Forterra*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Radima Dundálka, Ph.D. a s použitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 21. května 2014

.....

Petr Kučera



## PODĚKOVÁNÍ

Za cenné připomínky a rady při tvorbě diplomové práce bych zde chtěl poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Radimu Dundálkovi, Ph.D. Rovněž bych rád poděkoval své rodině za neocenitelnou podporu po celou dobu mého studia na vysoké škole.



## OBSAH

Úvod .....	10
1 Emise vznětových motorů .....	11
1.1 Průběh spalování směsi .....	11
1.1.1 Ideální průběh spalování .....	11
1.1.2 Skutečný průběh spalování .....	12
1.2 Složení výfukových plynů .....	12
1.3 Způsoby snižování obsahu emisí ve výfukových plynech vznětových motorů .....	14
1.3.1 Vnitřní opatření .....	14
1.3.2 Vnější opatření .....	14
1.4 Systém zpětného vedení výfukových plynů .....	15
1.5 Částečný filtr .....	15
1.6 SCR katalyzátor .....	17
1.6.1 Amoniakový SCR katalyzátor .....	17
1.6.2 Uhlovodíkový SCR katalyzátor .....	19
1.7 Oxidační katalyzátor .....	19
1.8 Zásobníkový katalyzátor .....	21
2 Formulace řešených problémů a cíle práce .....	23
2.1 Popis konstrukce uchycení filtru pevných částic .....	24
2.1.1 Vzpěra .....	28
2.1.2 Příruba výfuku a uchycení filtru pevných částic .....	29
2.1.3 Uchycení oxidačního katalyzátoru .....	29
2.2 Použité materiály .....	30
2.2.1 Materiál uchycení filtrační jednotky .....	30
2.2.2 Spojovací materiál .....	30
3 Tvorba výpočtového modelu .....	31
3.1 Metoda konečných prvků (MKP) .....	31
3.1.1 Základní veličiny obecné pružnosti .....	32
3.1.2 Typy úloh v MKP .....	32
3.1.3 Základní kroky v MKP .....	33
3.1.4 Rozdělení prvků používaných v MKP .....	33
3.2 Úprava 3D modelů .....	33
3.2.1 Model výfuku .....	34
3.2.2 Model filtrační jednotky .....	35
3.2.3 Modely svarů .....	36
3.2.4 Výsledná geometrie .....	37





3.3	Vytvoření konečnoprvkové sítě .....	39
3.3.1	Síťování výfuku .....	40
3.3.2	Síťování filtrační jednotky .....	41
3.3.3	Síťování pásových objímek .....	41
3.3.4	Síťování vzpěry .....	42
3.3.5	Síťování příruby výfuku a uchycení filtru pevných částic .....	43
3.3.6	Síťování uchycení oxidačního katalyzátoru .....	44
3.3.7	Síťování svarů .....	44
3.3.8	Výsledná konečnoprvková síť .....	45
4	Modální analýza .....	46
4.1	Zadání materiálových vlastností .....	46
4.2	Výsledky a vyhodnocení modální analýzy .....	46
5	Statická pevnostně-deformační analýza .....	48
5.1	Zadání okrajových podmínek .....	48
5.1.1	Kontakty těles .....	48
5.1.2	Vazby sestavy .....	48
5.1.3	Zatížení .....	49
5.2	Výsledky a vyhodnocení statické pevnostně-deformační analýzy .....	49
6	Únavové namáhání konstrukce uchycení filtrační jednotky .....	52
6.1	Výběr kritického místa .....	52
6.2	Mechanické vlastnosti použitého materiálu .....	52
6.3	Řešení bezpečnosti metodou LSA .....	52
	Závěr .....	55
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	58



## ÚVOD

Předmětem této diplomové práce je MKP analýza konstrukce uchycení filtru pevných částic na traktoru Zetor Forterra. Současné konstrukční řešení uchycení filtrační jednotky, které se vyrábí a montuje na traktor, je výsledek práce a zkušeností konstruktérů firmy Zetor a doposud při jeho návrhu nebyly použity žádné výpočty využívající metody konečných prvků.

V úvodu práce je rešeršní část zabývající se problematikou emisí vznětových motorů a způsoby a prostředky pro jejich snižování. Vstupní data pro hlavní část práce byly 3D modely jednotlivých součástí. Pro řešení úkolů ze zadání této práce pomocí analýzy metodou konečných prvků bylo třeba nejprve vytvořit výpočtový model. To zahrnovalo několik kroků, jako byla tvorba náhradních modelů některých součástí, vymodelování svarů, tvorba konečnoprvkové sítě pro řešenou geometrii a zadání okrajových podmínek pro jednotlivé výpočty v programu ANSYS Workbench.

Hlavními cíly této diplomové práce bylo provedení modální analýzy pro posouzení chování stávající konstrukce ve frekvenční doméně, dále zjistit napětí a deformace a odhalit potenciálně nebezpečná místa. Po dohodě s vedoucím práce, panem Ing. Radimem Dundálkem, Ph.D., a nad rámec zadání práce budou provedeny také výpočty pro posouzení únavového namáhání celé konstrukce. Závěrem celé práce bude zhodnocení získaných výsledků a případné návrhy pro nápravná konstrukční opatření.



# 1 EMISE VZNĚTOVÝCH MOTORŮ

Celosvětová snaha ochraňovat životního prostředí a zdraví člověka je v posledních letech stále větší. Velká pozornost je kladena na automobilový průmysl v oblasti ekologického provozu automobilů. Silniční doprava způsobuje řadu nepříznivých vlivů na životní prostředí. Jedním z nich je znečišťování ovzduší výfukovými plyny. Snaha omezit tento negativní vliv je dána zákonnými předpisy předepisující maximální obsah jednotlivých škodlivin ve výfukových plynech. V Evropě jsou to tzv. EURO normy, které musí splňovat všechny automobily uvedené do provozu a jsou rozděleny do kategorií pro osobní, lehké užitkové, těžké nákladní automobily a autobusy. V současné době platí pro nákladní automobily norma Euro VI (vstoupila v platnost v prosinci r. 2013) a pro osobní automobily norma Euro 5 (od září r. 2009).

Pro pracovní stoje a traktory platí v Evropě pětifázová emisní norma EU Stage. Pro motory o výkonu 56 až 559 kW vstoupí v letošním roce závěrečná fáze, norma EU Stage IV.

kW	hp	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
0 - 7	0 - 10	V EU nepodléhá emisním limitům														
8 - 18	11 - 24	V EU nepodléhá emisním limitům														
19 - 36	25 - 49	V EU nepodléhá emisním limitům														
37 - 55	50 - 74	V EU nepodléhá emisním limitům														
56 - 74	75 - 99	EPA Tier 1 EU Stage I														
75 - 129	100 - 174					EPA Tier 2 EU Stage II										
130 - 559	175 - 749															
≥ 560	≥ 750	V EU nepodléhá emisním limitům														

Obr. 1 Nástup platnosti emisních norem EU Stage [15]

Specifické škodliviny ve výfukových plynech vznětových motorů jsou oxidy dusíku  $\text{NO}_x$  a pevné částice (saze), neboli PM (particulate matter). Aby bylo dosaženo dovolených hodnot emisí těchto škodlivin, musí výrobci automobilů vyrábět motory, které jsou schopny splňovat stále se zpřísnující předpisy. Proto jsou v současnosti technologie pro snížení emisí škodlivin, společně se systémy pro vstřikování paliva, nejpokrokovější oblastí vývoje spalovacích motorů.

## 1.1 PRŮBĚH SPALOVÁNÍ SMĚSI

### 1.1.1 IDEÁLNÍ PRŮBĚH SPALOVÁNÍ

K dokonalému spalování dojde jen za těch podmínek, kdy je k dispozici potřebná délka reakční doby bez působení nepříznivých vnějších vlivů. Výsledkem spalování, tj. reakce atomů uhlíku C a vodíku H v palivu s kyslíkem  $\text{O}_2$  obsaženým ve vzduchu, bude jen vodní pára  $\text{H}_2\text{O}$  a oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ . Ostatní složky vzduchu projdou procesem spalování beze změny.



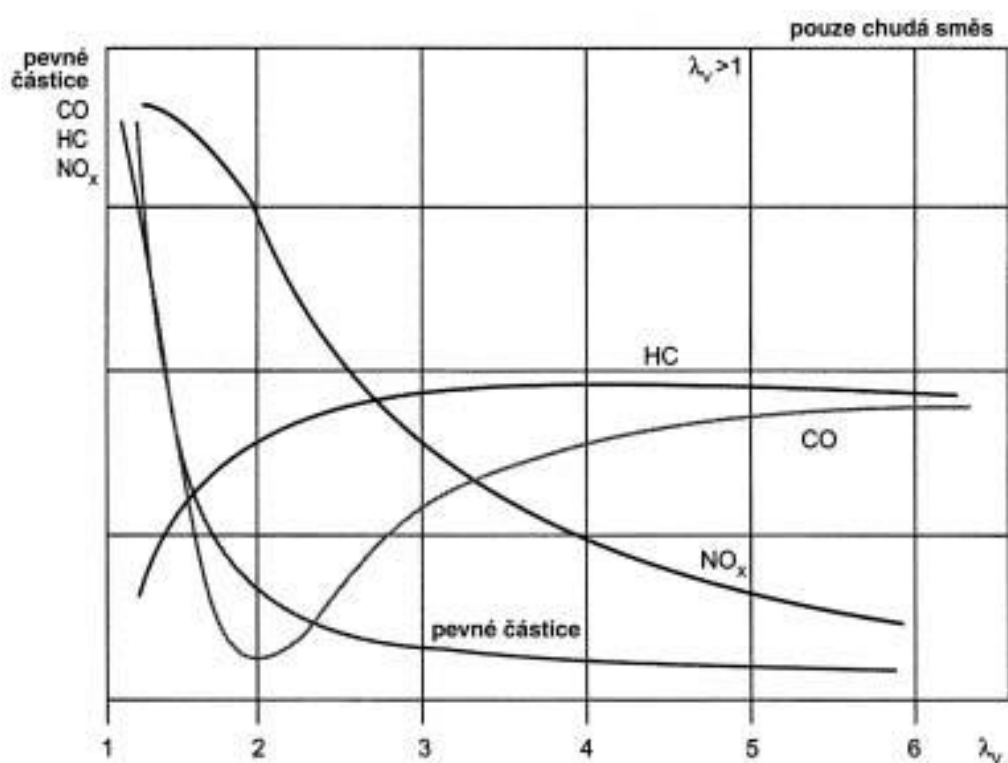
### 1.1.2 SKUTEČNÝ PRŮBĚH SPALOVÁNÍ

Vlivem tepelných ztrát, velice krátké reakční doby a ne úplně dokonalého promísení paliva se vzduchem vznikají při skutečném spalování kromě vodní páry, oxidu uhličitého a určitého množství jinak neškodných složek i škodliviny jako oxid uhelnatý CO, uhlovodíky HC, oxidy dusíku NO<sub>x</sub>, pevné částice a také sloučeniny olova a síry.

## 1.2 SLOŽENÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Výfukovými plyny rozumíme všechny plynné, kapalně i pevné produkty spalování zápalné směsi ve spalovacích motorech. Emise škodlivin jsou takové podíly výše uvedených složek, u kterých je prokázán, nebo se předpokládá, jejich škodlivý účinek.

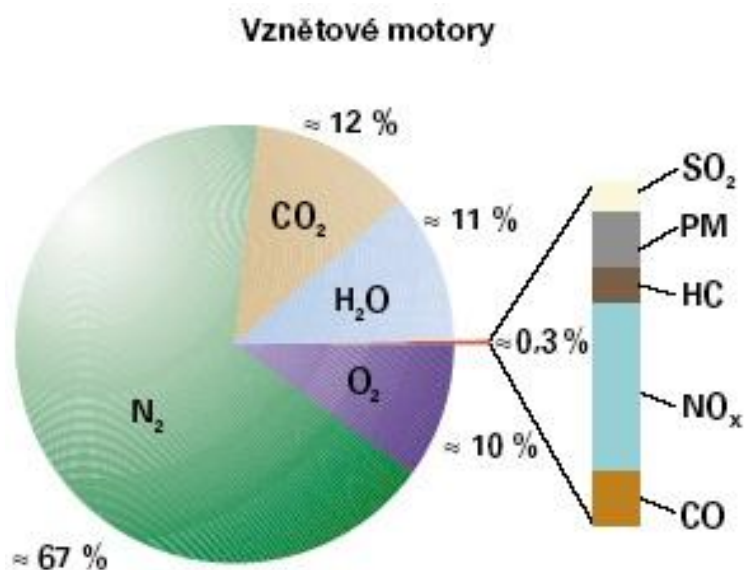
Podíl jednotlivých škodlivin ve výfukových plynech je silně závislý na složení zápalné směsi, které je určeno velikostí součinitele přebytku vzduchu  $\lambda$  (lambda), viz *Obr. 2*. Protože vznětové motory pracují ve své podstatě s chudou směsí s velkým přebytkem vzduchu, součinitel lambda se pohybuje pouze nad hodnotou 1.



Obr. 2 Průběh obsahu emisí v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu[1]



Typické složení výfukových plynů vznětových motorů je na Obr. 3.



Obr. 3 Složení výfukových plynů vznětových motorů[2]

Základní složky výfukových plynů [3]:

#### *Oxid uhličitý $CO_2$*

- vzniká dokonalým spálením paliv obsahujících uhlík
- nejedovatý, bez chuti a zápachu, bezbarvý a nehořlavý plyn
- způsobuje tzv. skleníkový efekt (ničí ozonovou vrstvu, která nás chrání před UV zářením)
- jeho obsah není v normách EURO limitován

#### *Uhlovodíky HC*

- vznikají zejména při spalování bohaté směsi, jejich obsah ve výfukových plynech vznětových motorů je malý
- výfukové plyny obsahují jak nespálené (parafíny, olefiny, acetyleny, aromatické uhlovodíky), tak i částečně spálené uhlovodíky (aldehydy, ketony, atd.)
- podílí se na tvorbě smogu, některé jsou neškodné, jiné mohou být dráždivé a rakovinotvorné

#### *Oxid uhelnatý CO*

- vzniká spalováním bohaté směsi, v menší míře i při spalování chudé směsi, jeho obsah ve výfukových plynech vznětových motorů je malý
- bezbarvý, bez chuti a zápachu, velmi jedovatý plyn (váže se na krevní destičky a brání tak transportu kyslíku v krvi)

#### *Oxidy dusíku $NO_x$*

- vznikají ve spalovacím prostoru při velkých tlacích a teplotách
- oxid dusnatý NO je bez barvy, chuti a zápachu, oxid dusičitý  $NO_2$  je jedovatý, ostře páchnoucí červenohnědý plyn, dále vzniká i oxid dusný  $N_2O$
- dráždí dýchací cesty, podílí se na tvorbě smogu



#### *Pevné částice (saze)*

- vznikají ve vznětových motorech při vysokém zatížení nedokonalým spalováním za vysoké teploty a nedostatku vzduchu nebo příliš rychlým ochlazením spalin
- na jádro saze z uhlíku se vážou zbytky nespáleného paliva ve formě uhlovodíků, dále sloučeniny síry, vodu a další látky
- omezují viditelnost
- pokud obsahují i nespálené uhlovodíky, stanou se z nich karcinogenní a mutagenní látky

#### *Oxid siřičitý SO<sub>2</sub>*

- vzniká slučováním síry obsažené v naftě s kyslíkem
- bezbarvý, nehořlavý a štiplavě páchnoucí plyn
- slučováním s vodou vznikají siřné kyseliny a poté působí negativně na životní prostředí ve formě tzv. „kyselých dešťů“

Dále výfukové plyny obsahují: dusík N<sub>2</sub>, vodní páry H<sub>2</sub>O, kyslík O<sub>2</sub> a další látky.

## **1.3 ZPŮSOBY SNIŽOVÁNÍ OBSAHU EMISÍ VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH VZNĚTOVÝCH MOTORŮ**

### **1.3.1 VNITŘNÍ OPATŘENÍ**

- zvýšení vstřikovacích tlaků pro lepší rozprášení a následné spálení paliva
- použití vstřikovacích trysek s větším počtem otvorů
- předvstříky a dovstříky paliva pro regeneraci částicových filtrů a SCR katalyzátorů
- elektronicky řízené vstřikování paliva
- optimalizace tvaru spalovacího prostoru pro zlepšení průběhu spalování
- regulace žhavení pro snížení tepelných ztrát
- použití více ventilů na válec a optimalizace tvaru sacích kanálů pro důkladné smíšení paliva a vzduchu
- přizpůsobování plnicího tlaku turbodmyhadla nezávisle na otáčkách motoru pomocí proměnlivé geometrie lopatek turbíny
- použití specifických přísad pro podporu vznětlivosti nafty zvýšením cetanového čísla [1]

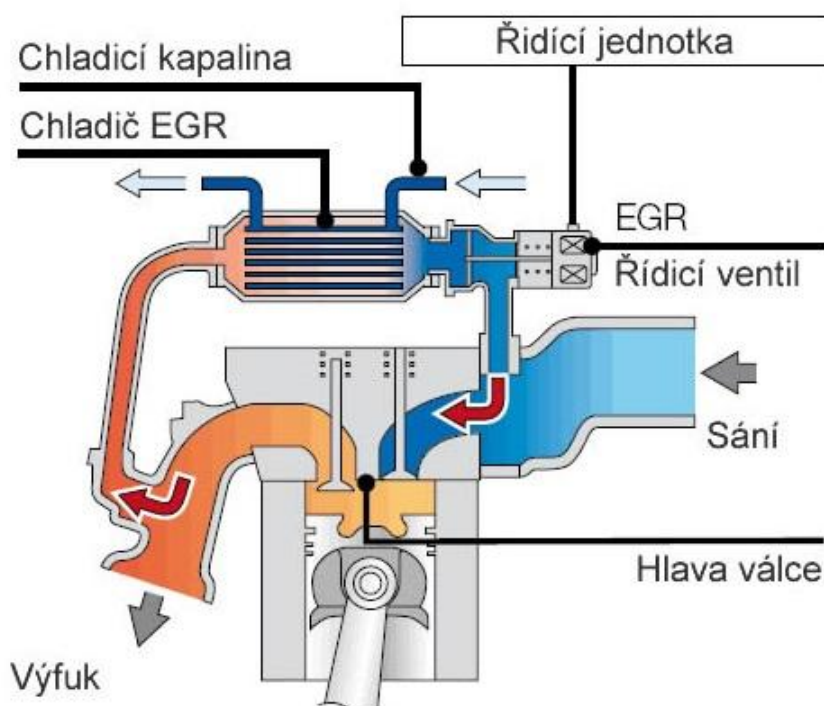
### **1.3.2 VNĚJŠÍ OPATŘENÍ**

- Systém zpětného vedení výfukových plynů
- Částicový filtr
- SCR katalyzátor
- Oxidační katalyzátor
- Zásobníkový katalyzátor



## 1.4 SYSTÉM ZPĚTNÉHO VEDENÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Ke snížení obsahu  $\text{NO}_x$  ve výfukových plynech zážehových, ale zejména vznětových motorů slouží technologie recirkulace spalin. Ve spojovacím potrubí mezi sacím a výfukovým potrubím je umístěn ventil recirkulace spalin, který reguluje množství spalin přiváděných zpět přes chladič do sání motoru. Systém se aktivuje při volnoběhu nebo částečném zatížení. Výfukové plyny jsou inertní, neúčastní se tedy spalování ve spalovacím prostoru. Snížením obsahu kyslíku ve vzniklé směsi se sníží teplota při spalování a vzniká tak řádově o desítky procent méně oxidů dusíku. Pokud roste podíl recirkulovaných výfukových plynů dále, snižují se sice emise  $\text{NO}_x$ , ale kvůli nedostatku kyslíku začne opět růst podíl nespálených uhlovodíků a pevných částic [3].



Obr. 4 Schéma zpětného vedení výfukových plynů [4]

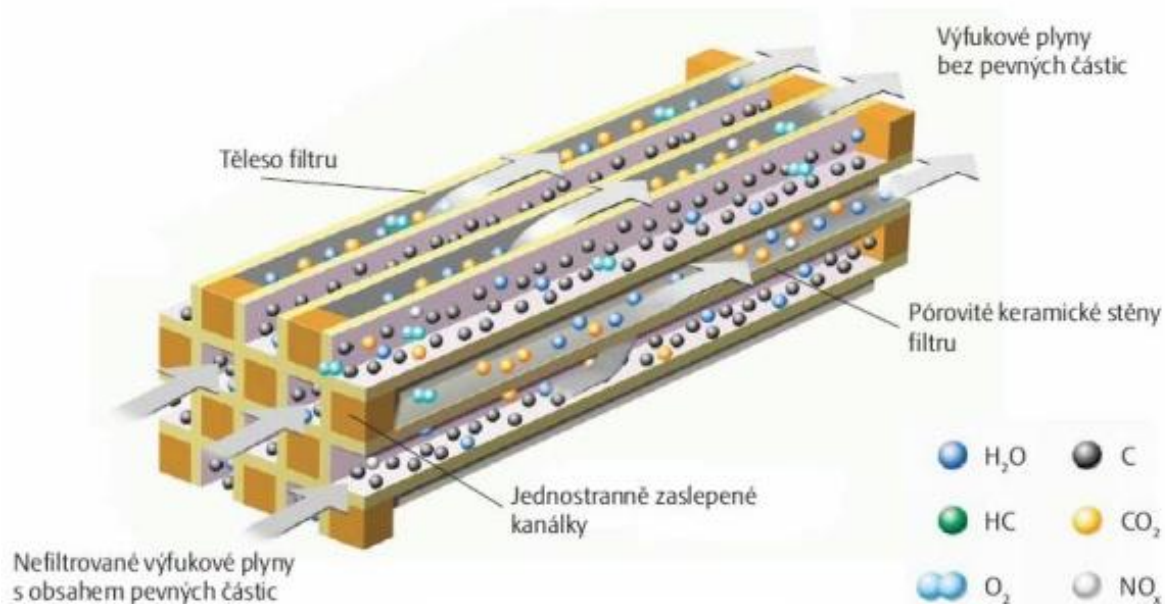
## 1.5 ČÁSTICOVÝ FILTR

Filtr pevných částic neboli DPF (Diesel Particulate Filter) je filtr, který snižuje emise nejvýznamnější škodliviny u vznětových motorů, což jsou pevné částice (saze). K filtraci dochází při průchodu výfukových plynů skrz pórovitou keramickou stěnu, ve které jsou pevné částice zachycovány.

Keramické jádro filtru má voštinovou strukturu, díky tomu má velkou funkční plochu v porovnání s velikostí jádra. Důležitým konstrukčním prvkem je zaslepení vstupních kanálů na straně výstupu a zaslepení výstupních kanálů na vstupní straně filtru (viz Obr. 5). Výfukové plyny jsou tak nuceny procházet porézními stěnami z karbidu křemíku do sousedních výstupních kanálů. Částice sazí se usazují v pórech na stěnách filtru a zvyšuje se tak protitlak výfukových plynů. To způsobuje zvýšení spotřeby paliva a snížení výkonu



motoru. Z těchto důvodů musí po určité době dojít k tzv. regeneraci filtru (vyhoření vyfiltrovaných částic). Při regeneraci dochází k přeměně pevných částic na oxid uhličitý a vodní páru.



Obr. 5 Řez filtrem pevných částic [5]

Tento proces je buď plně automaticky řízen řídicí jednotkou motoru, nebo je vyvolán a spuštěn samočinně. Proto se z hlediska způsobu aktivace dělí tento proces na tzv. pasivní a aktivní regeneraci.

#### *Pasivní regenerace*

- dochází k ní samočinně vždy, když pracovní podmínky motoru zajistí dostatečnou teplotu spalin – to je typické pro motor ve vysokých otáčkách a vysokém zatížení (např. při jízdě na dálnici), kdy se teplota spalin sama zvýší na hodnotu potřebnou pro regeneraci filtru
- dalším možným způsobem je snížení teploty spalování pevných částic - dávkovací jednotka přidává speciální aditivum do paliva v nádrži, které umožní snížení reakční teploty potřebné pro spálení pevných částic o cca 100°C

#### *Aktivní regenerace*

- řídicí jednotka motoru změnou spalovacího procesu (předvstřík, hlavní vstřík, dovstřík paliva) zvýší teplotu výfukových plynů na požadovaných 600°C a udržuje ji po dobu nutnou ke spálení pevných částic ve filtru
- potřebné teploty je možno dosáhnout i použitím hořáků, které vstříkují palivo do výfuku před filtr DPF a palivo je následně zapáleno zapalovací svíčkou, nebo pomocí topných spirál umístěných na vstupu do filtrační jednotky, které díky svému vyhřívání zvýší teplotu spalin





## 1.6 SCR KATALYZÁTOR

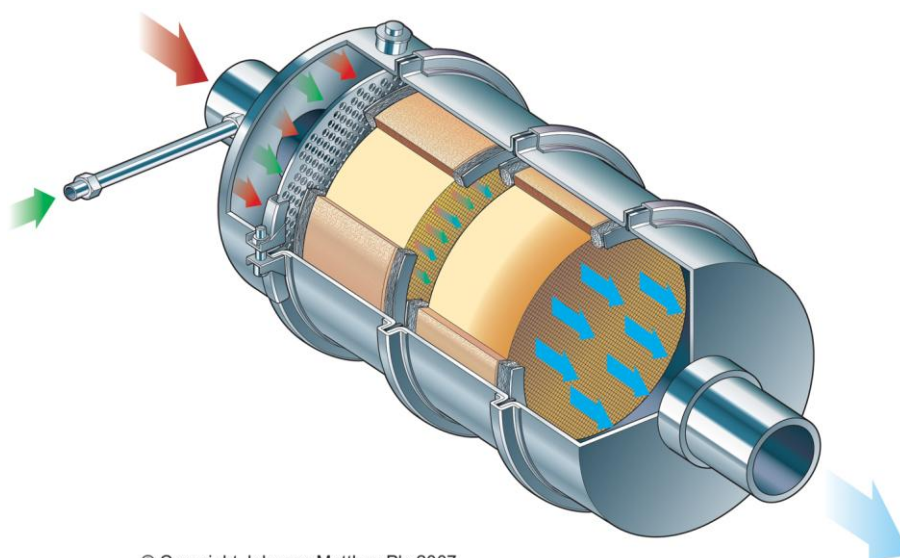
SCR katalyzátor pracuje na principu selektivní katalytické redukce. Dochází v něm k přeměně škodlivých oxidů dusíku na neškodný dusík a vodní páru. Katalyzátor se skládá z keramického jádra a z vlastní katalyticky aktivní vrstvy z wolframu, vanadu, molybdenu, zeolitu (hlinitokřemičitý minerál s mikroporézní strukturou) a dalších prvků. Těleso katalyzátoru je tvořeno oxidačním katalyzátorem, za kterým je umístěn samotný SCR katalyzátor.

Dle druhu použitého redukčního činidla se používají dva druhy SRC katalyzátorů:

- Amoniakový SCR katalyzátor
- Uhlovodíkový SCR katalyzátor

### 1.6.1 AMONIAKOVÝ SCR KATALYZÁTOR

Do výfukového potrubí před katalyzátor je vstřikováváno aditivum AdBlue, což je 32,5 obj. % vodný roztok syntetické močoviny. Po smíchání s horkými výfukovými plyny se AdBlue rozloží na oxid uhličitý a amoniak. Amoniak reaguje s oxidy dusíku a vzniká neškodný dusík a vodní pára.

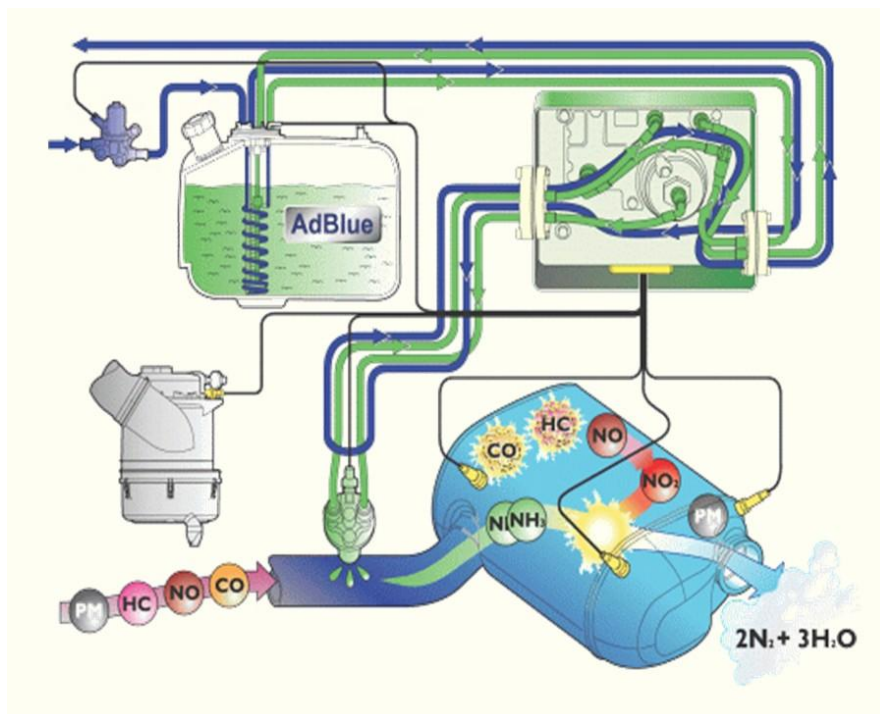


© Copyright Johnson Matthey Plc 2007

*Obr. 6 SCR katalyzátor se vstřikováním AdBlue [13]*

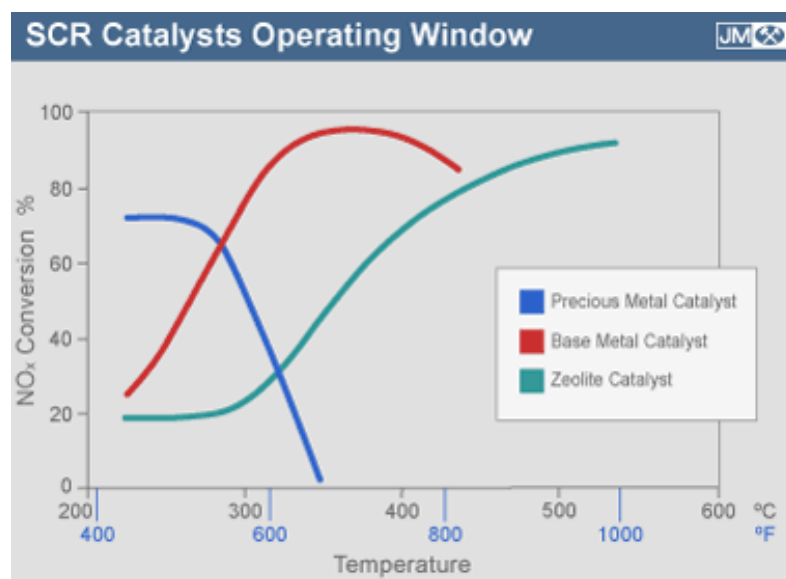


Celý systém je tvořen nádrží na AdBlue, řídicí jednotkou, modulem pro čerpání močoviny z nádrže a její dávkování a vstřikovací jednotky umístěné ve stěně výfukového potrubí před katalyzátorem, viz *Obr. 7*.



*Obr. 7 Technologie SCR se vstřikováním močoviny [6]*

Tento katalyzátor pracuje v závislosti na pracovní teplotě a typu použitých materiálů aktivní vrstvy s účinností až 90% [13], viz *Obr. 8*.



*Obr. 8 Průběh závislosti účinnosti redukce NO<sub>x</sub> na teplotě a použitím materiálu [13]*

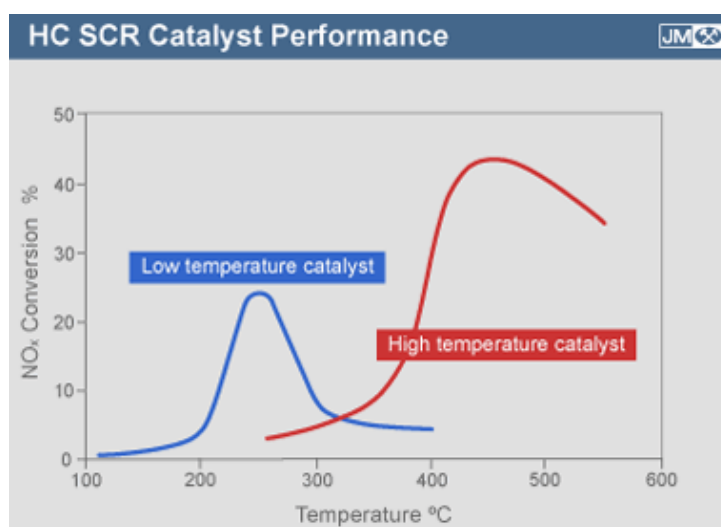


### 1.6.2 UHLOVODÍKOVÝ SCR KATALYZÁTOR

Tento typ katalyzátoru používá jako redukční činidlo uhlovodíky, které jsou přirozenou složkou výfukových plynů. Chemické reakce probíhající v katalyzátoru závisí na typu uhlovodíků, které se jich účastní, ale výsledkem je vždy přeměna oxidů dusíku a uhlovodíků na plynný dusík, vodní páru a oxid uhličitý. Výhodou je, že není zapotřebí žádné přídatné aditivum a systémů s tím souvisejících. Účinnost je ale v porovnání s amoniakovým SCR katalyzátorem zhruba poloviční.

Dle typu materiálu katalyzátoru a jeho vhodnosti použití pro určitý rozsah pracovních teplot rozeznáváme [14]:

- nízkoteplotní katalyzátor s nejvyšší účinností cca 25% při teplotě 250°C
- vysokoteplotní katalyzátor s nejvyšší účinností cca 45% při teplotě 450°C



Obr. 9 Účinnost redukce  $\text{NO}_x$  u uhlovodíkových SCR katalyzátorů [14]

### 1.7 OXIDAČNÍ KATALYZÁTOR

Katalytický konvertor, neboli katalyzátor, je zařízení, ve kterém dochází chemicko-tepelnou reakcí k částečné nebo úplné přeměně škodlivých látek na neškodné, případně méně škodlivé. Katalyzátor se skládá z nosiče (kovový nebo keramický), mezvrstvy z oxidu hlinitého – tzv. „wash-coat“ (jen u keramického nosiče) a katalyticky aktivní vrstvy tvořené vzácnými kovy (platina Pt, paladium Pd, rhodium Rh). V každém katalyzátoru jsou 2g až 3g těchto kovů. Ty se nespotřebovávají, protože se vlastních chemických reakcí neúčastní.

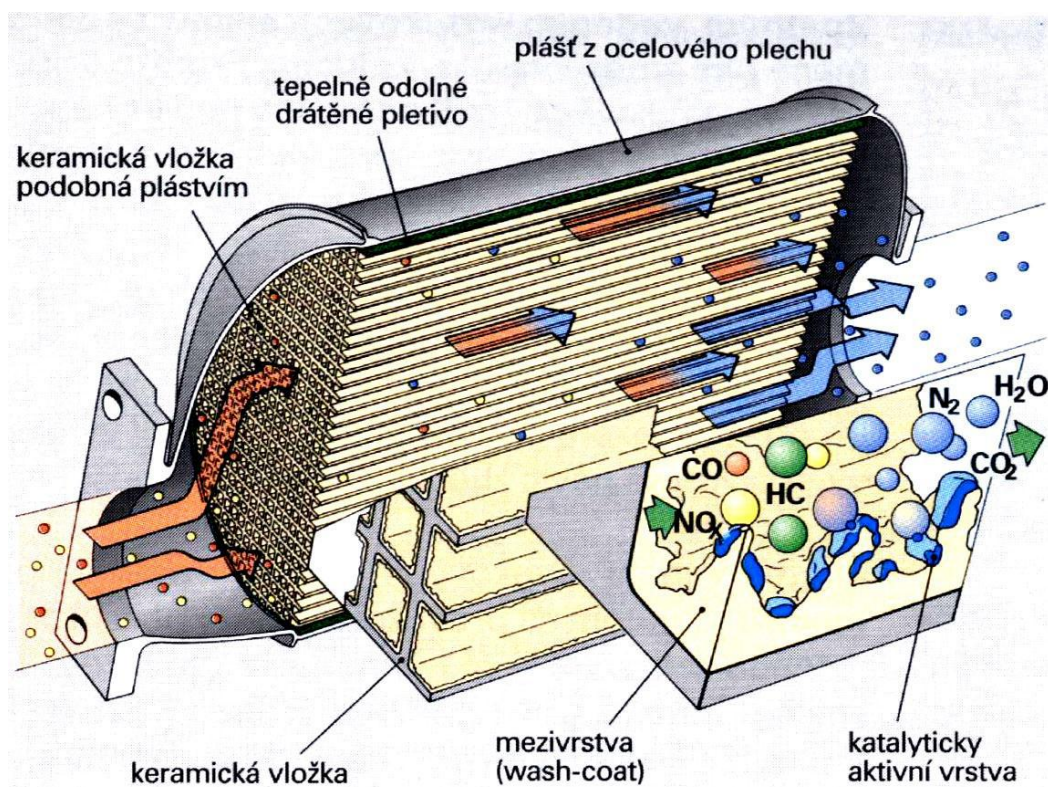


Obr. 10 Keramický nosič [11]



Obr. 11 Kovový nosič [12]

Nosič tvoří několik tisíc podélných kanálků, přes které proudí výfukové plyny. Mezivrstva je porézní a díky tomu je činná plocha katalyzátoru zvětšena až 7000 krát [3].



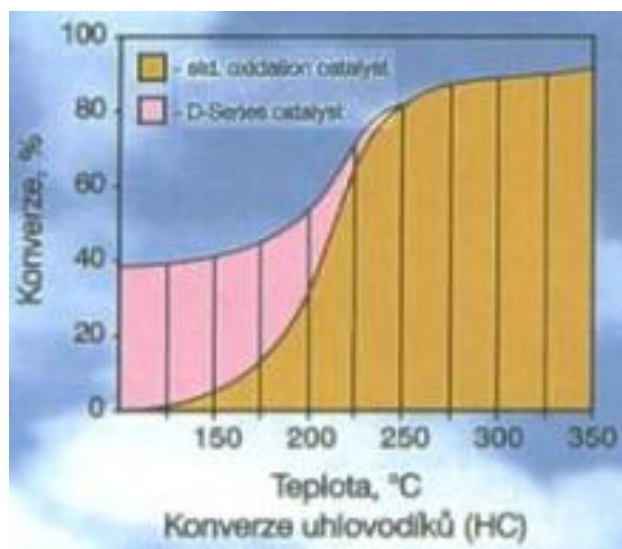
Obr. 12 Konstrukce a činnost katalyzátoru s keramickou vložkou [8]

Katalyzátor začíná plnit svou funkci až při 250°C, optimální provozní podmínky jsou při teplotě 400°C až 800°C. Oxidační (dvojčinný) katalyzátor pracuje s chudou směsí (přebytkem vzduchu) a pomocí oxidace (spalování) přeměňuje CO a HC na H<sub>2</sub>O a CO<sub>2</sub>. Obsah NO<sub>x</sub> se kvůli přebytku vzduchu v podstatě nesnižuje [3]. Přestože není určen pro filtraci pevných částic, dokáže jich odfiltrovat až 30% [9].



### Katalyzátor typu D

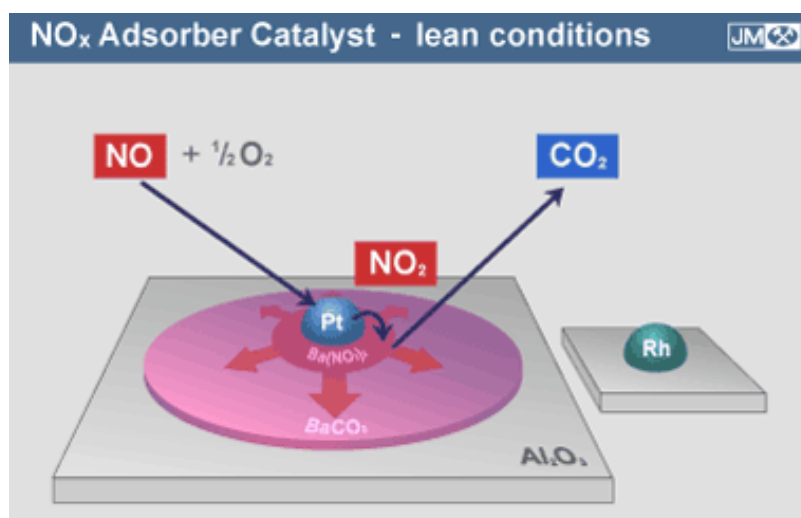
- je konstruován pro použití také pro nízké teploty výfukových plynů. Katalyzátor typu D obsahuje v mezivrstvě zeolity. Ty pohlcují uhlovodíky HC z výfukových plynů v době, kdy výfukové plyny mají nízkou teplotu, například během volnoběžných otáček motoru. Pak, když se teplota výfukových plynů zvýší, se uhlovodíky uvolní a přemění se na oxid uhličitý a vodní páru, jako v klasickém oxidačním katalyzátoru. Při vyšší teplotě výfukových plynů katalyzátor dosahuje konverze uhlovodíků nad 80 % a CO nad 90 % [7].



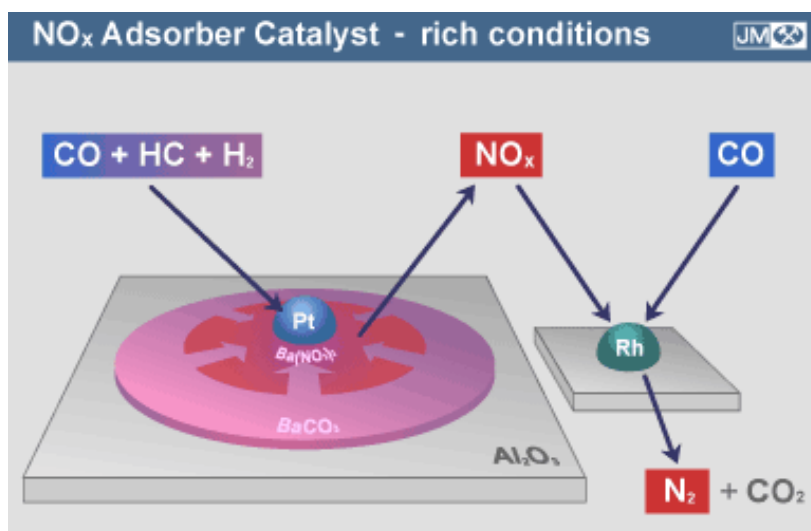
Obr. 13 Konverze uhlovodíků v katalyzátoru typu D [7]

## 1.8 ZÁSObNÍKOVÝ KATALYZÁTOR

Zásobníkový, neboli absorpční, katalyzátor je další typ systému určeného pro redukci oxidů dusíku. Konstrukčně se podobá oxidačnímu katalyzátoru, navíc ale vedle klasických katalyzačních prvků (platina, palladiu, rhodium) obsahuje i absorpční materiál. Při spalování chudé směsi dokáže vázat oxidy dusíku prostřednictvím absorpčního materiálu (např. oxidů barya) ve formě pevných dusičnanů. Zároveň dochází k uvolňování oxidu uhličitého. Jakmile je absorpční materiál plný dusičnanů (při provozu s chudou směsí za zhruba minutu), dojde krátkodobě (1 až 2 s) k obohacení směsi v motoru. Po jejím shoření se nespálené uhlovodíky spolu s oxidem uhelnatým dostanou do katalyzátoru, kde slouží za přítomnosti ušlechtilých kovů jako redukční prostředek a rozloží dusičnany v pevné formě zpět na  $\text{NO}_x$ . Tyto uvolněné  $\text{NO}_x$  reagují společně s HC a CO stejným způsobem jako je tomu u třícestného oxidačně-redukčního katalyzátoru. Po této přeměně je absorpční materiál regenerován a může znovu přijímat  $\text{NO}_x$  a celý cyklus se může opakovat [3].



Obr. 14 Proces ukládání oxidů dusíku při spalování chudé směsi [10]



Obr. 15 Proces regenerace [10]



## 2 FORMULACE ŘEŠENÝCH PROBLÉMŮ A CÍLE PRÁCE

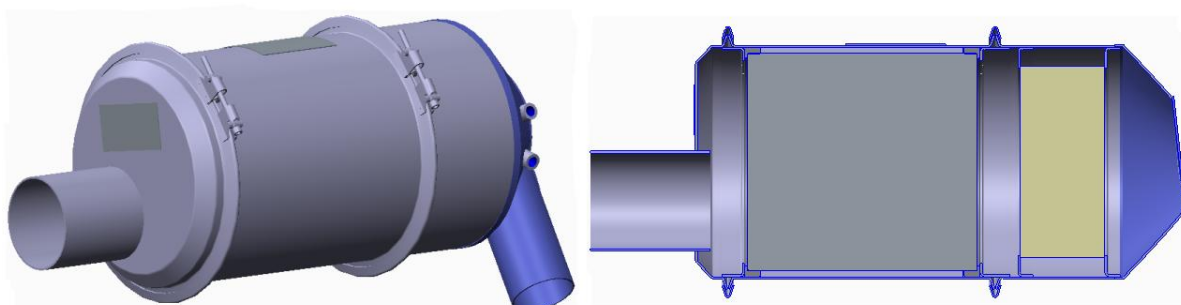
Firma Zetor, tradiční český výrobce traktorů a vznětových motorů, musí stejně jako další výrobci řešit problematiku snižování emisí výfukových plynů. Výsledkem této snahy jsou technologie a zařízení, která jsou součástí příslušenství motoru a upravují obsah škodlivin ve spalinách.

Traktor Zetor Forterra 140, zmíněný v zadání této diplomové práce, má vznětový, čtyřválcový, řadový motor s typovým označením Z 1606. Jeho výkon je 100 kW při 2200 min<sup>-1</sup> a splňuje emisní limit Stage IIIB [16].



Obr. 16 Motor Zetor Z 1606 [16]

Eliminace škodlivin výfukových plynů je zajištěna pasivním filtračním systémem od firmy Baumot. Tubus filtrační jednotky je tvořen předřazeným oxidačním katalyzátorem a filtrem pevných částic (DPF). Oxidační katalyzátor má kovový nosič, filtr pevných částic má keramické jádro s povrchovou úpravou z platiny zajišťující pasivní regeneraci filtru.



Obr. 17 Tubus filtrační jednotky firmy Baumot použitý na traktoru Zetor Forterra



Předmětem této diplomové práce je konstrukce uchycení filtru pevných částic na traktoru. Současné konstrukční řešení je výsledkem práce konstruktérů firmy Zetor, kteří využili svých dlouholetých zkušeností v této oblasti. Při návrhu uchycení tubusu filtrační jednotky nebyly doposud použity žádné výpočty, které využívají metody konečných prvků (MKP).

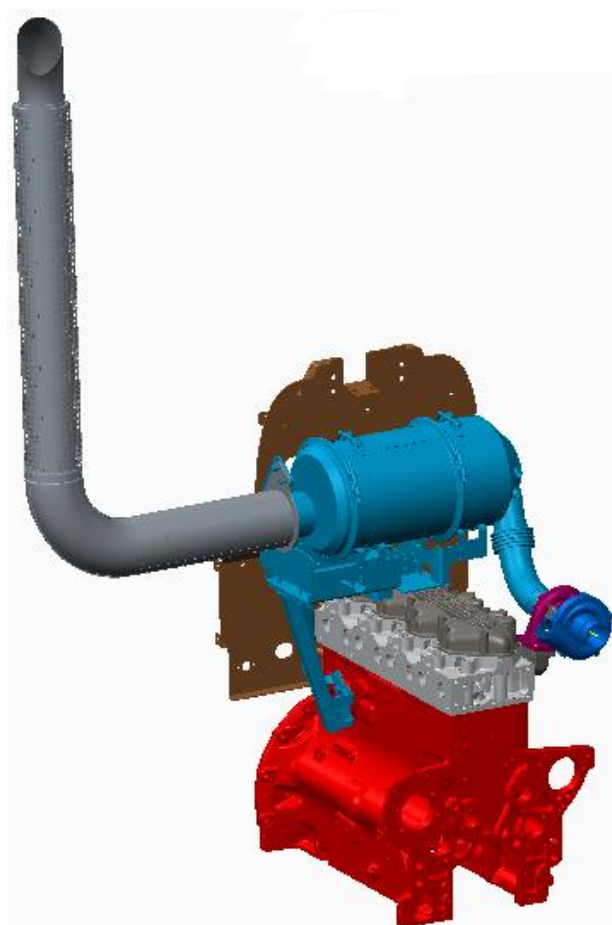
Jako základní vstupy diplomové práce jsou 3D modely jednotlivých součástí dodané vedoucím práce a informace o materiálu použitém pro konstrukci posuzovaného celku.

Cílem diplomové práce je zjistit napětí a deformace uchycení filtru pevných částic, odhalit nebezpečná místa, dále posoudit chování stávající konstrukce ve frekvenční doméně, provést výpočet na únavu a v závěru posoudit bezpečnost z hlediska mezních stavů, které mohou nastat za provozu traktoru (běhu motoru).

Provedení MKP analýzy tedy umožní zhodnotit chování stávající konstrukce a na základě získaných výsledků případně navrhnout způsoby pro nápravná opatření.

## 2.1 POPIS KONSTRUKCE UCHYCENÍ FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC

Prvním krokem při řešení této diplomové práce bylo vytvoření sestavy z dodaných 3D modelů ve formátu .stp (step) v programu Creo Parametric 2.0. Celá sestava je zobrazena na *Obr. 18*.



*Obr. 18 Sestava jednotlivých dílů v prostředí programu Creo Parametric 2.0*

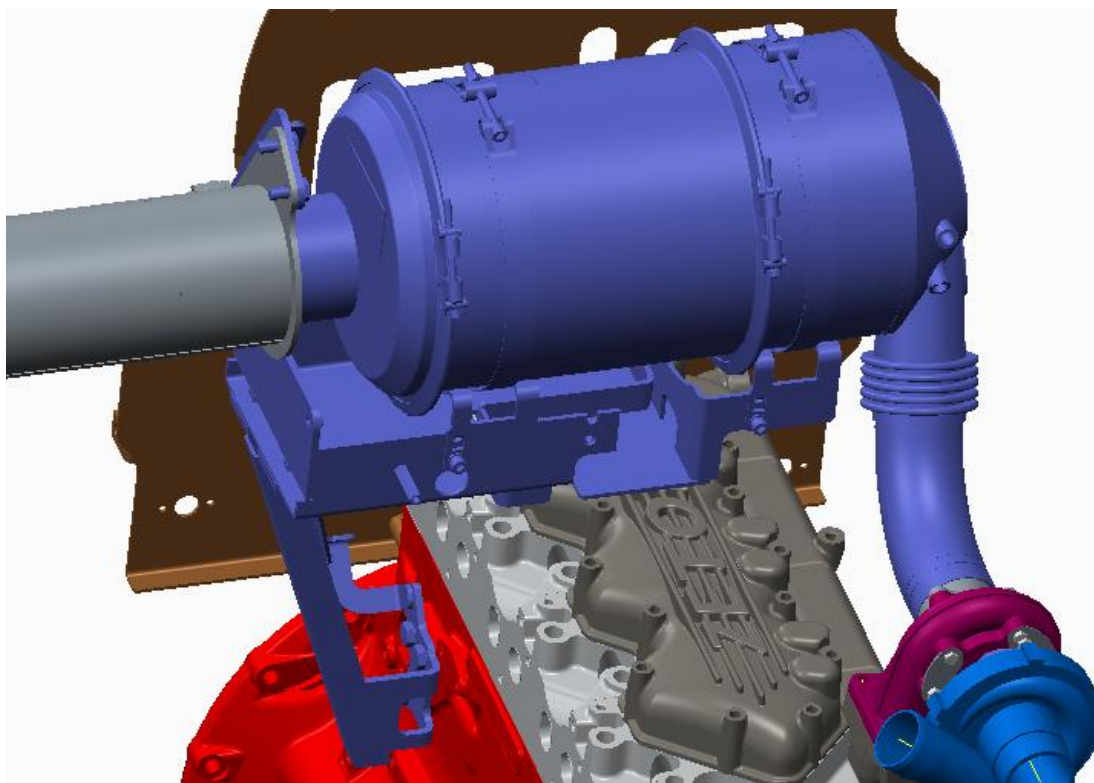




Seznam jednotlivých dílů:

- víko ventilů
- hlava válců
- kliková skříň
- přepážka mezi kabinou řidiče a motorovým prostorem
- sběrné výfukové potrubí
- turbodmychadlo
- tubus filtrační jednotky s jeho uchycením na klikovou skříň a přepážku
- výfuk

Po dohodě s vedoucím práce je předmětem této diplomové práce **uchycení** tubusu filtrační jednotky, což je **svařenec**, ke kterému je přimontován výfuk a filtrační jednotka. Uchycení slouží jako jediný nosič pro tyto dva díly. Sestava na *Obr. 18* slouží pro zobrazení a pochopení zástavby samotného uchycení v motorovém prostoru. Detailnější zobrazení (model filtrační jednotky a jejího uchycení má fialovou barvu) je na *Obr. 19*.

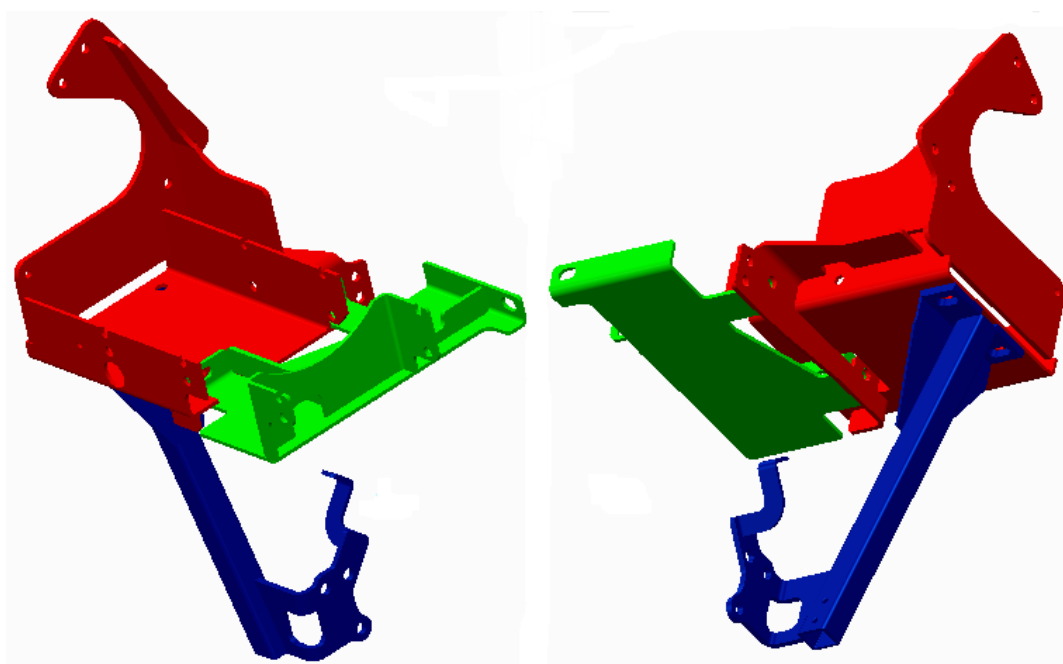


*.Obr. 19 Pohled na zástavbu filtrační jednotky s uchycením a výfukem*

Konstrukce uchycení je tvořena třemi svařenci (viz *Obr. 20*):

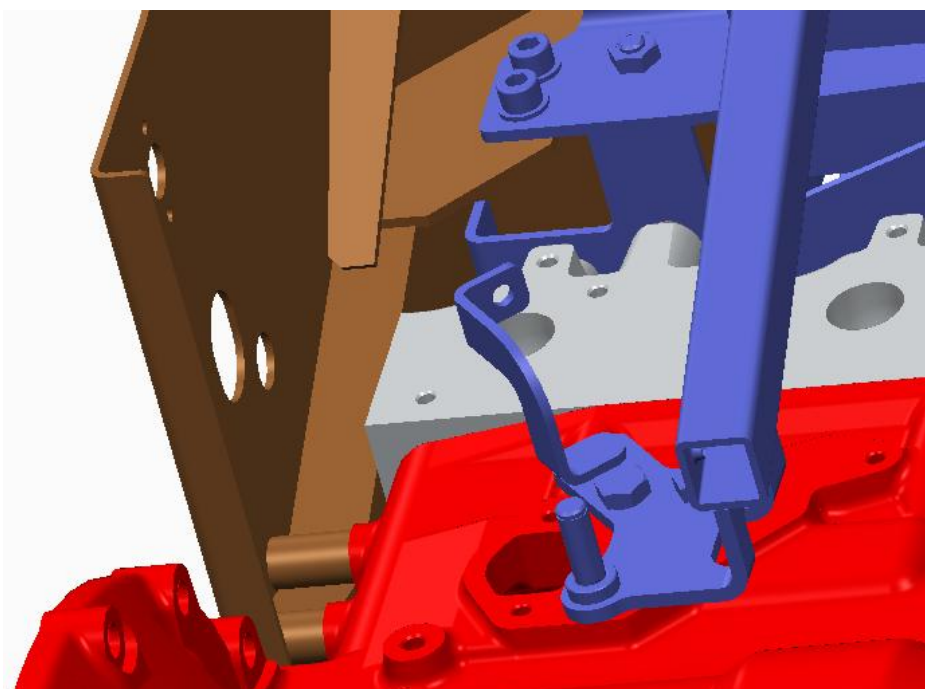
- vzpěra (modrá barva)
- příruba výfuku a uchycení filtru pevných částic (červená barva)
- uchycení oxidačního katalyzátoru (zelená barva)

Jednotlivé svařence jsou k sobě vzájemně přišroubovány pomocí dvou dvojic matic a šroubů M10x20 a M10x25 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Šroubových spojů je využito i k připevnění výfuku a filtrační jednotky k uchycení, stejně jako k upevnění celé této sestavy na klikovou skříň a přepážku mezi kabinou řidiče a motorovým prostorem.



*Obr. 20 Pohled na uchycení výfuku a filtrační jednotky ze dvou stran*

Sestava uchycení je ke klikové skříni připevněna dvěma šrouby M12x20 se šestihrannou hlavou a dále třemi maticemi a šrouby M10x20 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem k přepážce (viz detail na *Obr. 21*). V místech těchto šroubových spojů bude později sestava pro potřeby výpočtu zavazbena.

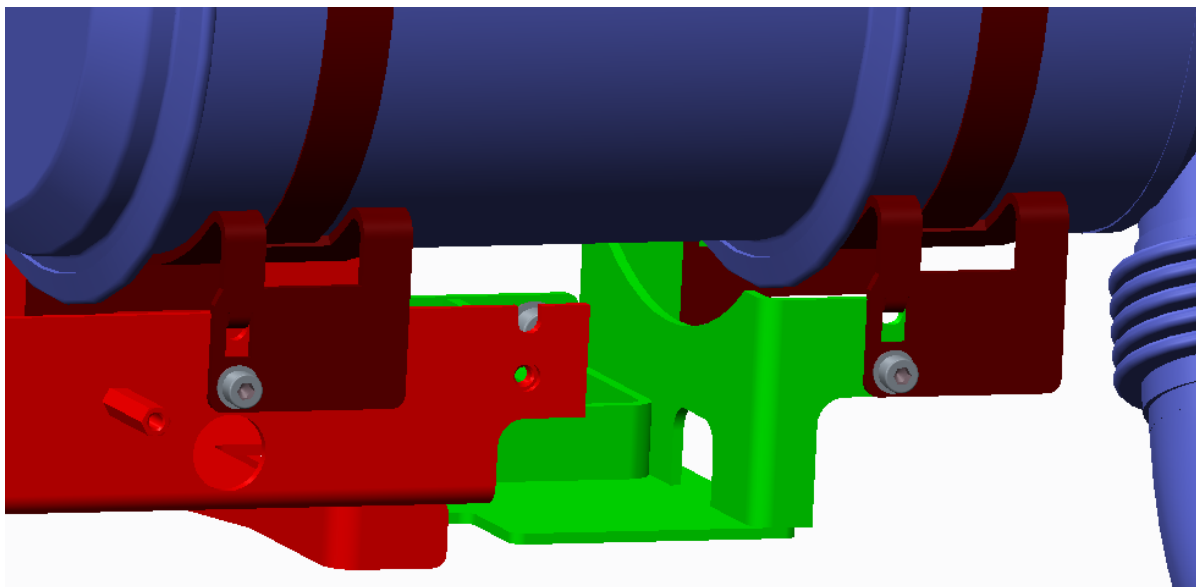


*Obr. 21 Detail šroubových spojů*



Výfuk je k sestavě uchycení přišroubován přes přírubu třemi maticemi a šrouby M10x25 se šestihrannou hlavou a jednou maticí a šroubem M10x30 se zápustnou hlavou a vnitřním šestihranem.

Tubus filtrační jednotky je obepnut pásovými objímkami a následně zajištěn čtyřmi maticemi a šrouby M8x20 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem, viz detail na *Obr. 22*.



*Obr. 22 Detail obepnutí filtrační jednotky pásovými objímkami*

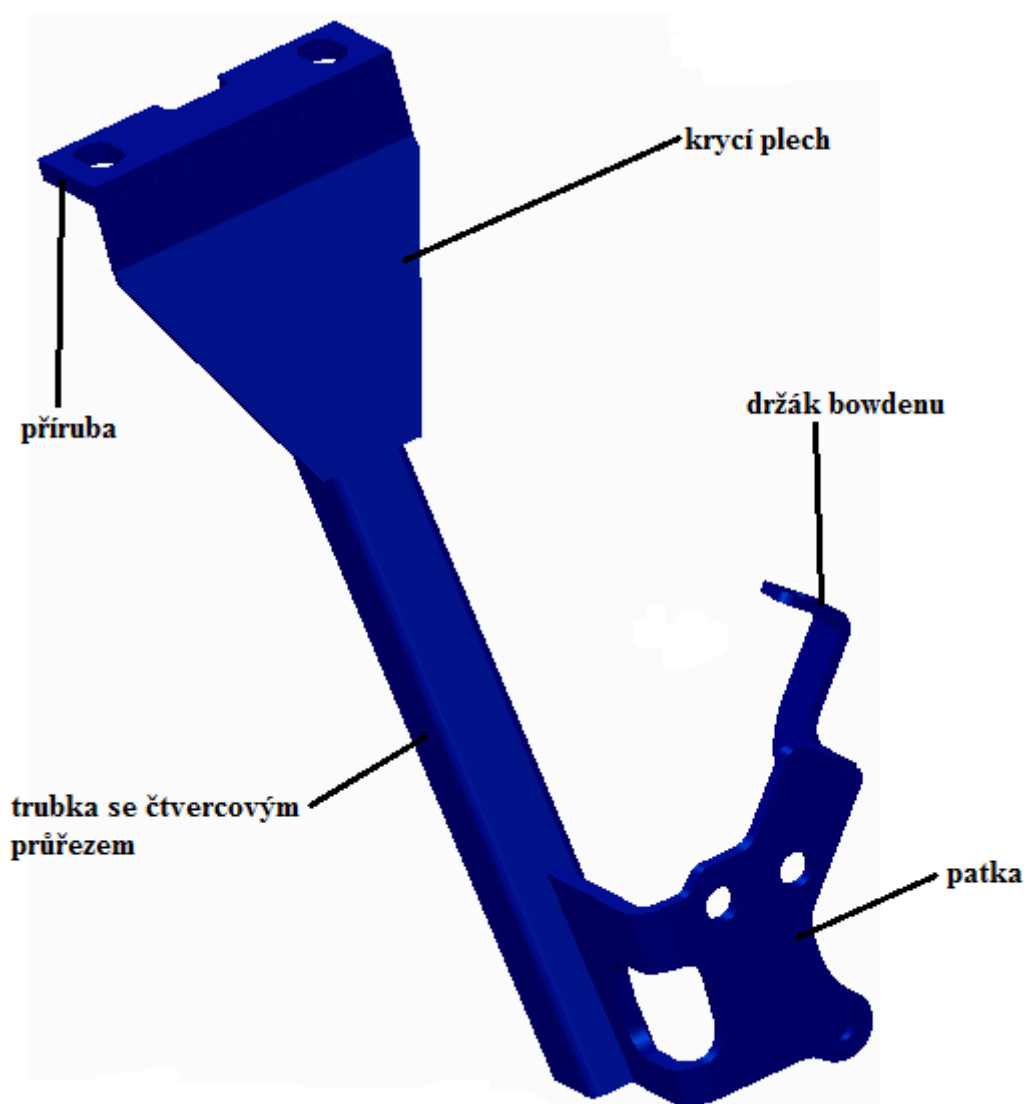
Součástí dodaných 3D modelů nebyly svary, ty bylo potřeba domodelovat, což bude popsáno později v kapitole 3.2.3 **Modely svarů**. Svařence tvořící po sešroubování sestavu uchycení budou dále popsány v následujících kapitolách.



### 2.1.1 VZPĚRA

Vzpěra přenáší většinu zatížení od výfuku a tubusu filtrační jednotky na klikovou skříň. Je to svařenec 4 ohýbaných plechů různých tlouštěk  $t$  a trubky se čtvercovým průřezem:

- příruba,  $t = 8$  mm
- krycí plech,  $t = 3$  mm
- trubka se čtvercovým průřezem 30x30,  $t = 3$  mm
- držák bowdenu,  $t = 4$  mm
- patka,  $t = 6$  mm



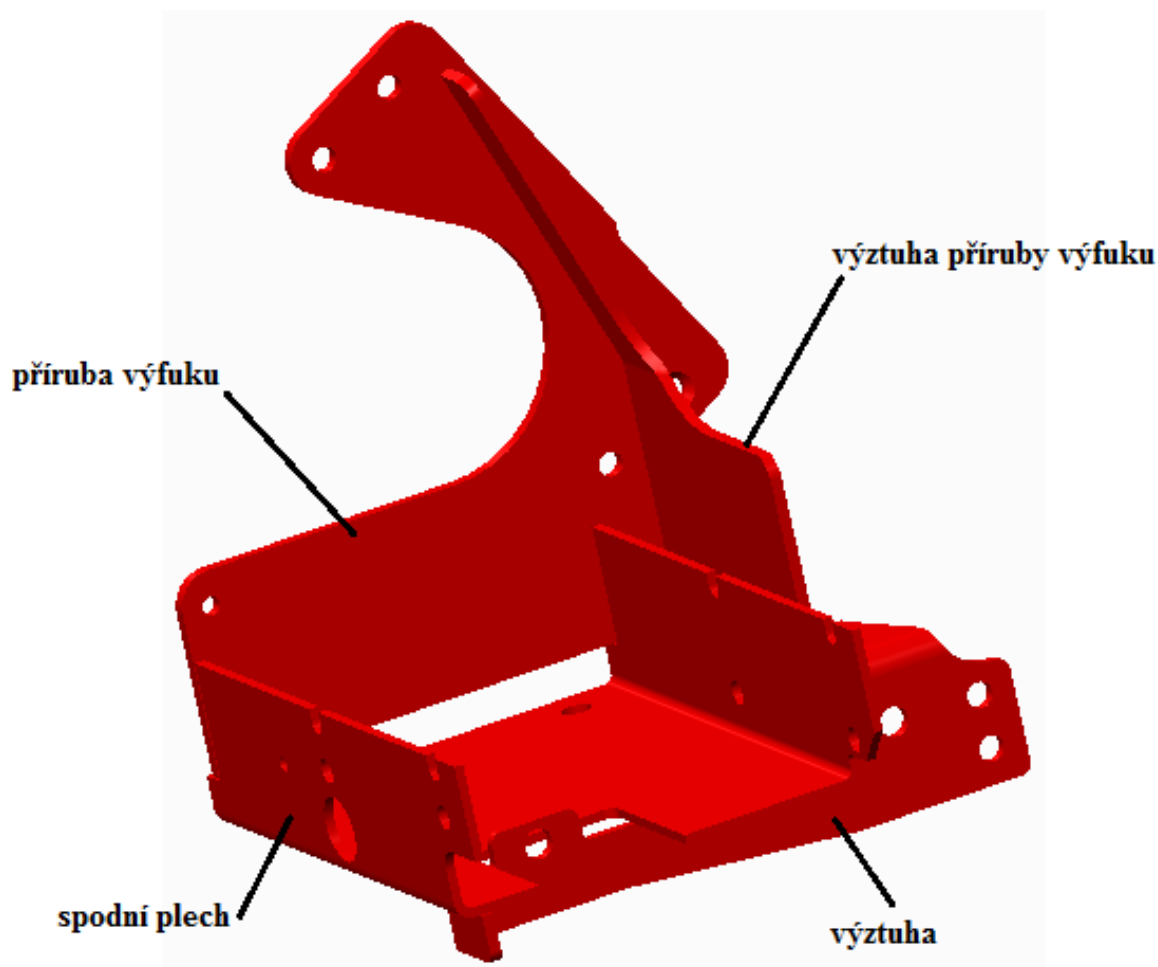
Obr. 23 Vzpěra



### 2.1.2 PŘÍRUBA VÝFUKU A UCHYCENÍ FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC

Tento díl přenáší veškeré zatížení od výfuku a částečně nese filtrační jednotku. Konstrukčně jde o svařenec 4 ohýbaných plechů různých tloušťek:

- příruba výfuku,  $t = 6$  mm
- výztuha příruby výfuku,  $t = 5$  mm
- spodní plech,  $t = 4$  mm
- výztuha,  $t = 5$  mm

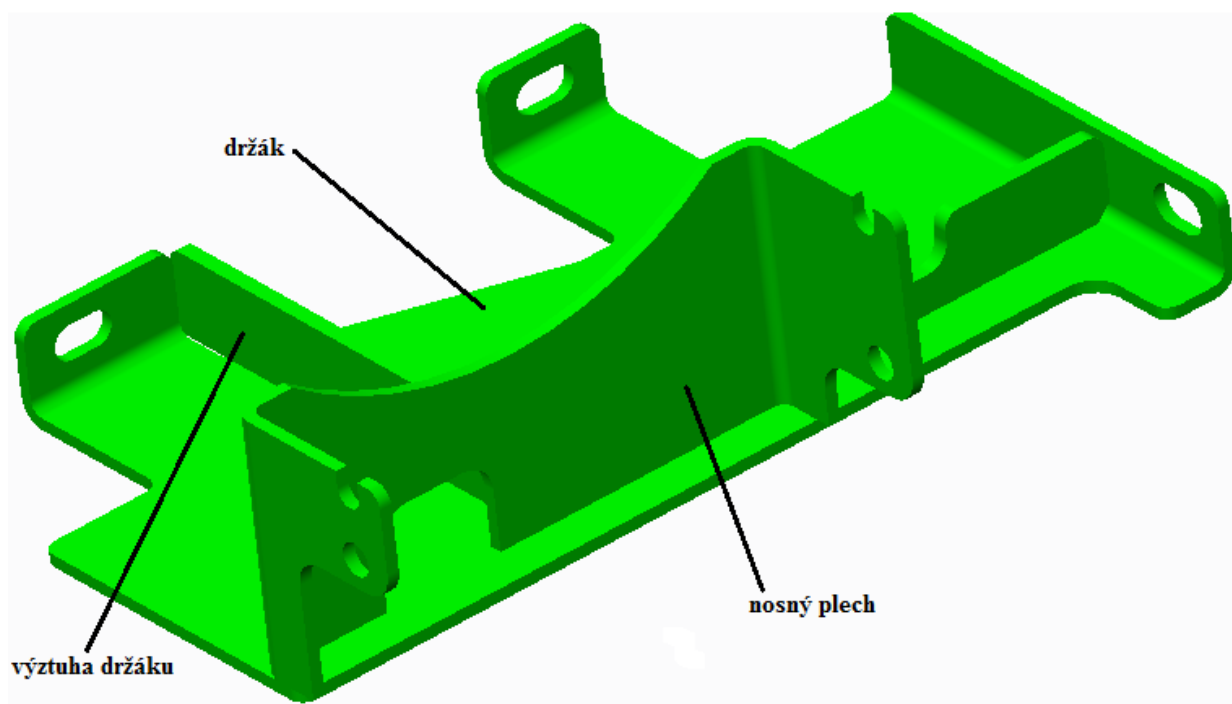


Obr. 24 Příruba výfuku a uchycení filtru pevných částic

### 2.1.3 UCHYCENÍ OXIDAČNÍHO KATALYZÁTORU

Uchycení oxidačního katalyzátoru částečně nese filtrační jednotku. Je to opět svařenec 3 ohýbaných plechů různých tloušťek:

- držák,  $t = 4$  mm
- výztuha držáku,  $t = 5$  mm
- nosný plech,  $t = 4$  mm



Obr. 25 Uchycení oxidačního katalyzátoru

## 2.2 POUŽITÉ MATERIÁLY

### 2.2.1 MATERIÁL UCHYCENÍ FILTRAČNÍ JEDNOTKY

Konstrukce je ze za tepla válcovaných, normalizačně žíhaných, plechů z oceli S235JR+N dle EN 10025-2, 11373.1 dle ČSN. Jde o nelegovanou konstrukční ocel vhodnou ke svařování.

Tab. 1 Materiálové charakteristiky oceli S235JR+N

VELIČINA	OZNAČENÍ	HODNOTA
MEZ KLUZU	$R_e$	235 MPa
MEZ PEVNOSTI	$R_m$	340 MPa
MEZ ÚNAVY V TAHU/TLAKU	$\sigma_{cT}$	130 MPa
MEZ ÚNAVY V OHYBU	$\sigma_{cO}$	170 MPa

### 2.2.2 SPOJOVACÍ MATERIÁL

Třída pevnosti všech použitých šroubů je 8.8, mez kluzu materiálu šroubů je  $R_e = 640$  MPa.



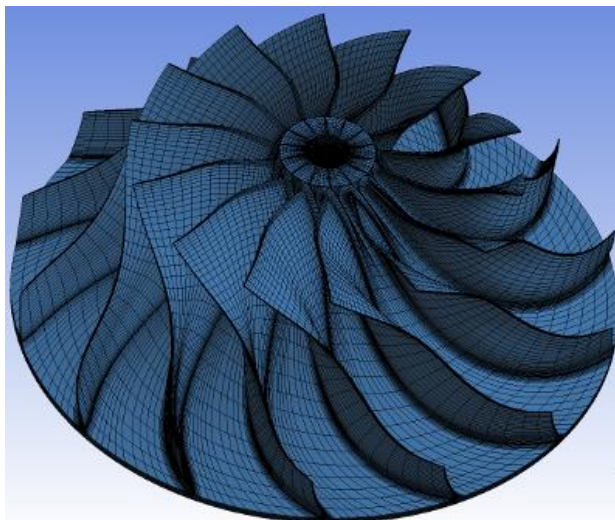
### 3 TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU

Pro MKP analýzu je třeba vytvořit výpočtový model. Výpočtový model se skládá z dílčích modelů, které jsou hlavními vstupními údaji řešených analýz. Tato práce řeší tzv. přímou úlohu, tzn. že jsou známy vstupní veličiny – použitý materiál, geometrie, vazby, zatížení, a výstupní veličiny jako napětí, deformace, posuvy atd. jsou hledány v závislosti na vstupních veličinách.

#### 3.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)

Metoda konečných prvků, známá pod zkratkou MKP, je numerická metoda, která je určena pro simulaci průběhu napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tekutin, tepla a dalších typů úloh na vytvořeném fyzikálním modelu. MKP je založena na zcela jiném principu než analytické metody pružnosti. Zatímco analytické metody jsou založeny na diferenciálním a integrálním počtu, MKP spočívá v náhradě tvarově složitěho tělesa (spojitého kontinua) konečným počtem jednoduchých a vzájemně spojených geometrických elementů (prvků), čemuž se říká diskretizace. Zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech každého elementu.

Je tedy třeba na modelu tělesa vytvořit síť konečných prvků (*Obr. 26*). Pro každý typ prvku je kromě dimenze a tvaru charakteristický počet a poloha jeho uzlů. Uzly sítě jsou body, v nichž hledáme neznámé parametry řešení (např. posuvy a natočení, z kterých dále počítáme napětí atd.). Hustota, a topologie prvků sítě zásadně ovlivňuje kvalitu výsledků a potřebnou kapacitu pro řešení [20].



*Obr. 26 Síť konečných prvků na modelu kompresorového kola turbodmyhadla [19]*



U MKP převládá variační formulace. Z důvodu, že základní neznámou jsou funkce posuvů, jde o deformační variantu MKP. U této varianty MKP je východiskem Lagrangeův variační princip mechaniky. Variační princip je taková matematická formulace problému, který hledáme jako stav, kdy určitá forma energie vyšetřovaného tělesa dosahuje stacionární hodnoty.

Z matematického hlediska je Lagrangeův variační princip vyjádřen jako celková potenciální energie  $\Pi$ , která je dána rozdílem energie napjatosti tělesa  $W$  a potenciálem vnějšího zatížení  $P$  [20].

$$\Pi = W - P \quad (1)$$

Funkcionál  $\Pi$  závisí na funkcích hledaných posuvů a protože z hlediska variačního principu má být celková potenciální energie minimální, musí být variace funkcionálu rovna nule. Z následně zjištěných posuvů je možno určit složky přetvoření a napětí [20].

### 3.1.1 ZÁKLADNÍ VELIČINY OBECNÉ PRUŽNOSTI

V obecné prostorové statické úloze představují celkem 15 neznámých funkcí proměnných  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Jsou to:

- tři posuvy:  $u, v, w$
- šest přetvoření:  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$
- šest napětí:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$

Tyto funkce jsou provázány systémem obecných rovnic pružnosti, které musí být splněny uvnitř řešené oblasti. Jsou to rovnice statické rovnováhy, rovnice fyzikální a rovnice geometrické. Předepsané okrajové podmínky pak musí být splněny na hranici řešené oblasti [20].

### 3.1.2 TYPY ÚLOH V MKP

V oblasti mechaniky těles MKP umožňuje řešit tyto základní typy úloh:

- Napěťově deformační analýza při statickém, cyklickém i dynamickém zatěžování, včetně nejrůznějších nelineárních úloh
- Vlastní i vynucené kmitání soustav s tlumením i bez tlumení
- Kontaktní úloha pružnosti (rozložení stykového tlaku)
- Stabilitní problémy (ztráta tvarové stability konstrukcí)
- Analýza stacionárního i nestacionárního vedení tepla a určení teplotní napjatosti [18]

Kromě mechaniky se MKP uplatňuje při řešení vedení elektrického náboje a elektromagnetického pole, řešení difuze, akustiky a dalších úloh.



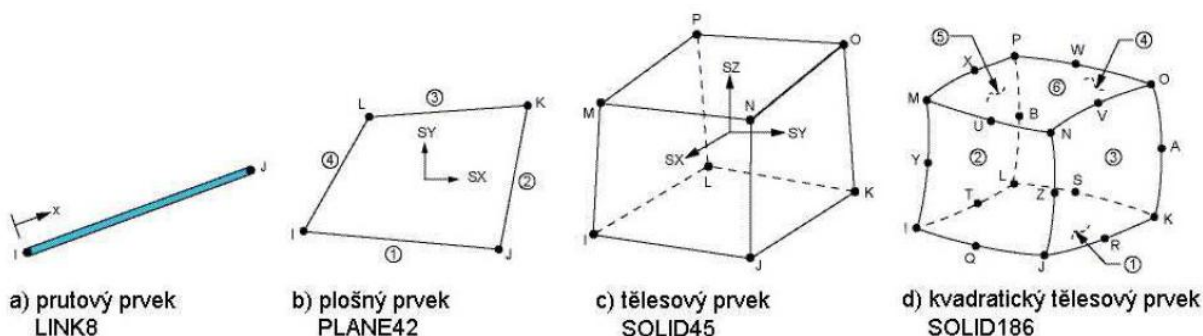


### 3.1.3 ZÁKLADNÍ KROKY V MKP

- Rozdělení tělesa na prvky
- Volba interpolačních funkcí
- Odvození matice tuhosti (příp. hmotnosti) prvku
- Sestavení globální matice tuhosti
- Aplikace okrajových podmínek
- Vyřešení soustavy rovnic
- Získání dodatečně požadovaných veličin

### 3.1.4 ROZDĚLENÍ PRVKŮ POUŽÍVANÝCH V MKP

Typů elementů, stejně jako hledisek, dle kterých se třídí, existuje poměrně velké množství. Volba hledisek třídění má význam i pro správné rozhodování při procesu tvorby výpočtového modelu. Obecně můžeme rozdělit elementy na prutové, plošné a objemové.



Obr. 27 Základní typy prvků v programu ANSYS [17]

## 3.2 ÚPRAVA 3D MODELŮ

Jak bylo řečeno v úvodu této kapitoly, jednotlivé modely tvořící geometrii jsou hlavními vstupy řešených výpočtových analýz. Tomu však předcházely důležité kroky týkající se úpravy této geometrie, které mají podstatný vliv na výsledky všech následně provedených analýz a také na náročnost výpočtů.

Prvním krokem bylo vytvoření sestavy všech dílů v kapitole 2.1 **Popis konstrukce uchycení filtru pevných částic**. Z tohoto celku byla následně vyjmuta podsestava uchycení filtrační jednotky a výfuku, což je hlavní předmět zájmu této diplomové práce. K tomu bylo nutné přidat i podsestavu filtrační jednotky a podsestavu výfuku. Vyčlenění pouze samotné konstrukce uchycení by vedlo k nepřesným výsledkům. Dvě výše zmíněné, přidané podsestavy totiž zcela změní tuhost celé konstrukce a tím ve výsledku celkové rozložení namáhání. Tomuto se bude věnovat kapitola 5 **Statická pevnostně-deformační analýza**.

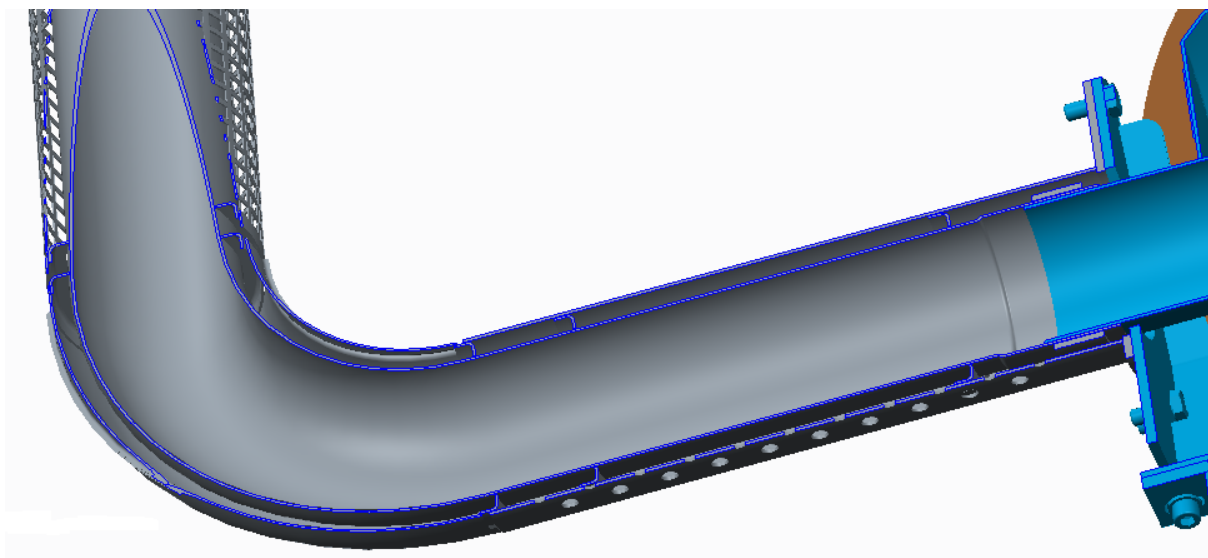


Pro výpočty byly použity náhrady skutečných modelů, což bude obsahem následujících tří podkapitol. Veškeré úpravy byly provedeny v programu Creo Parametric 2.0.

Další podstatnou úpravou geometrie bylo vyřešení náhrady svarových a šroubových spojů. Svařeny jsou k sobě nejen jednotlivé plechy konstrukce uchycení filtrační jednotky, ale i matice a šrouby k jednotlivým plechům. Příkladem může být přivaření 4 šroubů k plechu s názvem „Příruba výfuku“ (Obr. 24), na které se při montáži nasadí celý výfuk a následně dojde k jeho zajištění dotažením matic. To by vyžadovalo detailní modelování těchto svarových housenek a následně vytvoření složité a jemné konečnoprvkové sítě s velkým počtem elementů. Ve výsledku by to znamenalo časově, a zejména co se týče výpočetního výkonu, náročné výpočty. Proto jsem se rozhodl pro zjednodušení, kdy nebudu uvažovat použití šroubových spojů a v celé konstrukci je pro potřeby výpočtů nahradím kontakty typu *Bonded*. Náhrada svarových spojů je řešena v kapitole 3.2.3 **Modely svarů**.

### 3.2.1 MODEL VÝFUKU

Zahrnutí výfuku do výpočtového modelu bylo důležité z důvodu zachování jeho silového a momentového působení na celek uchycení filtrační jednotky, tak jak je tomu při reálném provozu traktoru. Skutečný model výfuku lze vidět na Obr. 18, na Obr. 28 lze vidět jeho řez.

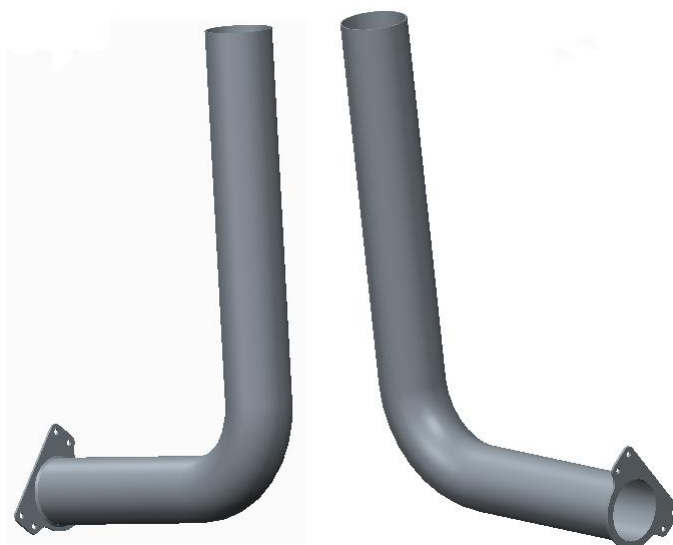


Obr. 28 Řez originálním 3D modelem výfuku

Pro účel popsáný v prvním odstavci postačovalo vytvořit náhradní model z oceli (viz Obr. 29), který bude mít stejné vnější rozměry a stejnou hmotnost, jako skutečný výfuk.

Tab. 2 Charakteristiky náhradního modelu výfuku

VELIČINA/ROZMĚR	OZNAČENÍ	HODNOTA
HMOTNOST	$m_v$	12,4 kg
VNĚJŠÍ PRŮMĚR	$d_{vv}$	128 mm



Obr. 29 Náhradní model výfuku

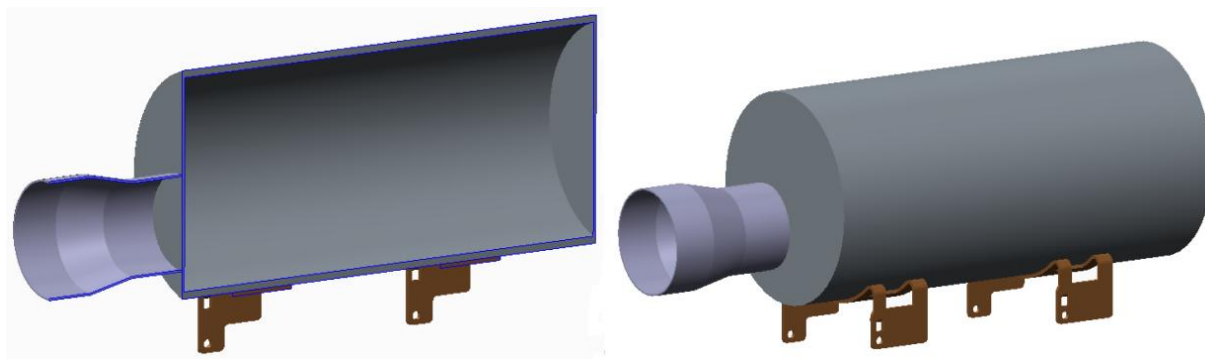
Model je tvořen dutou, zahnutou trubkou a přírubou. Důležité bylo také zachování přesných úhlů natočení:

- úhel mezi osou svislé části trubky a podélnou svislou rovinou traktoru
- úhel mezi osou svislé části trubky a příčnou svislou rovinou traktoru

### 3.2.2 MODEL FILTRAČNÍ JEDNOTKY

Stejně jako výfuk, tak i filtrační jednotka působí svým zatížením na uchycení, ke kterému je připevněna pomocí dvou pásových objímek (viz Obr. 22). Náhradní model byl vymodelován jako dutý válec, jeho vnější rozměry a hmotnost opět odpovídají skutečnému tubusu filtrační jednotky (viz Tab. 3). Pásové objímky obepínající válec po celém jeho obvodu byly odstraněny, ponechána byla jen jejich spodní část, na které je celý tubus usazen.

Z původního modelu filtrační jednotky byla použita krátká spojovací trubka, přes kterou ve skutečnosti proudí výfukové plyny dále do výfuku. Bylo ale nutné udělat úpravu v podobě rozšíření volného konce trubky na větší průměr. Přes tuto rozšířenou válcovou část bude náhradní model filtrační jednotky spojen s náhradním modelem výfuku. Celkový pohled a pohled v řezu je na Obr. 30.



Obr. 30 Náhradní model filtrační jednotky

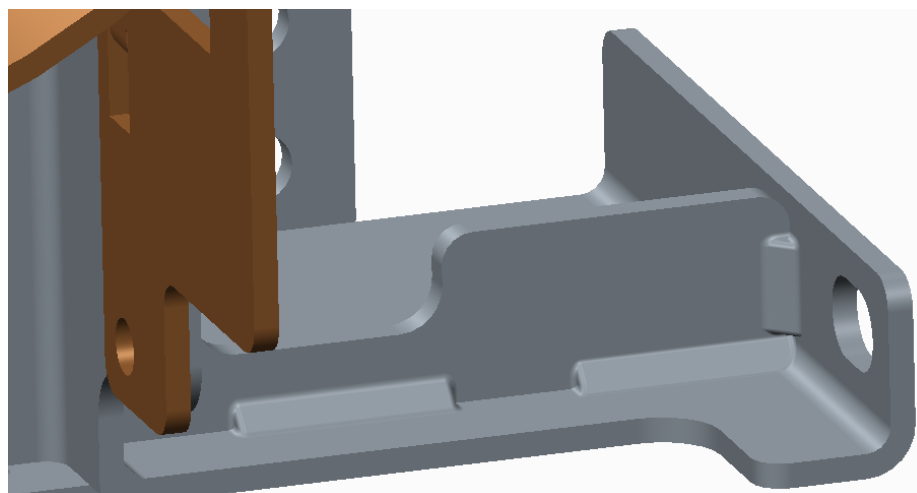


Tab. 3 Charakteristiky náhradního modelu filtrační jednotky

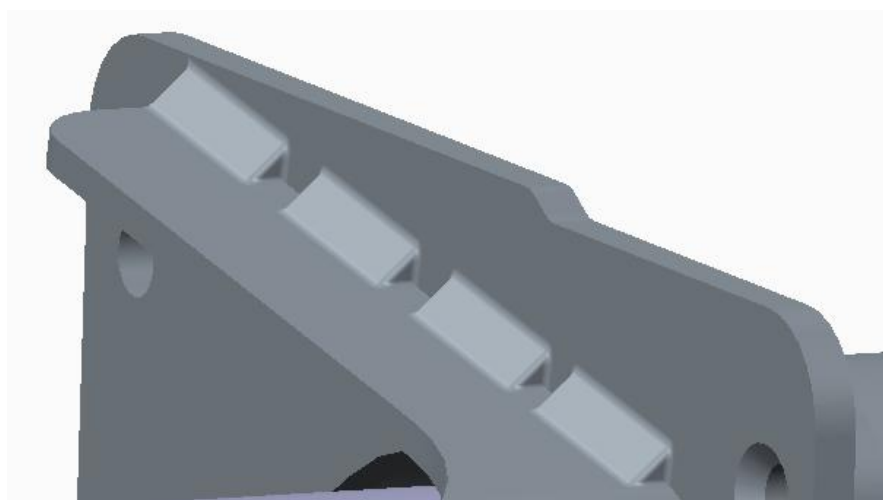
VELIČINA/ROZMĚR	OZNAČENÍ	HODNOTA
HMOTNOST	$m_f$	22,6 kg
VNĚJŠÍ PRŮMĚR	$d_{vf}$	244 mm
DĚLKA	$l_f$	500 mm

### 3.2.3 MODELÝ SVARŮ

Jednotlivé plechové díly jsou k sobě přivařeny koutovými svary. Podkladem pro jejich vymodelování byly výkresy svařenců pro svařování dodané vedoucím diplomové práce. Potřebnými údaji byly rozměry a polohy všech svarů. Výsledný model každé svarové housenky je tvořen trojbokým hranolem, jehož podstavu tvoří rovnoramenný trojúhelník.



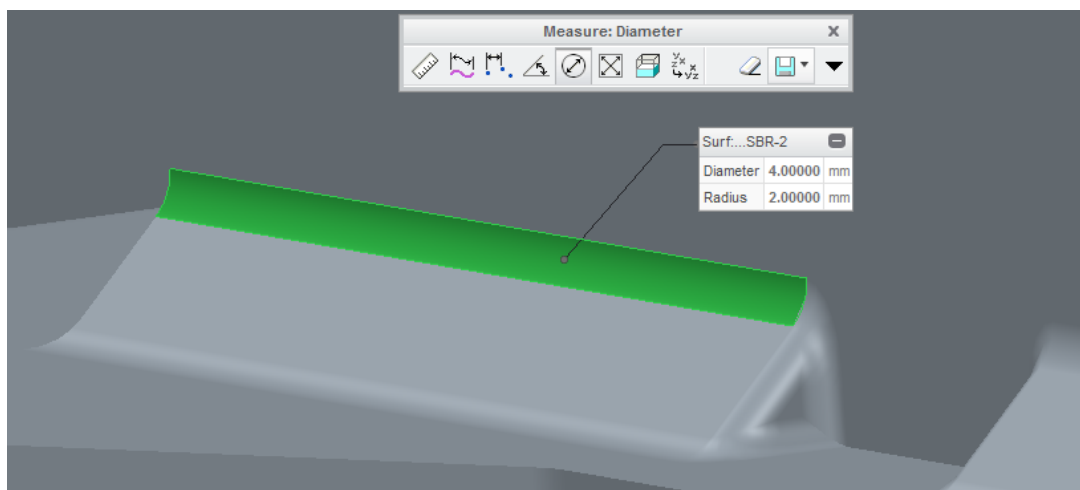
Obr. 31 Vymodelované svarové housenky



Obr. 32 Vymodelované svarové housenky



Protože k největším lokálním koncentracím napětí by docházelo v ostré hraně na přechodu mezi plechem a hranolem tvořícím svarovou housenku, bylo nutné pro snížení vrubového účinku v patě svaru zaoblit vzniklé ostré hrany pomocí příkazu *Round*. Poloměr radiusu jsem zvolil 2 mm, viz *Obr. 33*.



*Obr. 33 Zaoblčení ostrých hran v patě koutového svaru*

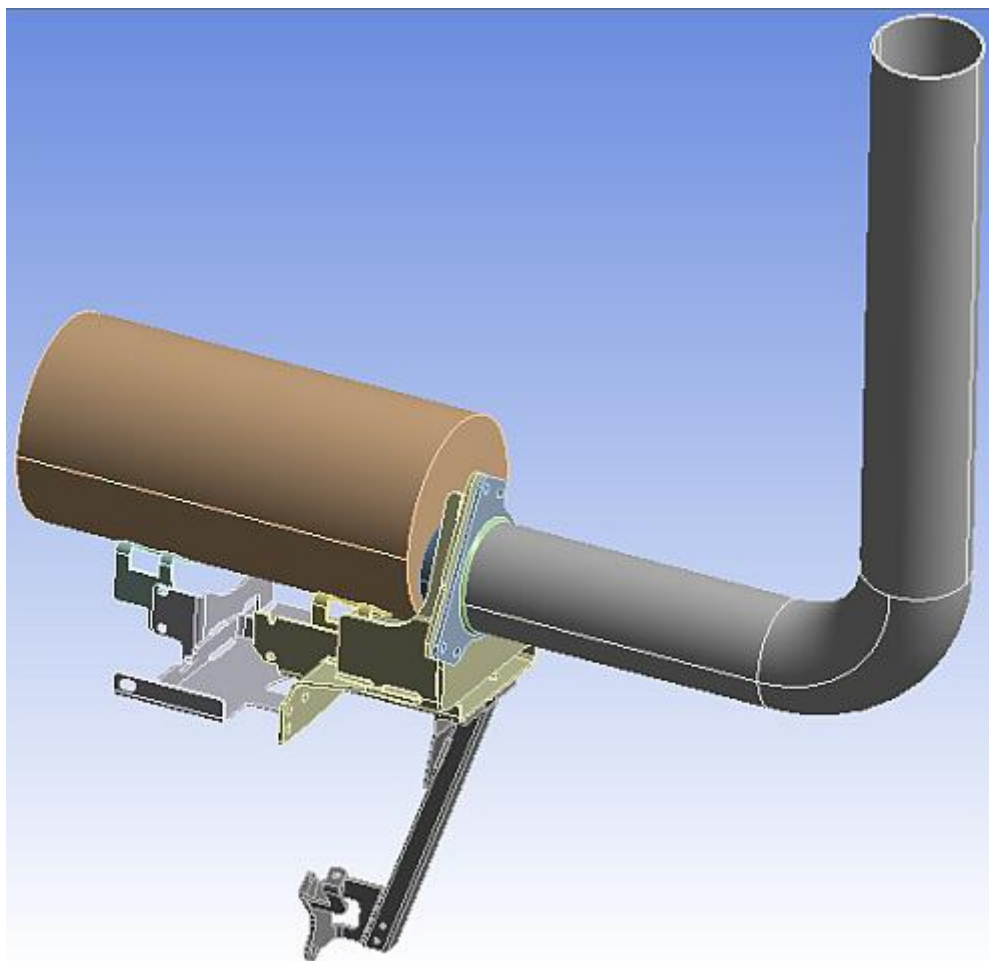
Geometrické parametry svarových spojů se nedají jednoznačně definovat. Jde např. o proměnnou velikost a průřez svarové housenky, velikost případného neprůvaru, poloměr radiusu v patě svaru, velikost a tvar počátečního a koncového kráteru svaru, odchylky změn pozice svařovaných dílů a jejich tloušťek a další parametry. Hodnocení pevnosti a únavové životnosti svarů založené na skutečných hodnotách lokálních napětí a deformací by vyžadovalo velmi podrobné 3D modely, včetně podrobně vymodelovaných svarů. Vzhledem k šíři a náročnosti této problematiky by takové detailní posouzení mohlo být tématem obsahu samostatné diplomové práce. Pro cíle stanovené zadáním této mé diplomové práce, tedy posouzení chování konstrukce uchycení filtrační jednotky jako celku, považuji použité modely svarových spojů za dostatečné.

### 3.2.4 VÝSLEDNÁ GEOMETRIE

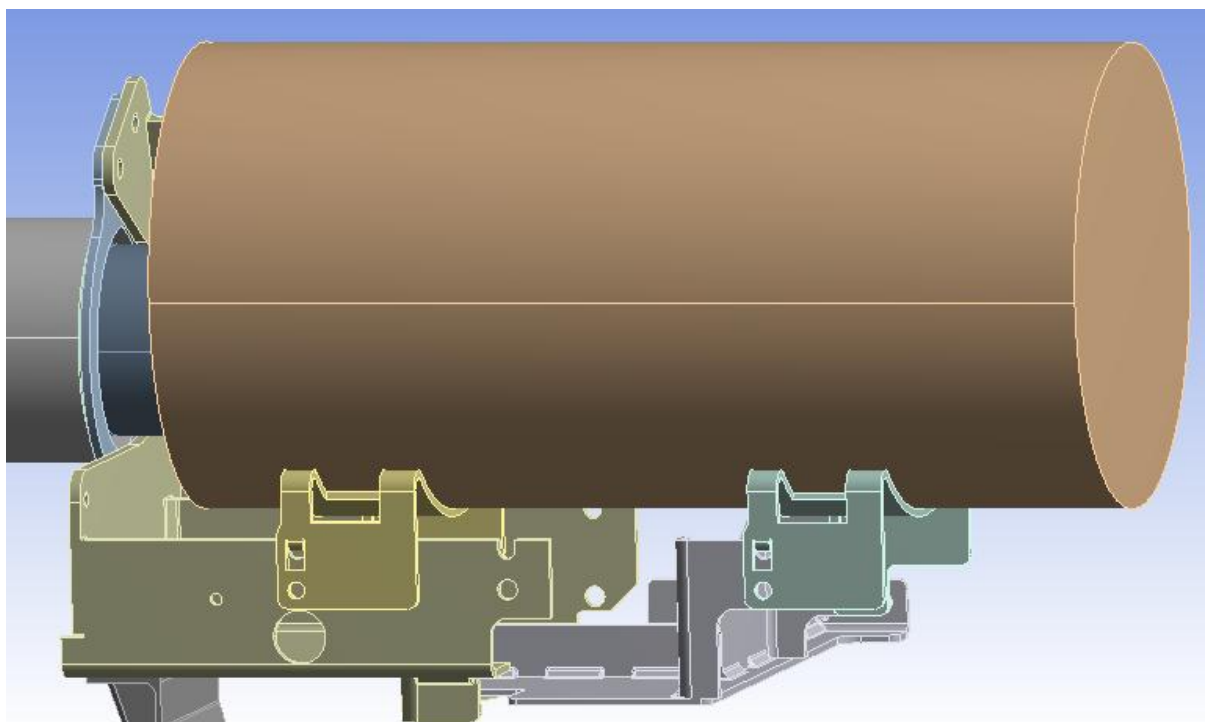
Z celku uchycení filtrační jednotky a výše popsaných náhradních modelů byla vytvořena finální sestava – geometrický 3D model, který byl poté importován do programu ANSYS Workbench ve formátu IGES.

[-] Bounding Box	
Length X	343,5 mm
Length Y	1215, mm
Length Z	1393,2 mm
[-] Properties	
<input type="checkbox"/> Volume	5,9393e-006 mm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Mass	46,624 kg
Scale Factor Value	1,
[-] Statistics	
Bodies	10
Active Bodies	10

*Obr. 34 Detaily importované geometrie*



*Obr. 35 Importovaná geometrie v prostředí programu ANSYS Workbench*



*Obr. 36 Importovaná geometrie v prostředí programu ANSYS Workbench*



### 3.3 VYTVOŘENÍ KONEČNOPRVKOVÉ SÍTĚ

Pro tvorbu konečnoprvkové sítě a následné provedení všech analýz jsem použil program ANSYS Workbench, konkrétně modul Mechanical, který umožňuje import geometrie modelu z CAD systému, tvorbu sítě a jako řešič používá ANSYS. ANSYS je obecně nelineární, multifyzikální program, určený pro analýzu metodou konečných prvků [20].

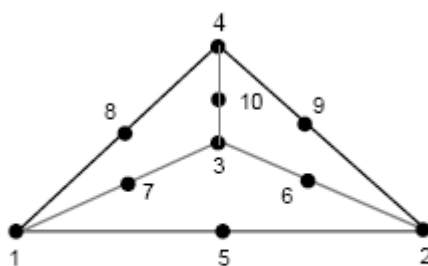
ANSYS Workbench umožňuje automatickou tvorbu sítě, přičemž uživatel má poměrně široké možnosti pro definování základních parametrů použitých pro celou síť, ale také řadu dalších nástrojů pro následné dílčí úpravy sítě. Pokud uživatel žádné parametry neupraví, generátor sítě si další potřebná nastavení zvolí sám, automaticky. Protože automaticky generovaná síť nebyla pro potřeby mé diplomové práce dostačující, musel jsem provést úpravy vygenerované sítě. Prvním krokem byl výběr a použití tří níže popsanych metod síťování.

Metoda *Tetrahedrons* generuje čtyřstěnné elementy (tetraedry). Systém ANSYS Workbench disponuje pro tuto metodu dvěma algoritmy pro tvorbu sítě, já jsem použil algoritmus *Patch Conforming*, který umožňuje automatické síťování objektu přizpůsobující se tvaru geometrie. Výhodou tohoto algoritmu je to, že dovoluje zjemňování sítě a že např. při změně okrajových podmínek či umístění zatížení není potřeba síť znovu generovat.

Metoda *Sweep* spočívá ve vytvoření objemové výpočetní sítě vytažením povrchové sítě s definovaným krokem (počet buněk, velikost elementů) do prostoru. Tato metoda je využitelná zejména pro pravidelnou geometrii, jako je např. válec. Podobné použití má i metoda *MultiZone*.

Dále jsem používal nástroj *Sizing* pro úpravu velikosti prvků křivek, rovin, příp. celých těles.

Vygenerované elementy byly typu Tet10. Tet10 je prvek ve tvaru tetraedru (čtyřstěnu) se 4 uzly ve vrcholech a 6 uzly ve středech hran. Každý uzel má 3 deformační parametry - posuvy ve směru osy x, y a z [21].



Tet10

Obr. 37 Prvek typu Tet10 [22]



Postup při vytváření konečnoprvkové sítě byl následující:

- odhadnutí míst koncentrace napětí
- provedení zkušebního výpočtu a následná identifikace kritických míst s vyšší koncentrací napětí
- zjemnění sítě v kritických místech, v oblastech s nevýraznými gradienty napětí je síť ponechána hrubší
- provedení dalšího zkušebního výpočtu, zhodnocení nově získaných výsledků
- v případě potřeby provést další úpravy sítě
- provedení konečného výpočtu

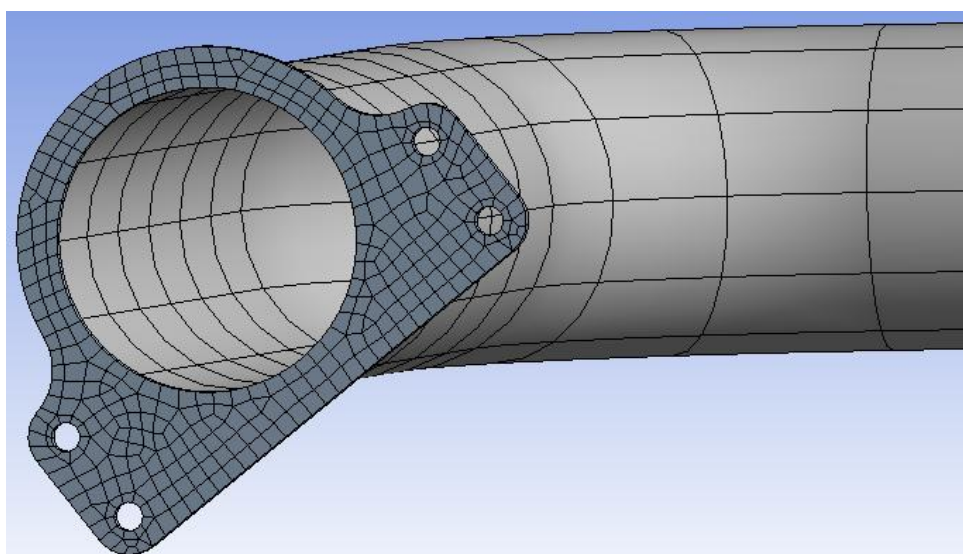
Tento postup jsem provedl několikrát a experimentoval jsem s různými metodami a nástroji pro tvorbu a úpravu sítě. Bylo potřeba brát v úvahu složitost vlastního modelu, čas řešení a také hustotu vygenerované sítě a s tím spojenou přesnost získaných výsledků a hardwarovou náročnost. Při tvorbě sítě jsem byl limitován zejména posledně zmíněným aspektem, výsledná síť je tedy kompromisem zohledňujícím jak přesnost získaných výsledků, tak výpočetní výkon, který jsem měl k dispozici.

### 3.3.1 SÍŤOVÁNÍ VÝFUKU

Síť příruby výfuku má elementy o velikosti 7 mm vygenerované nástrojem *Body Sizing*. Trubka výfuku má síť vytvořenou metodou *Sweep*.

Tab. 4 Parametry sítě výfuku

MODEL	POČET ELEMENTŮ	POČET UZLŮ
TRUBKA	240	1740
PŘÍRUBA	552	3745



Obr. 38 Síť sestavy výfuku



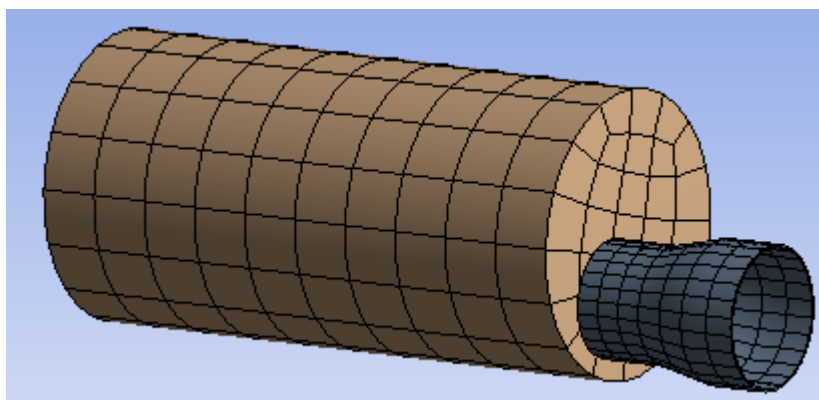


### 3.3.2 SÍŤOVÁNÍ FILTRAČNÍ JEDNOTKY

Síť filtrační jednotky byla vytvořena metodou *MultiZone*, u spojovací trubky jsem použil metodu *Sweep*.

Tab. 5 Parametry sítě filtrační jednotky

MODEL	POČET ELEMENTŮ	POČET UZLŮ
FILTRAČNÍ JEDNOTKA	429	1846
SPOJOVACÍ TRUBKA	182	1404



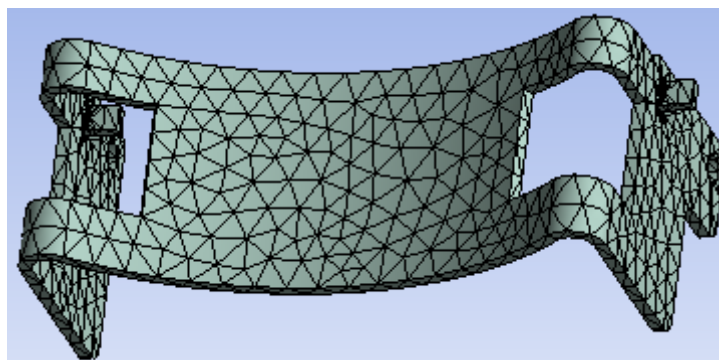
Obr. 39 Síť filtrační jednotky

### 3.3.3 SÍŤOVÁNÍ PÁSOVÝCH OBJÍMEK

Obě pásové objímky byly pokryty elementy o velikosti 10 mm vygenerované nástrojem *Body Sizing*.

Tab. 6 Parametry sítě pásových objímek

MODEL	POČET ELEMENTŮ	POČET UZLŮ
PÁSOVÉ OBJÍMKY	5676	11731



Obr. 40 Síť pásových objímek

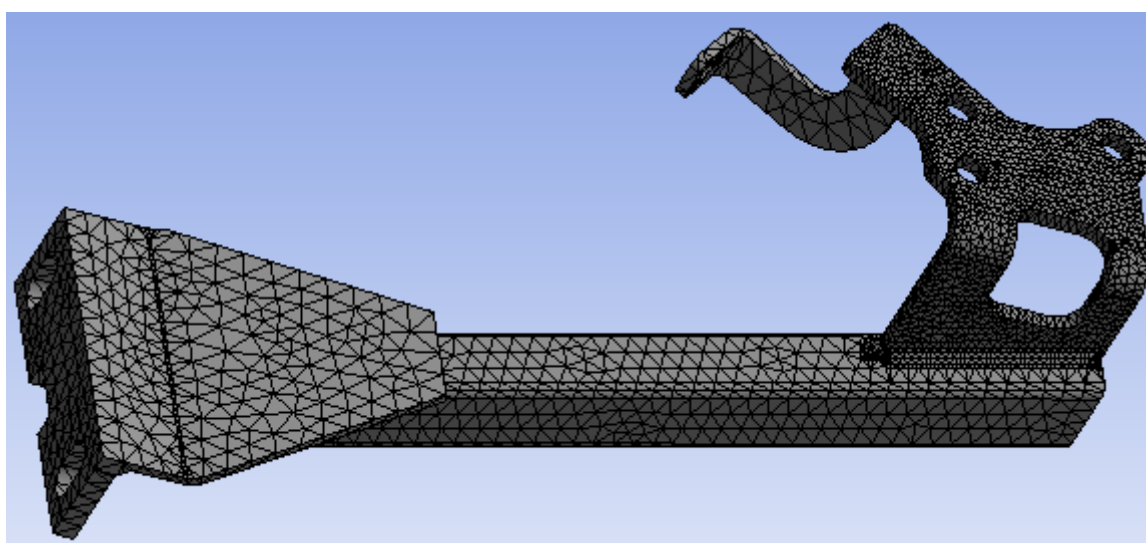


### 3.3.4 SÍŤOVÁNÍ VZPĚRY

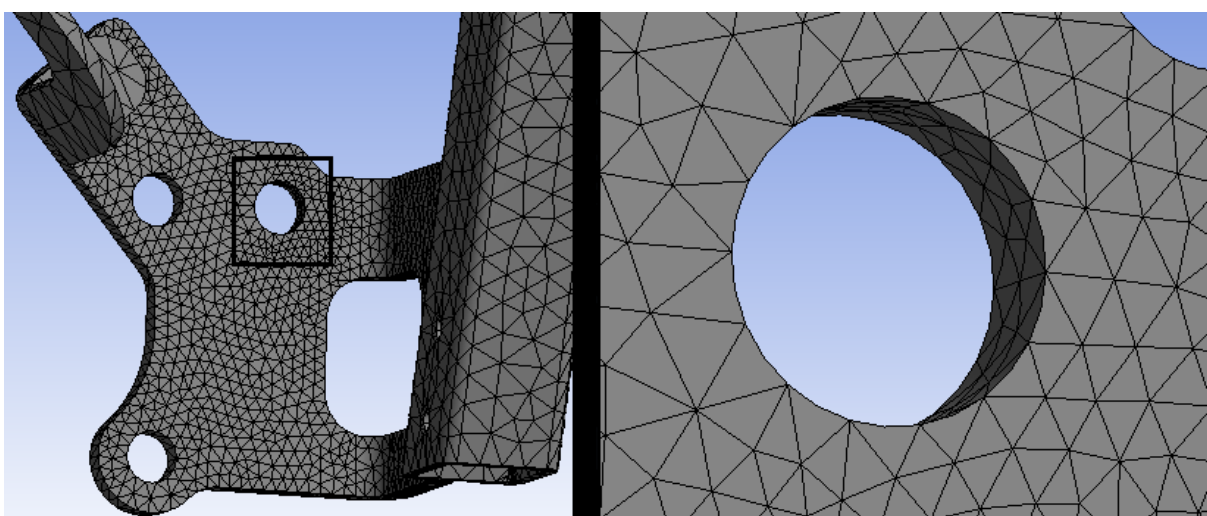
Na síťování vzpěry byla použita metoda *Tetrahedrons* s algoritmem *Patch Conforming*. Pomocí nástroje *Face Sizing* byly na vzpěře vygenerovány elementy o velikosti 7 a 10 mm. Patka vzpěry byla pokládána za kritické místo s vyšší koncentrací napětí, což se později potvrdilo výsledky výpočtu statické analýzy. Proto byla tato část pokryta prvky o velikosti 3mm, v okolí otvorů pro šrouby pak prvky s velikostí 2 mm, viz *Obr. 42*.

Tab. 7 Parametry sítě vzpěry

MODEL	POČET ELEMENTŮ	POČET UZLŮ
VZPĚRA	26480	49099



Obr. 41 Sít' vzpěry



Obr. 42 Detail sítě patky a otvorů pro šrouby

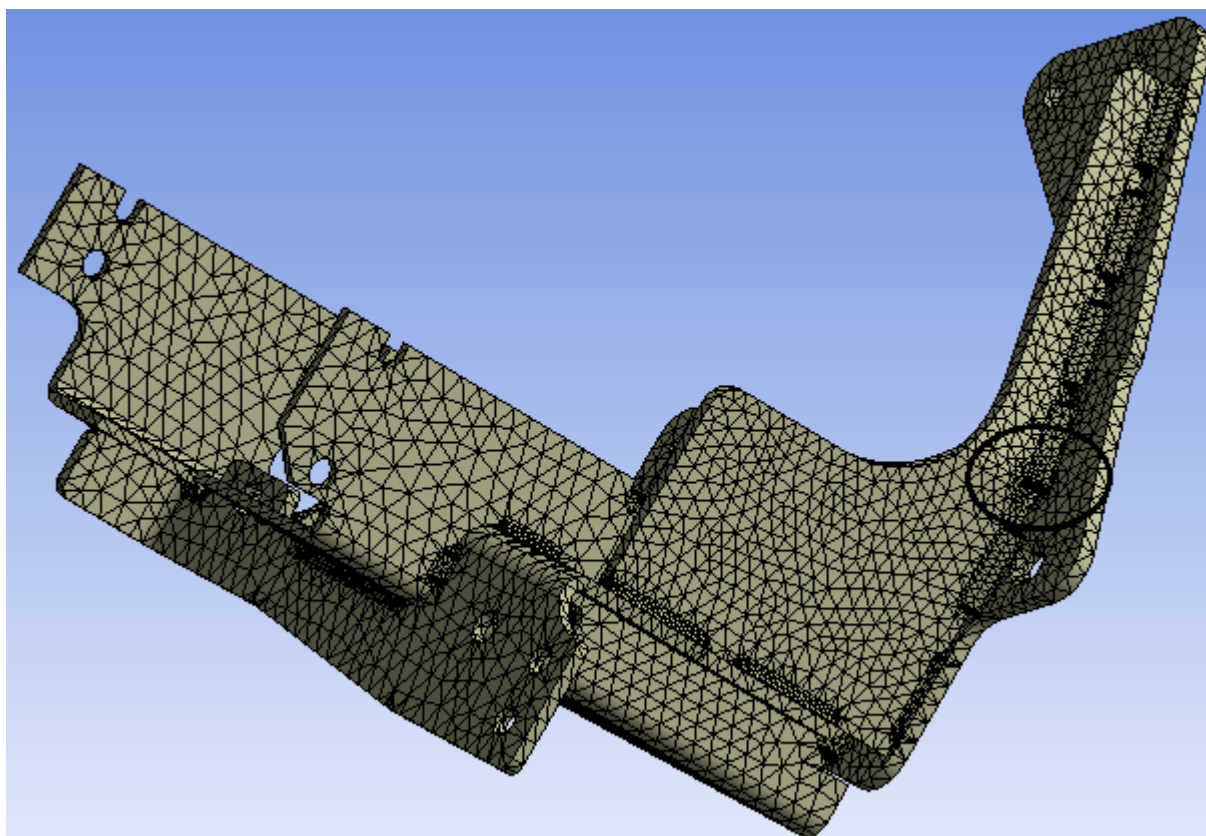


### 3.3.5 SÍŤOVÁNÍ PŘÍRUBY VÝFUKU A UCHYCENÍ FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC

Pro síť tohoto modelu byla také použita metoda *Tetrahedrons* s algoritmem *Patch Conforming*. Nástrojem *Face Sizing* byly vygenerovány elementy o velikosti 6 a 8 mm. Na tomto modelu bylo očekáváno několik kritických míst, jedno z nich byl přechod mezi výztuhou příruby výfuku a svarovou housenkou (zakroužkováno na *Obr. 43*), proto zde byl použit nástroj *Sphere of influence*. Tento nástroj umožňuje vytvořit pomyslnou kouli o zadaném průměru a prvkům, které leží v objemu této koule, lze přiřadit velikost. V tomto případě měla pomyslná koule průměr 14 mm a velikost prvků byla 2 mm.

Tab. 8 Parametry sítě příruby výfuku a uchycení filtru pevných částic

MODEL	POČET ELEMENTŮ	POČET UZLŮ
PŘÍRUBA VÝFUKU A UCHYCENÍ FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC	30046	56915



Obr. 43 Síť příruby výfuku a uchycení filtru pevných částic

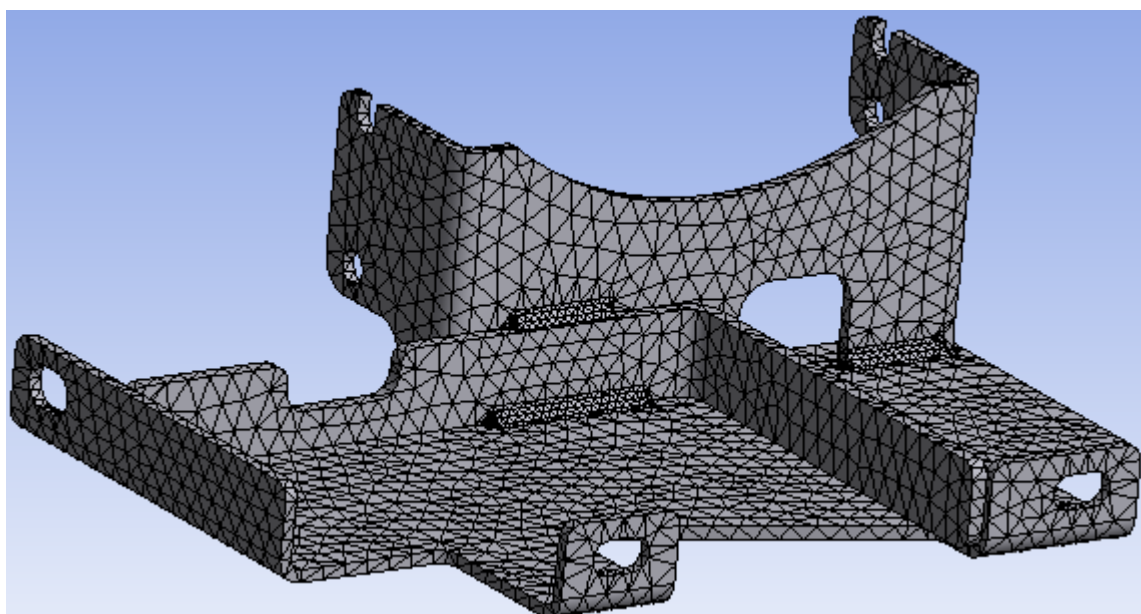


### 3.3.6 SÍŤOVÁNÍ UCHYCENÍ OXIDAČNÍHO KATALYZÁTORU

Opět byla použita metoda *Tetrahedrons* s algoritmem *Patch Conforming*. Nástrojem *Face Sizing* byly vygenerovány elementy o velikosti 8 mm.

Tab. 9 Parametry sítě uchycení oxidačního katalyzátoru

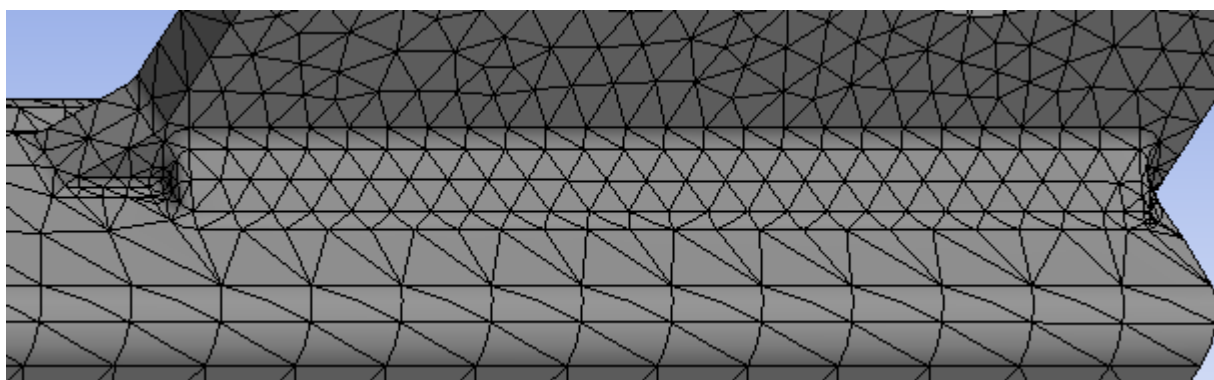
MODEL	POČET ELEMENTŮ	POČET UZLŮ
UCHYCENÍ OXIDAČNÍHO KATALYZÁTORU	16375	30570



Obr. 44 Síť uchycení oxidačního katalyzátoru

### 3.3.7 SÍŤOVÁNÍ SVARŮ

Svarové housenky byly pomocí nástroje *Face sizing* pokryty prvky o velikosti 3 mm.



Obr. 45 Příklad sítě svarové housenky v místě patky na vzpěře

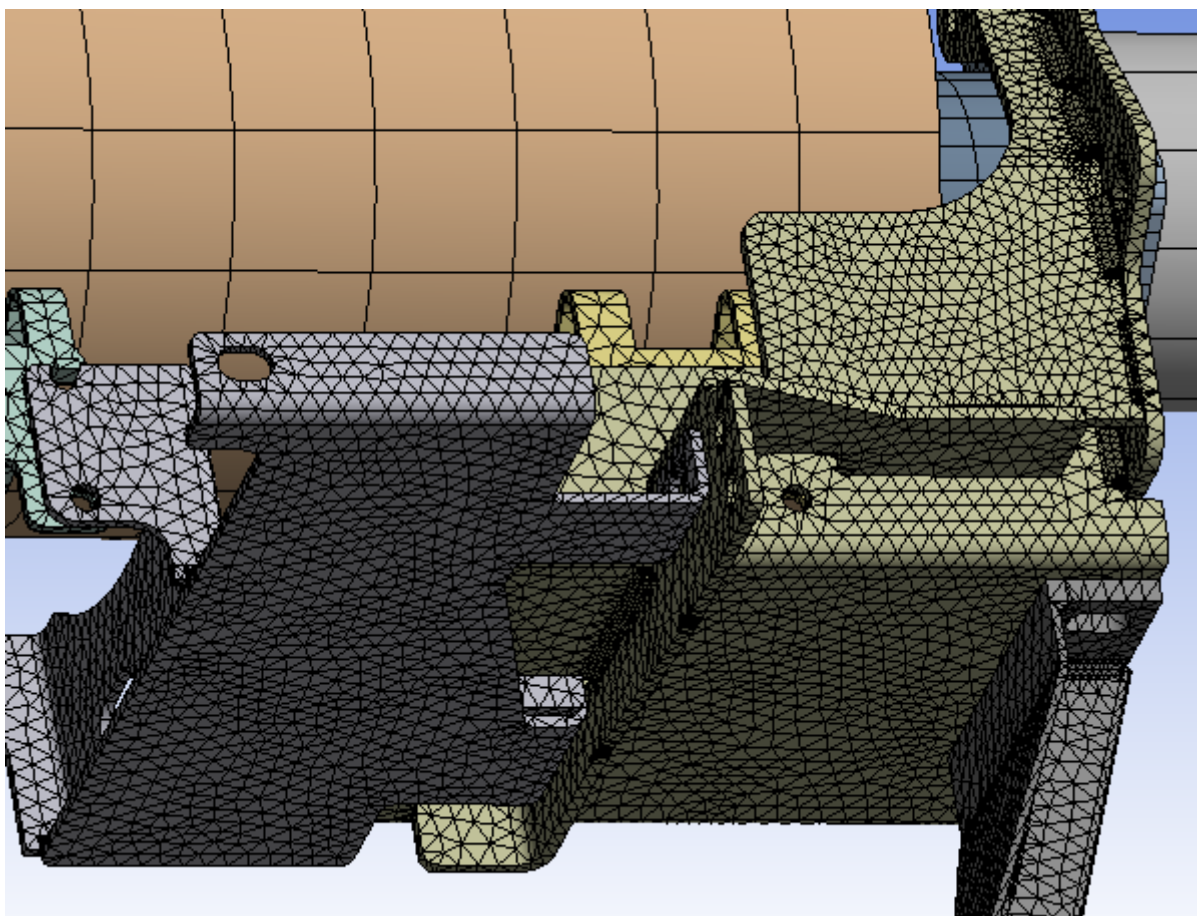


### 3.3.8 VÝSLEDNÁ KONEČNOPRVKOVÁ SÍŤ

Konečná podoba konečnoprvkové sítě celé sestavy je na *Obr. 46*.

*Tab. 10* Parametry sítě finálního geometrického modelu

MODEL	POČET ELEMENTŮ	POČET UZLŮ
FINÁLNÍ GEOMETRICKÝ MODEL	79980	157050



*Obr. 46* Část vysíťované sestavy



## 4 MODÁLNÍ ANALÝZA

Modální analýzu provádíme za účelem zjištění vlastních tvarů a vlastních frekvencí součásti. Protože konstrukce uchycení filtrační jednotky a výfuku je připevněna k motoru, je nutné zjistit, zda není provozována v režimu, kdy by mohlo dojít k rezonanci - čili shodě frekvence periodicky-se budících sil v motoru s vlastní frekvencí konstrukce uchycení. V takovém případě by mohlo vlivem rezonance dojít k rozkmitání nebo až k úplnému zničení konstrukce.

### 4.1 ZADÁNÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

Před samotným výpočtem bylo nutné importovat vysíťovanou geometrii do programu ANSYS Workbench a zadat vlastnosti materiálu (viz *Tab. 11*). Zadána byla ocel, což je izotropní, lineárně elastický materiál.

*Tab. 11 Vlastnosti použitého materiálu*

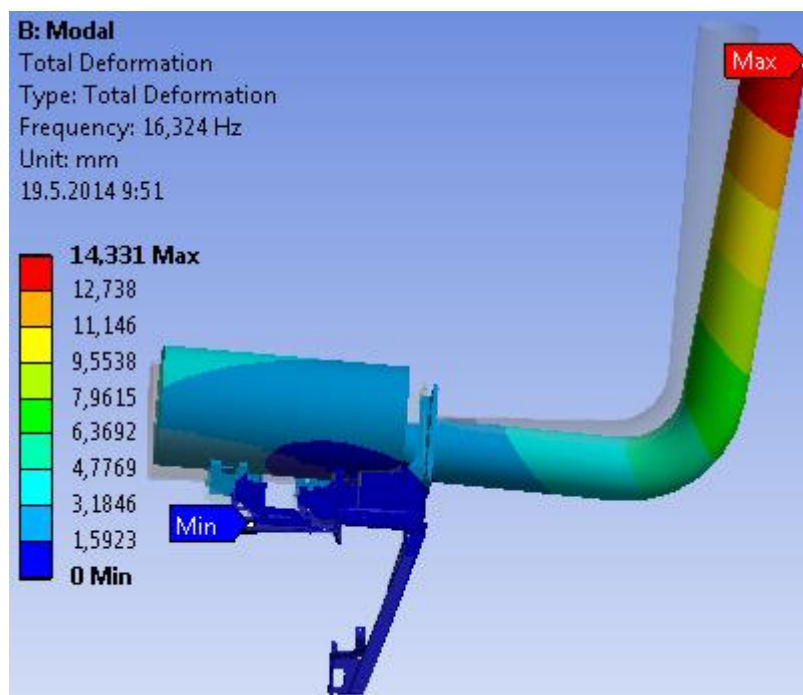
VELIČINA	OZNAČENÍ	HODNOTA
HUSTOTA MATERIÁLU	$\rho$	7850 kg·m <sup>-3</sup>
MODUL PRUŽNOSTI V TAHU	E	2,1·10 <sup>5</sup> MPa
POISSONOVA KONSTANTA	$\mu$	0,3 [-]

### 4.2 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ MODÁLNÍ ANALÝZY

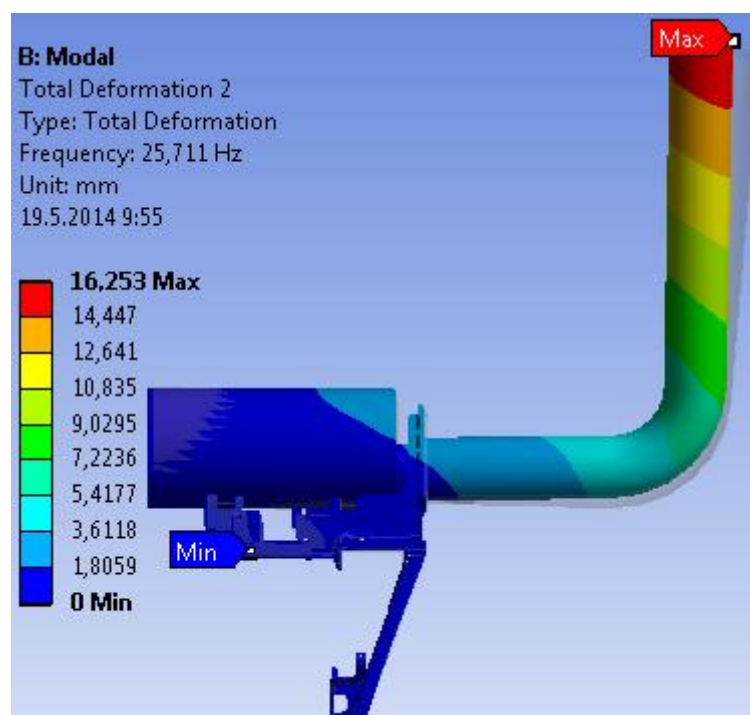
Maximální otáčky motoru Z 1606 jsou 2460 min<sup>-1</sup> [16]. Jak lze vidět z výsledků v *Tab. 12*, v rozsahu pracovních otáček motoru se nachází 2 vlastní tvary a vlastní frekvence. Čili existuje teoretický předpoklad, že dojde k rozkmitání celé konstrukce, pokud by byl traktor provozován po delší dobu v rezonančních otáčkách sestavy uchycení filtrační jednotky. V tomto případě je však nutné vzít v úvahu fakt, že posuzovaná konstrukce je už v sériové výrobě, je namontována na traktorech používaných v provozu a nevyskytují se žádné problémy s pevností a integritou tohoto posuzovaného celku. I přes zjednodušení a úpravy, které jsem při tvorbě výpočtového modelu provedl, a s přihlédnutím k výše zmíněnému bezproblémovému provozu, lze konstatovat, že současná konstrukce má dostatečnou tuhost a při provozu nedojde k nadměrnému rozkmitání vedoucímu k porušení konstrukce.

*Tab. 12 Výsledky modální analýzy*

MÓD VLASTNÍHO KMITÁNÍ	VLASTNÍ FREKVENCE	OTÁČKY MOTORU
	f [Hz]	n [min <sup>-1</sup> ]
1.	16,3	980
2.	25,7	1543



Obr. 47 1. Vlastní tvar a vlastní frekvence ( $f = 16,3$  Hz) s obrysem nedeformovaného tvaru



Obr. 48 2. Vlastní tvar a vlastní frekvence ( $f = 25,7$  Hz) s obrysem nedeformovaného tvaru



## 5 STATICKÁ PEVNOSTNĚ-DEFORMAČNÍ ANALÝZA

Cílem pevnostní analýzy stávající konstrukce je zjistit napětí a deformace a odhalit potenciálně nebezpečná místa. Nejprve bylo nutné zadat okrajové podmínky, mezi které patří nastavení kontaktů mezi jednotlivými tělesy, definování vazeb celé sestavy k okolí a zadání zatížení.

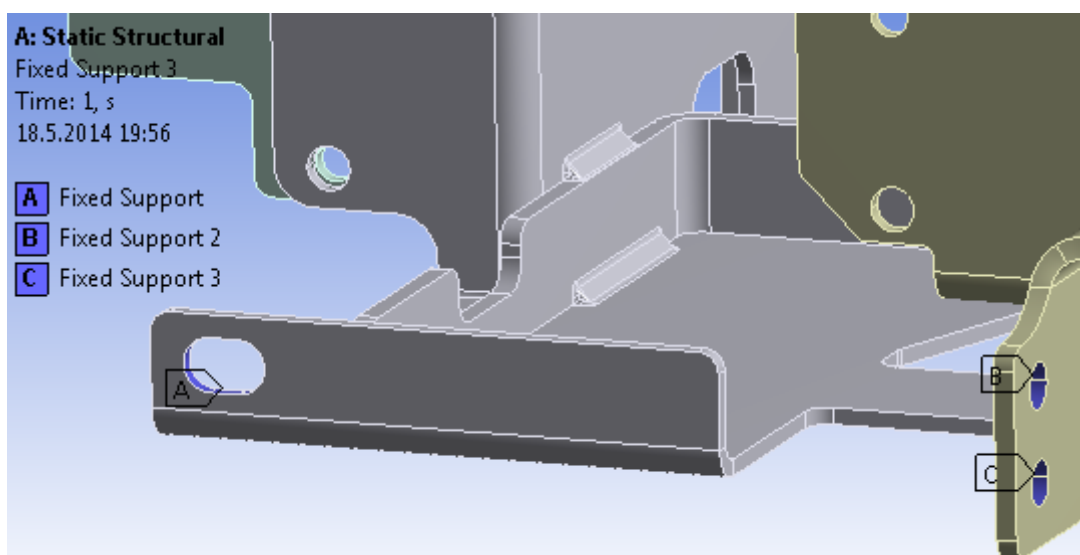
### 5.1 ZADÁNÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

#### 5.1.1 KONTAKTY TĚLES

Kontaktním plochám mezi jednotlivými tělesy importované geometrie byl přiřazen kontakt typu *Bonded*. Tento kontakt zajistí, že nedojde k žádné penetraci a obě stykové plochy součástí v kontaktu budou stále spojeny a během výpočtu nedojde k jejich oddělení.

#### 5.1.2 VAZBY SESTAVY

Celá sestava uchycení filtrační jednotky je ve skutečnosti v pěti místech připevněna šroubovými spoji na blok motoru a přepážku mezi kabinou řidiče a motorovým prostorem (viz *Obr. 21*). Přes tato místa jsou do konstrukce uchycení přenášeny vibrace od motoru a další dynamická zatížení vzniklá při provozu traktoru, zejména se jedná o dynamické rázy způsobené přejezdem nerovností na vozovce a v terénu. Protože nejsou k dispozici data, které by tyto vstupy definovaly, budu tyto vazby považovat za pevné. V programu ANSYS Workbench jsem proto použil vazbu typu *Fixed support*, která odebírá všechny stupně volnosti.



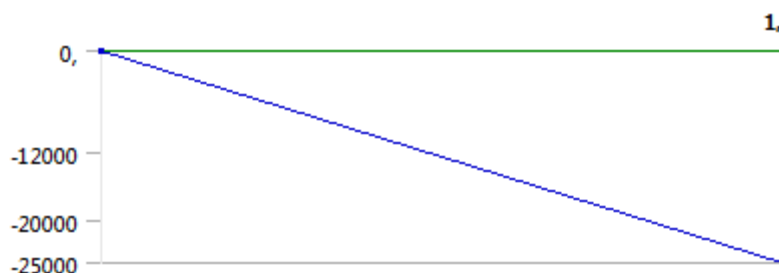
*Obr. 49 Vazba typu Fixed support*





### 5.1.3 ZATÍŽENÍ

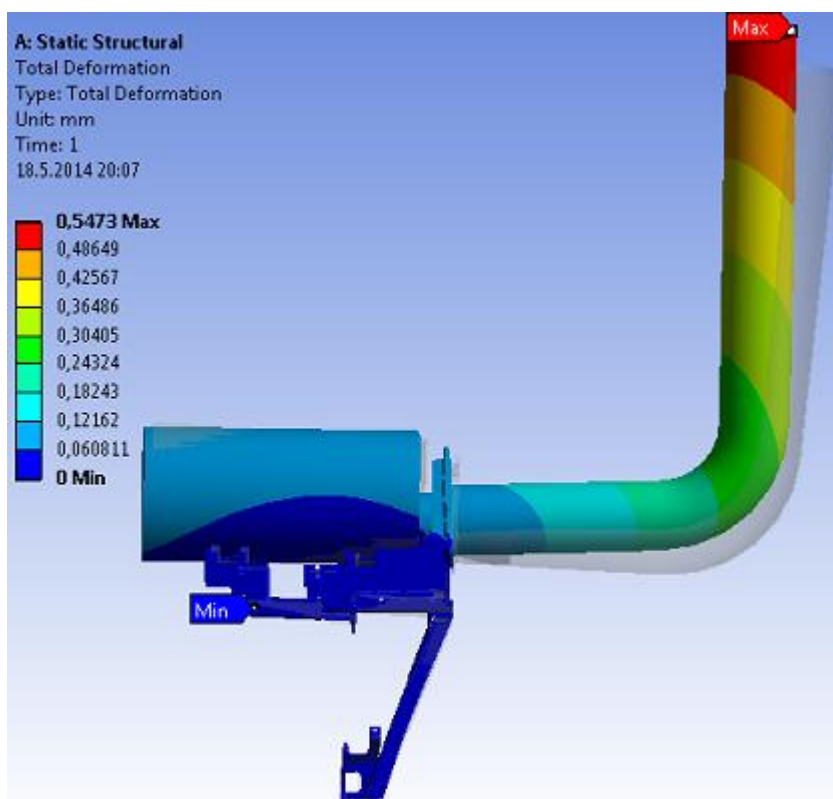
Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, neměl jsem k dispozici data popisující dynamické buzení celé konstrukce. Ve firmě Zetor používají pro přibližnou náhradu a simulaci skutečných dynamických jevů tzv. dynamický koeficient  $k_d = 2,5$ , který jsem po konzultaci s vedoucím práce použil. Na celou konstrukci bude tedy kromě gravitačního zrychlení  $g$  působit i tzv. dynamické zrychlení  $a_d$ , které bude definováno jako 2,5 násobek gravitačního zrychlení a bude působit i ve stejném směru. Po zaokrouhlení na celá čísla bude  $a_d = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Na celou konstrukci bude dynamické a gravitační zrychlení aplikováno během jedné sekundy a to s lineárním nárůstem z nuly na svou maximální hodnotu a zpět na nulovou hodnotu.



Obr. 50 Grafické zobrazení průběhu dynamického zrychlení v prostředí programu ANSYS Workbench. Stejný průběh má i gravitační zrychlení.

## 5.2 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ STATICKÉ PEVNOSTNĚ-DEFORMAČNÍ ANALÝZY

Celková deformace konstrukce uchycení je na Obr. 51. Maximální posuv má hodnotu 0,55 mm a dochází k němu na horním konci výfukové trubky.



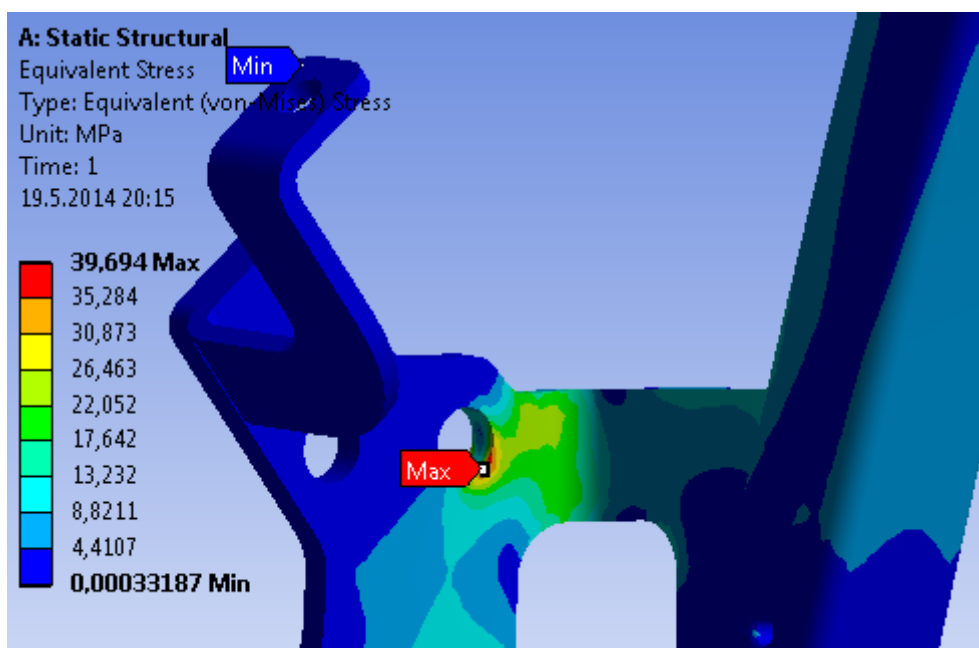
Obr. 51 Celkový posuv uchycení filtrační jednotky



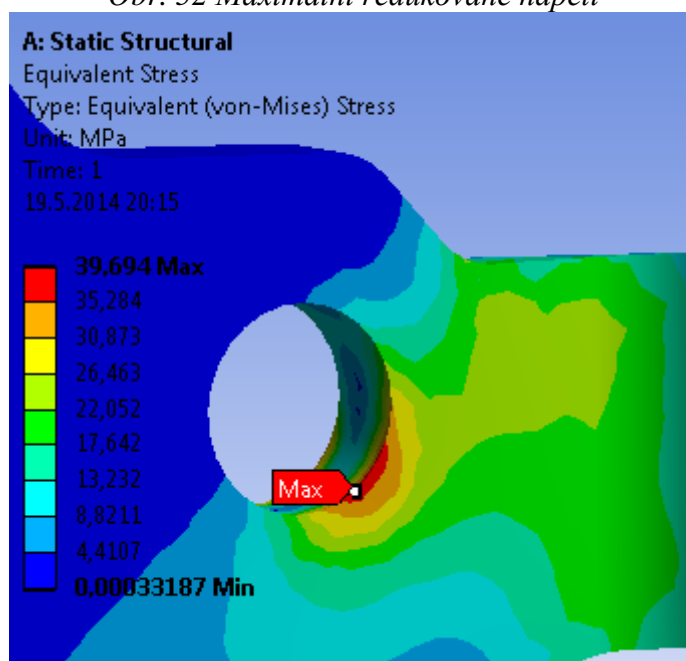
Výsledkem výpočtu napětí při statickém zatížení jsou průběhy 3-osé napjatosti. K přepočtu této víceosé napjatosti s hlavními napětími  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$  na jednoosou napjatost využívá ANSYS Workbench teorie měrné energie napjatosti změny tvaru pro houževnaté materiály HMM (von-Mises stress). Výsledkem je redukované (von-Mises) napětí  $\sigma_{red}$  definované jako:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (2)$$

Maximální hodnota redukovaného napětí je  $\sigma_{red} = 39,694$  MPa a nachází se na patce vzpěry v místě kde je sestava předepnutým šroubem uchycena k bloku motoru, viz *Obr. 52* a *Obr. 53*. Díra pro šroub představuje vrub s ostrou hranou.



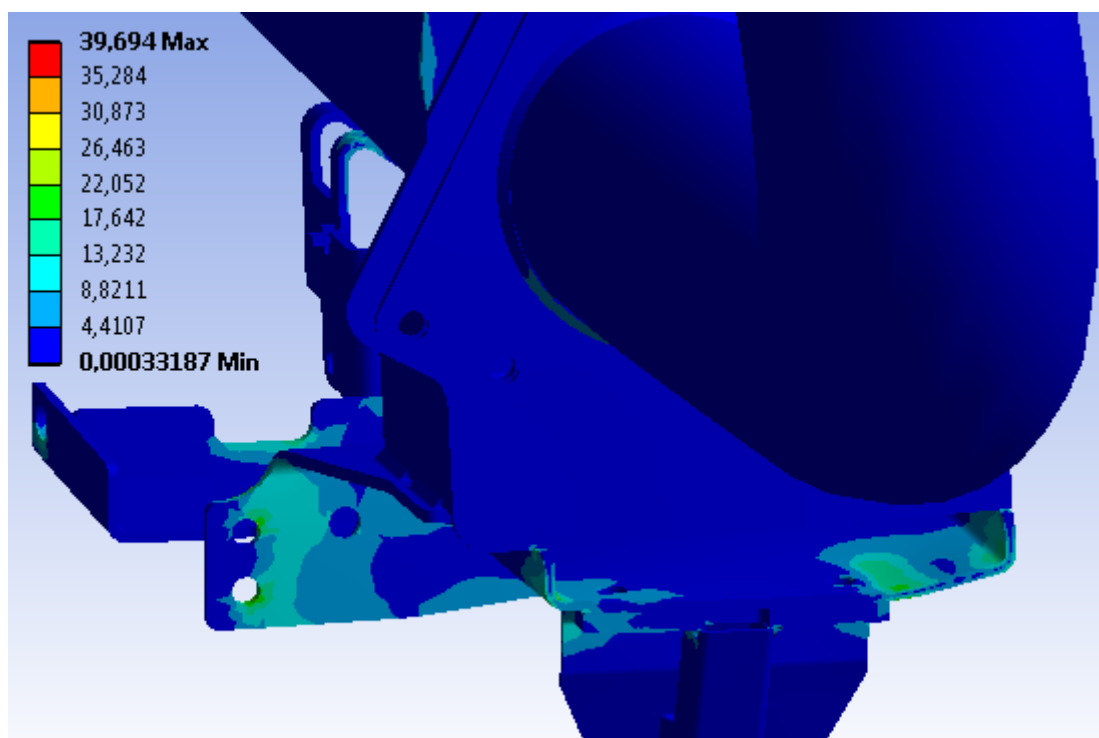
*Obr. 52 Maximální redukované napětí*



*Obr. 53 Maximální redukované napětí - detail*



Další místa s vyšší koncentrací napětí se nachází v místě, kde je sestava připevněna k přepážce a také v místě kontaktu vzpěry s přírubou výfuku a uchycení filtru pevných částic, viz *Obr. 54*.



*Obr. 54* Další místa s vyšší koncentrací napětí

Je možno určit bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti:

$$k_k = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{235}{39,694} = 5,92 \quad (3)$$

Z výsledku tohoto výpočtu vyplývá, že k žádné plastické deformaci nedojde. Při výpočtu, který by nezohledňoval dynamické jevy dynamickým koeficientem  $k_d$ , by byly hodnoty zjištěného redukovaného napětí ještě nižší.

I přes úpravy geometrie a zjednodušení okrajových podmínek považuji výsledky za dostatečně důvěryhodné a pro přibližné zhodnocení chování celé konstrukce za postačující. Lze tedy konstatovat, že současná konstrukce je nadimenzována dostatečně a pevnostně vyhovuje.

Zcela detailní posouzení chování celé konstrukce by vyžadovalo zahrnutí vlivu vibrací od motoru a nerovnosti terénu, dále zahrnutí vlivu předepnutých šroubových spojů a zejména detailní modely skutečného výfuku a filtrační jednotky. Kromě dostatečně výkonného hardwaru by bylo potřebné znát hlavně podrobné konstrukční uspořádání a způsob výroby výfuku i filtrační jednotky (svařování, pájení, lepení), přesné materiálové vlastnosti a další potřebné informace.

Vzhledem k výše uvedeným závěrům nepovažuji za nutné provádět jakákoliv konstrukční opatření na tomto posuzovaném konstrukčním celku.



## 6 ÚNAVOVÉ NAMÁHÁNÍ KONSTRUKCE UCHYCENÍ FILTRAČNÍ JEDNOTKY

Jak už bylo zmíněno v minulých kapitolách, celá konstrukce uchytení filtrační jednotky je vystavena blíže nedefinovaným, časově proměnným vnějším zatížením. Pro určení bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu únavového porušení je nutné nasimulovat provozní stavy, kterými je konstrukce namáhána. První zátěžný stav bude působení dynamického zrychlení  $a_d$  (viz kap. 5.1.3), druhý zátěžný stav bude působení toho stejného zrychlení, ovšem s opačným směrem působení. Hlavní vstupy analýzy zhodnocení únavové bezpečnosti konstrukce tedy budou výsledky statické analýzy, konkrétně maximální, minimální a redukovaná napětí. Abych získal tyto potřebné veličiny i pro druhý zátěžný stav, bylo nutné provést druhou statickou analýzu.

### 6.1 VÝBĚR KRITICKÉHO MÍSTA

Místem, kde budu řešit bezpečnost, bude oblast s největší koncentrací napětí. U obou zátěžných stavů je toto nebezpečné místo totožné, jde o hranu otvoru pro šroub na patce vzpěry, viz *Obr. 52* a *Obr. 53*.

### 6.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POUŽITÉHO MATERIÁLU

Pro následující výpočty budu potřebovat materiálové charakteristiky použité oceli uvedené v kapitole 2.2.1

*Tab. 23 Materiálové charakteristiky oceli S235JR+N*

VELIČINA	OZNAČENÍ	HODNOTA
MEZ KLUZU	$R_e$	235 MPa
MEZ PEVNOSTI	$R_m$	340 MPa
MEZ ÚNAVY V TAHU/TLAKU	$\sigma_{cT}$	130 MPa
MEZ ÚNAVY V OHYBU	$\sigma_{cO}$	170 MPa

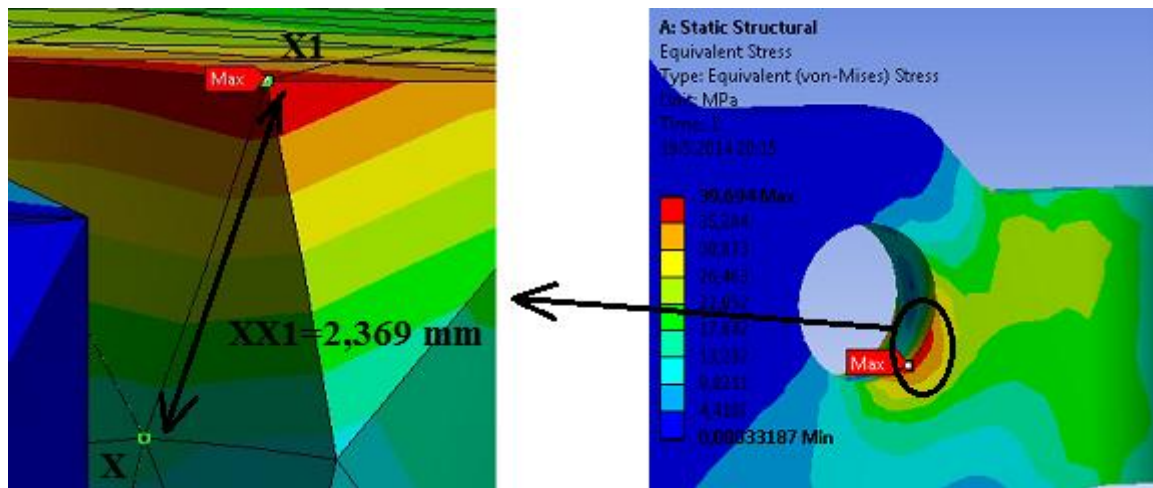
### 6.3 ŘEŠENÍ BEZPEČNOSTI METODOU LSA

Metoda LSA (z anglického Local Stress Analysis) využívá skutečná elastická napětí stanovená pomocí MKP. Vyhodnocuje dva zátěžné stavy, které způsobují minimální a maximální deformace. Analýzou těchto stavů zjistíme charakter průběhu napětí zejména k povrchovým vrstvám a porovnání diferencí mezi nimi nám určí náchylnost k únavovému porušení.

Níže jsou uvedeny dílčí výpočty pro určení hledané bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu únavového porušení  $k$ .



Prvním krokem bylo určení vzdálenosti dvou uzlů  $XX_1$ , což je jedna z hodnot potřebných pro určení poměrného gradientu  $\chi_R$ . V uzlu  $X_1$  na povrchu součásti jsem odečetl hodnotu maximálního redukovaného napětí  $\sigma_{X1}$ . V tomto místě jsem poté vedl pomyslný řez kolmý k povrchu součásti a na nejbližším uzlu  $X$  jsem určil hodnotu redukovaného napětí  $\sigma_X$ .



Obr. 55 Selekce elementu pro určení poměrného gradientu

Výpočet poměrného gradientu napětí:

$$\chi_R = \frac{1}{\sigma_{X1}} \cdot \left( \frac{\sigma_{X1} - \sigma_X}{|XX_1|} \right) = \frac{1}{90,936} \cdot \left( \frac{90,936 - 32,588}{2,369} \right) = 0,271 \text{ mm}^{-1} \quad (4)$$

Korekční součinitel zahrnuje vliv velikosti tělesa a vliv způsobu zatěžování.

Výpočet korekčního součinitele  $f_G$ :

$$f_G = 1 + \frac{\frac{\sigma_{c0} - 1}{\sigma_{cT}}}{\frac{2}{d_{VZ}}} \cdot \chi_R = 1 + \frac{\frac{170}{130} - 1}{\frac{2}{7,5}} \cdot 0,271 = 1,313 \quad (5)$$

kde  $d_{VZ}$  je průměr zkušební vzorku.

Výpočet součinitele vrubu a koncentrace napětí  $\beta/\alpha$ :

$$\frac{\beta}{\alpha} = 1 + \sqrt{\chi_R} \cdot 10^{-\left(0,35 + \frac{R_g}{810}\right)} = 1 + \sqrt{0,271} \cdot 10^{-\left(0,35 + \frac{235}{810}\right)} = 1,031 \quad (6)$$



Pro výpočty následujících parametrů je potřebné mít výsledky statické analýzy, konkrétně maximální, minimální a redukovaná napětí pro oba zátěžné stavy. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 34.

Tab. 44 Lokální napětíové stavy v nebezpečném místě

PRVNÍ ZÁTĚŽNÝ STAV „A“			DRUHÝ ZÁTĚŽNÝ STAV „B“		
VELIČINA	OZNAČENÍ	HODNOTA	VELIČINA	OZNAČENÍ	HODNOTA
REDUKOVANÉ NAPĚTÍ	$\sigma_{redA}$	39,694 MPa	REDUKOVANÉ NAPĚTÍ	$\sigma_{redB}$	90,936 MPa
PRVNÍ HLAVNÍ NAPĚTÍ	$\sigma_{1A}$	50,420 MPa	PRVNÍ HLAVNÍ NAPĚTÍ	$\sigma_{1B}$	136,080 MPa
TŘETÍ HLAVNÍ NAPĚTÍ	$\sigma_{3A}$	16,111 MPa	TŘETÍ HLAVNÍ NAPĚTÍ	$\sigma_{3B}$	39,113 MPa

Výpočet amplitudy napětí a střední hodnoty redukovaného napětí:

$$\sigma_{emax} = \text{sign}(\sigma_{1A}) \cdot \sigma_{redA} = \text{sign}(136,08) \cdot 90,936 = 90,936 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$\sigma_{emin} = \text{sign}(\sigma_{1B}) \cdot \sigma_{redB} = \text{sign}(50,42) \cdot 39,694 = 39,694 \text{ MPa} \quad (8)$$

kde  $\sigma_{emax}$  a  $\sigma_{emin}$  jsou extrémní hodnoty redukovaného napětí.

$$\sigma_{ea} = \frac{\sigma_{emax} - \sigma_{emin}}{2} = \frac{90,936 - 39,694}{2} = 25,621 \text{ MPa} \quad (9)$$

kde  $\sigma_{ea}$  je amplituda napětí.

$$\sigma_{em} = \frac{\sigma_{emax} + \sigma_{emin}}{2} = \frac{90,936 + 39,694}{2} = 65,315 \text{ MPa} \quad (10)$$

kde  $\sigma_{em}$  je střední napětí.

Výpočet bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu únavového porušení  $k$ :

$$\frac{1}{k} = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{\sigma_{ea}}{\sigma_{cT} \cdot \eta_{\sigma} \cdot \nu_{\sigma} \cdot f_G} + \frac{\sigma_{em}}{R_m} = 1,031 \cdot \frac{25,621}{130 \cdot 1 \cdot 0,75 \cdot 1,313} + \frac{65,315}{340} = 0,399 \quad (11)$$

kde  $\eta_{\sigma}$  je součinitel vlivu velikosti (voleno  $\eta_{\sigma} = 1$  dle [23]),

$\nu_{\sigma}$  je součinitel spolehlivosti (voleno  $\nu_{\sigma} = 0,75$  dle [23]).

$$k = 0,399^{-1} = 2,509 \quad (12)$$

Bezpečnost vzhledem k meznímu stavu únavového porušení má hodnotu  $k = 2,509$ . Tato hodnota je větší než 1, a proto považují bezpečnost konstrukce k výše uvedenému meznímu stavu za zcela dostačující.



## ZÁVĚR

Obsahem úvodní části této diplomové práce je shrnutí problematiky emisí vznětových motorů a přehled technologií pro jejich snižování a přeměnu v neškodné či méně škodlivé látky.

Následuje část s formulací řešených problémů a cílů práce, které mají být splněny. Předmětem této práce byla sestava uchycení filtrační jednotky a výfuku. Pro splnění úkolů bylo potřebné provést dílčí analýzy pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS Workbench. K tomu bylo nutné vytvořit tzv. výpočtový model, což v sobě zahrnovalo tvorbu náhradních modelů pro některé součásti, vymodelování svarů a vytvoření sítě konečných prvků. Hotový výpočtový model byl připraven pro řešení jednotlivých analýz.

Prvním úkolem, který byl splněn, bylo provedení modální analýzy celé sestavy uchycení filtrační jednotky. Z výsledků vyplývá, že v rozsahu pracovních otáček motoru se nachází 2 vlastní tvary a vlastní frekvence. Existuje tedy předpoklad, že v reálném provozu traktoru dochází k rozkmitání celé konstrukce. Experimentálním měřením vibrací by bylo možné tento předpoklad potvrdit nebo vyvrátit. Ale vzhledem k tomu, že tento konstrukční celek je běžně v provozu na sériově vyráběných traktorech a nejsou známy žádné problémy s jeho pevností a integritou, považují celou konstrukci za dostatečně tuhou.

Před řešením další analýzy, která měla posoudit celek z pevnostního hlediska, bylo zapotřebí zadat okrajové podmínky pro statický výpočet. Definovány byly kontakty mezi jednotlivými tělesy, dále vazby celé sestavy k okolí a také zatížení konstrukce. To bylo zadáno jako dynamické zrychlení, které simuluje skutečné dynamické jevy při provozu traktoru. Přesná data, která by popisovala vibrace od motoru a vliv přejezdu nerovností způsobující dynamické rázy, totiž nejsou k dispozici.

Výsledkem výpočtu pevnostně deformační analýzy bylo odhalení míst s největšími koncentracemi napětí. Kritické místo s maximální hodnotou redukovaného napětí  $\sigma_{red} = 39,694$  MPa je hrana otvoru pro šroub nacházející se na patce vzpěry v místě, kde je sestava předeprnutým šroubem uchycena k bloku motoru. Díra pro šroub totiž představuje vrub s ostrou hranou. V místě vrubu se mění charakter napjatosti a dochází zde k výrazné koncentraci napětí. Hodnota bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu pružnosti ale s výraznou rezervou převyšuje hodnotu 1. Proto lze konstatovat, že současná konstrukce je navržena s dostatečnou rezervou pro odolnost vůči vnějšímu zatížení a pevnostně vyhovuje.

Posledním úkolem bylo posouzení celku z hlediska únavového namáhání. Pro určení bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu únavového porušení bylo nutné nasimulovat dva provozní stavy, kterými je konstrukce při provozu traktoru namáhána. Byly provedeny dílčí výpočty, jejichž výsledky posloužily jako vstupy do závěrečného výpočtu bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu únavového porušení, jehož hodnota byla  $k = 2,509$ .

Vzhledem ke všem získaným výsledkům konstatuji, že současné konstrukční řešení bylo provedeno zodpovědně a dostatečně kvalitně. Nepovažuji proto za nutné provádět úpravy v konstrukci.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BROŽ, J. – TRNKA, L. SNIŽOVÁNÍ EMISÍ SPALOVACÍCH MOTORŮ VOZIDEL II. *Autoexpert*, říjen 2009, roč. 14, č. 10.
- [2] SNIŽOVÁNÍ EMISÍ ŠKODLIVIN U VZNĚTOVÝCH MOTORŮ. *Www.ssamp-krnov.cz* [online]. 2012, [cit. 29. prosince 2013]. Dostupný z WWW: <<http://ssamp-krnov.cz/upload/soubory/00032.pdf>>
- [3] JAN, Zdeněk - ŽDÁNSKÝ, Bronislav. *Automobily IV - Příslušenství* 2. vyd., Brno: Avid, 2003. 305 s.
- [4] Nová řada pásových rypadel Hitachi Zaxis-3 zvedá laťku základní výbavy. *Www.bagry.cz* [online]. 02.03.2006, [cit. 4. ledna 2014]. Dostupný z WWW: <[http://bagry.cz/cze/clanky/recenze/nova\\_rada\\_pasovych\\_rypadel\\_hitachi\\_zaxis\\_3\\_zveda\\_latku\\_zakladni\\_vybavy](http://bagry.cz/cze/clanky/recenze/nova_rada_pasovych_rypadel_hitachi_zaxis_3_zveda_latku_zakladni_vybavy)>
- [5] DPF (Diesel Particulate Filter). *Www.cs.autolexicon.net* [online]. [cit. 23. prosince 2013]. Dostupný z WWW: <<http://cs.autolexicon.net/articles/dpf-diesel-particulate-filter/>>
- [6] Systém katalytické redukce. *Www.vitejtenazemi.net* [online]. [cit. 1. ledna 2014]. Dostupný z WWW: <[http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=system\\_katalycticke\\_redukce&site=doprava](http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=system_katalycticke_redukce&site=doprava)>
- [7] Katalyzátory pro vznětové (dieselové) motory. *Www.externiservis.cz* [online]. [cit. 1. ledna 2014]. Dostupný z WWW: <<http://www.externiservis.cz/katalyzatory-nett/katalyzatory-pro-vznetove-dieselove-motory.php>>
- [8] GSCHEIDLE, Rolf, aj. *Příručka pro automechanika*. 2. vyd. Praha: Sobotáles, 2002. 652 s. ISBN 80-85920-83-2.
- [9] 2-way (oxidation) Catalysts. *Www.ect.jmcatalysts.com* [online]. [cit. 27. prosince 2013]. Dostupný z WWW: <<http://ect.jmcatalysts.com/Oxidation-catalysts-johnson-matthey>>
- [10] NO<sub>x</sub> Adsorber Catalysts. *Www.ect.jmcatalysts.com* [online]. [cit. 27. prosince 2013]. Dostupný z WWW: <<http://ect.jmcatalysts.com/Nox-adsorber-catalysts-emission-control-johnson-matthey>>
- [11] Ceramic Catalyst Substrates. *Www.dieselnet.com* [online]. 15.2.2011, [cit. 2. ledna 2014]. Dostupný z WWW: <[https://www.dieselnet.com/tech/cat\\_subs\\_cer.php](https://www.dieselnet.com/tech/cat_subs_cer.php)>
- [12] Catalysts. *Www.heraeus-hmts.com* [online]. [cit. 2. ledna 2014]. Dostupný z WWW: <<http://heraeus-hmts.com/en/product/catalyticsystems/catalysts.aspx>>
- [13] Ammonia-SCR. *Www.ect.jmcatalysts.com* [online]. [cit. 2. ledna 2014]. Dostupný z WWW: <<http://ect.jmcatalysts.com/ammonia-selective-catalytic-reduction-SCR-johnson-matthey>>
- [14] Hydrocarbon-SCR. *Www.ect.jmcatalysts.com* [online]. [cit. 2. ledna 2014]. Dostupný z WWW: <<http://ect.jmcatalysts.com/SCR-catalyst-johnson-matthey>>





- [15] Emisní norma Tier 4i: jak fungují nové motory v zemních strojích a na co si dát pozor. Www.bagry.cz [online]. [cit. 31. března 2014]. Dostupný z WWW: <[http://bagry.cz/cze/clanky/technika/emisni\\_norma\\_tier\\_4i\\_jak\\_funguji\\_nove\\_motory\\_v\\_zemnich\\_strojich\\_a\\_na\\_co\\_si\\_dat\\_pozor](http://bagry.cz/cze/clanky/technika/emisni_norma_tier_4i_jak_funguji_nove_motory_v_zemnich_strojich_a_na_co_si_dat_pozor)>
- [16] Motor Zetor Z 1606. Www.zetor.cz [online]. [cit. 5. května 2014]. Dostupný z WWW: <<http://www.zetor.cz/motor-zetor-z-1606>>
- [17] Release 10.0 Documentation for ANSYS. ANSYS, Inc., 2007.
- [18] BURŠA, J. MKP, Studijní opora [online]. [cit. 5. května 2014]. Dostupný z WWW: <[http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud\\_opory/MKP4.pdf](http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud_opory/MKP4.pdf)>
- [19] Meshing Centrifugal Stages for CFD and FEA Is Easy with Pointwise. Www.pointwise.com [online]. [cit. 5. května 2014]. Dostupný z WWW: <<http://www.pointwise.com/theconnector/January-2012/Meshing-Centrifugal-Stages-for-CFD-and-FEA.shtml>>
- [20] VRBKA, Martin - VAVERKA, Michal. *Metoda konečných prvků*. Www.old.uk.fme.vutbr.cz [online]. [cit. 5. května 2014]. Dostupný z WWW: <[http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1\\_mkp.pdf](http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf)>
- [21] PETRUŠKA, J. MKP v inženýrských výpočtech, Studijní opora [online]. [cit. 6. května 2014]. Dostupný z WWW: <<http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/RIV/MKP2011.pdf>>
- [22] Patran's Element Library. Www.mscsoftware.com [online]. [cit. 15. května 2014]. Dostupný z WWW: <[http://www.mscsoftware.com/training\\_videos/patran/Reverb\\_help/index.html#page/Finite%2520Element%2520Modeling/elem\\_lib\\_topics.16.9.html](http://www.mscsoftware.com/training_videos/patran/Reverb_help/index.html#page/Finite%2520Element%2520Modeling/elem_lib_topics.16.9.html)>
- [23] Fatigue Modifying Factors. Www.roymech.co.uk [online]. [cit. 17. května 2014]. Dostupný z WWW: <[http://www.roymech.co.uk/Useful\\_Tables/Fatigue/FAT\\_Mod\\_factors.html](http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Fatigue/FAT_Mod_factors.html)>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

HMH		Hencky, von Mises, Huber
LSA		Local Stress Analysis
MKP		metoda konečných prvků
$a_d$	[ $m \cdot s^{-2}$ ]	dynamické zrychlení
$d_{vf}$	[mm]	vnější průměr filtrační jednotky
$d_{vv}$	[mm]	vnější průměr výfuku
$d_{vz}$	[mm]	průměr zkušebního vzorku
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
f	[Hz]	vlastní frekvence
$f_G$	[-]	korekční součinitel
g	[ $m \cdot s^{-2}$ ]	gravitační zrychlení
k	[-]	bezpečnost vzhledem k meznímu stavu únavového porušení
$k_d$	[-]	dynamický koeficient
$k_k$	[-]	bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti
$l_f$	[mm]	délka filtrační jednotky
$m_f$	[kg]	hmotnost filtrační jednotky
$m_v$	[kg]	hmotnost výfuku
n	[ $min^{-1}$ ]	otáčky motoru
$R_e$	[MPa]	mez kluzu
$R_m$	[MPa]	mez pevnosti
t	[mm]	tloušťka plechu
$XX_1$	[mm]	vzdálenost dvou uzlů
$\beta/\alpha$	[-]	součinitel vrubu a koncentrace napětí
$\eta_\sigma$	[-]	součinitel vlivu velikosti
$\mu$	[-]	Poissonova konstanta
$\rho$	[ $kg \cdot m^{-3}$ ]	hustota materiálu
$\sigma_{1,2,3}$	[MPa]	hlavní napětí víceosé napjatosti
$\sigma_{1A,B}$	[MPa]	první hlavní napětí pro příslušný zátěžný stav
$\sigma_{3A,B}$	[MPa]	třetí hlavní napětí pro příslušný zátěžný stav
$\sigma_{cO}$	[MPa]	mez únavy o ohybu
$\sigma_{cT}$	[MPa]	mez únavy v tahu/tlaku



$\sigma_{ea}$	[MPa]	amplituda napětí
$\sigma_{em}$	[MPa]	střední napětí
$\sigma_{e_{max,emin}}$	[MPa]	extrémní hodnoty redukovaného napětí
$\sigma_{red}$	[MPa]	redukované napětí
$\sigma_{redA,B}$	[MPa]	redukovaná napětí pro příslušný zátěžný stav
$\sigma_X$	[MPa]	redukované napětí v uzlu X
$\sigma_{X1}$	[MPa]	redukované napětí v uzlu $X_1$
$\nu_\sigma$	[-]	součinitel spolehlivosti
$\chi_R$	[mm <sup>-1</sup> ]	poměrný gradient napětí