

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301      Strojní inženýrství  
Studijní obor:      2301T001      Dopravní a manipulační technika

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výběr konstrukčních materiálů

Autor:              **Bc. Jiří Dvořák**

Vedoucí práce: **Ing. Ivana Mazínová, Ph.D**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří DVOŘÁK**  
Osobní číslo: **S17N0044K**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**  
Název tématu: **Výběr konstrukčních materiálů**  
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

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

#### Základní požadavky:

Proveďte modální analýzu stávající konstrukce venkovní klimatizační jednotky za účelem zjištění vlivu materiálů na vlastní frekvence konstrukce. Navrhněte alternativní materiály pro danou konstrukci. Použijte metodiku výběru materiálu dle profesora Michaela F. Ashbyho a databáze CES (Cambridge Engineering Selector). Zhodnoťte výsledky po aplikaci alternativních materiálů.

#### Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

#### Osnova diplomové práce:

1. Úvod, rešerše.
2. Rozbor stávající konstrukce.
3. Metodika výběru materiálu.
4. Výběr materiálu.
5. Zhodnocení práce, závěr.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah kvalifikační práce: **50-70 stran A4**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

**ASHBY, M** *Materials Selection in Mechanical Design*. Burlington:  
**Butterworth-Heinemann, 2010**

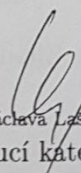
**ASHBY, M** *Materials and the Environment*. Waltham: **Butterworth-Heinemann,**  
**2012**

*Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.*

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ivana Mazínová, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Hosnedl**  
Daikin Industries Czech Republic, s.r.o.  
Datum zadání diplomové práce: **19. září 2017**  
Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2018**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2017

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....  
**podpis autora**

## **Poděkování:**

Tímto bych chtěl poděkovat především Ing. Ivaně Mazínové, Ph.D, jakožto vedoucí práce za podporu během zpracování diplomové práce. Zvláště pak jsem vděčný za věnovaný čas, cenné rady a trpělivost.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Hosnedlovi ze společnosti Daikin Industries Czech Republic s.r.o., který mi pomáhal s odbornými znalostmi z oboru klimatizačních jednotek. Samozřejmě velké díky patří společnosti Daikin Industries Czech Republic s.r.o. za poskytnutí venkovní klimatizační jednotky a potřebného vybavení.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Dvořák	<b>Jméno</b> Jiří	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301T001 „Dopravní a manipulační technika“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Mazínová, Ph.D	<b>Jméno</b> Ivana	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Výběr konstrukčních materiálů		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	85	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	85	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Diplomová práce se zabývá metodikou výběru konstrukčních materiálů dle specifikovaných požadavků. Alternativní materiály byly hledány pomocí databáze CES Edupack. Pro aplikaci nově nalezených materiálů byla zvolena venkovní klimatizační jednotka. K ověření výsledků byla použita modální analýza v sw Ansys workbench 19.0.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Výběr materiálu, materiálové vlastnosti, materiály, modální analýza, vlastní frekvence, klimatizace

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Dvořák	<b>Name</b> Jiří	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301T001 "Transport Vehicles and handling machinery"		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Mazínová, Ph.D	<b>Name</b> Ivana	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<del><b>BACHELOR</b></del>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Engineering Materials Selection		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2018
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	85	<b>TEXT PART</b>	85	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This diploma thesis deals with engineering materials selection according specified requirements. Alternativ materials were searched with help of CES Edupack database. New materials were applied to outdoor air conditioner. Verification of results was with help of sw Ansys workbench 19.0.
<b>KEY WORDS</b>	Materials selection, materials properties, materials, modal analyse, own frequencies, air conditioner

## Obsah

1. Úvod.....	10
1.1 Cíl práce .....	11
2. Odborné pojednání o výběru materiálu .....	11
2.1 Proces návrhu .....	11
2.1.1 Přístupu ke konstruování .....	13
2.1.2 Nástroje a materiálová data .....	13
2.1.3 Propojení čtyř hlavních atributů .....	14
2.2 Materiály a jejich vlastnosti.....	15
2.2.1 Mechanické vlastnosti .....	16
2.2.2 Tepelné vlastnosti.....	17
2.2.3 Elektrické vlastnosti .....	18
2.2.4 Optické vlastnosti .....	18
2.2.5 Eco vlastnosti .....	18
2.3 Grafy materiálových vlastností.....	18
2.3.1 Materiálové vlastnosti .....	19
2.3.2 Závislosti materiálových vlastností .....	20
2.3.3 Závislost zohledňující náklady na materiál .....	23
3. Rozbor stávající konstrukce .....	24
3.1 Popis venkovní klimatizační jednotky.....	25
3.2 Požadavky kladené na venkovní klimatizační jednotku.....	29
3.3 Rozbor současných materiálů a jejich vlastnosti .....	34
4. Metodika výběru materiálu.....	37
4.1 Strategie výběru – úvod.....	37
4.1.1 Materiálové atributy .....	37
4.1.2 Strategie výběru.....	38
4.1.3 Materiálové indexy.....	41
4.2 Více násobné omezení a konfliktní cíle.....	45
4.2.1 Výběr s více násobným omezením.....	46
4.2.2 Konfliktní cíle.....	48
4.3 Zhodnocení současného materiálu – DX51D-Z140MAC .....	53
4.4 Strategie výběru – FMS.....	54
4.4.1 Převedení konstrukčních požadavků .....	54
4.4.2 Prověření konstrukčních materiálů.....	55
4.4.3 Hodnocení konstrukčních materiálů.....	55

4.4.4 Dokumentace.....	56
4.5 Alternativní strategie výběru materiálu pro FMS.....	58
4.5.1 Převedení konstrukčních požadavků .....	58
4.5.2 Prověření konstrukčních materiálů.....	60
4.5.3 Hodnocení konstrukčních materiálů.....	60
4.5.4 Dokumentace.....	62
5. Reálné měření, nalazení modelu.....	64
5.1 Reálně měření vibrací.....	64
5.1.1 Měření provozních stavů jednotky.....	64
5.1.1 První rezonance.....	66
5.1.2 Druhá rezonance .....	67
5.2 Závěr po měření .....	67
6. Modální analýza .....	68
6.1 Popis modelu .....	68
6.2 Nastavení modální analýzy – ANSYS 19.0.....	68
6.2.1 Geometrie .....	68
6.2.2 Hmotný bod.....	69
6.2.3 Zasiťování modelu.....	70
6.2.4 Analýza uvolněného modelu .....	70
6.2.5 Vazby.....	70
6.3 Nalazení modelu.....	71
6.4 Analýza současného materiálu .....	72
6.5 Analýza alternativního materiálu .....	73
6.5.1 Karbid křemíku SiC.....	73
6.5.2 HM uhlíková vlákna .....	73
7. Zhodnocení výsledků .....	74
8. Závěr.....	74
9. Seznam použitých zdrojů (literatury) .....	76
10. Přílohy .....	78
10.1 Peierlsovo napětí.....	78
10.2 Technická dokumentace.....	78
10.3 Ukázka unifikace FMS na dva výměníky .....	79
10.4 Hodnoty konstant C, C <sub>1</sub> a C <sub>2</sub> .....	80
10.5 Ceník přepravy DHL .....	80
10.6 Reálné měření vibrací.....	81



10.7 Modální analýza - FMS .....	81
10.7.1 Kontrola sítě .....	81
10.7.2 Vazby .....	82
10.7.3 Výsledky.....	82
10.8 Modální analýza celé skříně .....	83
10.8.1 Kontrola sítě .....	83
10.8.2 Vazby.....	84
10.8.3 Výsledky.....	85

## 1. Úvod

Téma Výběr konstrukčních materiálů jsem si vybral kvůli jeho komplexnosti. Neboť samotnému výběru materiálu předchází poměrně mnoho kroků. Díky této diplomové práci jsem si rozšířil obzory, co se konstruování týče, ale také nabylo mnoho nových informací.

Na diplomové práci jsem spolupracoval s mým současným zaměstnavatelem společností Daikin Industries Czech Republic s.r.o. To mi umožnilo dávat nové teoretické informace do kontrastu s reálným případem/problémem. Pro účely diplomové práce byla použita venkovní klimatizační jednotka Daikin Multi 3MXM52M2 a pak zejména držák motoru, neboli „*Fan motor stand*“, dále bude používána zkratka FMS.

Na této diplomové práci se mi líbí, jak na sebe vše navazuje a dohromady tvoří logický řetězec jednotlivých kroků. Problematika výběru konstrukčních materiálů dle postupu profesora M. Ashbyho je poměrně rozsáhlá, nicméně veškeré informace uvedené níže jsou nezbytné a jednotlivě na sebe navazují. Celá diplomová práce je rozdělena od pěti okruhů:

- První část se věnuje popisu celé problematiky výběru konstrukčních materiálů dle postupu profesora M. Ashbyho. Základní myšlenka je určit typ vývoje produktu, v našem případě se jedná o tzv. „*developmental design*“, tedy o další rozvíjení stávajícího produktu tak, jak tomu je ve skutečnosti. Na základě toho postupujeme podle daných kroků. V této části jsou také zmíněny vlastnosti materiálů a materiálové grafy. Ty slouží jako velice účinný nástroj a pomůcka pro selekci konstrukčních materiálů. Výstupem této části je určení postupu, kterým se budeme řídit.
- Druhá část je zaměřena na rozbor stávající konstrukce. Tedy je zde zmíněn princip činnosti klimatizační jednotky a popis jednotlivých sestav. Což je velice důležité pro nalezení součásti, pro kterou budeme hledat alternativní materiál. Na základě analýzy trhu, určení funkce a podrobného rozboru stávající konstrukce určíme požadované vlastnosti, ať už pro produkt jako takový, anebo komponentu. Výstupem druhé části je nalezení komponentů pro aplikaci alternativního materiálu a také specifikace požadovaných vlastností ve formě cílů a omezení.
- Třetí nejdůležitější část se týká hledání alternativního materiálu pomocí nástrojů definovaných profesorem Ashbyem a také pomocí softwaru CES Edupack 2013. Tak jako v celé této práci je na začátku každé kapitoly postup rozebrán teoreticky s vysvětlením dané problematiky a následně je postup aplikovaný na náš konkrétní případ. V této části existuje opět více přístupů k řešení, přičemž dva z nich byly vyzkoušeny. Výsledkem je nalezení dvou rozdílných alternativních materiálů.
- Čtvrtá část je zaměřena na reálné měření vibrací jednotky. Ventilátor venkovní klimatizační jednotky pracuje v pěti různých otáčkách od 420 do 700 [ot/min]. Toto pracovní spektrum bylo proměřeno a byly nalezeny dvě rezonance, dle kterých byl nalazen model pro Ansys, aby následná změna materiálu odpovídala skutečnosti. Tedy výsledkem této části bylo nalezení vlastních frekvencí skříně klimatizační jednotky pro následné nalazení modelu.
- Pátá a poslední část diplomové práce se zabývá modální analýzou. V tomto případě modální analýza slouží jako nástroj pro porovnání materiálů. Díky tomu budeme schopni určit, jestli nový materiál představuje zlepšení pro stávající konstrukci či nikoliv. Nastavení modální analýzy bylo konzultováno se společností SVS FEM Brno, tedy modální analýza je bezpochyby provedena správně. Výsledkem poslední

částí je ověření vlivu alternativního materiálu na vibrace venkovní klimatizační jednotky.

## 1.1 Cíl práce

Cílem práce je nalezení alternativního materiálu pro součást klimatizační jednotky. Nový materiál by měl vykazovat vyšší tuhost za účelem snížení vibrační jednotky. Vibrace a hluk je obecně pro zákazníka jeden z nejdůležitějších atributů, neboť i laik je schopen tyto nežádoucí vlastnosti pozorovat, na rozdíl třeba od maximální dosažitelné kapacity. Nový materiál by samozřejmě měl být maximálně levný, neboť právě cena je jeden z nejdůležitějších aspektů pro výrobce.

Tedy cílem je nalezení materiálu, jehož vlastní frekvence bude vyšší než u materiálu současného, ale s ohledem na provozní otáčky. V ideální případě chceme, aby první vlastní frekvence byla vyšší než 11.66 [Hz], což představuje maximální provozní otáčky klimatizační jednotky ( $f = \frac{n}{60} = \frac{700}{60} = 11.66$  [Hz]).

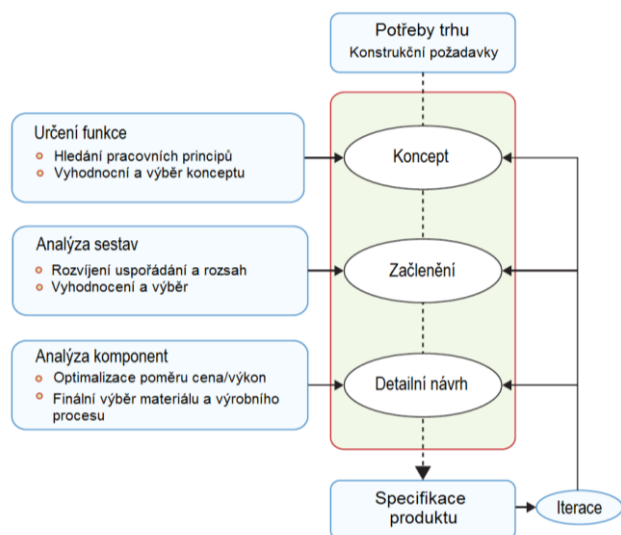
## 2. Odborné pojednání o výběru materiálu

### 2.1 Proces návrhu

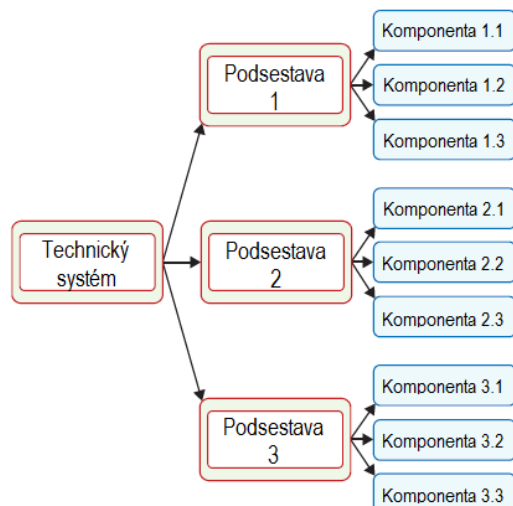
V této kapitole budeme hovořit v první řadě o návrhu z pohledu mechanických požadavků a vlastností. Jako jsou fyzikální principy, správná funkce a výroba mechanických systémů. Neznamená to ale, že se zanedbává průmyslový design – vzhled, barva, textura. Tato část návrhu přichází na řadu později. Pro úspěšný vývoj produktu je důležité vycházet z kvalitního mechanického základu, tedy vhodného materiálu a výrobního procesu.

Proces návrhu vždy začíná průzkumem trhu, nalezením jeho potřeby a novou myšlenkou. Na opačném konci stojí kompletní specifikace nového produktu. Při návrhu je nezbytné důkladně specifikovat a vyjádřit konstrukční požadavky. Základní kroky mezi požadavky trhu a finální specifikací zobrazuje obrázek 1. Konstrukční požadavky jsou zde reprezentovány třemi kroky – koncept, začlenění a detailní analýza.

Produkt jako takový nazýváme technický systém, který se obecně skládá z podsestav a jednotlivých komponent. Výběr materiálu a výrobního procesu se odehrává právě na nejnižší úrovni, tedy na úrovni jednotlivých komponent. Rozklad technického systému je zobrazen na obrázku 2. Obecně je tento rozklad užitečný v případě rozboru existujícího produktu.



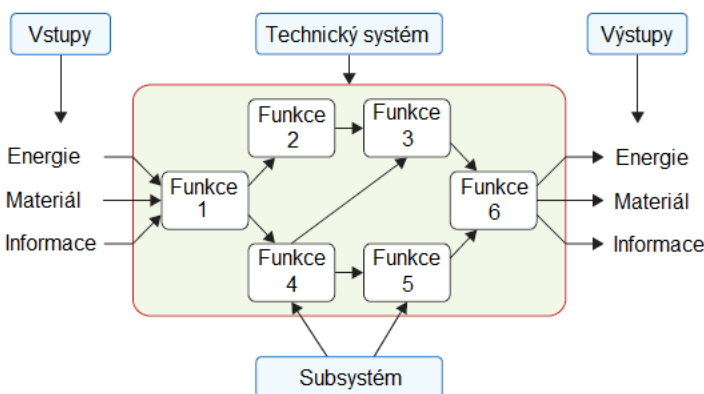
Obrázek 1 [3]



Obrázek 2[3]

V případě vývoje nového produktu je lepší použít systémovou – funkční analýzu.

Základní myšlenka je postavena na technickém systému, který má vstup a výstup v podobě energie, materiálu a informací. Technický systém je tvořen vzájemně propojenými funkcemi – podsystém. Každý tento podsystém plní konkrétní funkci. Grafické zobrazení poskytuje obrázek 3. Výsledkem je funkční struktura, která umožňuje alternativní návrhy funkcí, jejich vzájemné propojení, nebo jejich kombinaci. Funkční struktura je systematický nástroj pro posouzení různých možností návrhu konstrukce.



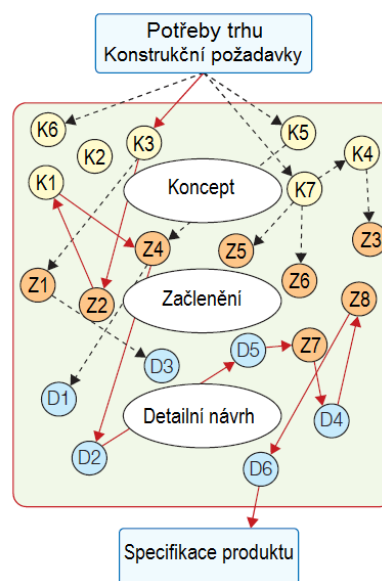
Obrázek 3 [4]

Návrh začíná vytvořením konceptu a funkčních struktur založených na pracovním postupu. V této fázi jsou všechny možnosti otevřeny. Konstruktor zvažuje alternativní koncepty a cesty, jak tyto možnosti oddělit, nebo naopak kombinovat. Další fáze – začlenění, je rozbor slibných konceptů na přibližně stejné úrovni. To zahrnuje dimenzování součástí, zvolení materiálu a posouzení konceptů z různých hledisek. Pevnost, teplota, míra plnění konstrukčních požadavků, ale také poměr cena vs. výkon. Druhá fáze končí nalezením proveditelného konceptu, který je následně podrobněji zkoumán. Například kritické komponenty podrobíme pevnostní nebo teplotní analýze. V detailním návrhu je zvolena finální geometrie, materiál a výrobní proces. Návrh zahrnuje i vyčíslení nákladů. Celý proces návrhu je zakončen podrobnou výrobní specifikací produktu.

Předchozí postup v podstatě popisuje zjednodušený návrh, kdy zvolíme koncept, ten následně podrobíme zkoumání z různých hledisek a nakonec detailně koncept rozpracujeme. Bohužel takto jednoduché to není. Obrázek 1 neposkytuje vazby mezi jednotlivými kroky.

Negativní důsledky volby v jednotlivých krocích se neprojeví hned, a proto je nezbytnou součástí každého návrhu opakované zkoumání alternativ.

Obrázek 1 poskytuje ucelenou představu o hrubém postupu při navrhování produktu. Teď je možné si předchozí postup rozšířit právě o vnitřní vazby – obrázek 4. Každá možnost je znázorněna příslušnou kuličkou. Kde K1, K2... představuje možné koncepty. Krok začlenění reprezentuje Z1, Z2. A nakonec D1, D2... představuje detailní návrh. Proces návrhu představuje vytvoření cesty od požadavků trhu k finální specifikaci produktu. Tyto cesty mohou být slepé, někdy je potřeba vrátit se k předchozímu kroku. Klíčovou součástí návrhu produktu a jeho materiálu je flexibilita a schopnost rychle hledat alternativy.



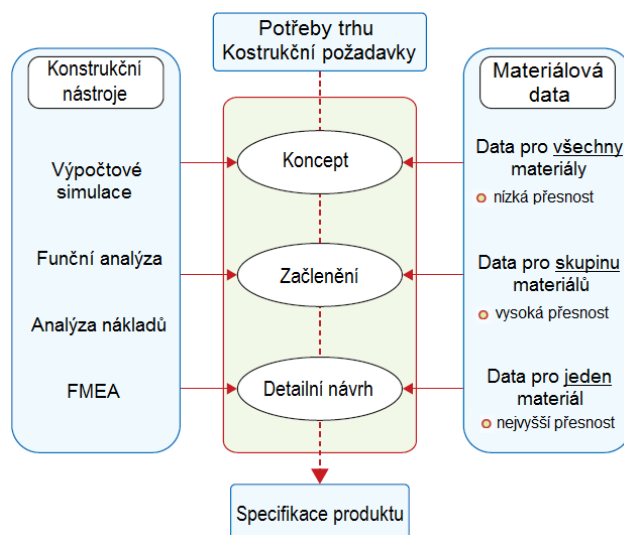
Obrázek 4 [5]

### 2.1.1 Přístupu ke konstruování

Postup konstruování lze rozdělit na tři základní přístupy. První z nich méně častý je tzv. „*Original design*“. Volně přeloženo konstruování od nuly. Vždy se vychází z nové myšlenky, nového nápadu či nového pracovního principu. Z hlediska materiálu se tento přístup vyznačuje dvojným chováním. Zprvce vznik nového materiálu poskytne příležitost pro nové výrobky – například výroba vysoce čistého křemíku umožnila vzniku transistoru. Druhá možnost je pak vznik nového materiálu kvůli novému výrobku. V tomto smyslu funguje zejména jaderný a kosmický průmysl. Samozřejmě, že z pohledu konstruktéra je tento přístup mnohem více vzrušující, nicméně z pohledu obecného konstruování je méně častý. Druhý přístup se nazývá „*Adaptive*“ nebo „*Developmental design*“. Česky řečeno adaptivní nebo vývojové konstruování, které je aplikováno ve většině případů. Hlavní myšlenka spočívá ve stávajícím produktu, jakožto výchozí bod konstruování. Cílem a motivací pro přepracování stávajícího produktu je například snížení ceny, zlepšení výkonu nebo přizpůsobení se novému trhu. V některých případech je to umožněno právě díky nově vzniklým materiálům. Příkladem mohou být polymery, které nahradily kovy v domácích spotřebičích, nebo použití uhlíkových vláken pro sportovní náčiní místo dřeva. Posledním přístupem je „*Variant design*“, kdy dochází u vyvíjeného produktu ke změně velikosti, ale jeho funkce zůstává zachována. Z pohledu materiálu se jedná o změnu specifikace kvůli rozměrům. Příkladem může být lodička, kdy pro malé loďky je využíváno sklolaminátu, kdežto pro zaoceánské lodě se používá ocel.

### 2.1.2 Nástroje a materiálová data

Pro zavedení jednotlivých kroků, které jsou znázorněny na obrázku 1, používáme konstrukční nástroje. Tyto nástroje jsou popsány v levé části obrázku 5 a umožňují modelování a optimalizaci v jednotlivých krocích procesu návrhu. Jak je z obrázku patrné, tak se konstrukční nástroje směrem dolů stávají složitější a přesnější. Je to samozřejmě dáno tím, jak se postupně posouváme od konceptu směrem k detailnímu zpracování řešení.

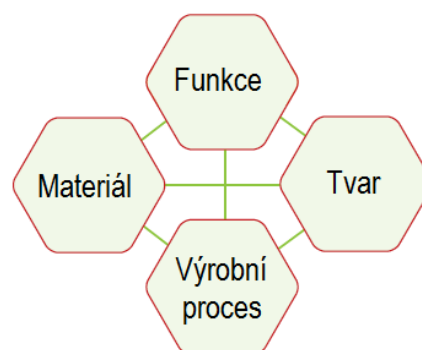


Obrázek 5 [6]

Nástroje pro výběr materiálu jsou nezbytné v každém kroku. Množství a důležitost údajů se liší podle toho, v jakém kroku návrhu se právě nacházíme – pravá část obrázku 5. Na začátku procesu návrhu je pro konstruktéra důležité mít široké spektrum materiálů a znát jejich základní charakteristické vlastnosti. Protože jak již bylo zmíněno výše, v tomto okamžiku jsou všechny možnosti otevřené. Což znamená, že pro jeden koncept je vhodný materiál plast, pro jiný zase kov, ačkoliv oba koncepty počítají se stejnou funkcí. Ve druhém kroku bychom se měli zaměřit na podmnožinu daného materiálu a pečlivěji specifikovat jeho vlastnosti a chování. K nalezení požadovaných informací slouží specializované knihy a softwary. Největší riziko druhého kroku představuje špatná volba materiálu, kdy jsme se zaměřili na myšlenku, která se nakonec ukáže jako slepá. Viz obrázek 4. V závěrečné fázi provedeme detailní analýzu zvoleného materiálu. V ideálním případě máme vyselektován jeden konkrétní materiál. V tomto kroku je velmi důležité získávat vlastnosti materiálu přímo od konkrétních výrobců z materiálového listu. Důvodem je, že některé vlastnosti a chování plynou ze způsobu výroby, což se u jednotlivých výrobců liší. Pokud existuje kritická vlastnost, která výrazně ovlivňuje chování nebo funkci daného produktu, doporučuje se provést vlastní testování materiálu za účelem ověření deklarovaných vlastností výrobcem.

### 2.1.3 Propojení čtyř hlavních atributů

S výběrem materiálu se vážou další aspekty. Pokud chceme dosáhnout nějakého tvaru, je nutné materiál podrobit procesům, které obecně nazýváme výroba. Patří sem primární procesy – odlévání, kování. Dále obrábění materiálu, jeho spojování – například svařování. Funkce daného produktu nám také ovlivňuje výchozí materiál. Volba materiálu ovlivňuje procesy skrz jeho vhodnost pro jednotlivé výrobní procesy. Proces určuje tvar, velikost, přesnost. Navíc jsou tyto interakce obousměrné, tedy tvar omezuje výběr materiálu i procesu, stejně jako výrobní proces omezuje volbu materiálu a dostupné tvary.

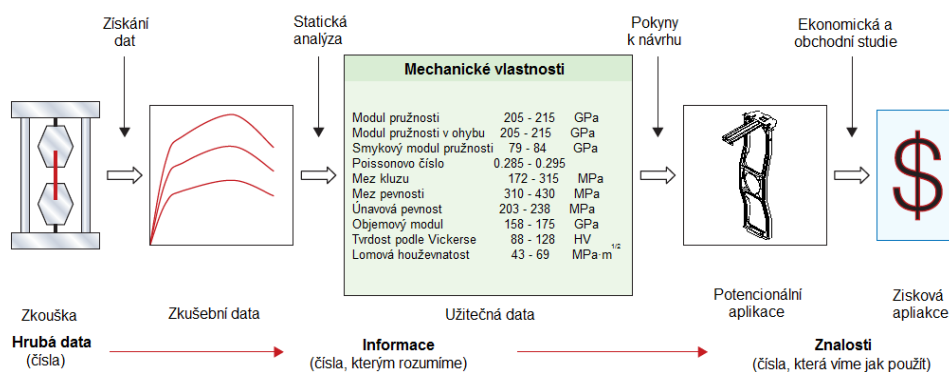


Obrázek 6 [7]

Závěrem čím složitější a komplikovanější konstrukční návrh, tím větší jsou jednotlivé interakce.

## 2.2 Materiály a jejich vlastnosti

Znalost materiálů je nezbytnou výbavou každého konstruktéra a jejich použití se odvíjí od materiálových vlastností. Konstrukteři bývají ve volbě materiálu často velice konzervativní. Stále dokola se používají staré, leč osvědčené materiály. Důvodem může být například velké množství dostupných informací, spolehlivost nebo časem ověřené použití konvenčních materiálů. Na druhé straně pokud chceme přijít s inovativním řešením, tak právě volbou materiálu toho lze dosáhnout. Důležité je samozřejmě mít dostatek informací, materiálových dat a vědět, jak s nimi nakládat. Z obrázku 7 je patrné, že ne všechny informace o vlastnostech materiálu jsou pro nás přínosné a potřebné. Vlevo jsou zobrazena hrubá data, která pro účely konstruování nemají příliš význam. Skrze statickou analýzu dostaneme data užitečná. Právě tato materiálová data nás zajímají. Obecně lze říci, že materiálové texty obsahují data hrubá – z měření, a naopak inženýrské příručky poskytují data užitečná. Pravá strana obrázku pak představuje důležitost ekonomické stránky výrobku. Pokud chceme v dnešní době na trhu uspět, měl by výrobek být ekonomicky životaschopný a v porovnání s konkurencí výkonný.



Obrázek 7 [8]

Data popisující vlastnosti materiálů berme jako informace se známou přesností. Lze je třídit a strukturovat do tabulek a grafů. Materiálová data mají mnoho atributů a jsou společná pro všechny materiály. Ať už se jedná o hustotu, modul pružnosti, elektrickou vodivost a mnoho dalších. Na základě těchto informací učiníme první krok ve výběru materiálu. Nicméně to nestačí a je potřeba znát skutečnou povahu materiálu. To znamená jeho silné a slabé stránky, dále jeho zpracovatelnost. Poté je dobré znát předchozí zkušenosti, tedy na co a kde byl materiál použitý a jestli došlo k jeho selhání a pokud ano proč. Tyto informace lze nalézt v inženýrských příručkách a směrnících. Dále existuje mnoho případových studií.

Každý materiál považujeme za soubor s mnoha atributy, jejichž kombinace definuje jeho profil a vlastnosti. Existují zde dvě takzvané obecné vlastnosti. První z nich je hustota  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]. Zajímavost je, že i dnes měříme hustotu stejně jako Archimedes ve třetím století př.n.l. tedy hydrostatickou metodou. Druhou obecnou vlastností je cena, vyjádřená jako cena za jednotku hmotnosti [Kč/kg].

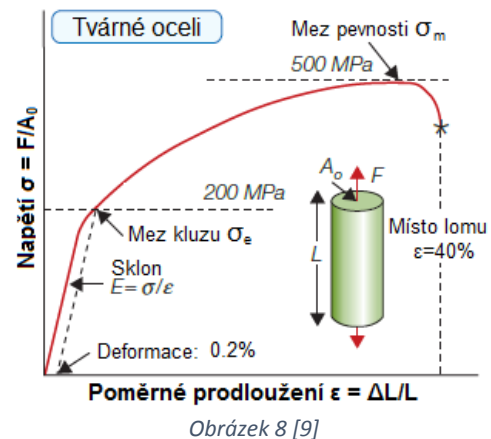
### 2.2.1 Mechanické vlastnosti

Modul pružnosti E [MPa] vyjadřuje poměr napětí  $\sigma$  a poměrného prodloužení (deformace)  $\varepsilon$ . Youngův modul pružnosti popisuje reakci na tah nebo tlak. Reakci na smyk vyjadřuje modul pružnosti ve smyku  $G$ . Za předpokladu izotropního materiálu lze modul pružnosti ve smyku vypočítat skrze Poissonovo číslo  $\mu$ . Poissonovo číslo je bezrozměrná hodnota a vyjadřuje poměr deformací v podélném a příčném směru:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (2.1)$$

Modul pružnosti ve smyku pro izotropní materiály se tedy vypočítá ze vztahu:

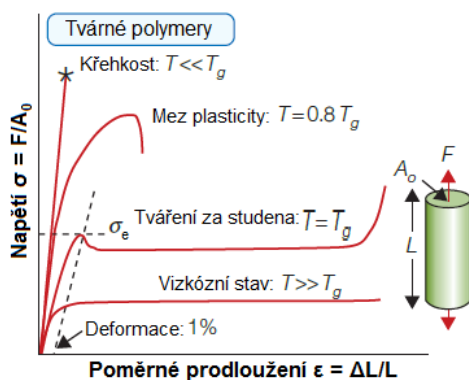
$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2.2)$$



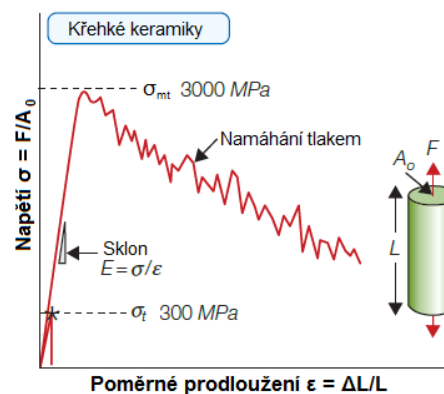
Mez kluzu  $\sigma_e$  [MPa] pevné látky vyžaduje pečlivou definici. U kovů nalezneme  $\sigma_e$  při odsazení 0.2% poměrné deformace. (viz. obrázek 8). To znamená napětí, při kterém se křivka napětí a deformace pro axiální zatížení odchyluje o 0.2% od lineárně elastické křivky. Tato hodnota je stejná pro tahové i tlakové namáhání. Někdy také označujeme jako smluvní mez kluzu.

U polymerů je  $\sigma_e$  označeno napětí, při kterém se křivka zatěžování stává výrazně nelineární. Tato hodnota je typicky 1% poměrného prodloužení (viz. obrázek 9). Může to být způsobeno buď nevratným zklouznutím molekulárních řetězců, anebo tvorbou nízkohustotních objemů, jejich porušení je navenek doprovázeno zbledením polymeru. Polymery jsou o něco silnější (cca 20%) při námáhání tlakem, než při námáhání tahem.

Pevnost keramických materiálů a skla silně závisí na druhu zatížení (viz. obrázek 10). V případě námáhání tahem je pevnost materiálu vyjádřena jako lomová pevnost  $\sigma_t$ . Naopak pevnost v tlaku  $\sigma_{mt}$  je mnohonásobně vyšší. Typicky je to  $\sigma_{mt} = 10 \sim 15 \cdot \sigma_t$ . (2.3)



Obrázek 9 [10]



Obrázek 10 [10]

Pevnost v tahu  $\sigma_m$  [MPa] je maximální jmenovité napětí, při kterém dochází k destrukci zkušebního tělesa (viz. obrázek 8). U křehkých pevných látek např. keramiky, skel a křehkých polymerů je maximální pevnost v tahu stejná jako pevnost na mezy kluzu. U kovů, tvárných polymerů stejně tak i většiny kompozitů je maximální pevnost větší než mez kluzu.

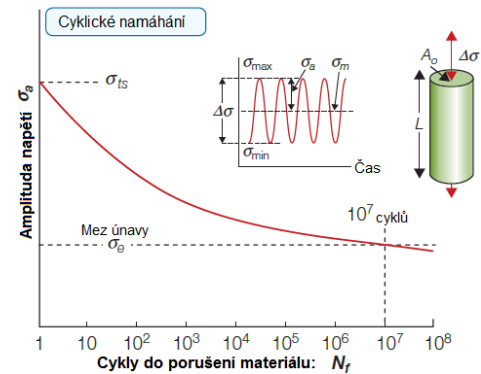


Cyklické zatížení může způsobit uvnitř materiálu trhlinu, jejíž růst vyvrcholí únavovou poruchou. U mnoha materiálů lze nalézt mez únavy, neboli mez vytrvalosti  $\sigma_e$  [MPa]. Závislost je zobrazena na obrázku číslo 11. Jedná se o amplitudu  $\Delta\sigma$ , pod kterou nedochází k tvorbě únavové trhliny, případně se vyskytuje až po velkém počtu cyklů  $N_f > 10^7$  cyklů.

Tvrdość H [MPa]. Zkoušky tahem a tlakem nejsou vždy vhodné, neboť je potřeba poměrně velký vzorek materiálu a také se jedná o zkoušky destruktivní.

Zkouška tvrdosti poskytuje přibližné, ale nedestruktivní měření síly. Tvrdość materiálu označujeme  $H$  a měří se vlačováním zkušebního tělíska do testovaného materiálu. Mezi nejznámější zkoušky tvrdosti patří zkoušky tvrdosti podle Brinella, Rockwella a Vickerse.

Dále do mechanických vlastností patří houževnatost  $G_{1c}$  [kJ/m<sup>2</sup>], lomová houževnatost  $K_{1c}$  [MPa/m<sup>2</sup>] a ztrátový koeficient  $\eta$  [-].

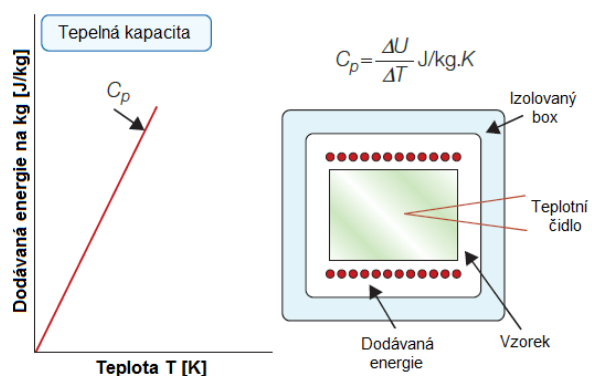


Obrázek 11 [11]

## 2.2.2 Tepelné vlastnosti

V případě pevnosti vazeb pevných látek rozlišujeme dvě základní teploty. První je teplota tání  $T_m$  vyznačující se ostrým přechodem mezi pevným a kapalným stavem. Teplota  $T_m$  je charakteristická pro krystalické látky. Amorfni látky jsou charakterizovány teplotou  $T_g$ , což je teplota přechodu ze stavu pevného do stavu velmi viskózní kapaliny. Obě tyto teploty jsou zásadní a udávají se buď ve stupních Celsia [°C], nebo v Kelvinech [K]. Během konstrukčního návrhu daného výrobku je dobré také počítat s dalšími dvěma teplotami. Jsou to maximální  $T_{max}$  a minimální provozní teplota  $T_{min}$ . První definuje nejvyšší teplotu, při které je vhodné konstrukci provozovat, nevzniká oxidace ani jiné chemické přeměny a také hodnota tečení je na přijatelné úrovni. Naopak minimální teplota definuje, kdy se materiál stává křehkým, či jinak nebezpečným.

Tepelná kapacita [J/kg·K] vyjadřuje množství potřebné energie k ohřátí jednoho kilogramu materiálu o jeden kelvin. Tepelná kapacita se využívá při výpočtu tepla a změny entalpie. Měřením tepelné kapacity se zabývá kalorimetrie. Obrázek 12 zobrazuje měření tepelné kapacity při konstantním tlaku, kdy do vzorku materiálu o známé hmotnosti vkládáme známé množství energie. Změřený nárůst teploty umožňuje výpočet  $\Delta U/\Delta T$ . Skutečné kalorimetry jsou více komplikované, ale na stejném principu.



Obrázek 12 [12]

Mezi další tepelné vlastnosti materiálů patří tepelná vodivost  $\lambda$ , což je schopnost daného materiálu vést teplo a je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti. Za zmínku ještě stojí odolnost vůči tepelnému rázu  $\Delta T_c$ . Tato vlastnost vyjadřuje schopnost konstrukce odolávat velkým rozdílům teplot bez poškození. To znamená náhlé ochlazení, nebo naopak

odolnost proti tečení. Tečení je pomalá a časově závislá deformace, která nastává obecně v 1/3 teploty  $T_m$  a 2/3 teploty  $T_g$ .

### 2.2.3 Elektrické vlastnosti

Měrný elektrický odpor [ $\Omega \cdot m$ ] vyjadřuje odpor vodiče o délce 1m a průřezu  $1m^2$ . Má obrovský rozsah, který se pohybuje v rozsahu od  $10^{-8} \Omega \cdot m$  pro dobré vodiče po  $10^{16} \Omega \cdot m$  pro nejlepší izolátory. Převrácená hodnota se nazývá měrná vodivost [S/m].

Pokud je izolátor umístěn v elektrickém poli, dochází k jeho polarizaci. Schopnost polarizace se měří dielektrickou konstantou  $\epsilon_r$ . Tato veličina je bezrozměrná a její hodnota je pro volný prostor a většinu plynů rovna 1. Naopak izolátory se pohybují v rozsahu od 2 do 30.

### 2.2.4 Optické vlastnosti

Skrze všechny materiály prochází světlo, ačkoliv skrz kovy je to zanedbatelné. Označíme-li rychlost světla procházející materiálem  $n$ , pak bude vždy nižší, než rychlost světla ve vakuu označená  $c$ . Důsledkem toho dopadá paprsek světla na povrch materiálu pod úhlem  $\alpha$  a následně do materiálu vstupuje pod úhlem  $\beta$ . Tedy index lomu se rovná:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (2.4)$$

Hodnota indexu lomu světla se vztahuje k dielektrické konstantě  $\epsilon_r$  o stejné frekvenci:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (2.5)$$

Index lomu světla je závislý na vlnové délce, tedy i barvě světla. Obecně lze říci, že čím má materiál větší hustotu, tím má větší dielektrickou konstantu a zároveň je index lomu vyšší. Potom platí, že pro  $n = 1$  materiál pohltí veškerou intenzitu záření. Naopak pro  $n > 1$  platí, že část záření se od povrchu materiálu odráží.

### 2.2.5 Eco vlastnosti

Ekologické vlastnosti jsou definovány především spotřebou energií a také produkcí škodlivých emisí uhlíku. K tomu dochází během celého života produktů a všech jeho částí. Tuto cestu popisuje životní cyklus, který se skládá ze čtyř základních kroků – získání materiálu a jeho zpracování, výroba, používání a likvidace produktu. V každé této etapě dochází ke spotřebování energie a produkci oxidu uhličitého a dalších emisí.

## 2.3 Grafy materiálových vlastností

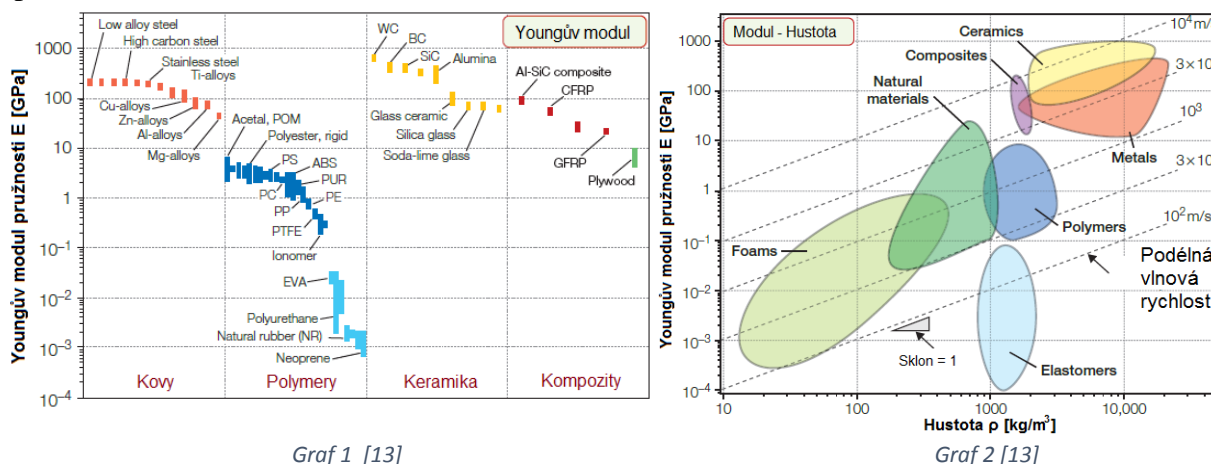
Vlastnosti materiálů stanovují limity jejich výkonnosti, a proto potřebuje nalézt cestu, jak tyto limity prozkoumat a získat tak přehled o těchto limitech. Jedna vlastnost může být zobrazena jako seznam hodnocení jednotlivých materiálů, nebo jako sloupcový graf. Nicméně jen zřídka výkonnost jednotlivých materiálů záleží pouze na jedné vlastnosti. Často jsou limity definovány jako kombinace vlastností, které musejí být splněny. Příkladem může být tuhost při nízké hmotnosti, nebo pevnost kombinovaná s houževnatostí. Příkladů je

samozřejmě mnoho a každý konstruktér se s nimi při navrhování součástí potýká. Tato skutečnost nabízí myšlenku postavení jedné vlastnosti proti druhé a zároveň je vykreslit v grafu, kde je možné posuzovat celé rodiny materiálů, ale i materiály dílčí.

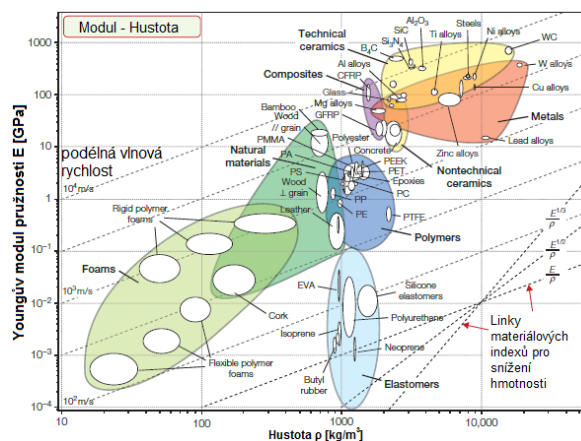
Výsledné grafy slouží především jako užitečná pomůcka při volbě materiálů. Jsou schopné zobrazit velké množství informací přehlednou formou. Umožňují korelaci materiálových vlastností a také umožňují jejich kontrolu. V neposlední řadě slouží jako nástroj pro výběr materiálů, čehož bude v této práci využito.

### 2.3.1 Materiálové vlastnosti

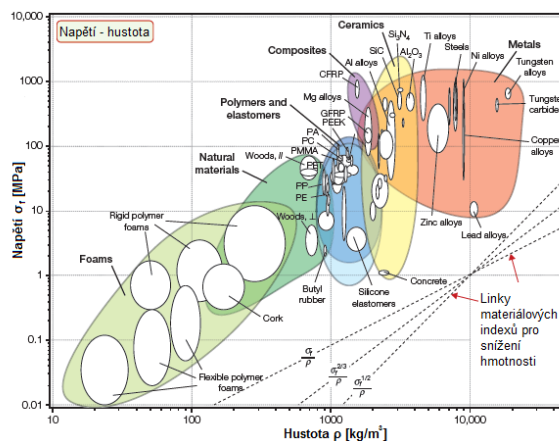
Každá vlastnost konstrukčních materiálů má charakteristický rozsah hodnot. Tento rozsah se u některých vlastností může pohybovat v několika řádech. Jedním ze způsobů, jak tuto škálu vyjádřit je pomocí sloupcových grafů, viz. graf číslo 1 zobrazující Youngův modul pružnosti. Každý sloupec vyjadřuje jeden materiál, přičemž jeho délka odpovídá rozsahu modulu pružnosti daného materiálu a jeho přidruženým formám. V tomto grafu jsou materiály rozděleny do skupin podle třídy, kdy každá třída vykazuje vlastní charakteristický rozsah. Za povšimnutí stojí velikost rozsahu –  $10^6$ , z tohoto důvodu se využívá logaritmického měřítka pro zobrazování.



Graf číslo 2 zobrazuje dané materiály jiným způsobem, a to postavením jedné vlastnosti proti druhé. V tomto případě se jedná o Youngův modul pružnosti a hustotu. Rozsah os je zvolen tak, aby bylo možné zahrnout všechny materiály. To znamená od flexibilních lehkých pěn až po tuhé těžké kovy. Opět je zde využito logaritmického měřítka. Tento obrázek také poskytuje představu, jak se rodiny jednotlivých materiálů shlukují navzájem kolem sebe. Data pro jednotlivé materiály vykresluje graf číslo 3, který je reálným odrazem grafu  $E - \rho$ . Bílé bubliny uvnitř materiálových rodin odkazují na jednotlivé materiálové třídy a podtřídy.



Graf 3 [14]



Graf 4 [15]

Stále to vše vypadá celkem jednoduše, jen jako užitečný způsob zobrazování dat. Každopádně pokud budeme s materiálovými grafy pracovat chytře, pak vhodným měřítkem a osovými vlastnostmi lze do grafu zanést mnohem více. Například rychlost zvuku v pevné fázi závisí právě na  $E$  a  $\rho$ . Pak rychlost podélné vlny lze vyjádřit jako:

$$v = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2} \quad \text{nebo} \quad \log E = \log \rho + 2 \log v \quad (2.6)$$

Takto stanovenou hodnotu  $v$  zaneseme do grafu jako přímku sklonu. Což umožňuje přidávat do grafu různé konstantní vlnové rychlosti. Tyto rovnoběžné úhlopříčkové čáry spojují materiály, v nichž se šíří podélné rychlosti stejně. Tyto materiálové grafy navíc umožňují vkládání dalších vztahů tzv. materiálové indexy. Více o této problematice v kapitole 4.1.3 *Materiálové indexy*.

## 2.3.2 Závislosti materiálových vlastností

### 2.3.2.1 Závislost: modul pružnosti – hustota

Hustota pevné látky se odvíjí od atomové hmotnosti atomů nebo iontů, jejich velikosti a způsobu uspořádání. Rozpětí hustoty závisí zejména na rozpětí atomové hmotnosti. Rozsah se pohybuje od jedné pro vodík až k 238 pro uran. Kovové materiály jsou husté, protože se skládají z těžkých atomů, navíc blízko sebe. Naopak polymery mají hustotu nízkou, neboť jsou složeny převážně z uhlíku (atomová hmotnost 12) a vodíku (atomová hmotnost 1). Hustota keramických materiálů je z větší části nižší než u kovů, neboť v hojném množství obsahují lehké prvky  $O$ ,  $N$ , nebo  $C$ .

Modul pružnosti u většiny materiálů závisí na dvou faktorech. První z nich je tuhost vazby a druhý počet vazeb na jednotku objemu. Vazbu mezi atomy lze chápat jako pružinu a stejně jako pružina má konstantu  $S$  [N/m]. Youngův modul pružnosti lze pak hrubě vyjádřit jako:

$$E = \frac{S}{r_0} \quad (2.7)$$

kde  $r_0$  je velikost atomu,  $r_0^3$  znamená objem atomu nebo iontu. Velké rozpětí modulu pružnosti je dáno především velkým rozsahem hodnot  $S$ . U kovalentní vazby se hodnota pohybuje v rozsahu  $S = 20 \sim 200 \text{ N/m}$ . Kovová a iontová vazba má tuto hodnotu nižší, a to v rozsahu  $S = 15 \sim 100 \text{ N/m}$ . Například diamant má velmi vysoký modul pružnosti, neboť jeho



stejně úrovni jako nejlepší kovy. Zajímavostí jsou elastomery, které mají výjimečně nízký modul pružnosti a tak mají poměr hodnot  $\sigma_f/E$  daleko větší, než kterýkoli jiný materiál 1~10.

Vzdálenost, přes kterou působí vnitřní mezi atomová síla je malá. K porušení vazby dojde v okamžiku zvětšení původní vzdálenosti o více než 10 %. Síla  $F$  potřebná k přerušení vazby je:

$$F \approx \frac{Sr_0}{10} \quad (2.8)$$

kde  $S$  je stejně jako v předchozím případě vazební konstanta, poté by napětí na mezi kluzu pevného tělesa mělo být vyjádřeno jako:

$$\frac{\sigma_f}{E} \approx \frac{F}{r_0^2} / \left( \frac{S}{r_0} \right) = \frac{1}{10} \quad (2.9)$$

Z grafu je zřejmé, že tyto hodnoty dosahují některé polymery, nicméně u většiny pevných látek je to méně a to ze dvou důvodů.

Za prvé je to dáno pohyblivou neboli delokalizovanou vazbou mezi atomy, která se při smykovém namáhání neporuší. Tímto způsobem se v určitém směru smykového namáhání chová kovová i iontová vazba. Velmi čisté kovy dosahují velmi nízkého napětí na mezi kluzu v hodnotě  $E/10^{-3}$ . K použití pro konstrukční účely je nutné tyto kovy dále zpevňovat. Kovalentní vazba je lokalizovaná, a to je důvod proč pevné látky s tímto typem vazby mají napětí na mezi kluzu vysoké  $E/10$ .

Druhým důvodem proč je hodnota napětí na mezi kluzu obecně nižší, jsou vnitřní vady materiálů. Tyto vady můžeme pojmenovat jako koncentrátoři napětí. Zvláštní skupinou materiálů jsou elastomery, protože u nich není modul pružnosti odvozen ze změny vzdálenosti mezi atomy, ale závisí na změně entropie molekulových řetězců při deformaci materiálu.

#### 2.3.2.4 Závislost: specifická tuhost – specifická pevnost

Hlavním cílem mnoha konstrukčních návrhů je dosáhnout vysoké úrovně tuhosti a pevnosti současně při zachování nízké hmotnosti. Užitečná pomůcka, jak toho dosáhnout se skrývá v předchozím grafu, který je navíc doplněn o hustotu. Respektive hodnoty modulu pružnosti a pevnosti na mezi kluzu jsou vyděleny právě hustotou. Na grafu číslo 6 je zobrazena takzvaná mechanická účinnost, což vyjadřuje použití nejmenšího množství materiálu, který je schopen odvést nejvíce strukturální práce.

Kompozity, zvláště pak CFRP leží v grafu vpravo nahoře, což znamená že má nejatraktivnější specifické vlastnosti. Tento fakt je jedním z důvodů rozmachu použití tohoto materiálu v letectví. Také keramika má tuhost a pevnost na jednotku hmotnosti na velmi vysoké úrovni, podobně jako kovy. Avšak křehkost keramiky zabraňuje širokému použití ve strukturálních návrzích.

### 2.3.3 Závislost zohledňující náklady na materiál

#### 2.3.3.1 Náklady na materiál

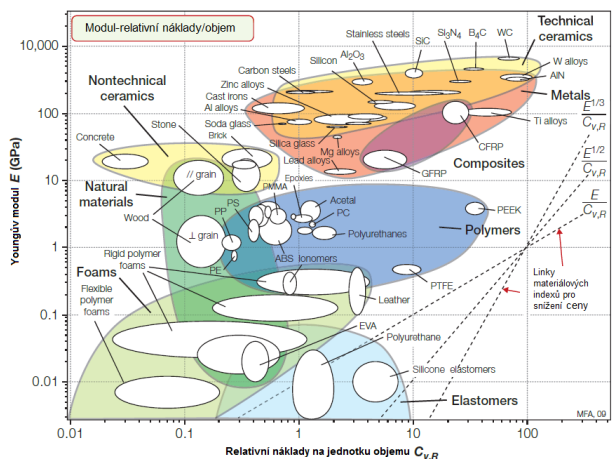
Vlastnosti materiálů jako jsou modul pružnosti, pevnost nebo například tepelná vodivost mají nespornou výhodu v tom, že se nemění v čase. Náklady však ano, což může působit obtěžujícím dojmem. Zejména problémy s dodávkami, nedostatkem, ale i spekulace a inflace způsobuje výrazné výkyvy v cenách za kilogram komodity. Pro některé materiály jako jsou měď či stříbro je poměrně snadné získat aktuální cenu, protože se uvádí v denním tisku anebo v odborných časopisech. V případě ostatních materiálů je toto problém.

#### 2.3.3.2 Závislost: modul pružnosti – relativní náklady

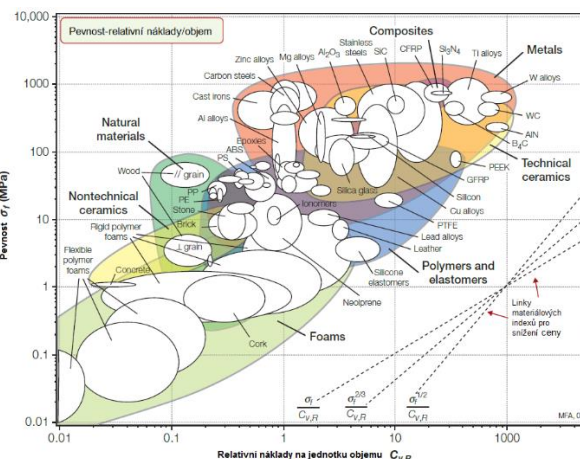
Při konstrukčním návrhu s důrazem na nízké náklady se výběr řídí materiálovými indexy, které se skládají z modulu pružnosti, pevnosti a náklady na jednotku objemu. Nástrojem, jak alespoň částečně udělat korekci kvůli možnému vlivu inflace zde zavedeme veličinu relativní náklady na jednotku objemu  $C_{v,R}$ , vyjádřené jako:

$$C_{v,R} = \frac{\text{Náklady/kg} \cdot \text{Hustota materiálu}}{\text{Náklady/kg} \cdot \text{Hustota prutu z měkké oceli}} \quad (2.10)$$

V rovnici výše je zohledněna cena ocelové výztuže 0.3 \$/kg. Následující graf číslo 7 zobrazuje materiály, které jsou v grafu zobrazeny závislostí modul pružnosti vůči relativním nákladům na jednotku objemu. Levné a tuhé materiály leží vlevo nahoře. Na obrázku jsou rovněž zobrazeny vodící čáry pro výběr materiálů, které jsou tuhé a levné.



Graf 7 [18]



Graf 8 [19]

#### 2.3.3.3 Závislost: pevnost – relativní náklady

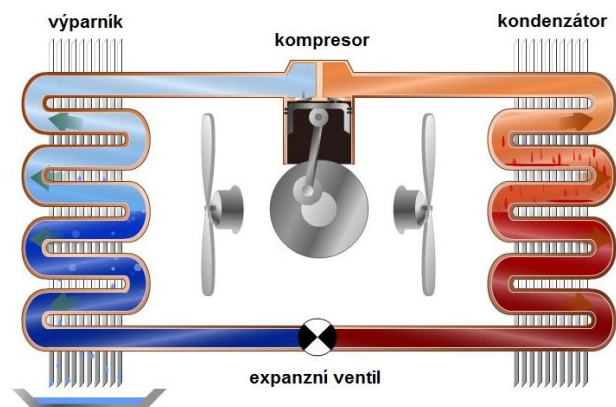
Na dalším grafu číslo 8 jsou materiály, které se vyznačují dobrým poměrem pevnost / náklady. Na ose Y je vynesena opět hodnota napětí na mezi kluzu. Co se týče kvality hodnot, nedosahují úrovně jako v případě postavení proti sobě fyzikálních vlastností. Samozřejmě je to dáno fluktuací ceny komodit na světových trzích. Závěrem není třeba tyto grafy zavrhnout, přece jen umožňují výběr materiálu pomocí kritéria „funkce na jednotkovou cenu“.

### 3. Rozbor stávající konstrukce

Klimatizační jednotka je zařízení určené primárně pro regulaci teploty. V této diplomové práci je použita klimatizační jednotka pro rezidenční využití, tzn., že klimatizační jednotka reguluje teplotu uvnitř bytu či domu. V letním období slouží k chlazení místnosti, naopak v zimě pak k jejímu vytápění. Dále je klimatizace doplněna o další funkce, jako například čištění vzduchu od alergenů, prachu a zápachů, zvlhčování vzduchu, nebo naopak jeho odvlhčování. Další funkce jsou přívod čerstvého vzduchu a cirkulace vzduchu. V současné době se ke slovu dostávají Smart funkce a ovládání jednotky pomocí mobilní aplikace. Mezi Smart funkce patří například sledování osob v místnosti. Pokud je místnost 20 minut bez pohybu osob, vnitřní jednotka sama přejde do úsporného režimu. Po zaznamenání pohybu se jednotka vrátí zpět do režimu nastaveného uživatelem. Detekce osob slouží také k ochraně zdraví, neboť při detekci uživatele před jednotkou se změni proudění vzduchu tak, aby se proudění nasměřovalo mimo. Mobilní aplikace pak slouží k ovládání jednotky skrze chytrý telefon. Jednotku je možné zapnout již při odchodu z práce nebo sledovat spotřebu energie.

Krátce k popisu činnosti klimatizace. Klimatizace se skládá z venkovní a vnitřní jednotky, přičemž vnitřních jednotek může být více. Pro správnou funkci jsou nezbytné čtyři základní komponenty. Výparník, kondenzátor, kompresor a expanzní ventil. Chladicí cyklus je zobrazen na obrázku číslo 13. Chladicí okruh je naplněn chladivem – v našem případě chladivem R32.

Při průchodu chladiva skrze výparník dochází k přenosu tepla ze vzduchu do chladiva. Chladný vzduch následně ochladí místnost. Chladivo přechází z kapalného stavu do plynného. V tomto stavu chladivo putuje do kompresoru, kde vlivem stlačení dochází k nárůstu teploty a tlaku. To zajistí snazší zkapalnění v kondenzátoru. V kondenzátoru díky rozdílným teplotám chladiva a okolního vzduchu dojde ke zkapalnění chladiva. Hodnoty tlaku a teploty zůstávají vysoké. Poslední komponentou je expanzní ventil, který škrtí tok chladiva a téměř okamžitě dochází k poklesu tlaku a teploty. Tento cyklus se následně opakuje.



Obrázek 13 [20]



Pro účely diplomové práce byla použita venkovní jednotka *Daikin Multi R32 3MXM52M2*.

Charakteristické vlastnosti této venkovní jednotky jsou:

- sezónní účinnost chlazení A+++ a topení A++
- možnost připojení až 3 vnitřních jednotek
- účinný a tichý swing kompresor
- možnost připojit různé vnitřní jednotky
  - například nástěnné nebo podhledové
- chladivo R32 šetrné k životnímu prostředí
  - GWP: 675 (R410A GWP: 2088)
  - oproti R410A o 68%
- více v příloze 10.2



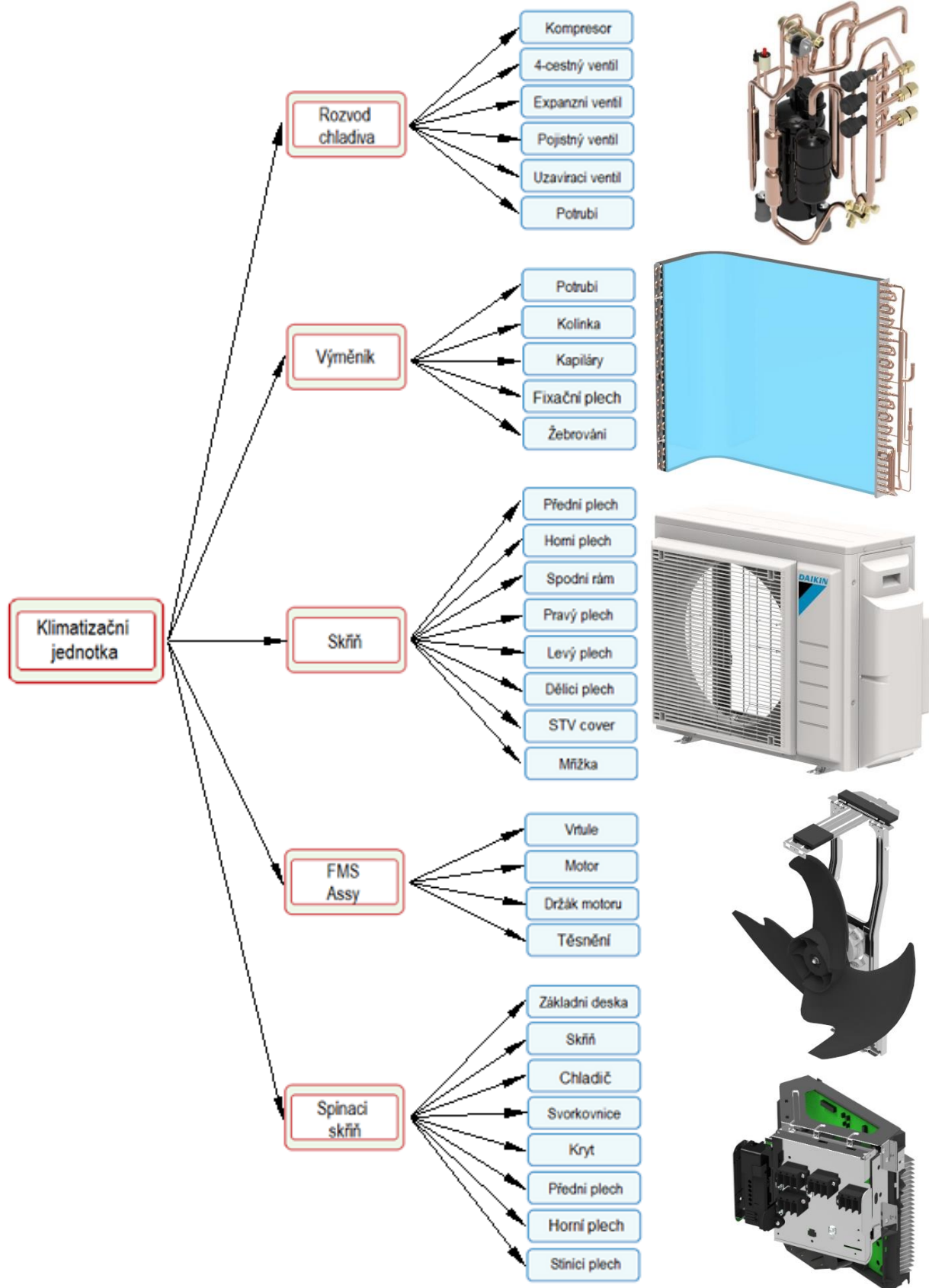
Obrázek 14 [21]

Rozměry jednotky jsou 734x868x320mm (VxŠxH). Důležitý údaj pro tuto diplomovou práci jsou provozní otáčky motoru ventilátoru, které se pohybují v rozmezí od 420~700 ot/min. Více o tomto tématu v kapitole 5. *Reálné měření*.

Jak již bylo popsáno v úvodní kapitole, hlavním tématem jsou *vibrace* od motoru. K tomuto účelu byla právě zvolena jednotka *3MXM52M2*, neboť používá motor, který je připevněn k FMS přímo. Vyšší řada používá větší motor, který je připevněn k FMS přes silentbloky. Vzhledem k přímé vazbě mezi motorem a FMS dochází k lepšímu přenosu budící frekvence jakožto sledované veličiny.

### 3.1 Popis venkovní klimatizační jednotky

Diplomová práce i praxe je založena na tzv. „*Developmental design*“ tedy rozvíjení a zlepšování stávajícího produktu – což je „*Base model*“. Z tohoto důvodu budeme postupovat dle obrázku 2 - rozklad technického systému, v našem případě klimatizační jednotky. Venkovní klimatizační jednotku je možné rozdělit do pěti základních celků – podsestav. Každý z těchto pěti celků tvoří jádro klimatizační jednotky a má jasně stanovenou úlohu pro zajištění bezchybné funkce klimatizace. Navíc nám tento rozklad bude užitečný v následující kapitole pro analýzu sestav a následně jednotlivých komponent.



Obrázek 15 Rozklad technického systému – venkovní klimatizační jednotka [3]

#### Rozvod chladiva:

- Srdcem venkovní klimatizační jednotky je kompresor. V tomto konkrétním případě se jedná o hermeticky uzavřený kompresor typu swing. Hlavní předností tohoto kompresoru je nízké tření během provozu, díky čemuž je rotační pohyb tichý s nízkými vibracemi.
- Čtyř-cestný ventil slouží ke změně směru toku chladiva. Při chlazení je ve vnitřní jednotce výparník a ve venkovní jednotce kondenzátor. Pokud jednotku přepneme do režimu vytápění, je nezbytné toto pořadí otočit tak, aby ve venkovní jednotce byl výparník a ve vnitřní jednotce kondenzátor. K tomuto účelu slouží právě čtyř-cestný ventil. Pomocí elektromagnetické cívky se posouvá šoupátko v těle ventilu a dle polohy proudí chladivo jedním, nebo druhým směrem.
- Další částí rozvodu chladiva je expanzní ventil. Do expanzního ventilu vstupuje chladivo o vysokém tlaku a vysoké teplotě. Průchodem skrze expanzní ventil se teplota i tlak chladiva výrazně sníží. Pohyb jehly uvnitř ventilu je zajištěn pomocí pulzního motoru (cívky). Tento pohyb určuje množství chladiva, které přes ventil prochází.
- V provozních podmínkách je uvnitř potrubí tlak okolo 4 MPa. Z toho důvodu je potrubí opatřeno pojistným ventilem, který hlídá tlak uvnitř systému a v případě nutnosti odstaví kompresor z činnosti do doby, než se dostane tlak na bezpečnou provozní úroveň.
- Předposlední komponentem rozvodu chladiva je uzavírací sedlový ventil, jehož úkolem je zamezit úniku chladiva před instalací klimatizace. Venkovní klimatizační jednotka se prodává již naplněná příslušným chladivem. Po připojení vnitřních jednotek dojde k otevření tohoto ventilu a tím k propojení vnitřní a venkovní jednotky.
- Poslední částí je samotné měděné potrubí, které propojuje jednotlivé výše popsané komponenty. Průměr trubky se liší dle konkrétní specifikace dané jednotky. Rozdíl v průměru je také mezi vnitřní a venkovní jednotkou.

#### Výměník:

- Výměník je další důležitou podsestavou klimatizační jednotky. Pomocí výměníku dochází k přenosu tepla z chladiva do okolního vzduchu (při režimu chlazení). Výměník se skládá z měděného potrubí, které je na konci opatřené kolínky. Ta slouží k propojení jednotlivých cest výměníku. Kolínka jsou taktéž měděná.
- Přívod chladiva (plynná fáze) do výměníku je pomocí jediné trubky, na jejímž konci je distributor s kapilárami. Toto rozvětvení zajišťuje správné rozložení proudění chladiva skrz celý výměník. Délka a rozmístění kapilár je přesně stanoveno výpočtem a simulací.
- Výměník tepla je na obou svých koncích opatřen fixačními plechy, které slouží k upevnění výměníku k základnímu rámu klimatizace. Fixační plech je vyroben z ocelového plechu o tloušťce přes 1 mm. Samozřejmostí je povrchová úprava, aby byl materiál odolný vůči korozi a měďnatým solím.
- Posledním prvkem výměníku je žebrování. Žebrování slouží k lepšímu předávání tepla mezi chladivem a vzduchem. Žebrování je vyrobeno z hliníku. Speciální povrchová úprava se vyznačuje tím, že výměník má po složení a zapájení tmavě modrou až zelenou barvu. V tomto případě je nejdůležitější vlastností odolnost proti měďnatým solím, neboť při kondenzaci protéká kondenzát skrz výměník a tedy i měděné potrubí.

#### Skříň:

- Skříň neboli *casing* jednotky je tvořena převážnou většinou z ocelových plechů. Tloušťka se pohybuje v rozmezí 0,6 mm až 2 mm. Základním mechanickým požadavkem na materiál je jeho tažnost. Potřebná tažnost se odvíjí od tvarové složitosti konkrétních dílů. Plechy jsou zpracovávány lisováním zpravidla v postupových kovových formách. Na skříň jednotky jsou také samozřejmě kladeny estetické požadavky, tudíž pohledové díly jsou po vylisování dále lakovány v práškové lakovně.
- Skříň je doplněna o několik plastových dílů. Vnější plastové díly jsou vyrobeny z polypropylenu odolným proti povětrnostním vlivům. Za zmínku rozhodně stojí mřížka – kryt vrtule. Tvar a rozložení jednotlivých elementů mřížky jsou vypočítávané tak, aby proudění vzduchu bylo usměrněné požadovaným způsobem. U naší konkrétní jednotky jsou jednotlivé horizontální elementy zahnuté do tvaru vrtule. Což nejenom že usměrňuje proudění vzduchu, ale má to také pozitivní vliv na zvuk.

#### Fan Motor Stand Assy:

- V této diplomové práci je tato podsestava hlavním účinkujícím. FMS Assy je tvořena třemi hlavními komponentami. Vrtule – motor – držák. Tato podsestava bude více rozebrána v kapitole *6.1 Popis modelu*.
- Vrtule se skládá ze dvou částí. První částí je samotná vrtule, která se vyrábí z materiálu ABS s příměsí skelných vláken. Tvar vrtule se navrhuje s ohledem na požadované *airflow* (objemový průtok vzduchu) a také s ohledem na nízkou hladinu zvuku. Druhou částí je náboj vrtule, který slouží k uchycení vrtule na hřídel elektromotoru. Náboj je vyroben ze slitiny zinku. Každá vrtule před montáží do jednotky musí projít zkouškou na nevyváženost. V případě potřeby je následně pomocí závažíčka dovyvážená. Cílem je pochopitelně co nejvíce omezit vibrace celého systému.
- O pohon vrtule a do značné míry i výkon jednotky se stará motor. V našem případě se jedná o bezkartáčový elektromotor s osmi pólovými nástavci. K motoru je přiváděno stejnosměrné napětí. Při výrobě motoru je opět kladen důraz na minimální házivost výstupního hřídele.
- Další součástí této podsestavy je držák motoru a vrtule neboli Fan Motor Stand. Zde se opět jedná o sestavu. Hlavní částí je samotný FMS vyrobený z ocelového plechu o tloušťce 1 mm. Vyrábí se v postupové formě. Na horní ploše je FMS opatřen dvěma těsněními, která vymezují prostor mezi FMS a skříňí jednotky.
- Poslední částí této podsestavy je těsnění (*sealing*), které vymezuje prostor mezi FMS a horním plechem skříně. Vyrábí se z materiálu CR Foam, tedy z chloroprenového kaučuku. Tloušťka obou těsnění je 10 mm. Toto těsnění je samozřejmě zahrnuto do modální analýzy.

### Spínací skříň:

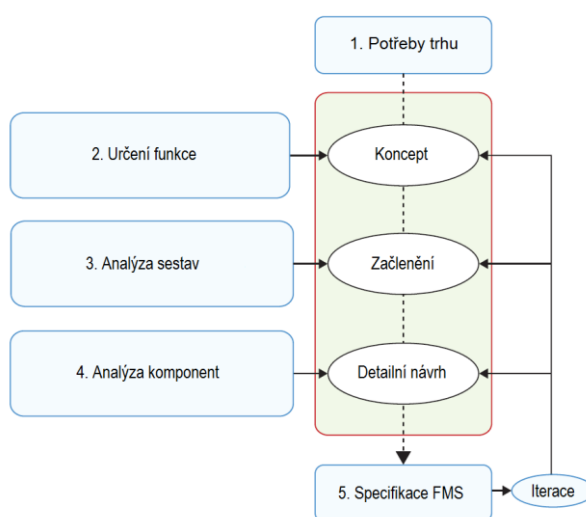
- Činnost celé jednotky je řízena základní deskou neboli PCB (*Printed Circuit Board*). Ta je tvořena mnoha konektory, pojistkami, relátky a dalšími prvky.
- Tělo spínací skříňe je vyrobeno z materiálu ABS. V případě plastových částí, které tvoří podsestavu spínací skříňe, musejí plnit specifikaci nehořlavosti 5-VA. Tento požadavek je dán normou.
- Důležitou součástí spínací skříňe je hliníkový chladič. Velikost chladiče koresponduje s velikostí základní desky a je k ní připojen skrze teplovodivou pastu a šrouby. Výroba chladiče probíhá v jednoduchých odlévacích formách.
- Svorkovnice slouží k přívodu elektrické energie do jednotky a také k propojení venkovní jednotky s jednotkami vnitřními. Počet svorkovnic závisí na typu provedení jednotky. V našem případě jsou ve spínací skříni čtyři svorkovnice. Jedna slouží k napájení venkovní jednotky a tři jsou pro komunikační a síťové kabely k vnitřním jednotkám.
- Spínací skříň je opatřena šesti signálními diodami na pomocném PCB. Tyto diody slouží k indikování abnormálního chování jednotky. Světelné kombinace jsou popsány v operačním manuálu jednotky. Toto pomocné PCB je umístěno v plastovém krytu, který je vyrobený z ABS. Samozřejmostí je pak specifikace 5-VA.
- Celá konstrukce spínací skříňe je doplněna o několik plechů. Jedná se tak o přední plech, který slouží jako základna pro svorkovnice. Přední plech je výklopný, aby byl umožněn přístup k základní desce. K tělu skříňe je přišroubován přes horní plech. V zadní části je potom umístěn stínící plech. Přední a horní plech má tloušťku 0.8 mm a zadní stínící plech je vyroben z materiálu o tloušťce 0.4 mm.

★ Více o materiálech v kapitole 3.3.

## 3.2 Požadavky kladené na venkovní klimatizační jednotku

V této podkapitole rozebereme venkovní jednotku dle obrázku 1. Jen pro zopakování, každý proces návrhu začíná nejprve průzkumem trhu, na jehož základě dochází k první obecné specifikaci požadavků na nový produkt. Cílem je specifikovat jednotlivé požadavky na nový produkt, které budou dále sloužit k výběru nejvhodnějšího materiálu. Jednotlivé kroky jsou popsány níže.

Obecně lze říci, že požadavky se mění v závislosti na typu použití klimatizační jednotky a zemi budoucí distribuce. V našem případě máme venkovní klimatizační jednotku typu „multi“ a slouží především pro rezidenční účely



Obrázek 16 [3]

## 1. Potřeby trhu:

Potřeby trhu se liší a odvíjejí podle geografické polohy. Obecně se výrobce snaží vyrábět pokud možno „univerzální“ modely. Potřeby a požadavky trhu lze rozdělit ze dvou úhlů pohledu. První se týká výkonu klimatizační jednotky a druhý bezpečnosti a plnění norem příslušného státu, ve kterém bude jednotka provozována.

Z hlediska výkonu se jedná zejména o sezónní účinnost SEER (chlazení), SCOP (topení) a dosažitelnou kapacitu. Nicméně důležitou vlastností je maximální hladina zvuku a vibrací. Je to dáno zejména tím, že koncový uživatel je schopen zvuk vnímat na rozdíl třeba od maximální účinnosti. Toto tvrzení berme trochu s nadsázkou. Obecně lze říci, že jak účinnost, tak kapacitu ovlivňují dva faktory. Velikost výměníku a *airflow*, neboli objemový průtok vzduchu skrze výměník. Velikost výměníku jednak omezuje požadovaná velikost celé jednotky, ale hlavně výsledná cena a zvyšování *airflow* má pak negativní vliv na zvuk. Tedy je důležité najít vhodný kompromis.

Závěrem lze konstatovat, že primárním požadavkem na „nový“ produkt bude nízká hladina zvuku, potažmo i vibrací. Dále nízká cena, jakožto obecný požadavek každého trhu, ale také nízká hmotnost, což samozřejmě také ve výsledku ovlivňuje cenu.

Nízké vibrace – Nízká hladina zvuku – Vysoká účinnost chlazení – Vysoká účinnost topení – Přijatelná cena – Nízká hmotnost – Dosažitelná kapacita – Odolnost proti povětrnostním vlivům – Široký rozsah provozních teplot -20 °C ~ 50 °C – Maximální zastavěné rozměry

## 2. Určení funkce:

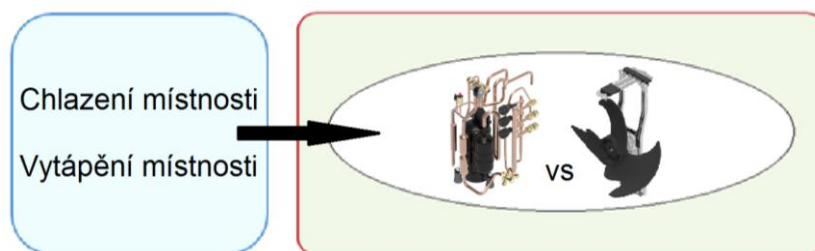
Funkcí klimatizační jednotky je především chlazení, případně vytápění. Z tohoto úhlu pohledu se jeví jako klíčové sestavy rozvod chladiva, tepelný výměník a FMS. Dále je důležitá nízká hladina zvuku i vibrací. Důvodem je možná instalace venkovní klimatizační jednotky blízko sousedních budov, čili není žádoucí zasahovat do osobního komfortu ostatních obyvatel.

Kompresor stlačuje chladivo v plynném stavu za účelem zvýšení teploty a tlaku. Vzhledem k jeho smíšenému pohybu (rotační a posuvný vratný) dochází k vibracím. Tento pohyb se snažíme eliminovat jeho uložením k základnímu rámu. Buď se používají pryžové silentbloky, tak jako v našem případě, anebo u velkých kompresorů se používají ještě ocelové pružinky, aby uložení bylo maximálně flexibilní. Samozřejmě s ohledem na potrubí, proto je i zde nutná dávka kompromisu. Rozvod chladiva v čele s kompresorem je základ pro dosahování vysokých výkonů klimatizace, ale i v tomto případě je potřeba synergie více komponent.

Tepelný výměník se opět podílí velkou měrou na výkonu jednotky. Samozřejmě v ideálním scénáři bychom udělali obrovský výměník tepla a z hlediska výkonu bychom nemuseli dělat kompromisy. Nicméně vždy je konstruktérský tým omezen ze všech stran požadavky marketingu. V tomto případě hovoří proti maximální rozměry jednotky, ale i její finální hmotnost. Na základě toho je použitý výměník dvouřadý, abychom zvýšili objem chladiva, ale zároveň nezvětšovali zastavěný prostor venkovní klimatizační jednotky.

FMS sestava se nám stará o *airflow*. Opět důležitá veličina, která promlouvá do celkového výkonu jednotky. Jednak z hlediska dosažitelné kapacity, ale i účinnosti. Cílem je umístění

dostatečně výkonného motoru, ale i odpovídajícího tvaru vrtule. Nicméně otáčky motoru způsobují budící frekvence, které se mohou nepříznivě projevit nežádoucími vibracemi.



Obrázek 17

### 3. Analýza sestav:

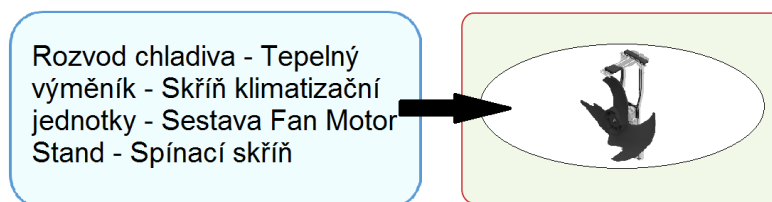
Rozvod chladiva – tato podsestava se poměrně zásadně podílí na vibracích celé jednotky a také ceně. Kompresor pracuje v širokém spektru budící frekvence a tak se může snadno stát, že se frekvence kompresoru bude shodovat s vlastní frekvencí skříně. Nicméně změna kompresoru je poměrně složitá záležitost. Jednak ve velké míře ovlivňuje kapacitu, tudíž i výkon jednotky, ale také je to díl nakupovaný a složitý. Obecně v této diplomové práci můžu konstatovat, že je snazší cesta přizpůsobit zbytek jednotky kompresoru, než kompresor klimatizační jednotce. Dále potrubí samo o sobě může být zdrojem vibrací, každopádně při návrhu se distribuce chladiva testuje na tzv. „*Piping Stress*“, dle jehož výsledku se uzpůsobuje tvar tak, aby potrubí nebylo rozkmitáváno vlivem pohybu kompresoru.

Tepelný výměník – základní kámen výkonu jednotky. Jak již víme, velikost výměníku je jednou ze dvou veličin, které nám určují kapacitu jednotky. Tudíž můžeme říci, že kolem výměníku a kompresoru se staví zbytek jednotky. Dále nám v této studii jde především o vibrace. Z tohoto hlediska nepředstavuje výměník žádnou hrozbu, neboť chladivo je již ustálené v okamžiku proudění skrze výměník.

Skříň – z hlediska vibrací je skříň klimatizační jednotky relativně zásadní, neboť zprostředkovává vazbu mezi uživatelem a „hnacím“ ústrojím jednotky. Celá skříň je tvořena tenkými plechy, které jsou navíc všechny navzájem propojené. Z tohoto úhlu pohledu se může zdát, že právě skříň jednotky je z hlediska vibrací nejdůležitější. Opak může být pravdou. Mým cílem, jakožto konstruktéra klimatizací, je samozřejmě zabránit šíření vibrací od dvou známých zdrojů – motoru a kompresoru. Avšak dosáhnout tohoto cíle není úplně snadné a v kapitole 6. *Modální analýza* se budeme snažit spočítat vlastní frekvence celé skříně. Sice to není hlavní tématem této diplomové práce, ale uvědomuji si komplexnost této úlohy.

FMS – slouží k uchycení motoru s vrtulí. Právě skrze něj se mohou přenášet budící frekvence od motoru do celé skříně. Z reálných měření je ověřeno, že se celá budící frekvence, která je rovna  $f = \frac{n}{60}$  přenáší do FMS. Na základě toho, je nezbytné, aby se budící frekvence nerovнала vlastní frekvenci FMS. Což by v provozu způsobilo jednak rezonanci a tedy i vibraci, ale v případě delšího provozu by mohlo dojít k porušení konstrukce FMS a následně zborcení celé konstrukce. Následky jsou asi zřejmé. Kvůli snaze o co nejmenší konstrukci celé klimatizační jednotky jsou si všechny části poměrně blízko. Při rozkmitání FMS by mohlo dojít ke kontaktu mezi vrtulí a předním plechem, což by mělo za následek selhání celého systému chlazení (vytápění). Tento stav si žádný výrobce nemůže dovolit.

Spínací skříň – Ačkoliv se jedná o „mozek“ klimatizační jednotky, v našem případě je tato podsestava pouze do počtu. Ovšem nelze opomenout jednu důležitou skutečnost a to, že právě spínací skříň nám umožňuje ovlivňovat celou řadu proměnných veličin. Příkladem jsou provozní otáčky jednotky = budící frekvence motoru a také je možné přes software jednotky zakazovat frekvence kompresoru. Pro ilustraci jsou vždy zakázané frekvence 50 a 60 Hz, což představuje frekvenci v elektrické síti.



Obrázek 18

#### 4. Analýza komponent:

Výběru materiálu je věnována celá kapitola 4. *Metodika výběru materiálu.*

Vrtule – vyrábí se vstřikováním materiálu do kovové formy vstřikolisu. Tvar vrtule je dán požadovanými vlastnostmi. Mezi základní vlastnosti patří dosahování požadovaného proudění vzduchu. Se zvyšováním proudění vzduchu skrze výměník dochází ke zvyšování účinnosti celého systému. Jenže to má následně negativní dopad na hladinu hluku. Vrtule za dobu svého vývoje již prošla řadou protiopatření, co se týče zvuku i vibrací. Kvůli možným materiálovým nedokonalostem z výroby je každá vrtule před instalací vyvažována pomocí ocelových závaží. Tím by mělo dojít k odstranění nežádoucích vibrací. Dále má každá vrtule integrovaný tenký pryžový válec, který je umístěn mezi vlastním tělem vrtule a náboj, přes který se vrtule připevňuje na hřídel motoru. Závěrem lze konstatovat, že zásah do vrtule není ideální cesta k dosažení našeho cíle snížení vibrací, neboť by bylo potřeba provést celou řadu výpočtů a reálného testování, což vyžaduje nemalé množství času a pracovní síly, tudíž i financí.

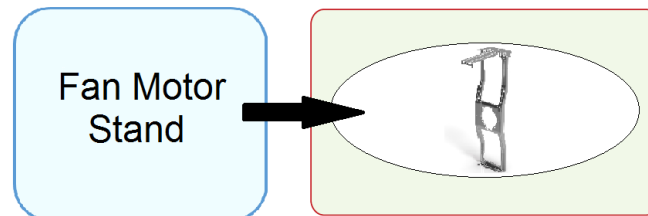
Motor – jeden ze dvou hlavních zdrojů buzení (druhý zdroj je kompresor) a tedy i vibrací. Budící frekvence je závislá na otáčkách motoru, které se pohybují v rozsahu od 420 do 700 [ot/min]. To znamená budící frekvenci 7 ~ 11.66 [Hz]. Motor se upevňuje k FMS pomocí čtyř samořezných šroubů M4x12. Motor je jako celek díl nakupovaný s důrazem kladeným na minimální hřízivost výstupní hřídele. Zároveň jsou veškeré komponenty nerozebíratelně zalité v plastovém těle motoru. S ohledem na tyto fakty nebude motoru dále věnována pozornost. V neposlední řadě je zde faktor ceny. Z pohledu této podsestavy se jedná o jednoznačně nejdražší komponentu a to samé platí z pohledu celé klimatizační jednotky.

Fan Motor Stand – vyrábí se v kovové postupové formě z plechu DX53DZ140MA-C o tloušťce stěny 1 mm. Hlavní funkcí FMS je držení motoru s vrtulí ve správné poloze. K upevnění motoru slouží čtyři otvory tzv. *burring holes*. Tyto otvory vznikají přímo v lisovací formě a jsou definovány pomocí průměru a výšky komínku. Tyto dvě hodnoty udává interní standard na základě tloušťky stěny plechu, velikosti šroubu a jeho stoupání. V našem případě používáme šroub M4x12 Class 3. Výsledné parametry děr jsou průměr 3.5 mm a výška komínku včetně tloušťky plechu minimálně 2.4 mm. Skrze tyto samé díry je FMS uchycen ke skříni. Dvěma šrouby k základnímu rámu, dále jedním šroubem k přednímu plechu a jedním šroubem k hornímu plechu. Více o vazbách v kapitole 5.2 *Popis modelu.*



FMS musí být dostatečně tuhý, aby se budící frekvence od motoru nepřenesla dál do celé skříně. Dalším požadavkem je možnost vedení kabelu k motoru bezpečným a zároveň jednoduchým způsobem do spínací skříně. Samozřejmostí je potom nízká cena i hmotnost. Více o požadavcích v posledním bodu číslo 5 *Specifikace*.

Těsnění – vkládá se do mezery mezi FMS a horní plech. Velikost této mezery je 8 mm a vložením těsnění o tloušťce 10 mm dochází k vymezení vůle a mírnému předeptnutí. Cílem je omezení pohybu horní části FMS. Tento pohyb je znatelný i v modální analýze.



Obrázek 19

## 5. Specifikace:

Na základě obrázku 1 – Konstrukční vývojový diagram jsme na základě potřeb / požadavků trhu došli až k finální specifikaci produktu, a tedy Fan Motor Stand. Tento výběr je na základě předchozích kroků logický, neboť je nositelem budící frekvence a zároveň se skrze něj může vibrace přenášet dále do celé skříně. Finální požadavky na materiál pro FMS jsou:

- Tuhost – zejména modul pružnosti je u tohoto dílu důležitý aspekt, neboť ovlivňuje přesnost vibrací dále do skříně jednotky. Tento parametr bude klíčový v našem hledání.
- Pevnost – FMS je v podstatě nosník na dvou podporách nesoucí váhu motoru a vrtule. Proto je důležité, aby materiál byl dostatečně pevný a odolný vůči namáháním, která na něj působí.
- Tažnost – v případě oceli je nutné tento požadavek zahrnout do konstrukčního návrhu, neboť se FMS vyrábí v postupových lisovacích formách. Ačkoliv tento díl patří z hlediska tažnosti spíše k nenáročným, je dobré to mít na paměti.
- Odolnost vůči velkým rozdílům teplot – vzhledem k tomu, že se klimatizační jednotka vyvíjí pro širokou geografickou oblast budoucího použití, je nezbytné, aby jednotlivé díly byly schopné bezchybné funkce v širokém rozsahu teplot. Obecně se toto rozmezí pohybuje v rozsahu od  $-20\text{ °C}$  do  $+50\text{ °C}$ .
- Odolnost vůči měďnatým solím – kapalina obsahující měďnaté soli se vytváří kondenzací na výměníku. FMS může přijít do styku s kondenzátem na dvou místech, jednak v horní části, ale zejména pak v části dolní, kde je připevněn k dolnímu plechu.
- Nízká hmotnost – nejen hmotnost FMS, ale v podstatě všech dílů klimatizační jednotky je důležitá, neboť na základě výsledné hmotnosti se dělají tzv. přepravní testy. Čím vyšší je váha jednotky, tím větší nároky jsou kladené na balení, a to opět souvisí s cenou. Dále samotná cena přepravy se odvíjí právě od hmotnosti i objemu.
- Nízká cena – tento aspekt hraje samozřejmě důležitou roli, neboť je ve firmě vždy kladen důraz na co nejnižší možnou cenu za předpokladu splnění dalších důležitých parametrů. Na druhou stranu ne vždy je levný materiál levnější. Z mých zkušeností je zároveň rozhodující odebíraná kvantita a také lokální dostupnost materiálu.

- **Unifikace** – v současné době se FMS používá pro dva typy výměníků, ty se liší počtem řad. Rozlišujeme FMS pro jednořadý a dvouřadý výměník. V současné chvíli se to řeší ve druhém kroku postupové formy. Viz. příloha 9.3.

Nízká hmotnost – Voděodolnost – Pevnost – Tuhost – Tepelné namáhání – Odolnost vůči měďnatým solím – Nízká cena – Cenová dostupnost – unifikace na 2 výměníky – Rozmezí provozní

Jak je zmíněno výše, požadavků na FMS je celá řada. Jak to tak v praxi bývá, oddělení marketingu má mnoho a mnoho požadavků na nový díl, nový produkt. Z pohledu konstruktéra bývá proto velice složité všechny tyto požadavky začlenit do návrhu a téměř vždy dochází ke kompromisu. Pokračování ve čtvrté kapitole.

### 3.3 Rozbor současných materiálů a jejich vlastnosti

<b>Tabulka 1</b> Konstrukční celek: Rozvod chladiva		
Název dílu:	Materiál	Základní požadavky:
Kompresor	/	*
4-cestný ventil	/	*
Expanzní ventil	/	*
Pojistný ventil	/	*
Uzavírací ventil	/	*
Potrubí	C1220T-0	Skupina VIII

<b>Tabulka 2</b> Konstrukční celek: Výměník		
Název dílu:	Materiál	Základní požadavky:
Potrubí	C1220T-0	Skupina VIII
Kolínka	C1220T-0	Skupina VIII
Kapiláry	C1220T-0	Skupina VIII
Fixační plech	DX51D-AZ150C	Skupina IV
Žebrování	Al1200-H22	Skupina X

<b>Tabulka 3</b> Konstrukční celek: Skříň		
Název dílu:	Materiál	Základní požadavky:
Přední plech	DX53D-Z140MBO	Skupina III
Horní plech	DX53D-Z140MBO	Skupina III
Spodní rám	DX54D-ZMA140C	Skupina V
Pravý plech	DX53D-Z140MBO	Skupina III
Levý plech	DX51D-Z140MAC	Skupina I
Dělicí plech	DX53D-Z140MAC	Skupina II
STV cover	PP	Skupina VI
Mřížka	PP	Skupina VI

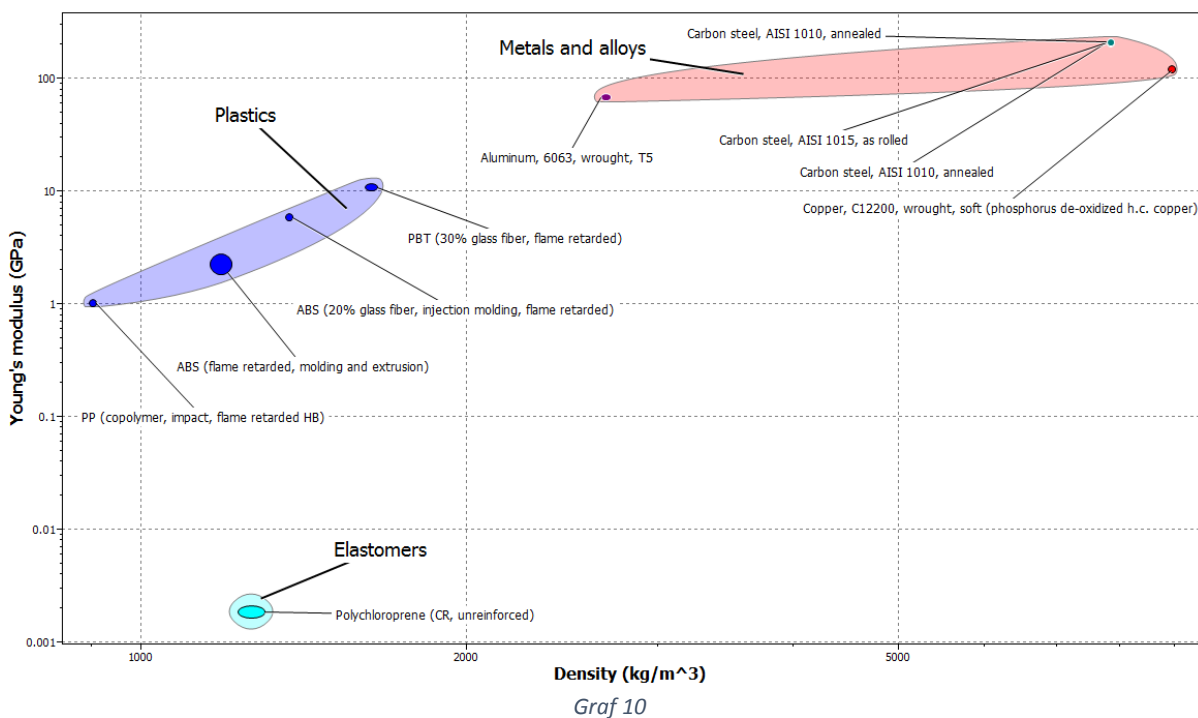
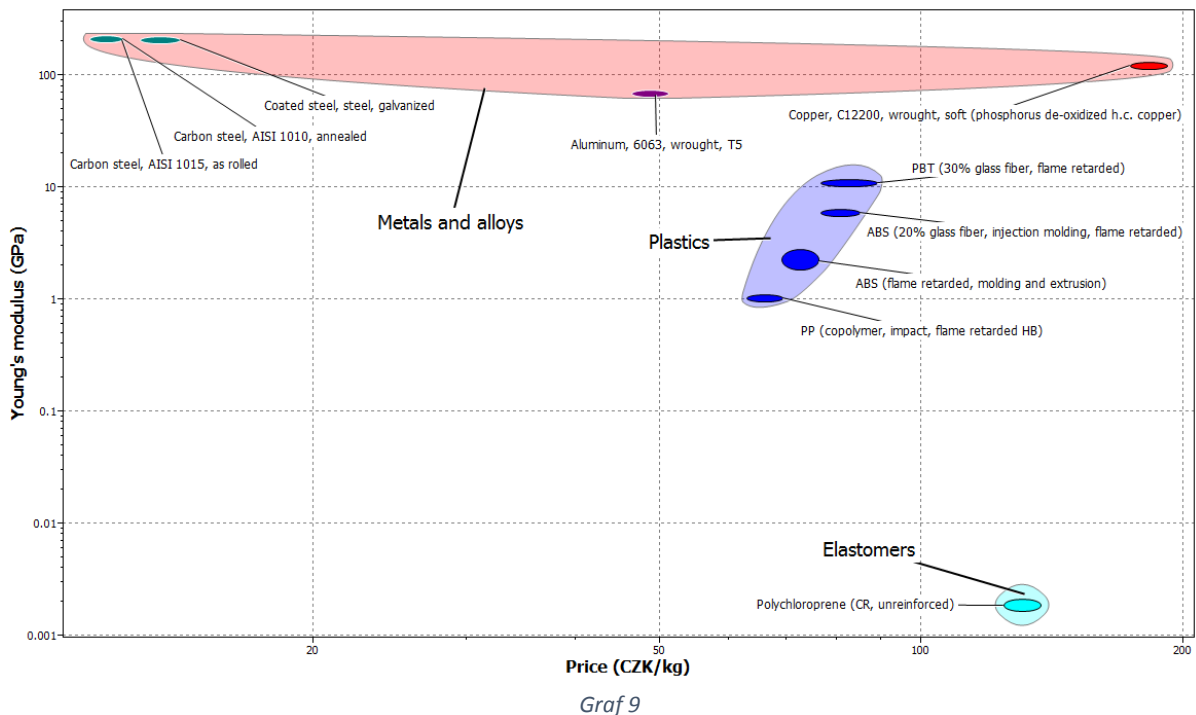
<b>Tabulka 4 Konstrukční celek: FMS Assy</b>		
Název dílu:	Materiál	Základní požadavky:
Vrtule	ASG	Skupina XII
Motor	/	*
Držák motoru	DX51D-Z140MAC	Skupina I
Těsnění	CR FOAM	Skupina XI

<b>Tabulka 5 Konstrukční celek: Spínací skříň</b>		
Název dílu:	Materiál	Základní požadavky:
Základní deska	/	*
Skříň	ABS	Skupina VII
Chladič	AS6063S-T5	Skupina IX
Svorkovnice	PBT	Skupina XIII
Kryt	ABS	Skupina VII
Přední plech	DX53D-Z140MAC	Skupina II
Horní plech	DX53D-Z140MAC	Skupina II
Stínící plech	DX51D-Z140MAC	Skupina I

<b>Tabulka 6 Požadavky na materiály:</b>		
Skupina:	Materiál	Základní požadavky:
I.	DX51D-Z140MAC	Vhodnost k lakování, Nízké nároky na tažnost A80>22, Standartní povrch, Povrchová úprava proti korozi
II.	DX53D-Z140MAC	Vysoké nároky na tažnost A80>30, Standartní povrch, Povrchová úprava proti korozi, nelakováno
III.	DX53D-Z140MBO	Vhodnost k lakování, Vysoké nároky na tažnost A80>30, Zlepšená kvalita povrchu, Povrchová úprava proti korozi
IV.	DX51D-AZ150C	Zvýšená odolnost proti korozi, Nelakováno, Nízké nároky na tažnost A80>22, Standartní povrch
V.	DX54D-ZMA140C	Vysoké nároky na tažnost A80>36, Vysoká odolnosti proti korozi, Nelakováno, Standartní povrch
VI.	Polypropylen	Odolnost proti povětrnostním vlivům, Nehořlavost UL94-V2, Teplotní odolnost více jak 100 °C
VII.	ABS	Nehořlavost UL94-5VA, Teplotní odolnost více jak 70 °C, Mechanická odolnost
VIII.	C1220T-0	Dobrá průtažnost E>40, odolnost proti tlaku> 14.7 MPa, Obsah fosforu max. 0.04%
IX.	AS6063S-T5	Drsnost povrchu Ra3.2, Odolnost vůči povětrnostním vlivům, Odolnost vůči korozi
X.	Al1200-H22	Průtažnost alespoň E>25, Vysoká korozní odolnost, Více vrstvý ochranný povlak
XI.	CR FOAM	Černá barva, Bez zápachu, Odolnost vůči teplotním výkyvům, Požadavky na adhesivní vrstvu dané výkresem
XII.	ABS + skelná vlákna	Provozní teplota -30°C ~ 85°C, Odolnost vůči povětrnostním vlivům, Dobré mechanické vlastnosti
XIII.	PBT	Obsah sklených vláken 30%, Teplotní rozsah -40°C~85°C

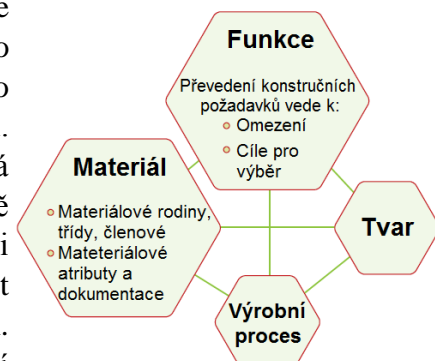
Komponenty v tabulce, které jsou označeny hvězdičkou „\*“ se skládají více než ze dvou materiálů. Jedná se o dále dělitelné sestavy, které se ale nakupují jako celek. Příkladem může být motor pro pohon vrtule, který je tvořena mnoha různými materiály, ale jako celek je nerozebíratelný.

Na grafech číslo 9 a 10 jsou vyneseny materiály z tabulky číslo 6. Graf číslo 9 vyjadřuje závislost modulu pružnosti (tuhosti) na ceně. Graf číslo 10 pak vyjadřuje závislost modulu pružnosti na hustotě (hmotnosti). Jak je vidět, tak základní materiál pro venkovní klimatizační jednotku – ocel je nejtěžší, nejlevnější ale zároveň nejtěžší.



## 4. Metodika výběru materiálu

Jak již víme, s výběrem materiálu souvisí propojení čtyř základních atributů (viz. obrázek 6). V této kapitole se zaměřím na vazbu mezi materiálem a funkcí při jeho výběru. Každý materiál je charakterizován vlastnostmi jako jsou hustota, pevnost, cena či odolnost proti korozi. Konstrukční požadavky pak budou nízká hustota, vysoká pevnost, přijatelná cena a odolnost vůči mořské vodě například. Na počátku výběru je důležité začít se všemi dostupnými materiály, pokud tak neučiníme, lze to chápat jako promarněnou šanci, jak přijít s novátorským návrhem. Samotný výběr lze rozdělit do dvou úrovní. Zprvu popsání požadovaných vlastností a za druhé tyto vlastnosti porovnat s reálnými materiály za účelem nalezení co nejlepší shody.



Obrázek 20 [22]

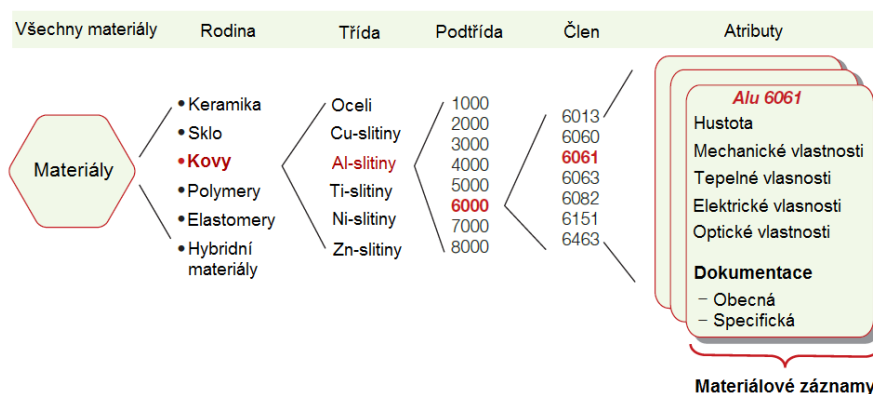
Prvním krokem při výběru materiálu je převedení konstrukčních požadavků. Na jejich základě získáme představu o omezujících attributech. Díky tomu můžeme poprvé vyřadit materiály, které jednoznačně nevyhovují našim kritériím a z velice široké škály dostupných materiálu dostaneme první skupinu, kterou dále podrobíme zkoumání. Zaměříme se na to, jak jednotlivé nově vybrané materiály plní naše požadavky. Více v následující kapitole.

### 4.1 Strategie výběru – úvod

#### 4.1.1 Materiálové atributy

Z obrázku číslo 21 je patrné, jak dlouhá a složitá cesta je ke konkrétnímu materiálu. Všechny materiály se rozdělují do rodin, dále tříd, podtříd a nakonec má ještě každá podtřída členy. A právě každý člen je charakterizován různými atributy – vlastnostmi. Toto rozdělení je demonstrováno na obrázku pro slitinu hliníku Alu 6061. Tento člen je charakterizován řadou vlastností jako jsou vlastnosti mechanické, tepelné, či elektrické. Dále mezi charakteristické rysy patří náklady na materiál a jeho dostupnost a také možnosti jeho zpracování. Souhrnně tyto atributy označujeme jako profil vlastností materiálu.

Výběrem materiálu je myšleno hledání nejlepšího profilu vlastností ve všech materiálech a následné porovnání s profilem materiálu, který konstruktér požaduje.



Obrázek 21 [23]

#### 4.1.2 Strategie výběru

Než budeme moci začít s výběrem konkrétního materiálu, představíme si strategii na celém produktu, neboť postup je v podstatě stejný, ale v případě výběru materiálu je zde více komplikací.

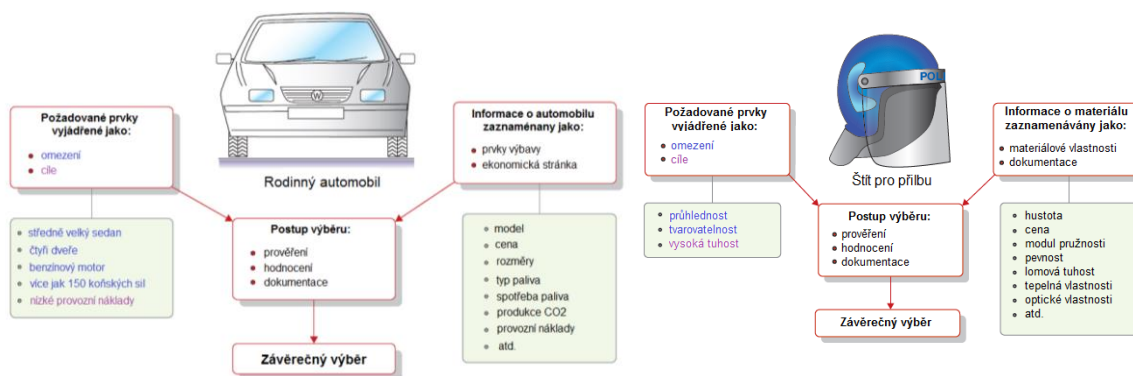
Na obrázku číslo 22 je zobrazena strategie výběru osobního automobilu. Aby automobil odpovídal našim potřebám, musí to být středně velký čtyřdveřový sedan s benzínovým motorem o výkonu alespoň 150 koňských sil. Zároveň očekáváme nízké pořizovací i provozní náklady. Tímto máme stanovené omezení a cíle, které reprezentuje levá strana obrázku. Zde je důležité podotknout, že sice máme tři omezující požadavky, které však nejsou stejného typu:

- první dva požadavky, tedy čtyřdveřový sedan s benzínovým motorem jsou tak zvané jednoduchá omezení, neboť je automobil musí splňovat, aby se stal kandidátem
- třetí požadavek patří do skupiny tak zvaných limitních omezení, neboť máme stanovenou dolní hranici omezení a to 150 koňských sil, ale zároveň vyšší hodnota je také pro náš výběr akceptovatelná

Z tohoto pohledu budou nejžádanější vozy, které budou splňovat veškerá naše předem stanovená omezení a zároveň se budou co nejvíce ztotožňovat s naším cílem.

Dalším krokem výběru je získání potřebných informací o automobilech, což na obrázku představuje pravá strana. K tomu nám mohou posloužit automobilové časopisy a internetové stránky výrobců i prodejců automobilů. Skrze tyto informace budeme schopni zjistit, zda automobil plní naše kritéria, dále je možné zjistit například odhadované provozní náklady, náklady na servis či pojištění.

Nyní se nacházíme ve střední části obrázku, kde nastal čas na rozhodování. Ačkoliv jsme dostupné automobily rozřídili dle našich omezení, stále máme dlouhý seznam vyhovujících kandidátů. To znamená, že potřebujeme nástroj, jak tento seznam poskládat a utřídit. K tomu právě použijeme cíl. Cíle nám dávají možnost poskládat seznam podle našich priorit – tedy dle nákladů. Nicméně v tomto okamžiku není nejvhodnější vybrat nejlevnější automobil a s tímto výběrem se spokojit. V této fázi výběru bychom si měli vybrat první tři, čtyři kandidáty a ty dále podrobit hlubšímu rozboru. Příkladem může být dodací lhůta nebo velikost kufru. Porovnáním těchto menších detailů nakonec získáme jeden konkrétní vůz.



Obrázek 22 [23]

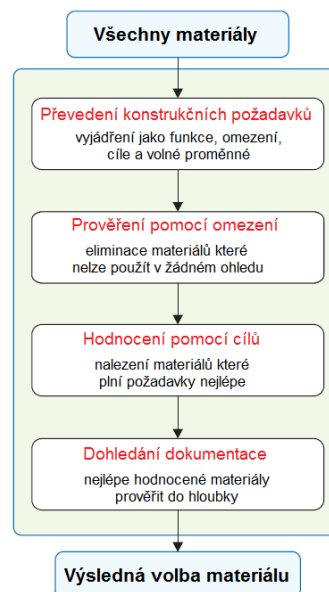
Obrázek 23 [24]

Výběr materiálu zahrnuje hledání nejlepší shody mezi požadavky na konstrukci a vlastnostmi materiálů, které lze využít v konstrukčním návrhu. Obrázek číslo 23 zobrazuje poslední část strategie výběru materiálu pro štít ochranné přílby. Na levé straně jsou

požadavky na materiál, které musí splňovat, vyjádřené jako omezení a cíle. V tomto příkladu je omezení vyjádřené tvárností materiálu a samozřejmě musí být materiál průhledný. Cílem pak je, aby byl materiál maximálně houževnatý. Jelikož je hlavní funkcí ochrana obličeje, musí být odolný proti rozbití, tudíž mít co nejvyšší lomovou houževnatost.

Na pravé straně máme opět materiálová data, která jsou zaznamenávána v materiálových listech, v různých příručkách či na internetu. Opět se dostáváme do střední části obrázku, kdy porovnáváme materiály z pravé části s konstrukčními omezeními z části pravé. Po získání kandidátů, které jsou schopni plnit naše požadavky, vybereme opět tři nebo čtyři materiály, které mají nejvyšší lomovou houževnatost. Pro tyto konkrétní materiály hledáme další podrobnou dokumentaci, abychom mohli vybrat ten nejlepší materiál.

S výběrem materiálu se vážou i jisté komplikace. Hlavním rozdílem jsou konstrukční požadavky, neboť v případě automobilu – produktu, jsou požadavky jasně dané: čtyři dveře, benzínový motor. Navíc tyto požadavky spíše specifikují funkci, neboli co má produkt dělat, než jaké vlastnosti by měli mít jeho materiály. Jak již víme, strategie výběru materiálu se skládá ze čtyř základních kroků. Stanovení konstrukčních požadavků, dle kterých vyřadíme materiály absolutně nevyhovující, cíle nám pomohou zúžit počet „vhodných“ kandidátů na přijatelný počet a tyto kandidáty dále hlouběji zkoumáme. Tento postup je znázorněn na obrázku číslo 24. Blíže si představíme jednotlivé kroky.



Obrázek 24 [25]

- **Převedení konstrukčních požadavků** – V prvním kroku by si konstruktér měl položit otázku: Jak převést konstrukční požadavky ze součásti na materiál? Každá součást má jednu či více funkcí, jako například přenos zatížení nebo přenášet teplo. Tyto vlastnosti musí většinou součást dosahovat za určitý podmínek neboli omezení. Ať už se jedná o maximální dovolené rozměry, odolávat tlakům bez porušení nebo pracovat v širokém spektru provozních teplot. Při návrhu pracuje konstruktér s cílem udělat součást co nejlevnější, co nejlehčí, případně co nejbezpečnější. Často se jedná o kombinaci cílů. Některé parametry lze nastavit tak, aby bylo dosažení cíle jednodušší. To znamená možnost libovolně měnit rozměry, které nejsou omezeny konstrukčními požadavky a co je nejdůležitější – libovolně volit materiál součásti. Tyto parametry se nazývají volné proměnné. Právě funkce, omezení, cíle a volné proměnné definují okrajové podmínky pro výběr materiálu. V případě nosných součástí rozhoduje i tvar průřezu. Tabulka číslo 7 slouží jako nápověda při definování tohoto prvního kroku.

Tabulka 7	Funkce, Omezení, Cíle a Volné proměnné
Funkce	Co součást dělá?
Omezení	Jaké podmínky musí být splněny?
Cíl	Co musí být minimalizováno/maximalizováno?
Volné proměnné	Které parametry může konstruktér měnit?

- **Prověření** – Základem tohoto kroku je nezaujatý postoj. Na počátku výběru je nutné brát do úvahy všechny materiály a to do doby, než se pomocí předchozího kroku jednotlivý kandidáti nevyloučí. V první řadě eliminujeme ty materiály, které nemohou plnit naše konstrukční požadavky v žádném ohledu. To určíme tak, že materiálové atributy leží mimo naše stanové hranice. Příkladem může být požadavek „součást musí plnit svoji úlohu ve vroucí vodě“ anebo „součást musí být průhledná“ tím jsou definovány jasné dané limity, která musí vhodní kandidáti plnit. Tyto požadavky se nazývají limitní požadavky.
- **Hodnocení** – Limitní požadavky nám ovšem neumějí pomoci s roztříděním zbývajících kandidátů. K tomu slouží tak zvaná optimalizační kritéria. Tyto kritéria rozhodují o tom, jak jednotlivý kandidáti, kteří prošli výběrem až do této fáze jsou schopni plnit požadovanou funkci. Kvalita, nebo můžeme říci výkonost jednotlivých kandidátů je v některých případech limitována jednou vlastností. Například nejlepší materiály pro vztlak jsou ty s nejnižší hustotou, pro tepelnou izolaci jsou to materiály s nejnižší hodnotou tepelné vodivosti. Samozřejmě toto neplatí vždy a pro výměník tepla naopak budou nejlepší materiály s vysokou hodnotou tepelné vodivosti. V tomto případě minimalizace, či naopak maximalizace jediné vlastnosti znamená maximální výkon kandidáta.  
Nicméně ve většině případu o kvalitě rozhoduje kombinace více vlastností. Nejlepším materiálem pro lehké silné tyče jsou ty, které dosahují největší specifické pevnosti  $\sigma_f/\rho$ , kde  $\sigma_f$  je mez pevnosti. Nejlepším materiálem pro pružiny jsou ty, které mají  $\sigma_f^2/E$ , kde E je Youngův modul pružnosti. Tyto vlastnosti, které maximalizují výkon konstrukčního řešení se nazývají materiálové indexy.
- **Dohledání dokumentace** – Výsledkem předchozích tří kroků seřazení nejlépe hodnocených kandidátů. Z předchozích informací již víme, že v této fázi výběru by měli již zůstat tři maximálně čtyři kandidáti. O pořadí rozhoduje schopnost materiálu plnit předem stanové funkce, omezení a jaký mají minimalizační nebo maximalizační výkon. Pochopitelně se zde nabízí otázka, proč rovnou nezvolit materiál, který se v hodnocení umístil nejvýše? Odpovědí je, že může mít skryté slabiny. Neznáme jeho pověst a hodnocení ve světě. Z tohoto důvodu je nezbytné finalisty našeho výběru podrobit dalšímu důkladnému prozkoumání.  
Dokumentace použitá v této poslední fázi výběru se značně liší od dokumentace, pokud to tak můžeme nazvat, kterou používáme ve druhém kroku. Spíše používáme strukturované seznamy vlastností a data sheety. Pro finální posouzení oněch tří až čtyř materiálů používáme případové studie předchozího použití materiálu, FMEA analýzy, detailní popis korozního chování, detaily o dostupnosti a cenách. Dokumentace nám pomáhá vybrat konkrétní materiál, kdy nalezneme konečnou shodu mezi konstrukčními požadavky a vlastnostmi materiálu.

Závěrem bych rád shrnul, proč jsou tyto kroky důležité a v podstatě nezbytné. Na základě prověření a určení pořadí materiálů, bychom pracovali s obrovským množstvím potenciálních materiálů a s násobným objemem dokumentace. Snadno se poté může stát, že se ponoříme do hledání materiálu, nalezneme dobrý materiál a nakonec zjistíme, že tato volba byla slepou



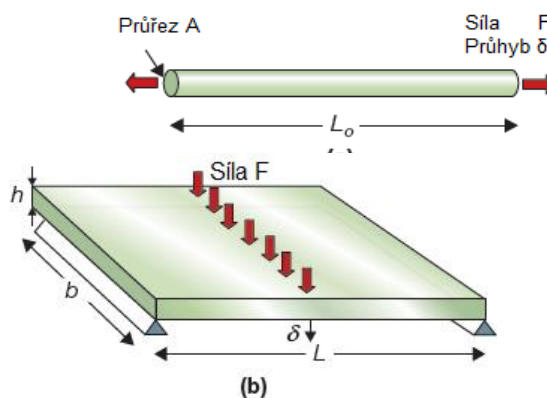
uličkou. Z tohoto úhlu pohledu je výše popsaná metodika výběru materiálu velmi užitečná, která jednak vede k výběru nejvhodnějšího materiálu a zároveň dokáže ušetřit cenný čas.

#### 4.1.3 Materiálové indexy

Omezení nastavují limity vlastností. Cíle definují materiálové indexy, pro které hledáme extrémní hodnoty. Pokud cíl není spárován s omezením, pak je materiálový index jednoduchou vlastností materiálu. Pokud se ale spojí omezení s cílem, pak se index stává skupinou vlastností. Tuto myšlenku si teď více přiblížíme.

Představme si nejjednodušší mechanickou součást. Zatížením součásti obecně vzniká kombinace axiálního napětí, ohybu, krutu a stlačení. Nicméně téměř vždy jedna složka namáhání převládá. Tato skutečnost je tak běžná, že název součásti odráží její funkci a definuje způsob zatížení: tyče nesou zatížení v tahu, nosníky a panely nesou zatížení ohybovým momentem, hřídele přenášejí kroutící momenty a profilované tyče pak nesou axiální zatížení v tlaku. Slova jako jsou tyč, nosník či hřídel vyjadřují funkci. V této podkapitole prozkoumáme omezení, cíle a výsledný materiálový index pro některé z nich.

Životní energie a škodlivé emise dopravních systémů se odvíjejí od spotřeby neobnovitelných paliv během používání. Čím je systém lehčí, tím méně spotřebuje paliva a samozřejmě tím méně produkuje škodlivé emise. Tato myšlenka se odráží i při výběru materiálu. Jako dobrým výchozím bodem je právě nízká hmotnost, každopádně tento bod podléhá i dalším omezením, z nichž nejdůležitějším je tuhost a síla. Na základě těchto skutečností vygenerujeme materiálové indexy pro výše popsané jednoduché mechanické součásti, které jsou zobrazeny na obrázku číslo 25.



Obrázek 25 [26]

- **Snižování hmotnosti: lehká, pevná tyč** – Návrh vyžaduje od tyče, aby přenášela tažnou sílu  $F$  bez selhání a měla by být lehká tak, jak to jen lze (obrázek číslo 25-a). Délka  $L$  je zadaný parametr, ale průřez  $A$  není. V tomto případě maximalizace výkonosti znamená minimalizace hmotnosti při dodržení bezpečného přenosu požadovaného zatížení  $F$ . Veškeré konstrukční požadavky jsou v následující tabulce:

Tabulka 8	Konstrukční požadavky pro lehkou, pevnou tyč
Funkce	Spojovací tyč
Omezení	Délka $L$ je dána (geometrické omezení) Tyč musí bezpečně přenášet zatížení $F$ (funkční omezení)
Cíl	Minimální hmotnost $m$ tyče
Volné proměnné	Průřez plochy $A$ Výběr materiálu

Prvním krokem je nalezení rovnici popisující množství, které má být maximalizováno, nebo minimalizováno. V tomto případě se jedná o hmotnost tyče  $m$ , což představuje naše hledané minimum. Rovnice níže se nazývá objektivní funkce:

$$m = AL\rho \quad (4.1)$$

kde  $A$  je plocha průřezu a  $\rho$  je hustota materiálu. Délku  $L$  a sílu  $F$  máme zadanou, čili hmotnost můžeme snížit pomocí průřezu při dodržení omezující podmínky vyjádřené jako:

$$\frac{F}{A} \leq \sigma_f \quad (4.2)$$

kde  $\sigma_f$  je napětí na mezi pevnosti, nahrazením průřezu  $A$  v předchozích dvou rovnicích dostaneme:

$$m \geq (F)(L) \left( \frac{\rho}{\sigma_f} \right) \quad (4.3)$$

Na základě toho hledáme materiál s nejnižší hodnotou  $\frac{\rho}{\sigma_f}$ . Tuto hledanou funkci je možné také vyjádřit materiálovým indexem. Nicméně je zvyklostí, že při hledání konkrétních vlastností pomocí materiálového indexu je hledaná hodnota vyjádřená jako maximum. Proto rovnici 4.3 převedeme do inverzního tvaru a definujeme materiálový index:

$$M_{t1} = \frac{\sigma_f}{\rho} \quad (4.4)$$

Nejlehčí tyč, která bude bezpečně přenášet požadovanou tažnou sílu  $F$  bude ta s největší hodnotou materiálového indexu definovaného jako „specifická pevnost“. Viz. graf číslo 6 z kapitoly 2.3.2.3. Podobným způsobem lze nalézt materiál pro lehkou tuhou tyč, pokud je zadaná tuhost  $S$ . Poté je materiálový index vyjádřen jako:

$$M_{t2} = \frac{E}{\rho} \quad (4.5)$$

kde  $E$  je Youngův modul pružnosti. V tomto případě je indexem „specifická tuhost“ opět vyjádřená na grafu číslo 6.

- Snižování hmotnosti: lehký, tuhý panel – Příkladem může být deska stolu pro lepší představitivost. Máme definovanou její délku  $L$  a šířku  $b$ . Volnou proměnou je v tomto případě tloušťka  $h$ . Zatížení je definováno centrální silou  $F$ , která bude způsobovat průhyb desky. Obrázek číslo 25-b. Požadavek tuhosti říká, že nesmí dojít k průhybu většímu, než je  $\delta$ . Cílem je dosáhnout výše popsaných skutečností s minimální hmotností panelu/desky. Souhrn je opět v tabulce níže.

Tabulka 9	Konstrukční požadavky pro lehký, tuhý panel
Funkce	Panel
Omezení	Délka $L$ a šířka $b$ je dána (geometrické omezení) Ohybová tuhost $S$ je dána (funkční omezení)
Cíl	Minimální hmotnost $m$ panelu
Volné proměnné	Tloušťka panelu $h$ Výběr materiálu

Hmotnost vyjádřená objektivní funkcí je stejná jako v předchozím příkladu:

$$m = AL\rho = bhL\rho \quad (4.6)$$

Dále ohybová tuhost musí být alespoň  $S^*$ :

$$S = \frac{C_1 EI}{L^3} \geq S^* \quad (4.7)$$

Kde konstanta  $C_1$  závisí pouze na rozložení zatížení, ovšem v našem případě ji nepotřebujeme. Nicméně hodnota této konstanty je k nahlédnutí v příloze 9.4. Moment setrvačnosti obdélníku k těžišťovým osám je vyjádřen:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4.8)$$

Na základě konstrukčních požadavků můžeme snížit hmotnost panelu redukcí výšky  $h$ , ale pouze na takovou míru, která bude splňovat ohybovou tuhost. To znamená, že z posledních dvou rovnic vytkneme výšku  $h$ , což nám dává objektivní funkci:

$$m = \left(\frac{12S^*}{C_1 b}\right)^{1/3} (bL^2) \left(\frac{\rho}{E^{1/3}}\right) \quad (4.9)$$

Hodnoty  $S^*$ ,  $L$ ,  $b$ , a  $C_1$  jsou v našem případě zadané konstanty, z čehož vyplývá že jediná svobodná volba je právě volba materiálu. Nyní si vyjádříme hledanou funkci jako materiálový index, tedy inverzní hodnotu materiálových vlastností, pro kterou hledáme maximum vyjádřené jako:

$$M_{p1} = \frac{E^{1/3}}{\rho} \quad (4.10)$$

Nejlepší materiály pro lehký a tuhý panel budou ty, kterým bude odpovídat nejvyšší hodnota materiálového indexu. Pokud bude omezení vyjádřené jako pevnost, spíše než tuhost, pak hodnota materiálového indexu bude:

$$M_{p2} = \frac{\sigma_y^{1/2}}{\rho} \quad (4.11)$$

Tyto indexy vypadají velice podobně jako v předchozím případě, avšak vedou k různým možnostem výběru materiálu.

- Snižování ceny materiálu: levná tyč a panel – V okamžiku kdy je hlavním cílem snižování nákladů, čili ceny materiálu, než snižování hmotnosti se materiálový index opět změní. Tato situace dle mého názoru nastává velice často, neboť o náklady jde vždy až na prvním místě. Pokud je cena materiálu vyjádřená jako  $C_m$  [Kč/kg], pak náklady na materiál, ze kterého je součást vyrobena musí být  $mC_m$ . Objektivní funkce nákladů na materiál je vyjádřena jako:

$$C = mC_m = AL C_m \rho \quad (4.12)$$

Dále pokračujeme jako v předchozích dvou příkladech s rozdílem, že hustota  $\rho$  je nahrazena  $\rho C_m$ . Tímto se dostáváme k vyjádření indexu, který vede k materiálu pro tyč specifikovanou pevností a minimálními náklady na materiál:

$$M_{tc} = \frac{\sigma_f}{C_m \rho} \quad (4.13)$$

Stejně tak lze vyjádřit materiálový index levný tuhý panel:

$$M_{pc} = \frac{E^{1/3}}{C_m \rho} \quad (4.14)$$

Závěrem je třeba dodat, že náklady na materiál jsou pouze součástí dalších nákladů, jako jsou náklady na výrobu požadovaného tvaru, náklady na spojení či dokončovací operace.

- Přidružování materiálových indexů součástem – Součásti popsané výše nesou označení podle zatížení, které přenášejí a podle materiálového indexu, který řídí výběr materiálu. Jako příklad lze uvést dvouplošník: pro něj je typická lehká konstrukce. Materiály jsou voleny tak, aby byli schopné nést požadované zatížení při minimální hmotnosti. Naopak struktura letiště je tvořena mnoho materiály s cílem nést zátěž, ale s minimálními náklady na materiál. Tedy materiálové indexy jsou odvozeny z jednoduchého cíle, a to z minimální hmotnosti na straně jedné a z minimální materiálových nákladů na straně druhé. Nicméně často se stává, že konstrukční návrh zahrnuje více než jeden cíl. O tomto tématu více v kapitole 4.2.

#### 4.1.3.1 Rámec materiálových indexů

V této podkapitole se podíváme na materiálový index v obecné měřítku. Konstrukční součásti slouží jako nositelé funkce. Přenášejí zatížení, předávají teplo, nebo uchovávají energii. Obecně řečeno konstrukční součásti plní funkční požadavky. Příklady byly již uvedeny výše.

Výkonost konstrukčního prvku je definována třemi atributy: funkčními požadavky, geometrií a materiálovými vlastnostmi. Tyto atributy popisuje rovnice (4.15),

$$P = \left[ \left( \begin{array}{c} \text{funkční} \\ \text{požadavky, } F \end{array} \right); \left( \begin{array}{c} \text{geometrické} \\ \text{parametry, } G \end{array} \right); \left( \begin{array}{c} \text{materiálové} \\ \text{vlastnosti, } M \end{array} \right) \right] \quad (4.15)$$

kde  $P$  výkonost konstrukční součásti zahrnující jeho hmotnost, objem, cenu. Optimální návrh konstrukční součásti je tvořen výběrem materiálu a geometrie tak, aby výkonost byla minimalizována nebo maximalizována. Závisí na výchozím požadavku. Tyto tři atributy z rovnice číslo 4.15 lze považovat za oddělitelné a rovnici lze přepsat

$$P = f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M) \quad (4.16)$$

kde  $f_1$ ,  $f_2$ , a  $f_3$  jsou samostatné funkce, které jsou mezi sebou jednoduše vynásobeny. Tato skutečnost je důležitá, neboť to dokazuje, že optimální výběr materiálu je nezávislý na ostatních atributech. To samé platí pro geometrii  $G$  i všechny hodnoty funkce  $F$ . Na základě toho lze nalézt ideální podmnožinu materiálů, aniž bychom řešily celý systém, ba dokonce

znali všechny detaily atributů F a G, což umožňuje obrovské zjednodušení. Výkonost atributů F a G je maximalizována maximalizací  $f_3(M)$ . Tento atribut se nazývá koeficient efektivnosti materiálu – zkráceně materiálový index. Zbylé dva atributy  $f_1(F) \cdot f_2(G)$  jsou koeficientem strukturní účinnosti – zkráceně skstrukturní index. V této práci nás zajímá pouze materiálový index. V tabulce číslo 10 jsou uvedeny příklady některých materiálových indexů.

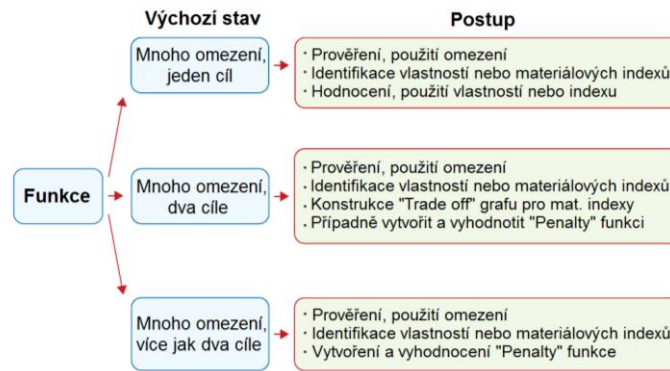
Tabulka 10		Příklady materiálových indexů
Funkce, Cíl a Omezení		Index
Tyč, minimální hotnost, tuhost zadána		$\frac{E}{\rho}$
Nosník, minimální hotnost, tuhost zadána		$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
Nosník, minimální hotnost, pevnost zadána		$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$
Nosník, minimální náklady, tuhost zadána		$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
Nosník, minimální náklady, pevnost zadána		$\frac{\sigma_y^{2/3}}{C_m \rho}$
Pružina, minimální hmotnost pro danou energii		$\frac{E \rho}{\sigma_y^2}$
Tepelná izolace, minimální náklady, zadaný tepelný tok		$\frac{1}{\lambda C_p \rho}$
Elektromagnet, maximální pole, dáno růst teploty		$\frac{C_p \rho}{\rho_e}$

#### 4.2 Více násobné omezení a konfliktní cíle

Výběr materiálu, stejně jako v životě, provází řada kompromisů. Konfliktní omezení lze vyjádřit jako: musím zaplatit dva účty, ale peníze mám jen na jeden, tedy zaplatím ten naléhavější. V případě kompromisu – řešení dvou konfliktních cílů to tak jednoduché není. Například chci být bohatý a chci být šťastný. Vyvážit tyto dva cíle nebude vůbec jednoduché už jen kvůli tomu, že peníze a štěstí nemají stejné jednotky.

Výběru materiálu musí často splňovat mnoho různých a často protichůdných omezení. Jak postupovat v případě jedno cíle již víme, ale co dělat v okamžiku kdy máme více cílů či omezení? Je přirozené, že výběr materiálu, který nejlépe splňuje jeden cíl obvykle nebude současně plnit cíle další. Příkladem je konstrukce křídla letadla. Konstruktor musí volit materiál, který je lehký a současně levný. Nicméně zde nastává konflikt. Materiály, které jsou lehké, nebývají obvykle levné.

K řešení konfliktu existuje řada rychlých ale subjektivních metod, které k práci s více násobnými omezeními a konfliktními cíli využívají fuzzy logiku. Sice je to poměrně dobrý způsob, jak se dobrat výsledku, nicméně pořád je nutné si uvědomovat podíl osobního úsudku. Právě subjektivní povaha těchto metod musí být eliminována. Proto se zaměříme na metody aktivních vazeb k řešení více násobných omezení (kapitola 4.2.1) a metody spojení konfliktních cílů do jedné trestné „penalty“ funkce (kapitola 4.2.2). Obrázek číslo 26 definuje strategii k řešení výběru materiálu s více omezeními a konfliktními cíli.



Obrázek 26 [27]

#### 4.2.1 Výběr s více násobným omezením

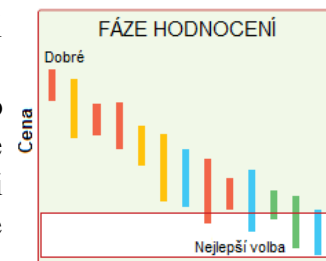
Obecně lze konstatovat, že problémy spojené s výběrem materiálu jsou zapříčeny nadměrným omezením v porovnání s volnými proměnnými. Jen pro zopakování při výběru materiálu zjišťujeme omezení a cíle na základě konstrukčních požadavků a postupujeme podle následujících kroků:

- Prověření kandidátů pomocí každého omezení
- Hodnocení, kdy sledujeme, jak dobře kandidáti plní cíl (často je cíl hmotnosti či cena), nebo hodnotíme skrze materiálový index
- Vyhledání dokumentace pro „finalisty“ výběru, obvykle tři až čtyři materiály

První dva kroky jsou zobrazeny na obrázcích 27 a 28, toto hodnocení se nazývá „centrální metodika“. Kdy levá část definuje omezení, které je nutné dodržet jako je minimální modul pružnosti nebo určitý způsob zpracování materiálu. Naopak vpravo je hodnocení přeživších kandidátů formou sloupcového grafu. Navíc je krásně viditelné jejich seřazení – vše velice jednoduché.

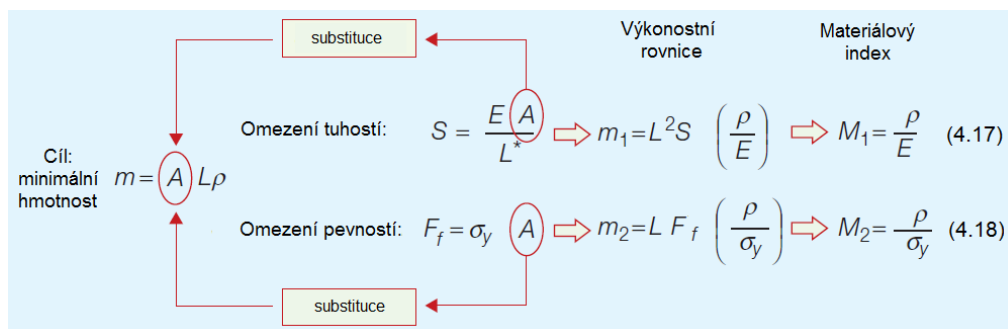
FÁZE PROVĚŘOVÁNÍ		
Youngův modul	> 100	GPa
Pevnost v tahu	> 250	MPa
Tepelná vodivost	> 80	W/m.K
Max. provozní teplota	> 300	°C
Odolnost proti korozi	Dobrá	
Vhodné k odlévání	Ano	

Obrázek 27 [28]



Obrázek 28 [28]

Nicméně i zde jsou komplikace. A to právě v případě, kdy máme jediný cíl, který je omezen více než jedním požadavkem. Příkladem mohou být požadavky na tyč s minimální hmotností, kde omezení představují tuhost i pevnost. Takto definované omezení vede ke dvou nezávislým rovnicím pro hmotnost. Tato situace je popsána na obrázku číslo 29.



Obrázek 29 [28]

Je-li dominantní omezení tuhost, pak hmotnost tyče je vyjádřena jako  $m_1$ , je-li dominantní omezení pevnost tyče, pak hmotnost bude vyjádřena jako  $m_2$ . Pokud tyč musí splňovat obě omezení, pak její hmotnost musí být větší než  $m_1$  a  $m_2$ . Tato závislost je vyjádřena jako:

$$\tilde{m} = \max(m_1, m_2) \quad (4.19)$$

Čili hledáme materiál, který poskytuje nejmenší hodnotu  $\tilde{m}$ . Toto je vyjádření „min – max“ problému, které se často vyskytuje ve světě optimalizace. Závěrem hledáme nejmenší hodnotu (min) ukazatele (v předchozím příkladu hmotnost), která je větší (max) než dvě a více alternativ.

#### 4.2.1.1 Analytická metoda

Existují silné metody k řešení problémů týkající se hledání minima nebo maxima nějaké hodnoty. V předchozím případě byl ukazatel hodnoty hmotnost, což prezentuje spojitou funkci řídicích proměnných. Na obrázku číslo 29 zobrazeno vpravo. Dále se zde vyskytuje jako další řídicí proměnná materiál. A jelikož uvažujeme celé skupiny různých materiálů s různými unikátními vlastnostmi, stává se tento problém izolovaný – ne kontinuální. Tedy jedním ze způsobů, jak tento problém řešit, je vyhodnotit členy  $m_1$  a  $m_2$  zvlášť – izolovaně. Přiřadíme maximum hodnot členům  $m_1$  a  $m_2$  a hledáme minimum. Pro ilustraci zde je příklad:

**Vícenásobné omezení - analytická metoda**

Hledáme materiál pro lehkou tyč, kdy máme zadanou délku  $L$ , tuhost  $S$  a zatěžující sílu  $F_t$  s hodnotami:

**Odpověď**  $L = 1\text{ m}$   $S = 3 \times 10^7\text{ N/m}$   $F_t = 10^6\text{ N}$

Nahrazení těchto hodnot a materiálových vlastností v tabulce do rovnic (4.17) a (4.18) z obrázku 29 dostaneme hodnoty pro  $m_1$  a  $m_2$  zobrazeny níže. Poslední sloupec zobrazuje  $\tilde{m}$  vypočítané z rovnice (4.19). Pro tyto konstrukční požadavky nejlépe odpovídá Ti-6-4. Tento materiál umožňuje lehkou tyč s uspokojením obou omezení

Výběr materiálu pro lehkou, tuhou s pevnou tyč						
Material	$\rho\text{ Kg/m}^3$	$E\text{ GPa}$	$\sigma_y\text{ MPa}$	$m_1\text{ kg}$	$m_2\text{ kg}$	$\tilde{m}\text{ kg}$
1020 Steel	7,850	200	320	1.12	2.45	2.45
6061 Al	2,700	70	120	1.16	2.25	2.25
Ti-6-4	4,400	115	950	1.15	0.46	1.15

Pokud změníme omezení

$L = 3\text{ m}$   $S = 10^8\text{ N/m}$   $F_t = 3 \times 10^6\text{ N}$

Po přepočítání zjistíme, že nejlepší volbou je nyní materiál 1020 steel.

Obrázek 30 [29]

V okamžiku kdy máme výběr 3000 materiálů je možné použít jednoduché počítačové kódy, které nám mohou materiály třídit a hodnotit. Avšak v této numerické metodě postrádáme vizualizaci a podmět k tvůrčímu myšlení.

#### 4.2.1.2 Grafická metoda

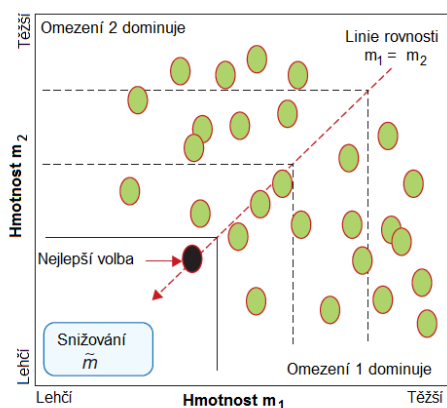
Řekněme, že skupinu materiálů zaneseme do grafu tak, že proti sobě postavíme  $m_1$  a  $m_2$ . Obrázek číslo 31. Každá bublina představuje jeden materiál, neboť všechny proměnné v rovnicích (4.17) a (4.18) jsou kromě materiálu známé. Pokud chceme materiál s nejnižší hmotností, pak logicky hledaný materiál leží v levém dolním rohu. Ale kde přesně? Musíme rozhodnout kdy je důležitá tuhost více než pevnost a kdy je tomu naopak. Grafické vyjádření

rovnosti  $m_1 = m_2$  rozděluje graf do dvou oblastí, v nichž v každé dominuje jeden atribut. Pak platí že v jedné oblasti je dominantní tuhost kdy  $m_1 > m_2$  a ve druhé oblasti převládá pevnost  $m_1 < m_2$ . V oblasti „1“ hledáme nejmenší hodnotu  $m_1$ , to samé uděláme v oblasti „2“, čímž dojde k vytvoření jakési hranice, jejíž roh leží na spojenci  $m_1 = m_2$ . Nejlepší materiál je ležící pod touto definovanou hranicí a pokud možno ležící co nejvíce v levém dolním rohu.

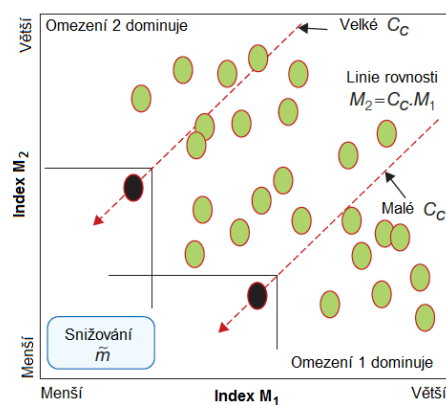
Předchozí odstavec vysvětluje hlavní myšlenku, přesto existuje lepší způsob, jak ji realizovat. Osy na obrázku vlevo představují hmotnosti  $m_1$  a  $m_2$ . V tomto grafu jsou vyjádřeny jednotlivé hodnoty  $L, S$  a  $F_f$ , pokud je změněno potřebuje nový graf. Na obrázku vpravo osy vyjadřují materiálový index  $M_1 = \frac{\rho}{E}$ , respektive  $M_2 = \frac{\rho}{\sigma_y}$ . V tomto případě každá bublina v grafu vpravo stále představuje materiál, ale nyní její poloha závisí pouze na materiálových vlastnostech, nikoliv na hodnotách  $L, S$  a  $F_f$ . Podmínka  $m_1 = m_2$  je nahrazena substitucí z rovnic (4.17) a (4.18) a je vyjádřena vztahem:

$$M_2 = \left( \frac{L \cdot S}{F_f} \right) \cdot M_1 \quad (4.20)$$

Tato rovnice popisuje polohu spojovací linky (sklon 1), jejíž pozice závisí na hodnotách  $L, S$  a  $F_f$ . Tyto hodnoty jsou vyjádřeny vazební konstantou  $C_c$ . Postup výběru je totožný s předchozím případem, ale graf nyní pokrývá všechny hodnoty  $L, S$  a  $F_f$ . Pokud se změní některý parametr, pouze přesuneme spojovací linku, která ovlivňuje výběr.



Obrázek 31 [30]



Obrázek 32 [30]

#### 4.2.2 Konfliktní cíle

Skutečný svět je plný kompromisů a s výběrem materiálu to není jinak. Téměř vždy se bude konstruktér potýkat s konfliktními cíli, které vedou ke konání určitých kompromisů. Tyto tři se objevují prakticky vždy:

- **Minimální hmotnost** – tento cíl je především společný pro konstrukční návrhy, které se budou pohybovat, přemísťovat či oscilovat
- **Minimální objem** – tento cíl je výsledkem snahy o používání co nejméně materiálu, ale i snahou konstrukčních řešení zabírat co nejméně prostoru, neboť v dnešní době se stává prostor čím dál více drahocennější
- **Minimální cena** – tento cíl ani nemá smysl více rozvádět, cena je vždy na prvním místě konstrukčního návrhu, cílem nových výrobků je ziskovost, čehož dosáhneme snížením nákladů, ať už na materiál či výrobní proces



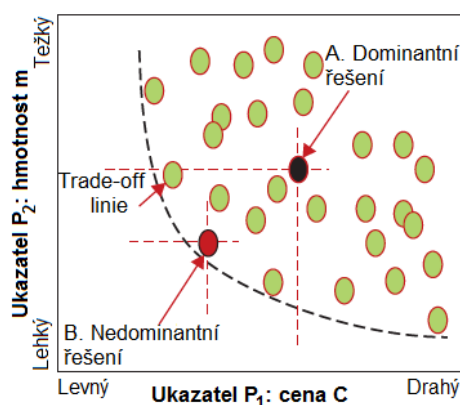
V dnešní době 21. století je nezbytné přidat ještě jeden konfliktní cíl, který by měl být uvažován:

- Minimální dopad na životní prostředí – tato minimalizace materiálů, výrobních procesů, ale i celých výrobků už není druhořadá a cílem každého konstruktéra by mělo být snižování všech dopadů na životní prostředí

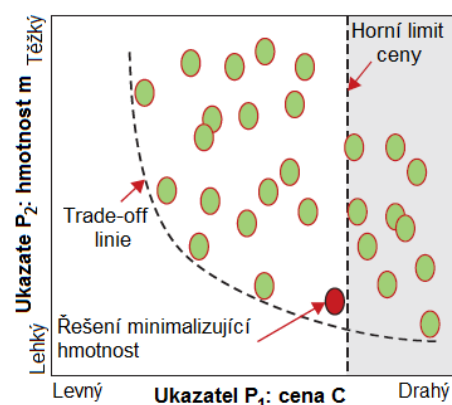
Výše popsané čtyři cíle jsou definované ukazatelem výkonu  $P_i$ . Během konstrukčního návrhu se obvykle vyskytují alespoň dva z nich. Ke konfliktu dochází v okamžiku volby materiálu pro jeden cíl a dá se očekávat, že tato volba už nebude optimalizovat cíle další. V tomto okamžiku dochází ke kompromisu. Tento kompromis by neměl optimalizovat žádný cíl, ale měl by tlačit všechny cíle blízko k ideálu tak, jak to jen jejich vzájemná závislost dovoluje. A teď k popisu hlavního problému: Jak můžeme porovnávat hmotnost s cenou, anebo s dopadem na životní prostředí? Navíc když každý cíl je v jiných jednotkách. K tomu složí níže popsané strategie.

#### 4.2.2.1 Strategie Trade-off

Tuto strategii si představíme na příkladu, kdy zvažujeme materiál s minimálními náklady – ukazatel  $P_1$  a nízkou hmotností – ukazatel  $P_2$ . Zároveň materiál musí plnit omezení jako jsou maximální provozní teplota a odolnost proti korozi. Pokud bychom použili standardní optimalizační teorii, pak výsledné řešení definuje materiál jako životaschopný, plnící všechna omezení, ale nemusí být optimální pro všechny cíle. Obrázek číslo 33 demonstruje alternativní řešení, kdy osy reprezentují hledané cíle  $P_1$  a  $P_2$  a každá bublina popisuje jeden z nich. Z obrázku je také patrné, že řešení, která optimalizují cíl  $P_1$  zmenšují cíl  $P_2$ . Naopak to samozřejmě platí také. Některá řešení, jako například bublina A není zdaleka optimální. Všechna řešení pod oblastí, která vznikla vymezení hranicí z bubliny A mají nižší a tím pádem lepší hodnoty  $P_1$  a  $P_2$ . Bublina A nám říká, že je ovládaná jinými řešeními. Naopak bublina B je charakteristická tím, že jí již neexistuje lepší řešení. Linka tohoto ideálního řešení se nazývá „trade off“ optimální linie.



Obrázek 33 [31]



Obrázek 34 [31]

Obrázek číslo 34 vpravo vyjadřuje alternativní „trade off“ strategie pro výběr materiálu. Princip spočívá v transformaci jednoho konfliktního cíle na omezení. V tomto případě je omezení vyjádřeno jako horní hranice nákladů, čímž dojde k minimalizace ostatních řešení.

Každopádně tato alternativní strategie se nechová jako opravdová optimalizace, ale spíše je to usnadnění konstruktérovo práce, což lze chápat jako určitý podvod. Abychom dosáhli správné optimalizace výběru je nutné použít metodu penalty. Více v následující kapitole.

#### 4.2.2.2 Penalty funkce

Pomocí předchozí strategie jsme schopni nalézt podmnožinu materiálů, které odpovídají nejlepšímu kompromisu mezi cíli. Ovšem my chceme vybrat pouze jeden materiál. Jedním ze způsobů je definovat různé cíle jedinou funkcí, jejíž minimum bude vyjadřovat ideální řešení. K tomu slouží lokálně lineární penalty funkce  $Z$ :

$$Z = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 \dots \quad (4.21)$$

Nejlepší volbou je pak materiál s nejmenší hodnotou  $Z$ . Hodnoty  $\alpha_i$  se nazývají konstanty výměny nebo také směnné konstanty a slouží k převodu výkonnostních jednotek na jednotky  $Z$ . Obvykle jsou definovány jako měna (Kč, \$, €). Směnné konstanty jsou definovány jako:

$$\alpha_i = \left( \frac{\partial Z}{\partial P_i} \right)_{P_i, j \neq i} \quad (4.22)$$

Směnné konstanty měří penalty přírůstek daného ukazatele výkonu. Všechny ostatní ukazatelé jsou konstantní. Tedy pokud je ukazatel výkonu  $P_2$  hmotnost  $m$ , pak  $\alpha_2$  je změna v  $Z$  asociována jako nárůst jednotky v  $m$ .

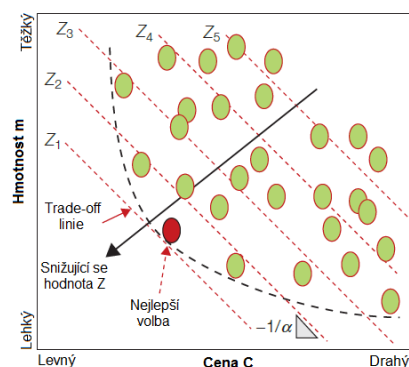
Často jeden z cílů, který má být minimalizován je cena  $C$ , to znamená že  $P_1 = C$ . Na základě toho měříme  $Z$  v měnových jednotkách. Touto volbou směnné jednotky dostává i jednotky  $Z$ . Výsledkem je pak  $\alpha_1 = 1$  a rovnice (4.21) změni tvar na:

$$Z = C + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 \dots \quad (4.23)$$

S ohledem na předchozí příklad, kde  $P_1 = \text{cena}$  a  $P_2 = \text{hmotnost}$ , pak platí že:

$$Z = C + \alpha m \quad \text{nebo} \quad m = -\frac{1}{\alpha} C + \frac{1}{\alpha} Z \quad (4.24)$$

$\alpha$  je změna v  $Z$  spojená s nárůstem jednotky v  $m$ . Rovnice (4.24) definuje lineární vztah mezi ukazateli  $m$  a  $C$ . Na základě toho dostaneme graf, kde jsou množiny paralelních „penalty“ linek, tak jak znázorňuje obrázek vlevo. Sklon těchto linek určuje převrácená hodnota směnné konstanty  $-\frac{1}{\alpha}$ . Optimální řešení nalezneme v bodě, který leží nejbližší místu, kde je „penalty“ linka tečná na „trade off“ optimální linii. Vzhledem k tomu, že budeme ještě hledat dokumentaci pro kandidáty, je v tuto chvíli vhodné zvolit podmnožinu řešení nejbližše dotykového bodu namísto výběru jediného materiálu.



Obrázek 35 [32]

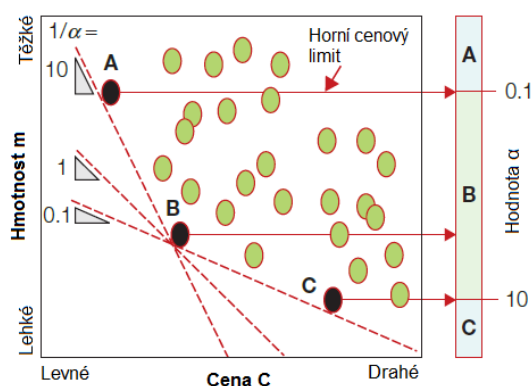
#### 4.2.2.3 Hodnoty konstant výměny $\alpha$

Konstanta výměny neboli také směnná konstanta je hodnota (užitečnost) snížení ukazatele výkonosti. Hodnota a značení závisí na oboru aplikování. Příkladem může být užitečnost úspory hmotnosti, která bude například u osobního automobilu malá, ale naopak v leteckém průmyslu mnohem větší. Hodnota čili užitečnost může být skutečná, což znamená, že je měřitelná a poskytuje reálnou úsporu nákladů. Někdy se ale může stát, že spotřebitel ovlivněný řadou aspektů, jako jsou reklamy či móda zaplatí více nebo méně, než je skutečná hodnota.

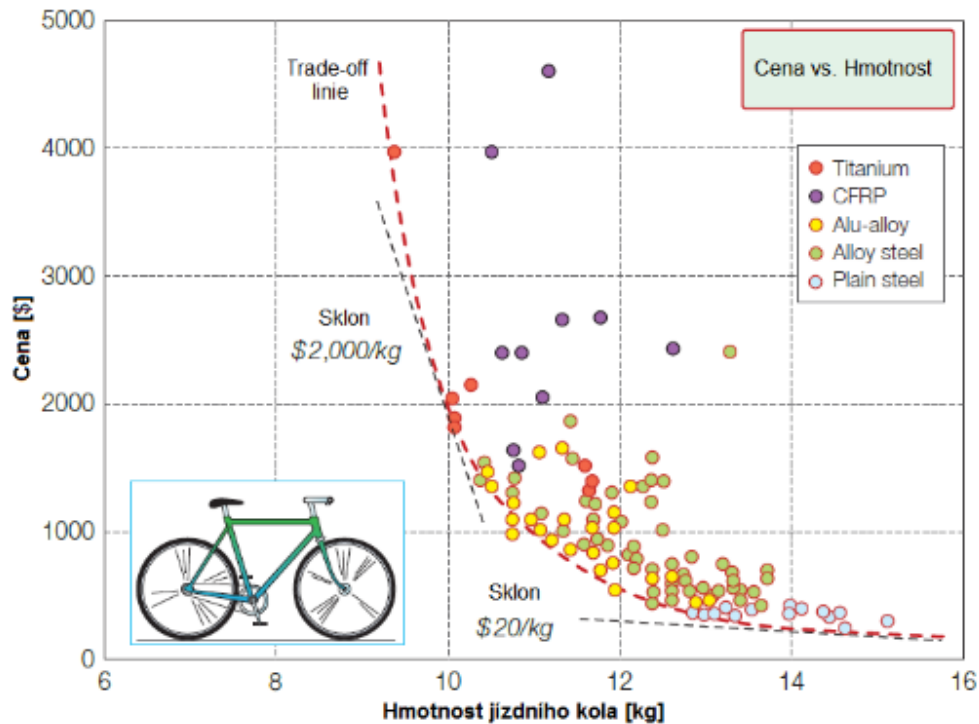
V strojních oborech bývají tyto směnné konstanty odvozeny z technických modelů pro celoživotní náklady systému. Tedy užitečnost úspory hmotnosti v dopravních systémech je odvozena z úspory paliva, či zvýšení užitečného zatížení hodnoceno po celou životnost systému. Pro představu tabulka 11 udává přibližné hodnoty směnné konstanty u dopravních prostředků. Za povšimnutí určitě stojí obrovský rozsah konstanty odvíjející se od konkrétní aplikace, kde se materiál bude používat. Právě náklady stojí v cestě většímu využívání hliníkových slitin v automobilovém průmyslu, ačkoliv v leteckém průmyslu se využívá běžně. Stejně tomu je i v případě využívání slitin titanu spíše ve vojenských letadlech než v civilních.

Tabulka 11 Směnná konstanta $\alpha$ u dopravních systémů		
Dopravní systém:	Odhad na základě:	Směnná konstanta $\alpha$ [\$/kg]
Osobní automobil	Úspora paliva	1 ~ 2
Nákladní automobil	Užitečné zatížení	5 ~ 20
Civilní letadlo	Užitečné zatížení	100 ~ 500
Vojenské letadlo	Užitečné zatížení	500 ~ 1000
Raketoplán	Užitečné zatížení	3 000 ~ 10 000

Existuje řada způsobů, jak směnou konstantu odhadnout. Například náklady na vyzvednutí nákladu do vesmíru leží v rozmezí 3 000 až 10 000 \$/kg. Snížení hmotnosti nosného zařízení by umožnilo adekvátní navýšení hmotnosti nákladu. Podobné argumenty založené na zvýšení užitečné nosnosti, anebo snížení spotřeby paliva udávají hodnotu  $\alpha$  pro další typy dopravního systému (viz. tabulka 11). Tyto hodnoty jsou časově proměnné, neboť reflektují náklady na palivo, legislativní změny a podobně. Vzhledem k tomu, že tyto konstanty jsou založeny na technických aspektech, není problém s jejich odhadem. Naopak tomu je v případě odhadu konstanty, která vychází z lidského vnímání. Příkladem budiž obrázek číslo 37, který odráží poměr cena / hmotnost u jízdního kola. Z hlediska lidského vnímání bude pro závodního jezdce či nadšence lehčí kolo lepší.



Obrázek 36 [34]



Obrázek 37 [33]

Obrázek číslo 37 odpovídá hodnocení materiálů používaných při výrobě jízdních kol. Jedná se o „trade off“ graf závislosti hmotnosti na ceně. Data vycházejí z cyklistických magazínů. „Trade off“ optimální linie poskytuje v každém bodě hodnotu směnné konstanty v rozsahu 20~2 000 \$/kg. Otázka zní, jestli má smysl pro obyčejného cyklistu zaplatit \$2 000, aby snížil hmotnost o 1 kg? Když může dietou snížit 1 kg vlastní váhy a tím i celého systému (cyklista + jízdní kolo), aniž by ho to stálo jediný dolar. Možná. Ale většinou se jedná o vnímání dané hodnoty. Jedním z cílů reklamy je zvýšit vnímanou hodnotu výrobku a tím zvýšit jeho hodnotu, ale zároveň bez zvyšování nákladů.

K uzavření okruhu směnných konstant se podíváme na obrázek číslo 36, který graficky znázorňuje, jak dokáží tyto směnné konstanty ovlivnit výběr materiálu. Pro jednoduchost jsou řešení rozmístěna v grafu tak, že jen tři jsou potenciálně vhodná. Pro  $\alpha \leq 0.1$  je optimální řešení A. Dále nejlepší řešení B platí pro  $0.1 < \alpha < 10$  a pro  $\alpha \geq 10$  je nejlepší řešení C. Tato informace je zobrazena na obrázku vpravo, kde je zachycen rozsah hodnot  $\alpha$  rozdělených do bodů, kdy dochází k změně optimální hodnoty a zároveň ke změně optimálního řešení.

### 4.3 Zhodnocení současného materiálu – DX51D-Z140MAC

Fan Motor Stand se v současné době vyrábí z materiálu DX51D-Z140MAC. Jedná se o plech, který je pozinkovaný v tavenině. Značení dle normy je ČSN EN 10143. Ve stručnosti vysvětlím, co jednotlivá písmena a číslice znamenají a také tento materiál bude sloužit jako výchozí bod pro hledání materiálu alternativního. To znamená, že hledaný materiál musí plnit veškeré základní požadavky a mechanické vlastnosti jako materiál výchozí, není-li předepsáno jinak.

#### DX51D – Z140MAC

- D → ploché výrobky k tváření za studena
- X → způsob válcování není předepsán (záleží na výrobcí)
- 51 → mechanické vlastnosti
- D → žárové pokování ponorem
- Z → zinkový povlak, obsah zinku alespoň 99%
- 140 → zinková vrstva [ $\text{g/m}^3$ ]
- M → provedení povlaku – malý zinkový květ
- A → kvalita povrchu – standartní
- C → ochrana povlaku – chemická pasivace

V tabulce 12 jsou zobrazeny základní vlastnosti materiálu DX51D – Z140MAC:

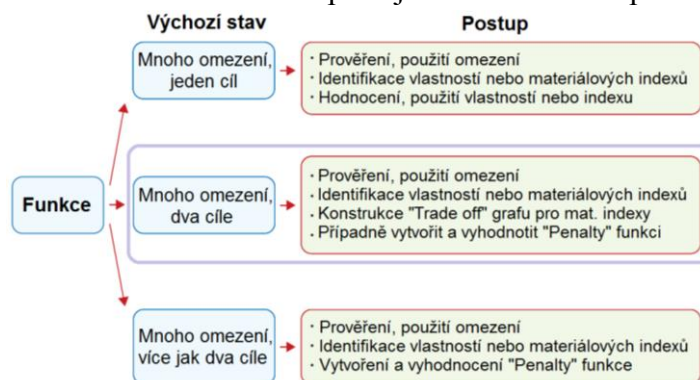
Tabulka 12	Základní vlastnosti materiálu	
Základní vlastnosti		
Hustota	7 830 ~ 7 900	kg/m <sup>3</sup>
Cena	11.1 ~ 12.1	Kč/kg
Mechanické vlastnosti		
Youngův modul	205 ~ 215	GPa
Mez kluzu	172 ~ 315	MPa
Mez pevnosti	310 ~ 430	MPa
Tepelné vlastnosti		
Min. provozní teplota	-43	°C
Max. provozní teplota	344	°C
Odolnost		
Čistá voda	Přijatelné použití	
Slaná voda	Limitní použití	
Slabé zásady	Přijatelná použití	
Slabé kyseliny	Limitní použití	

Porovnání materiálu DX51D-Z140MAC a alternativního materiálu bude uvedeno na konci následující kapitoly.

## 4.4 Strategie výběru – FMS

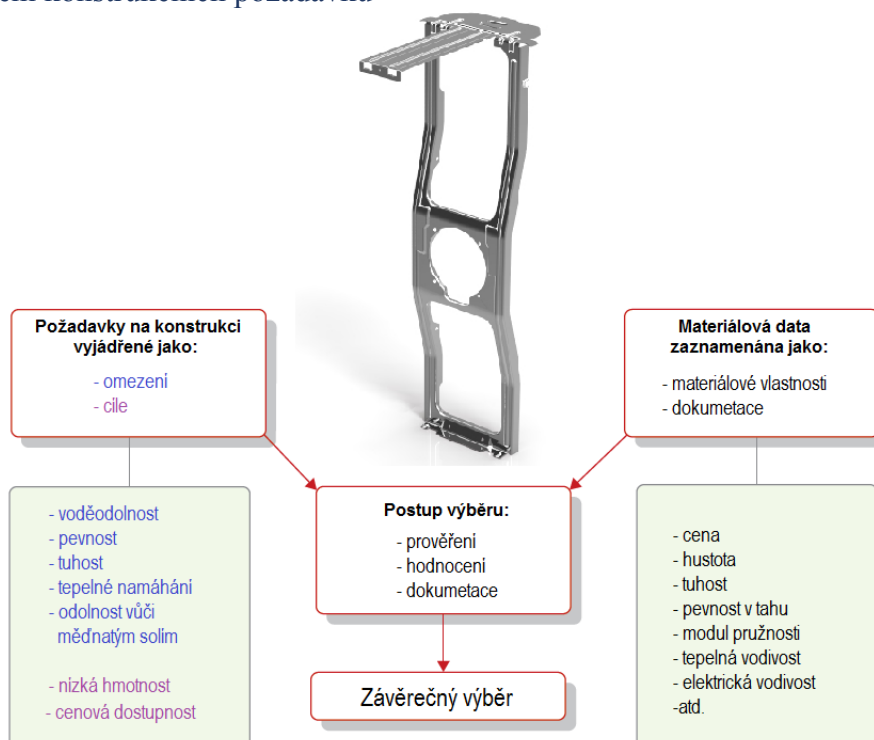
Při výběru materiálu pro Fan Motor Stand budeme postupovat dle jednotlivých kroků, které byly zmíněny výše. Na základě prvního kroku – převedení konstrukčních požadavků, víme, že jsme stanovili mnoho omezení a dva cíle. Tento stav poskytuje náповědu ohledně postupu. Budeme se řídit postupem znázorněným ve fialovém rámečku. Druhý krok (prověření) selektuje materiály pomocí softwaru CES Edupack, kdy filtrujeme materiály na základě stanovených omezení. Během třetího kroku (hodnocení) vytvoříme „trade off“ graf na základě cílů, tedy minimální hmotnost a minimální hmotnost. Výsledný materiál bude dán „penalty“ funkcí. V posledním kroku (dokumentace) dohledáme podrobné informace a na jejich základě bude vybrán jeden finální materiál.

★ Postup hledání materiálu v sw CES Edupack je možné nalézt v příloze 9.5.



Obrázek 38 [27]

### 4.4.1 Převedení konstrukčních požadavků



Obrázek 39 [24]

Tabulka 13	Konstrukční požadavky pro FMS
Funkce	Držák motoru
Omezení	Rozměry jsou dány (geometrické omezení) Minimální pevnost, Minimální tuhost Tepelné namáhání, Odolnost proti korozi (funkční omezení)
Cíl	Minimální hmotnost $m$ Minimální náklady $C$
Volné proměnné	Výběr materiálu Tloušťka

#### 4.4.2 Prověření konstrukčních materiálů

Jak již bylo zmíněno, současný materiál bude sloužit jako výchozí bod pro hledání materiálu alternativního. Tedy minimální hodnoty, které je nutné dodržet jsou zobrazeny na obrázku číslo 40. Na začátku tohoto kroku vybíráme z 3 905 materiálů a na základě stanovených omezení došlo k zúžení výběru na 800 kandidátů. Tyto materiály budou podrobeny dalšímu zkoumání v následujícím kroku, a to aplikování mnou stanovených cílů.

FÁZE PROVĚŘOVÁNÍ	
Youngův modul	> 205 GPa
Mez pevnosti	> 310 MPa
Mez kluzu	> 172 MPa
Min. provozní teplota	< -20 °C
Max. provozní teplota	> 50 °C
Odolnost-čistá voda	Přijatelné
Odolnost-slaná voda	Limitní
Odolnost-zásady	Přijatelné
Odolnost-kyseliny	Limitní

Obrázek 40 [28]

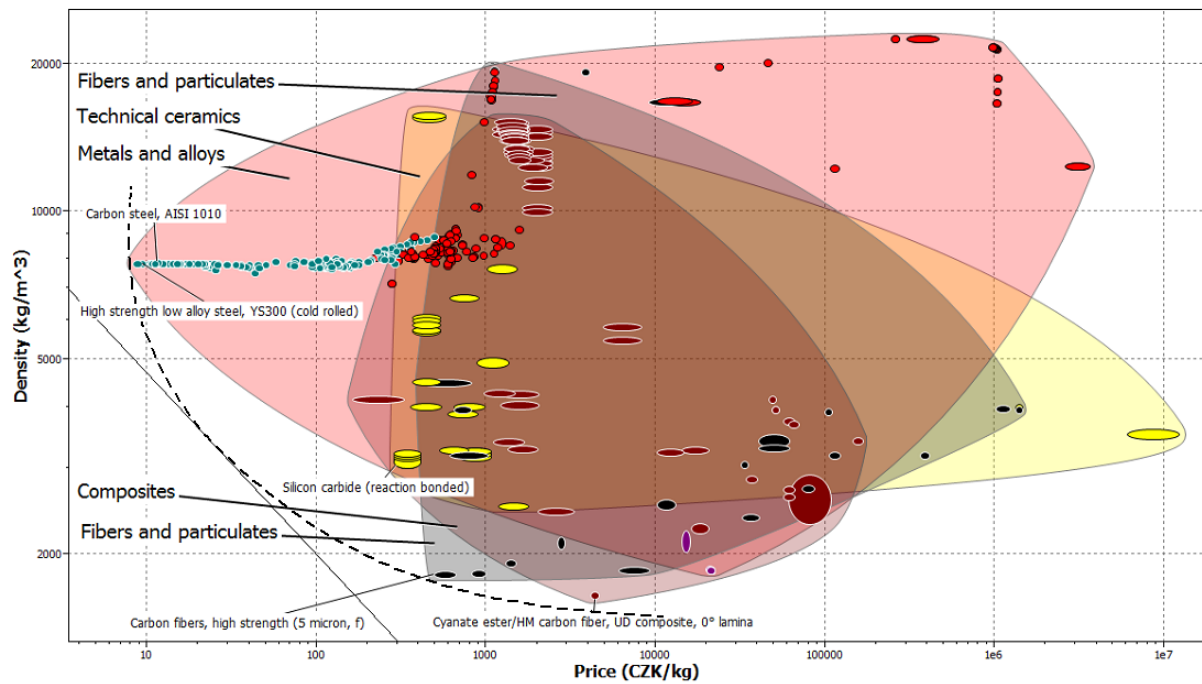
#### 4.4.3 Hodnocení konstrukčních materiálů

V tomto kroku je nutné vybrat materiál, maximálně ale tři materiály, které nejlépe plní naše cíle. Na základě předchozích kroků víme, že hlavní dva cíle jsou nízká cena a nízká hmotnost. Abychom byli schopni určit materiál, který nejlépe plní naše cíle, použijeme „penalty“ funkci, tak jak nás k tomu nabádá postup zobrazený na obrázku číslo 38. „Penalty“ funkce je vyjádřena na základě přechodního vysvětlení vztahem:

$$Z = C + \alpha m$$

Na základě toho hledáme hodnotu směnné konstanty  $\alpha$ . Položil jsem si otázku: Co ovlivňuje úspora hmotnosti? Jelikož se veškeré jednotky vyrobené v naší továrně přepravují do centrálního skladu v Belgii, pak to budou náklady na přepravu. Pro získání této částky jsem využil veřejně dostupných zdrojů společnosti DHL, jelikož cena přepravy naší společnosti není zcela veřejná věc. Tedy jak jsem se dopracoval ke směnné konstantě. Zabalená venkovní klimatizační jednotka váží 61 kg. Dle ceníku DHL (viz. příloha 10.5.1) je cena za přepravu každého dalšího kilogramu nad 35 kilogramů do zóny 2 (Belgie) 29Kč. To znamená, že úspora 1 kilogramu na materiálu ušetříme 29Kč.

Vzhledem k tomu, že hmotnost celého FMS je v současnosti 1 kg, rozdělíme si to na úsporu 100g. Závěrem hodnota směnné konstanty je  $\alpha = 2.9$ . Převrácenou hodnotou dostaneme sklon linky směnné konstanty, jejíž hodnota je  $-1/\alpha = -0.35$ . Výsledkem jsou tři kandidáti, které je nutné podrobit důkladnému zkoumání.



Graf 11

Na grafu č.11 je zobrazena „trade-off“ linie a na ní tečná linka jejíž sklon definuje směnná konstanta  $\alpha$ . Materiál nejbližší bodu dotyku je materiálem nejvhodnějším. Ale jak již víme, pro závěrečné posouzení je lepší brát v potaz více materiálů. Volíme tři. Pro zajímavost na grafu je také vynesena materiál současný, který má v softwaru název „Carbon steel AISI 1010“.

#### 4.4.4 Dokumentace

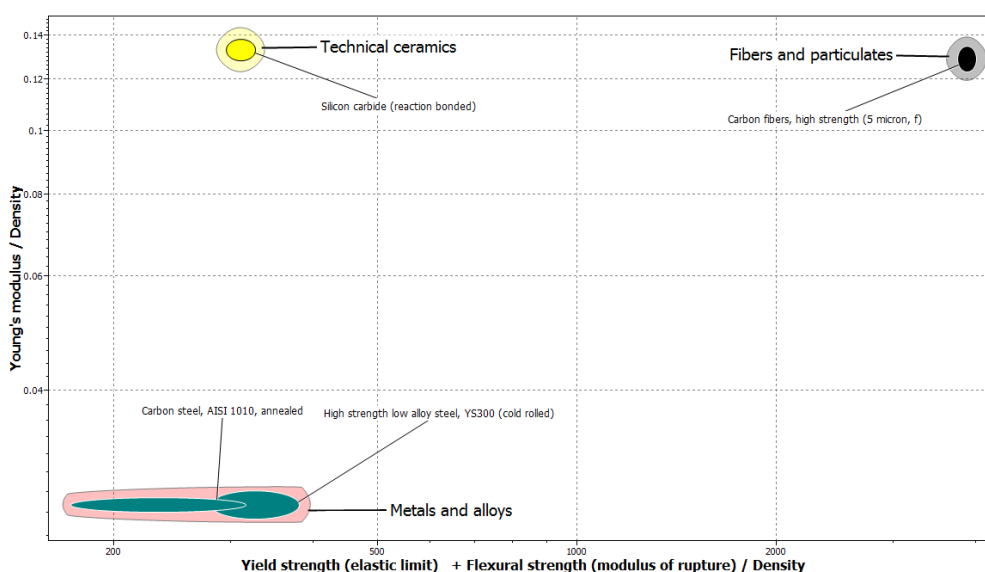
- HC300LA – ocel s vyšší mezí kluzu válcovaná za studena k tváření za studena
- Karbid křemíku
- Uhlíková vlákna (HS fiber)

Z těchto tří materiálů mě nejvíce zaujal karbid křemíku. Zejména z důvodu pro použití i za mnohem nižších teplot. Materiál HC300LA se příliš neliší od materiálu současného. Naopak materiál HS fiber je až příliš „výkonný“ pro použití v naší aplikaci.



Tabulka 14 Základní vlastnosti materiálu				
	HC300LA	Karbid křemíku	HS fiber	Jednotky
Základní vlastnosti				
Hustota	7 800 ~ 7 900	3 000 ~ 3 170	1800 ~ 1840	kg/m <sup>3</sup>
Cena	8.31 ~ 9.3	287 ~ 410	496 ~ 665	kč/kg
Mechanické vlastnosti				
Youngův modul	200 ~ 221	400 ~ 420	225 ~ 245	GPa
Mez kluzu	280 ~ 380	295 ~ 326	3 750 ~ 4 000	MPa
Mez pevnosti	370 ~ 480	295 ~ 326	4 500 ~ 4 800	MPa
Tepelné vlastnosti				
Min. provozní teplota	-35	-273	-273	°C
Max. provozní teplota	502	1 430	580	°C
Odolnost				
Čistá voda	Příjatelné použití	Výborná	Výborná	
Slaná voda	Limitní použití	Výborná	Výborná	
Slabé zásady	Příjatelné použití	Výborná	Výborná	
Slabé kyseliny	Limitní použití	Výborná	Výborná	

K finálnímu výběru materiálu využijeme graf vyjadřující závislost specifická tuhost – specifická pevnost. Jen pro zopakování, tento graf slouží k porovnání výkonosti z hlediska pevnosti, tuhosti a to vše při nízké hmotnosti.



Graf 12

Z grafu č.12 je jasně patrné, že nejvyšší mechanickou účinnost (*kapitola 2.3.2.4*) má materiál tvořený uhlíkovými vlákny o vysoké pevnosti. Ovšem jak již bylo zmíněno vzhledem k vysoké hodnotě ceny nebude (viz. tabulka číslo 14) tento materiál dále uvažován. V levém dolním rohu je materiál HC300LA a také současný materiál zde reprezentován jako AISI 1010. Tyto materiály jsou v tomto srovnání jasně nejhorší.

Závěrem novým alternativním materiálem je karbid křemíku SiC.

## 4.5 Alternativní strategie výběru materiálu pro FMS

Předchozí výběr materiálu byl založen na předpokladu nalezení alternativy pro stávající materiál. To znamená, že všechna omezení vycházela z hodnot stávajícího materiálu. Nicméně bych chtěl v této podkapitole hledat materiál pro FMS na základě myšlenky maximálně snížit vibrace, dále aplikovat materiálové indexy a na závěr porovnat rozdíly mezi materiálem výchozím, materiálem zvoleným pomocí softwaru CES Edupak a materiálem nalezeným v této podkapitole.



Obrázek 41 [27]

Hlavní myšlenkou tohoto alternativního výběru je nalezení materiálu, který bude svojí tuhostí odpovídat snížení vibrační venkovní klimatizační jednotky. Samozřejmě cena materiálu zůstane jako důležitý zohledňovaný atribut – není potřeba použít materiál pro vesmírný průmysl. Otázkou k zamyšlení zůstane pro každého čtenáře této diplomové práce, jestli by byl ochoten si za klimatizační jednotku připlatit kvůli nízké hladině vibrací. Tuto otázku nechám z mé strany nezodpověděnou. Úsudek je na každém z vás.

### 4.5.1 Převedení konstrukčních požadavků

Konstrukční požadavky zůstávají stejné. V tomto ohledu není potřeba je nijak měnit. Dále budeme postupovat podle následující tabulky:

Tabulka 15 Převedení konstrukčních požadavků	
Číslo kroku	Činnost
I.	Definice konstrukčních požadavků: Funkce, Omezení, Cíle a Volné proměnné
II.	Seznam omezení a definování jejich rovnic
III.	Definice objektivní funkce
IV.	Definice volné proměnné pro objektivní funkci
V.	Substituce volné proměnné z rovnice omezení do objektivní funkce
VI.	Rozdělení proměnných do tří skupin, funkční požadavky F, geometrické G a materiálové vlastnosti M, vyjádřené jako $P \leq f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$
VII.	Stanovení materiálových indexů

- Krok číslo I:

Tabulka 16	Konstrukční požadavky pro FMS
Funkce	Držák motoru
Omezení	Rozměry jsou dány (geometrické omezení) Minimální pevnost, Minimální tuhost Tepelné namáhání, Odolnost proti korozi (funkční omezení)
Cíl	Minimální hmotnost $m$
Volné proměnné	Výběr materiálu Tloušťka $h$

- Krok číslo II:

- Požadovaná tuhost definována jako:  $S = \frac{C_1 \cdot E \cdot I}{L^3}$
- Požadovaná pevnost definována jako:  $F = \frac{C \cdot Z_p \cdot \sigma_y}{L}$

- Krok číslo III:

- Hlavním požadavkem je minimalizace hmotnosti, čili objektivní funkce je vyjádřena jako:  $m = A \cdot L \cdot \rho = b \cdot h \cdot L \cdot \rho$

- Krok číslo IV:

- V tomto případě je volná proměnná tloušťka  $h$ , která bude následně použita pro substituci

- Krok číslo V – Objektivní funkce tuhosti:

- Moment setrvačnosti vyjádřený jako:  $I = \frac{b \cdot h^3}{12}$
- Objektivní funkce je pak dána:  $m_1 = \left(\frac{12 \cdot S}{C_1 \cdot b}\right)^{1/3} \cdot (L^2 \cdot b) \cdot \left(\frac{E^{1/3}}{\rho}\right)$

- Krok číslo V – Objektivní funkce pevnosti:

- Moment setrvačnosti vyjádřený jako:  $Z_p = \frac{b \cdot h^2}{4}$
- Objektivní funkce je pak dána:  $m_2 = \left(\frac{4 \cdot F}{C \cdot b}\right)^{1/2} \cdot (L \cdot b) \cdot \left(\frac{\sigma_e^{1/2}}{\rho}\right)$

- Krok číslo VI:

- Pro tuhost:  $P_1 \leq \left[ \left(\frac{12 \cdot S}{C_1 \cdot b}\right)^{1/3} (F); (L^2 \cdot b)(G); \left(\frac{\rho}{E^{1/3}}\right) (M) \right]$
- Pro pevnost:  $P_2 \leq \left[ \left(\frac{4 \cdot F}{C \cdot b}\right)^{1/2} (F); (L \cdot b)(G); \left(\frac{\rho}{\sigma_e^{1/2}}\right) (M) \right]$

- Krok číslo VII:

- Pro tuhost:  $M_1 = \frac{\rho}{E^{1/3}}$
- Pro pevnost:  $M_2 = \frac{\rho}{\sigma_e^{1/2}}$

#### 4.5.2 Prověření konstrukčních materiálů

Prověření proběhlo pomocí omezení, které vycházejí z funkce FMS. Viz. obrázek číslo 42. Tímto krokem došlo k eliminaci 1 820 nevhodných materiálů. V dalším kroku proběhne hodnocení materiálů, které prošly tímto krokem.

FÁZE PROVĚŘOVÁNÍ	
Min. provozní teplota	< -20 °C
Max. provozní teplota	> 50 °C
Odolnost-čistá voda	Přijatelné
Odolnost-slaná voda	Přijatelné
Odolnost-zásady	Přijatelné
Odolnost-kyseliny	Přijatelné

Obrázek 42 [28]

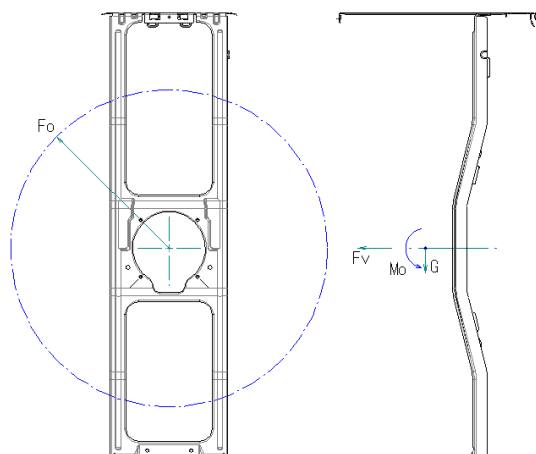
#### 4.5.3 Hodnocení konstrukčních materiálů

Hodnocení provedeme na základě dvou nejdůležitějších vlastností, a to tuhosti a pevnosti. Použijeme k tomu grafickou metodu rozšířenou o vazební konstantu  $C_c$ . Poloha spojovací linky vychází z následující rovnice:

$$M_2 = M_1 \cdot \frac{\left(\frac{12S}{C_1 b}\right)^{1/3}}{\left(\frac{4FL}{Cb}\right)^{1/2}} \cdot L \rightarrow M_2 = M_1 \cdot C_c$$

##### 4.5.3.1 Určení síly

K určení minimální síly použijeme náhrady jednoduchým nosníkem na dvou podporách. Na obrázku číslo 43 jsou znázorněny všechny síly, které na FMS působí.



Obrázek 43

- $F_o$  – odstředivá síla vrtule, zanedbáme, protože lze předpokládat, že proti každé síle bude působit stejně velká síla v opačném směru
- $F_v$  – síla od tahu vrtule, zanedbáme jelikož tato síla bude malá. Případné radiální síly zachytí ložiska v motoru.
- $M_o$  – ohybový moment vyvolaný sestavou motoru s vrtulou díky těžišti mimo FMS. Získáme vynásobením tíhy a těžištěm motoru.
- $G$  – tíha motoru.

V našem případě budeme uvažovat pouze tíhu motoru  $G$ .

Tabulka 17	Specifikované hodnoty
Hmotnost motoru	2.82 [kg]
Gravitační zrychlení	9.81 [m/s <sup>2</sup> ]

$$F = m \cdot g = 27.66 \text{ N}$$

#### 4.5.3.2 Určení tuhosti

K určení minimální požadované tuhosti budeme vycházet ze současných zkušeností a poznatků (i zde se odráží myšlenka, že se zabýváme developmental design), tedy vezmeme jako základ pro porovnávání současným materiál DX51D-Z140MAC. Minimální tuhost spočteme z rovnice:

$$S = \frac{48EI}{L^3} = \frac{48 \cdot E \cdot b \cdot h^2}{12 \cdot L^3}$$

Tabulka 18	Specifikované hodnoty
Modul pružnosti E	205 [GPa]
Šířka b	186 [mm]
Tloušťka h	1 [mm]
Délka L	701.7 [mm]

$$S = \frac{48 \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot 0.186 \cdot 0.001^2}{12 \cdot 0.7017^3} = 441.45 [N \cdot m^{-1}]$$

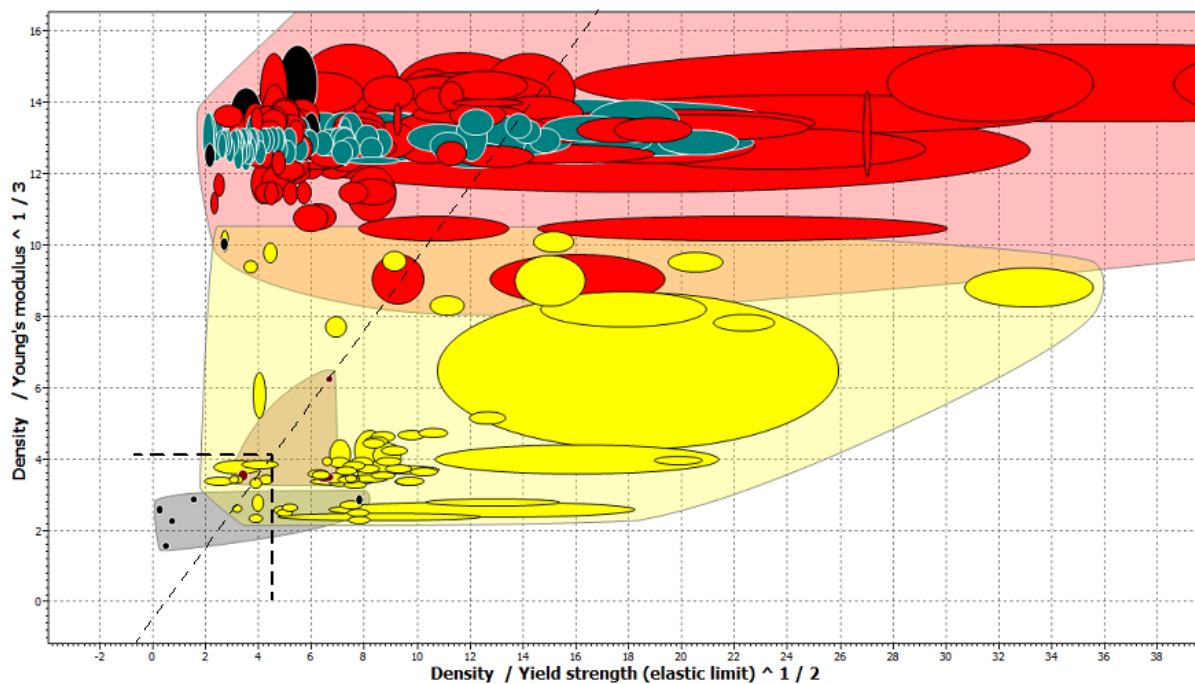
#### 4.5.3.3 Určení vazebné konstanty $C_c$

$$C_c = \frac{\left(\frac{12S}{C_1 b}\right)^{1/3}}{\left(\frac{4FL}{Cb}\right)^{1/2}} \cdot L = \frac{\left(\frac{12 \cdot 441.45}{192 \cdot 0.186}\right)^{1/3}}{\left(\frac{4 \cdot 27.66 \cdot 0.7}{8 \cdot 0.186}\right)^{1/2}} \cdot 0.7 = 0.51$$

Hodnota konstanty  $C_c$  je 0.51. Tato hodnota nám určuje sklon spojovací linky a její polohu získáme z rovnice:

$$M_2 = M_1 \cdot C_c$$

Na grafu číslo 13 je zobrazen výstup ze softwaru. V dalším kroku nás budou zajímat materiály, která jsou zobrazeny na grafu pod námi zvolenou hranicí.



Graf 13

#### 4.5.4 Dokumentace

V tabulce číslo 19 je uveden ideální zástupce každé rodiny materiálů, tedy z kompozitů, technické keramiky a z rodiny vlákna a částice. Viz. graf číslo 14.

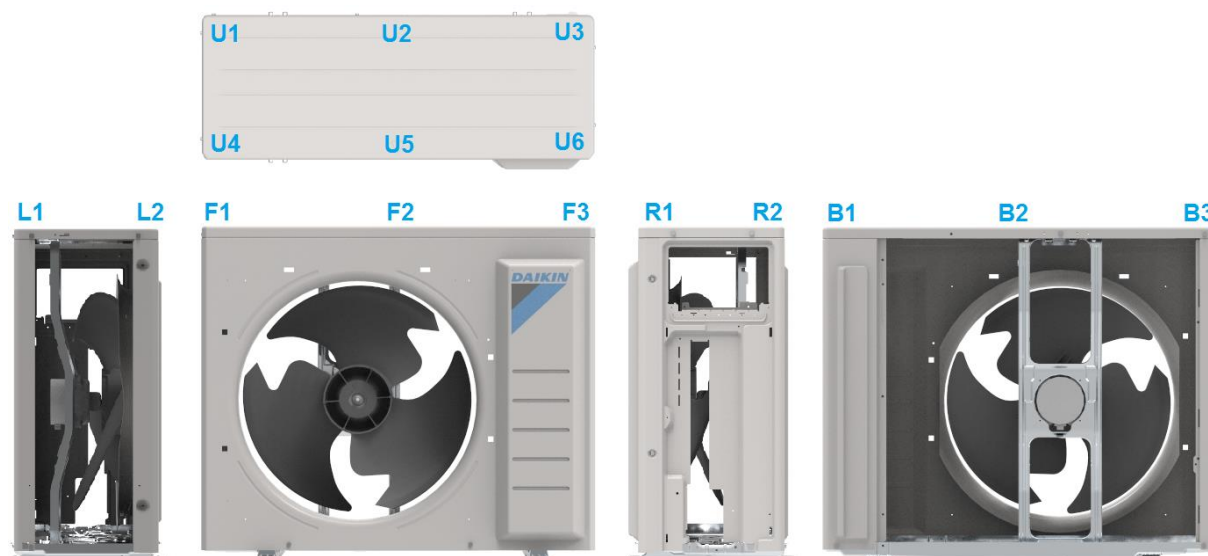
Tabulka 19	Základní vlastnosti materiálu			
	HM Fiber	GEM 2	Nitrid křemíku	Jednotky
Základní vlastnosti				
Hustota	1 800 ~ 1 850	4 220 ~ 4 300	3 160 ~ 3 230	kg/m <sup>3</sup>
Cena	828 ~ 994	984 ~ 1 480	697 ~ 1 070	kč/kg
Mechanické vlastnosti				
Youngův modul	370 ~ 390	385 ~ 415	302 ~ 318	GPa
Mez kluzu	1 910 ~ 2 110	602 ~ 665	476 ~ 525	MPa
Mez pevnosti	2 400 ~ 2 410	602 ~ 665	476 ~ 525	MPa
Tepelné vlastnosti				
Min. provozní teplota	- 273	- 273	- 273	°C
Max. provozní teplota	530 ~ 580	1 440 ~ 1 510	1 080 ~ 1 230	°C
Odolnost				
Čistá voda	Výborná	Výborná	Výborná	
Slaná voda	Výborná	Výborná	Výborná	
Slabé zásady	Výborná	Výborná	Výborná	
Slabé kyseliny	Výborná	Výborná	Výborná	



## 5. Reálné měření, nalazení modelu

### 5.1 Reálné měření vibrací

Reálné měření vibrací probíhalo ve laboratorní komoře 20HP ve společnosti Daikin Industries Czech Republic s.r.o. Během měření bylo uvnitř komory 20°C. K měření vibrací byl použit 40-ti kanálový vibrometr. Pro potřeby této diplomové práce bylo použito 16 sensorů, jejich rozmístění je uvedeno níže na obrázku číslo 44. Otáčky motoru se měnily pomocí „fan-driveru“ a následné ověření každé hodnoty bylo pomocí stroboskopu (viz. příloha 10.6).



Obrázek 44 Označení umístění jednotlivých sensorů

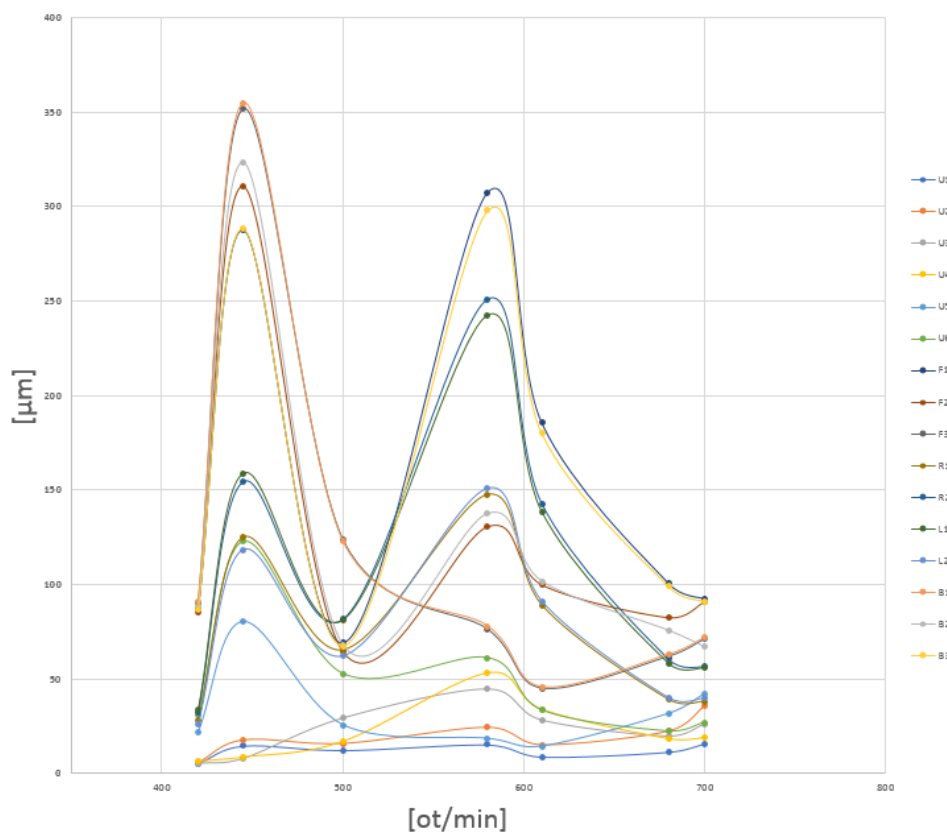
#### 5.1.1 Měření provozních stavů jednotky

Venkovní klimatizační jednotka Daikin Multi 3MXM52M2 je v závislosti na aktuálním nastavení provozována v pěti různých otáčkách, a to v rozmezí 420, 500, 610, 680 a 700 [ot/min]. Tyto jednotlivé otáčky byly proměřeny. Měřenými parametry byla frekvence [Hz] a maximální výchylka [ $\mu\text{m}$ ]. Zároveň po změření jednotlivých otáček byl proměřen plynule celý rozsah, tzn. od 420 do 700 [ot/min]. Výsledkem bylo nalezení dvou rezonančních stavů. První rezonance vznikla při 445 [ot/min] a druhý rezonanční stav nastal při 580 [ot/min].



Výsledky měření jsou zaneseny do tabulky číslo 20 a zároveň zaneseny do grafu číslo 15:

<b>Tabulka 20</b>		<b>Měření provozních stavů jednotky</b>						
	Označení senzoru	Jednotlivé otáčky [ot/min]						
		420	445	500	580	610	680	700
Výchylka [ $\mu\text{m}$ ]	U1	5,244552	14,70182	12,32742	15,32556	8,817255	11,4084	15,8854
	U2	5,733255	17,78014	15,87656	24,44661	15,20672	22,44605	35,81294
	U3	5,40197	8,041652	29,54414	44,96626	28,45891	19,93201	26,43724
	U4	6,795605	9,007217	17,17303	53,12502	34,04488	18,6459	19,13636
	U5	21,90602	80,44962	25,69494	18,50516	14,42299	31,7198	42,34683
	U6	30,86754	123,0569	52,84145	61,31668	33,44943	22,31509	27,06418
	F1	87,31675	287,716	69,4014	307,5381	185,5923	100,8354	92,6229
	F2	85,73941	310,7381	64,60486	130,7376	99,97325	82,62488	90,98266
	F3	90,20508	352,004	124,027	76,48079	45,21545	62,06875	71,34921
	R1	28,08248	125,0539	65,43255	147,5893	89,12235	39,22354	38,25891
	R2	32,58495	154,4996	81,66073	250,8595	142,7933	60,69513	56,56426
	L1	33,69317	158,7779	81,17888	242,3443	138,2922	58,31896	55,89825
	L2	26,13438	118,5428	62,30992	150,9197	91,23141	40,29955	40,0206
	B1	90,95179	354,865	122,9419	77,91971	45,73813	62,86615	71,89615
	B2	88,29173	323,2228	68,1235	137,588	101,7533	75,76554	67,13034
	B3	86,92146	288,3797	67,59511	297,9045	180,0234	99,05586	91,16993

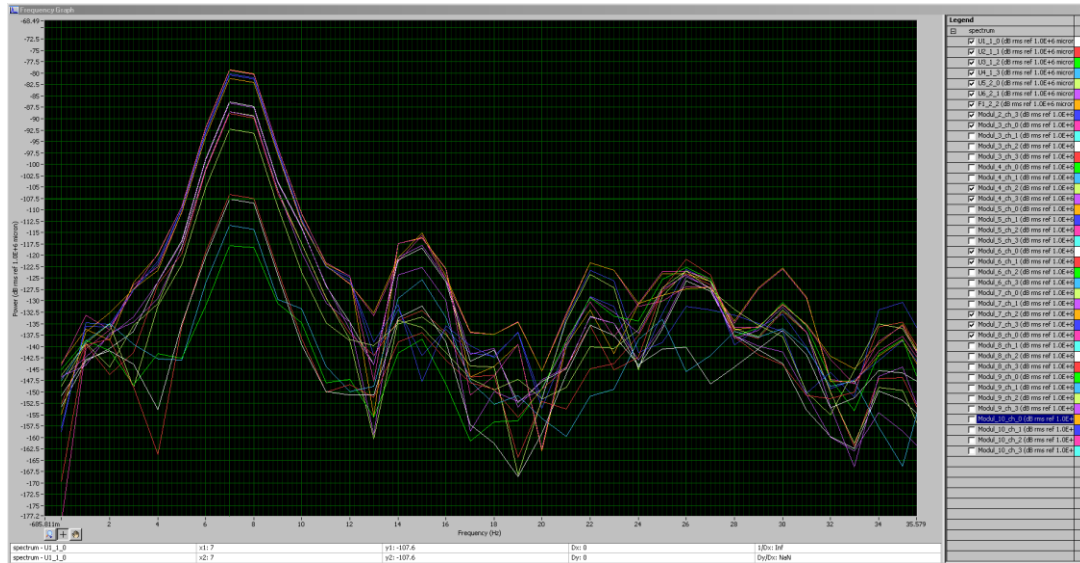


Graf 15 Reálné měření vibrací skříně klimatizační jednotky

### 5.1.1 První rezonance

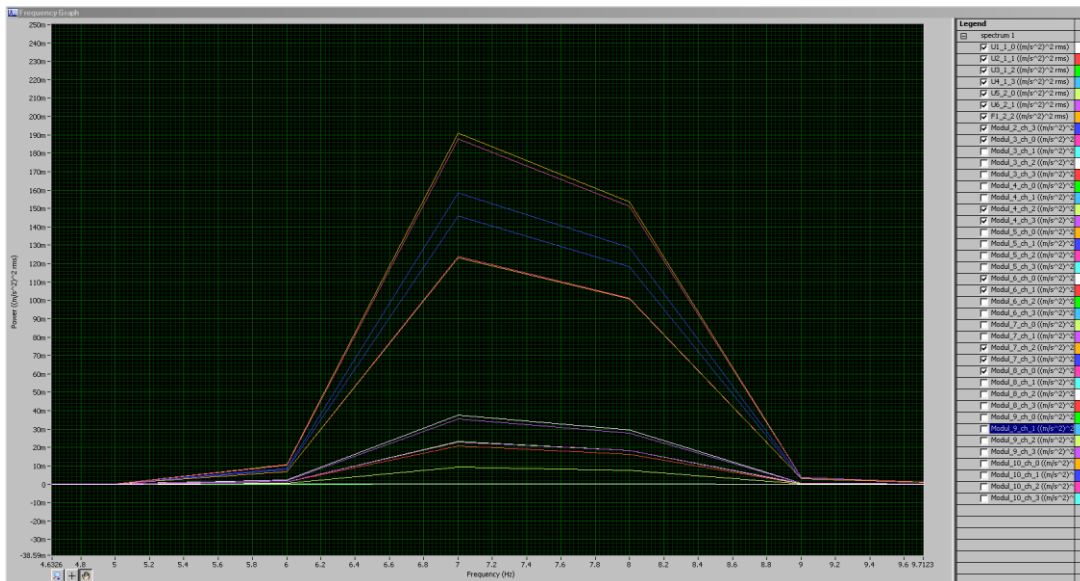
Z grafu je zároveň možné odhadnout, v jakém směru se bude skříň pohybovat. Pojdme se podívat blíže na první rezonanční stav 445 [ot/min], čemuž odpovídá frekvence 7.41 [Hz]. Z grafu je patrné, že nám vzniklo několik dvojic. Téměř stejnou výchylku mají body F3 a B1, to znamená že se bude hýbat levá strana jednotky dopředu a dozadu. Další dvojicí je F1 a B3, jejichž hodnota je ale nižší. Další dvojice jsou R1 a L2, R2 a L1. Tedy primární pohyb je zepředu dozadu. Vyjimku tvoří bod B6, stejně jako v simulaci se tento bod pohybuje nahoru a dolu. Zbylé informace lze obdobným způsobem vyčíst z grafu číslo 15.

Na obrázku číslo 45 je zobrazen signál z 16-ti sensorů po rychlé Fourierově transformaci.



Obrázek 45 - na ose X je frekvence, na ose Y je výchylka po Fourierovo transformaci

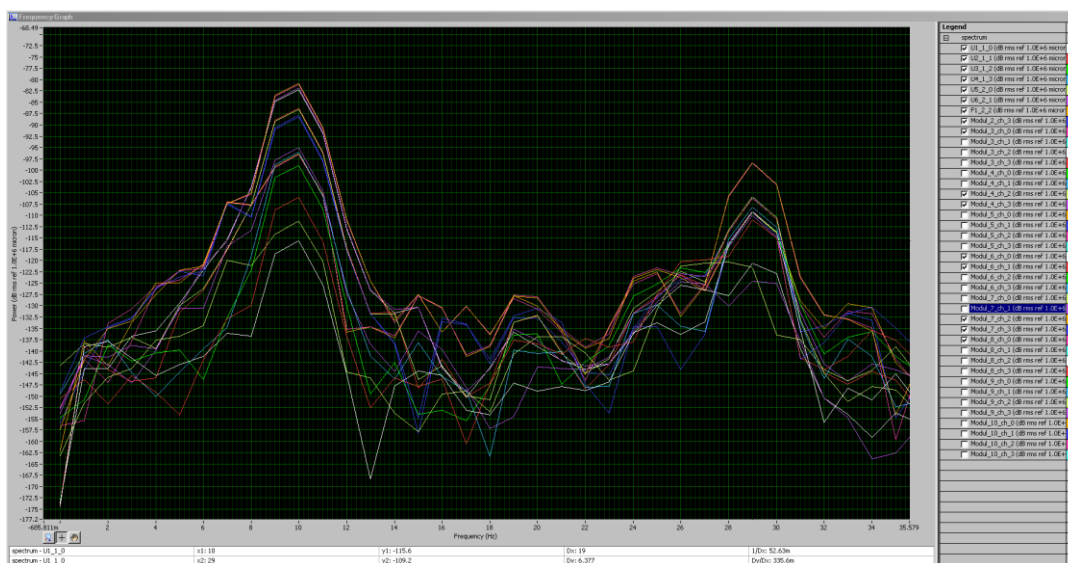
Na obrázku číslo 46 je zobrazeno zrychlení jednotlivých sensorů. I zde je vidět, že je většinou pohyb sensorů v páru.



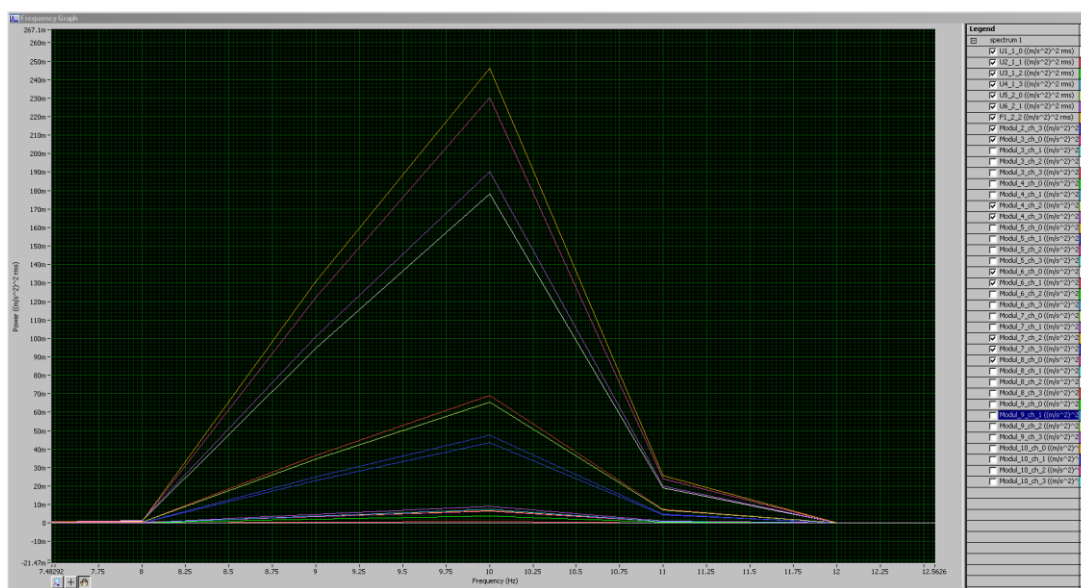
Obrázek 46 - na ose X je frekvence, na ose Y zrychlení

### 5.1.2 Druhá rezonance

Totéž platí pro druhou rezonanci. Druhá rezonance nastala při 580 [ot/min], což po přepočítání na frekvenci je 9.66 [Hz].



Obrázek 47 - na ose X je frekvence, na ose Y je výchylka po Furierovo transformaci



Obrázek 48 - na ose X je frekvence, na ose Y zrychlení

### 5.2 Závěr po měření

Reálné měření skříně klimatizační jednotky nám poskytlo celou řadu užitečných informací. Dvě nejdůležitější jsou dvě rezonance mezi provozními otáčkami. Na základě měření jsme zjistili, že během provozu jednotka při náběhu na provozní otáčky 610 [ot/min] a více projde skrze dvě rezonance. Tedy díky měření jsme dostali reálný cíl, kterého chceme dosáhnout.

Cílem je změna materiálu, která nám zajistí posunutí vlastní frekvence nad hranici 11.66 [Hz], což by ve výsledku znamenalo, že k rezonanci vůbec nebude docházet. Za úspěch by se též dalo považovat, kdybychom díky změně materiálu odstranili alespoň jednu rezonanci. V

této části si je také nutné sebekriticky přiznat, že by mohla nastat situace, kdy se sice díky změně materiálu posuneme výše, ale do míst provozních otáček. Což by byl vyloženě neúspěch.

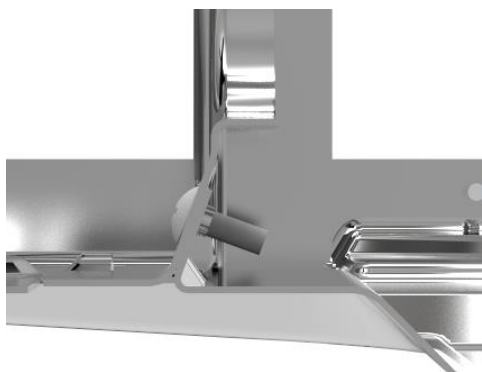
## 6. Modální analýza

Pro srovnání a zároveň porovnání jednotlivých materiálů byla použita modální analýza a analýza harmonic response ve výpočetním softwaru Ansys Workbench verze 19.0. Postup výpočtů byl rozdělen do dvou kroků. V prvním kroku byla provedena modální analýza samotného FMS (příloha 10.7). Ve druhém kroku byla provedena modální analýza celé skříně (příloha 10.8) kvůli zahrnutí šroubových spojů.

### 6.1 Popis modelu

Celý model je ve skutečnosti tvořen několika plechovými díly o tloušťkách od 0.6 mm do 1 mm. Ačkoliv je hlavní záměr zjistit vlastní frekvence FMS, bude do výpočtu zahrnuta celá skříň. Důvodem jsou vazby FMS na protikusy a jejich nahrazení prvkem „*beam*“. Provedl jsem modální analýzu jednak samotného FMS a také celé skříně a výsledky jsou poměrně odlišné. Modální analýza samotného FMS je uvedena v příloze 10.6.

FMS je ke skříně přišroubován pomocí čtyř šroubů M4x12 (Class 2). Ostatně tyto šrouby se používají ke spojení celé skříně. I zde je zohledněno těsnění, která se dává mezi FMS a horní plech, v tomto případě je nahrazeno vazbou „*elastic support*“. Vazby FMS na protikusy jsou zobrazeny níže. Ostatní vazby jsou uvedeny v příloze 10.7.1.



Obrázek 49 Spojení FMS a spodního plech



Obrázek 50 Spojení FMS a horní plechu

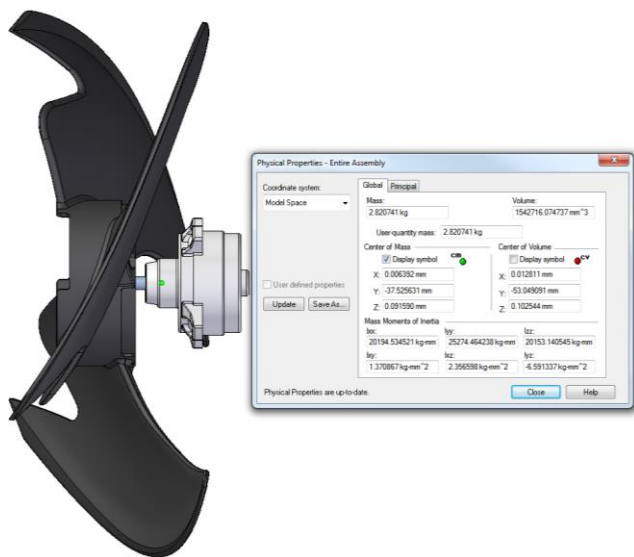
### 6.2 Nastavení modální analýzy – ANSYS 19.0

#### 6.2.1 Geometrie

Vzhledem k faktu, že celá vnější konstrukce venkovní klimatizační jednotky se skládá z plechů se samo nabízí převedení jednotlivých dílů do skořepiny a následně jim přiřadit příslušnou tloušťku stěny. Tento postup vede k rychlejšímu výpočtu.

### 6.2.2 Hmotný bod

Do výpočtu byla vrtule s motorem nahrazena hmotným bodem. V CAD programu Solid Edge ST4 byli zjištěny potřebné informace jako jsou těžiště této podsestavy, hmotnost a momenty setrvačnosti v jednotlivých osách. Viz. obrázek číslo 51. Co se týče hmotnosti ta byla samozřejmě ověřena na reálných dílech. V případě složitosti motoru a jeho velkém počtu dílů ani jiná možnost nebyla. Poloha těžiště ve směru osy Y byla také ověřena na reálné podsestavě. Hmotnost hmotného bodu je 2.82 [kg]. Hmotný bod je uchycen ke konstrukci FMS přes čtveřici otvorů, tak jak to odpovídá skutečnosti.

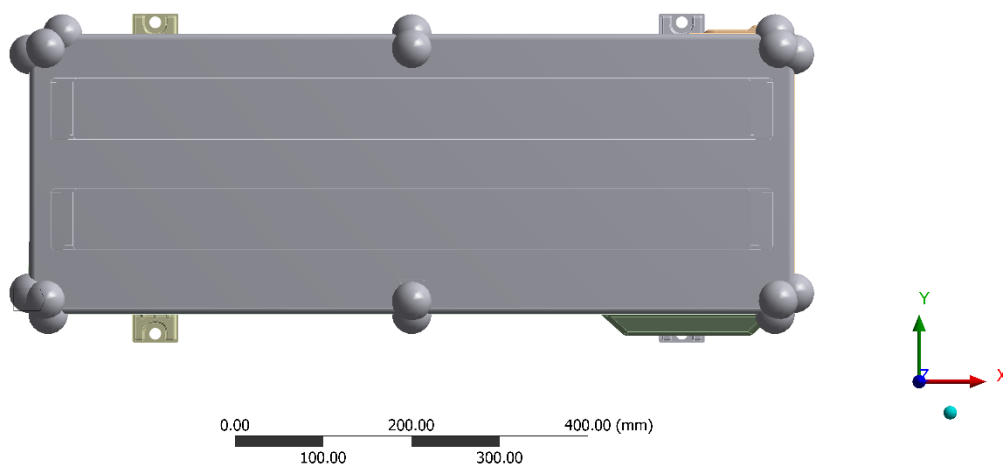


Obrázek 51



Obrázek 52

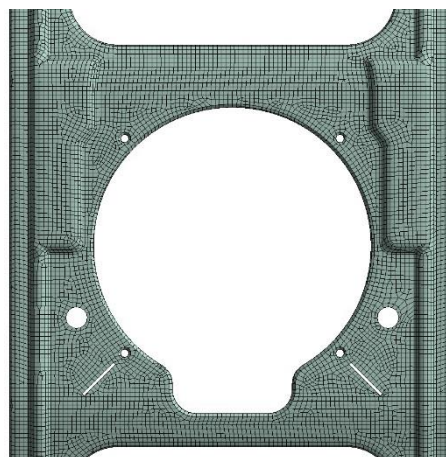
Dále bylo do výpočtu uvažováno s hmotností sensorů. Neboť každý váží nezanedbatelných 72 [g] a při počtu šestnácti sensorů to již ovlivňuje výsledek. Nahrazení a rozmístění sensorů v SW Ansys je zobrazeno na obrázku číslo 53.



Obrázek 53

### 6.2.3 Zasítování modelu

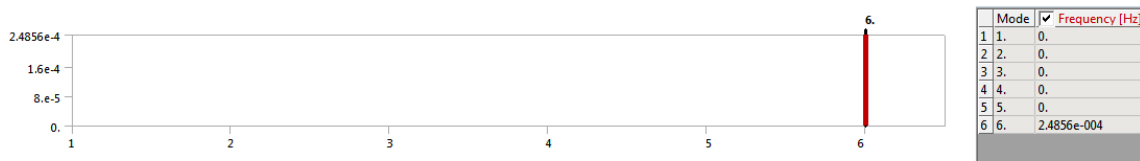
K zasítování byla použita funkce „uniform“ s nastavením velikosti elementu 1.8 mm. Tato velikost byla zvolena v závislosti na předchozím simulaci samotného FMS, kdy velikost elementu byla defaultně nastavena na 1.8 mm. Kvůli porovnání výsledků bude velikost elementu zachována. Funkce „uniform“ se snaží síťovat model stejnými elementy. Výsledkem je 483 771 uzlů a 481 494 elementů. Na obrázku číslo 54 je vidět výsledek síťování FMS. Kontrola kvality sítě je uvedena v příloze 10.7.1.



Obrázek 54

### 6.2.4 Analýza uvolněného modelu

Pro ověření správnosti nastavení modální analýzy byla analýza puštěna bez zahrnutí omezujících faktorů. Výsledek očekáváme ve formě šesti nulových frekvencí, neboť máme šest stupňů volnosti. Výsledek je zobrazen níže na obrázku číslo 55:

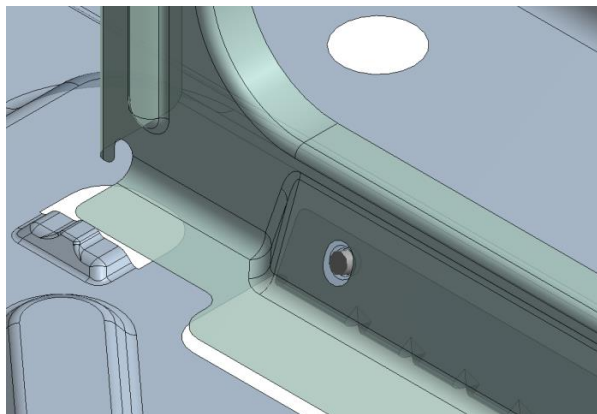


Obrázek 55

Jak je patrné, tak prvních pět vlastních frekvencí jsou nulové a šestá je velmi malá, čímž výsledek považuji za uspokojivý.

### 6.2.5 Vazby

Jednotlivé díly skříně jsou ve skutečnosti k sobě přišroubované pomocí šroubů M4X12 (Class 2). Pro účely výpočtu jsou tyto šroubová spojení nahrazeny prvkem beam. Jedno kontrétní nahrazení je zobrazeno na obrázku číslo 56. Pro ilustraci jsou na obrázku číslo 57 zobrazeny veškerá spojení jednotlivých plechů.



Obrázek 57

- ✓ Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To fan\_motor\_stand\_surface.par:1
- ✓ Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To fan\_motor\_stand\_surface.par:1
- ✓ Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To left\_side\_plat\_surface.par:1
- ✓ Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To left\_side\_plat\_surface.par:1
- ✓ Circular - left\_side\_plat\_surface.par:1 To top\_plate\_surface.par:1
- ✓ Circular - left\_side\_plat\_surface.par:1 To top\_plate\_surface.par:1
- ✓ Circular - fan\_motor\_stand\_surface.par:1 To top\_plate\_surface.par:1
- ✓ Circular - fan\_motor\_stand\_surface.par:1 To front\_plate\_surface.par:1
- ✓ Circular - front\_plate\_surface.par:1 To top\_plate\_surface.par:1
- ✓ Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To front\_plate\_surface.par:1
- ✓ Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To front\_plate\_surface.par:1
- ✓ Circular - right\_side\_plate\_surface.par:1 To front\_plate\_surface.par:1
- ✓ Circular - right\_side\_plate\_surface.par:1 To front\_plate\_surface.par:1
- ✓ Circular - right\_side\_plate\_surface.par:1 To top\_plate\_surface.par:1
- ✓ Circular - right\_side\_plate\_surface.par:1 To top\_plate\_surface.par:1
- ✓ Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To right\_side\_plate\_surface.par:1

Obrázek 56

### 6.3 Nalazení modelu

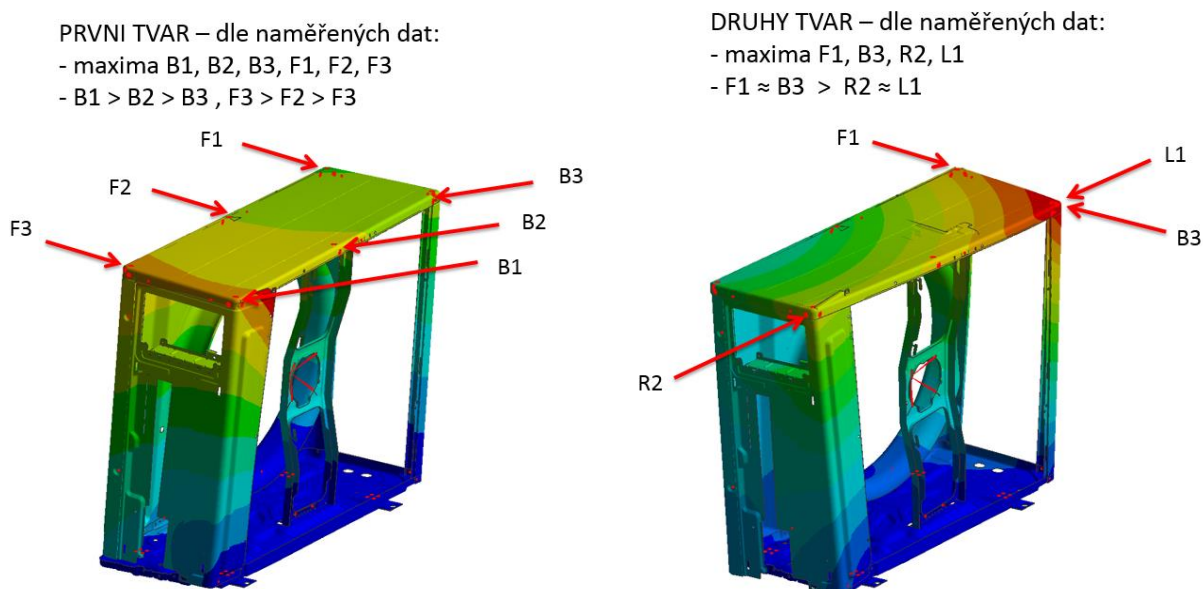
Prvotní modální analýza modelu je v příloze 10.8 *Modální analýza celé skříně*. Z výsledků je patrné, že model je třeba naladit dle reálného měření, aby se výsledky shodovaly. Lazení modelu probíhalo ve spolupráci se společností SVS FEM s.r.o. Pro dosažení co možná nejlepších výsledků bylo potřeba přidat kontakty do oblasti, kde není šroubové spojení, ale plechy jsou vzájemně svázané pomocí tvarových prvků. Nastavením normálové tuhosti „bonded“ kontaktu bylo dosaženo uspokojivých výsledků. První vlastní frekvence má hodnotu 7.501 [Hz] a druhá vlastní frekvence 9.634 [Hz]. Detail nastavení kontaktu je na obrázku číslo 58.

Details of "Bonded - right_side_plate_surface.par:1 To bottom_frame_surface.par:1"	
☐ <b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	right_side_plate_surface.par:1
Target Bodies	bottom_frame_surface.par:1
Contact Shell Face	Program Controlled
Target Shell Face	Program Controlled
Shell Thickness Effect	No
Protected	No
☐ <b>Definition</b>	
Type	Bonded
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
☐ <b>Advanced</b>	
Formulation	Pure Penalty
Small Sliding	Off
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Factor
Normal Stiffness Factor	2.e-005
Update Stiffness	Program Controlled
Pinball Region	Radius
Pinball Radius	10. mm

Obrázek 58

## 6.4 Analýza současného materiálu

Při modální analýze současného materiálu byly ověřeny výsledky reálného měření – graf číslo 15, a to porovnáním směru a velikosti deformace. Viz. obrázek číslo 59. Výsledky prvních tří frekvencí jsou zobrazeny na obrázku číslo 60. Jak je z výsledků patrné, tak model se podařilo naladit velmi uspokojivě, ať už z pohledu samotné vlastní frekvence tak i z pohledu pohybu skříně při deformaci.



Obrázek 59

**TABLE 26**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Solution (C6) > Results**

Object Name	Total Deformation	Total Deformation 2	Total Deformation 3	Directional Deformation	Directional Deformation 2	Directional Deformation 3
State	Solved					
<b>Scope</b>						
Scoping Method	Geometry Selection					
Geometry	All Bodies					
<b>Definition</b>						
Type	Total Deformation			Directional Deformation		
Mode	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Identifier						
Suppressed	No					
Orientation	X Axis					
Coordinate System	Global Coordinate System					
<b>Results</b>						
Minimum	0. mm			-0.33681 mm	-9.6636e-002 mm	-3.8461 mm
Maximum	14.759 mm	16.097 mm	32.655 mm	3.4147 mm	12.808 mm	10.911 mm
Average	4.72 mm	5.0893 mm	5.1849 mm	0.62647 mm	3.9268 mm	1.1957 mm
<b>Information</b>						
Frequency	7.501 Hz	9.6347 Hz	16.166 Hz	7.501 Hz	9.6347 Hz	16.166 Hz

**TABLE 27**  
**Model (C4) > Modal (C5) > Solution (C6) > Total Deformation**

Mode	Frequency [Hz]
1.	7.501
2.	9.6347
3.	16.166

Obrázek 60 Výstup ze sw Ansys



## 6.5 Analýza alternativního materiálu

### 6.5.1 Karbid křemíku SiC

Po přepočtu získaných vlastních frekvencí na otáčky získáme následující hodnoty:

- první vlastní frekvence 10.704 [Hz] odpovídá 642.24 [ot/min]
- druhá vlastní frekvence 12.711 [Hz] odpovídá 762.66 [ot/min]

Z výsledků je patrné, že se změnou materiálu podařilo odstranit alespoň jednu rezonanci, což lze považovat za úspěch.

TABLE 26  
Model (E4) > Modal (E5) > Solution (E6) > Results

Object Name	Total Deformation	Total Deformation 2	Total Deformation 3	Directional Deformation	Directional Deformation 2	Directional Deformation 3
State	Solved					
<b>Scope</b>						
Scoping Method	Geometry Selection					
Geometry	All Bodies					
<b>Definition</b>						
Type	Total Deformation			Directional Deformation		
Mode	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Identifier						
Suppressed	No					
Orientation	X Axis					
Coordinate System	Global Coordinate System					
<b>Results</b>						
Minimum	0. mm			-0.38918 mm		
Maximum	17.077 mm	18.133 mm	26.952 mm	3.0457 mm	15.18 mm	13.042 mm
Average	5.9621 mm	6.2554 mm	6.1996 mm	0.53871 mm	4.7769 mm	1.6716 mm
<b>Information</b>						
Frequency	10.704 Hz	12.711 Hz	25.583 Hz	10.704 Hz	12.711 Hz	25.583 Hz

TABLE 27  
Model (E4) > Modal (E5) > Solution (E6) > Total Deformation

Mode	Frequency [Hz]
1.	10.704
2.	12.711
3.	25.583

Obrázek 61 Výstup ze sw Ansys

### 6.5.2 HM uhlíková vlákna

Po přepočtu získaných vlastních frekvencí na otáčky získáme následující hodnoty:

- první vlastní frekvence 11.359 [Hz] odpovídá 681.54 [ot/min]
- druhá vlastní frekvence 13.467 [Hz] odpovídá 808.02 [ot/min]

Vzhledem k tomu, že provozní otáčky jsou 680 [ot/min], tato změna materiálu je vyloženě kontraproduktivní.

TABLE 26  
Model (D4) > Modal (D5) > Solution (D6) > Results

Object Name	Total Deformation	Total Deformation 2	Total Deformation 3	Directional Deformation	Directional Deformation 2	Directional Deformation 3
State	Solved					
<b>Scope</b>						
Scoping Method	Geometry Selection					
Geometry	All Bodies					
<b>Definition</b>						
Type	Total Deformation			Directional Deformation		
Mode	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Identifier						
Suppressed	No					
Orientation	X Axis					
Coordinate System	Global Coordinate System					
<b>Results</b>						
Minimum	0. mm			-0.18378 mm		
Maximum	18.811 mm	19.479 mm	27.223 mm	3.9237 mm	16.101 mm	13.866 mm
Average	6.303 mm	6.6654 mm	6.5742 mm	0.78252 mm	5.0514 mm	1.6601 mm
<b>Information</b>						
Frequency	11.359 Hz	13.467 Hz	26.696 Hz	11.359 Hz	13.467 Hz	26.696 Hz

TABLE 27  
Model (D4) > Modal (D5) > Solution (D6) > Total Deformation

Mode	Frequency [Hz]
1.	11.359
2.	13.467
3.	26.696

Obrázek 62 Výstup ze sw Ansys

## 7. Zhodnocení výsledků

Modální analýza posloužila především jako nástroj pro porovnání více materiálů mezi sebou z hlediska vlastních frekvencí. Ovlivňování vlastních frekvencí by se snaže dosahovalo změnou tvaru dílu nežli materiálu, ale v této práci jde o výběr konstrukčních materiálů.

V prvním kroku bylo nalazení modelu v sw Ansys 19.0. Na základě reálného měření pomocí 16 sensorů jsme našli dvě rezonance. První při 445 a 580 [ot/min] což odpovídá frekvenci 7.41 a 9.66 [Hz]. Modální analýza po prvotním nastavením těmto výsledkům neodpovídala a tak bylo nutné model dále ladit. Ve spolupráci se společností SVS Fem s.r.o. byl model nalazen tak, aby hodnota vlastních frekvencí odpovídala v co největší míře reálnému měření. Za pomoci přidání kontaktů do míst vzájemného tvarového spojení plechů a následném lazení normálové tuhosti bylo dosaženo upokojivých výsledků. První vlastní frekvence má hodnotou 7.5 [Hz] a 9.6 [Hz]. Lazení modelu probíhalo samozřejmě se současným materiálem.

Druhým krokem bylo zjištění případné změny vlastních frekvencí po aplikaci alternativního materiálu. Výsledky již známe. Alternativní materiál byl aplikován na celou skříň, neboť při aplikaci na samotný FMS nedošlo prakticky k žádné změně.

Po aplikaci materiálu SiC, tedy karbidu křemíku, se vlastní frekvence posunuly výše, ale bohužel ne dostatečně. Po reálném měření jsem si stanovili dva cíle, přičemž první je odstranění obou rezonancí a druhým cílem je odstranění alespoň jedné rezonance. Díky použití nového materiálu dojde k odstranění jedné rezonance a druhá má hodnotu 10.7 [Hz] což odpovídá 642 [ot/min]. Takovou změnu materiálu lze považovat za úspěch, byť jen částečný.

Vlastní frekvence konstrukce byly také ověřeny na druhém alternativním materiálu – uhlíková vlákna s vysokým modulem pružnosti (HM fibers). Oproti výchozímu materiálu i první alternativě došlo k posunutí vlastních frekvencí výše, což je samozřejmě žádoucí jev. První dvě vlastní frekvence mají hodnotu 11.35 [Hz] a 13.46 [Hz]. Po přepočítání na otáčky má první rezonance hodnotu 681.54 [ot/min]. Vzhledem k provozním otáčkám, které mají jednu z hodnot 680 [ot/min], je zde velká pravděpodobnost, že nastavení otáček na tuto hodnotu by uvedlo konstrukci do rezonance. Závěrem lze konstatovat, že použití materiálu uhlíková vlákna s vysokým modulem pružnosti (HM Fibers) není při takto navržené konstrukci vhodné.

## 8. Závěr

Hlavním cílem během zpracování této práce bylo aplikovat nově získané znalosti ihned na konkrétní konstrukci. V našem případě na venkovní klimatizační jednotku. Metodika výběru konstrukčního materiálu je dle profesora M. Ashbyho a také pomocí sw CES EduPack 2013. Tato diplomová práce je rozdělena do několika částí.

V první části diplomové práci jsme si představili obecné principy a přístupy při konstruování produktů. Ve společnosti Daikin Industries Czech Republic s.r.o. využíváme přístup, který se nazývá „*developmental design*“. Tento přístup spočívá v rozvíjení a zlepšování stávajícího modelu. Než začneme se samotným výběrem materiálu, je nezbytné nejprve nalézt součást, pro kterou budeme hledat nový alternativní materiál. Jak již víme, výběr materiálu probíhá na nejnižší úrovni technického systému, v našem případě venkovní

klimatizační jednotky. Na základě tohoto rozboru jsme si popsali funkce jednotlivých podsestav. V další fázi jsme přistoupili k výběru součástí. Na začátku tohoto procesu stojí požadavky trhu a na opačném konci stojí specifikace součástí. V této práci jsme si stanovili základní požadavek na snížení vibrační skříň jednotky při současném ohledu na nízkou cenu materiálu. Díky rozboru technického systému a popisu pracovních principů jsme došli k závěru, že hledaná součást pro následnou aplikaci alternativního materiálu je Fan Motor Stand neboli držák motoru ventilátoru.

Prostřední část diplomové práce se věnuje samotnému výběru nového materiálu pro Fan Motor Stand. V této diplomové práci byly vyzkoušeny dvě varianty výběru materiálu. Na základě předchozích kroků, kdy jsme specifikovali požadavky na součást, se následně tyto požadavky rozdělí na cíle a omezení. Čímž jsme udělali první krok výběru materiálu, a to převedení konstrukčních požadavků. Pomocí těchto atributů provede druhý krok výběru – prověření. To znamená, že odfiltrujeme všechny materiály, které určitým způsobem nejsou shopné vyhovět našim požadavkům. Třetím krokem je hodnocení přeživších materiálů. Existuje více způsobů, které byly popsány výše. V našem případě byla pokaždé zvolena grafická metoda. V prvním případě se jednalo o grafickou „trade off“ metodu rozšířenou o „penalty“ funkci. V druhém případě byla použita metoda grafická s využitím vazební konstaty  $C_c$ . Do závěrečného výběru se dostaly v obou případech tři materiály. K hodnocení těchto finalistů byla opět použita grafická metoda. Materiály byly zaneseny do grafu vyjadřující tzv. mechanickou účinnost.

Poslední část diplomové práce je věnována reálnému měření a modální analýze. Modální analýza byla využita jako nástroj pro porovnání současného materiálu a materiálu nově vybraného. Než bylo přistoupeno k samotné modální analýze, bylo provedeno reálné měření vibrační klimatizační jednotky. Tímto měření byly získané dvě rezonance a zároveň jsme získali reálný cíl, kterého jsme chtěli dosáhnout. A to odstranění obou rezonancí nebo alespoň jedné z nich. Na základě reálného měření bylo potřeba naladit model v sw Ansys workbench 19.0. Lazení modelu probíhalo ve spolupráci s SVS Fem s.r.o. Po úspěšném naladění modelu byla provedena modální analýza s alternativním materiálem. Jak již bylo zmíněno výše, aplikace alternativních materiálů proběhla na celou skříň.

Tato diplomová práce se primárně věnovala metodice výběru konstrukčního materiálu. Byly zde popsány a vysvětleny jednotlivé kroky, které vedou k výběru nejvhodnějšího materiálu pro danou součást. Modální analýza posloužila jako nástroj pro posouzení jednotlivých materiálů z hlediska vlastních frekvencí. Závěrem lze konstatovat, že současný materiál je plně dostačující. Dále použití alternativních materiálů má smysl za předpokladu aplikace na celou skříň. Reálné měření a také modální analýza byla provedena pouze na skříni klimatizační jednotky. Důvodem je složitost celé konstrukce, ale jak již bylo zmíněno, primární zaměření této práce byl postup při výběru konstrukčních materiálů.

## 9. Seznam použitých zdrojů (literatury)

- [1] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-1-85617-663-7
- [2] ASHBY, M. F.: *Material and the Environment*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009. ISBN 978-1-85617-608-8
- [3] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.17. ISBN 978-1-85617-663-7
- [4] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.18. ISBN 978-1-85617-663-7
- [5] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.19. ISBN 978-1-85617-663-7
- [6] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.21. ISBN 978-1-85617-663-7
- [7] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.23. ISBN 978-1-85617-663-7
- [8] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.36. ISBN 978-1-85617-663-7
- [9] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.38. ISBN 978-1-85617-663-7
- [10] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.40. ISBN 978-1-85617-663-7
- [11] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.42. ISBN 978-1-85617-663-7
- [12] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.47. ISBN 978-1-85617-663-7
- [13] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.60. ISBN 978-1-85617-663-7
- [14] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.61. ISBN 978-1-85617-663-7
- [15] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.67. ISBN 978-1-85617-663-7
- [16] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.69. ISBN 978-1-85617-663-7
- [17] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.71. ISBN 978-1-85617-663-7

- [18] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.93. ISBN 978-1-85617-663-7
- [19] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.94. ISBN 978-1-85617-663-7
- [20] Daikin Web base training
- [21] [http://www.daikintech.co.uk/Data/Bluevolution/MXM/2016/3MXM40-68M2V1B/3MXM40-68M2V1B\\_Databook\\_EEDEN16\\_tcm219-418405.pdf](http://www.daikintech.co.uk/Data/Bluevolution/MXM/2016/3MXM40-68M2V1B/3MXM40-68M2V1B_Databook_EEDEN16_tcm219-418405.pdf)
- [22] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.99. ISBN 978-1-85617-663-7
- [23] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.100. ISBN 978-1-85617-663-7
- [24] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.102. ISBN 978-1-85617-663-7
- [25] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.103. ISBN 978-1-85617-663-7
- [26] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.107. ISBN 978-1-85617-663-7
- [27] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.199. ISBN 978-1-85617-663-7
- [28] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.200. ISBN 978-1-85617-663-7
- [29] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.201. ISBN 978-1-85617-663-7
- [30] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.202. ISBN 978-1-85617-663-7
- [31] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.205. ISBN 978-1-85617-663-7
- [32] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.206. ISBN 978-1-85617-663-7
- [33] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.210. ISBN 978-1-85617-663-7
- [34] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.211. ISBN 978-1-85617-663-7
- [35] <http://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/13626-chladiva-uvod-definice-historie>
- [36] [http://www.daikin.com/products/ac/lineup/skyair/modals/technology/01\\_compressor/index.html](http://www.daikin.com/products/ac/lineup/skyair/modals/technology/01_compressor/index.html)

[37] [http://www.daikintech.co.uk/01\\_Multi\\_Split/Data/MXM.html](http://www.daikintech.co.uk/01_Multi_Split/Data/MXM.html)

[38] ASHBY, M. F.: *Material Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. str.535. ISBN 978-1-85617-663-7

[39] [www.dhl.cz](http://www.dhl.cz)

[40] ZEDNÍČEK, J.: *Deformační a lomové chování materiálu*, Brno, 2007. str.17.

## 10. Přílohy

### 10.1 Peierlsovo napětí

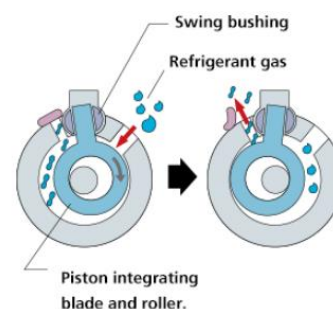
Peierlsovo napětí je síla, poprvé objevena Rudolfem Peierlsem. Vyjadřuje potřebnou sílu k posunutí dislokace ve skluzové rovině. Velikost se mění periodicky s pohybem dislokace. Peierlsovo napětí je závislé na rozměrech dislokace a také na vzdálenosti mezi skluzovými rovinami. S jejich roustoucí vzdáleností se napětí zmenšuje. [40]

### 10.2 Technická dokumentace

Od roku 2013 jsou klimatizační jednotky opatřeny energetickým štítkem s označením celoroční účinnosti. To zahrnuje měření skutečné účinnosti jak chlazení, tak vytápění po celý rok. Při výpočtu se bere v potaz kolísání teploty během roku, či doba v pohotovostním režimu. Dle vypočtené hodnoty se podle tabulky stanoví energetická účinnost od třídy A+++ do D. Kromě této hodnoty energetický štítek obsahuje informace o hladině zvuku, roční spotřebě elektrické energie a projektované zatížení [kW].

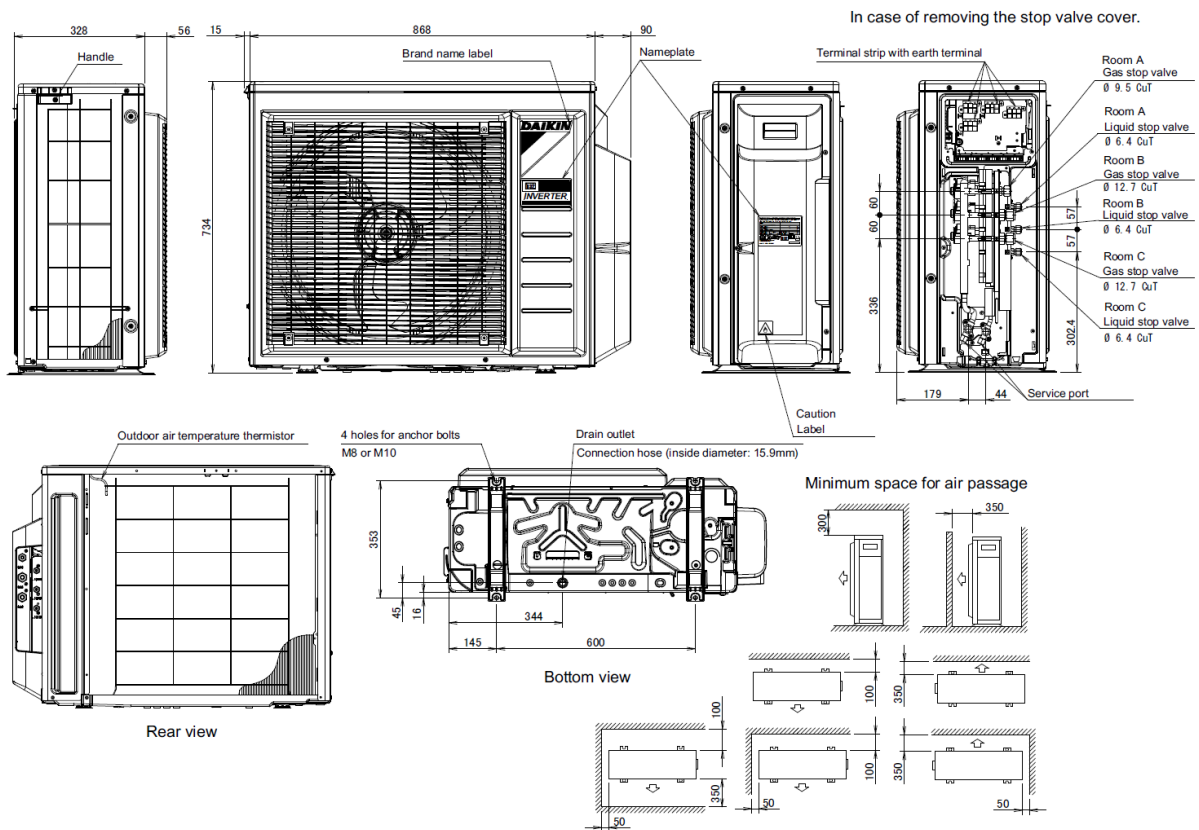
GWP (global warming potencial) je ukazatel vlivu daného látky (chladiwa) na globální oteplování. Termínem „globální oteplování“ se zde zjednodušeně myslí schopnost zachytit teplo v atmosféře, resp. odrazit zpět k zemskému povrchu (radiační účinnost). Jeho hodnota určuje, kolikrát více daný plyn přispívá ke skleníkovému jevu než plyn CO<sub>2</sub>. Hodnota je dána jak radiačními vlastnostmi plynu, tak jeho „životností“ v atmosféře. [35]

Swing kompresor – píst je uchycen na excentrické vačce s pohyblivou přepážkou. Pracovní cyklus je zobrazen na obrázku vpravo:



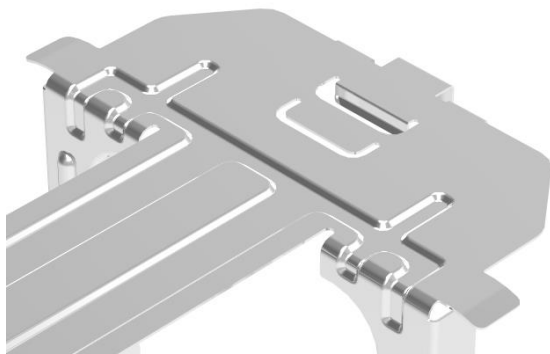
Obrázek 63 [36]

Na obrázku níže jsou zobrazeny celkové rozměry jednotky a také přípojovací rozměry:

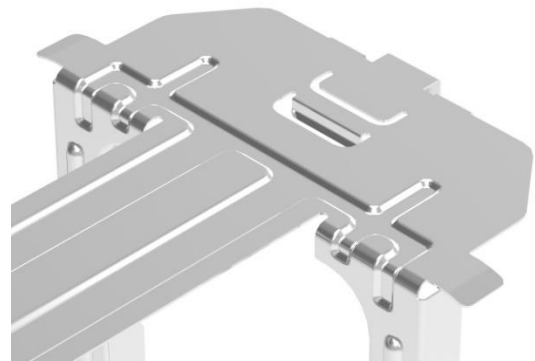


Obrázek 64 [37]

### 10.3 Ukázka unifikace FMS na dva výměníky



Obrázek 65 Pro dvouřadý výměník



Obrázek 66 Pro jednořadý výměník

### 10.4 Hodnoty konstant $C$ , $C_1$ a $C_2$



Obrázek 67 [38]

### 10.5 Ceník přepravy DHL

Země	Zóna	Předpokládaný čas přepravy v pracovních dnech		Země	Zóna	Předpokládaný čas přepravy v pracovních dnech	
		Time/Definite	Day/Definite			Time/Definite	Day/Definite
Alžírsko	10	3	-	Dominika	9	3	-
Albánie	5	1	-	Dominikánská rep.	9	3	-
Andorra	4	1	-	Ekvádor	9	2	-
Angola	10	2	-	Eritrea	10	5	-
Antigua	9	2	-	Estonsko	3	1	4
Argentina	9	3	-	Etiope	10	2	-
Arménie	8	2	-	Faerské ostrovy	5	4*	-
Aruba	9	2	-	Falklandy	9	6	-
Australie	8	3	-	Fiji	9	4	-
Azerbájdžán	8	3	-	Filipíny	7	2	-
Bahamy	9	2	-	Finsko	3	1	5
Bahraj	9	2	-	Francie	2	1	3
Bangladéš	9	3	-	Francouzská Guyana	9	3	-
Barbados	9	2	-	Gabon	10	2	-
Belgie	2	1	2	Gambie	10	3	-
Belize	9	3	-	Ghana	10	2	-
Bělorusko	5	2	-	Gibraltar	5	2	-
Bermudy	9	3	-	Grónsko	8	2	-
Bhútán	10	3	-	Guatemala	8	5*	-
Bolívie	9	3	-	Guineje	8	2	-
Bosna a Hercegovina	4	2	-	Guinejsko-Bissau	10	3	-
Botswana	10	2	-	Guyana (Britská)	9	3	-
Brazílie	9	2	-	Haiti	9	3	-
Brunej	9	3	-	Honduras	9	2	-
Bulharsko	3	1	4	Hongkong	7	2	7
Burkina Faso	10	2	-	Chile	9	2	-
Burundi	10	3	-	Chuvabuto	3	1	3
Cadové ostrovy	10	2	-	Indie	8	2	-
Canary	9	2	-	Indonésie	7	2	-
Čad	10	3	-	Isk	10	4	-
Černá Hora	5	2	-	Itálie	10	3	-
Česko	0	1	-	Irsko	2	1	4
Čína	8	2	-				
Dánsko	3	1	3				

## DHL ECONOMY SELECT

Doručení do stanoveného počtu dní v celé Evropě.

kg	Zóna 1	Zóna 2	Zóna 3	Zóna 4
Dokumentové i zboží základy				
1	2 072	2 481	2 928	2 946
2	2 421	2 952	3 429	3 717
3	2 456	3 056	3 495	4 053
4	2 491	3 160	3 561	4 389
5	2 526	3 264	3 627	4 725
6	2 630	3 324	3 687	4 810
7	2 734	3 384	3 747	4 895
8	2 838	3 444	3 807	4 980
9	2 942	3 504	3 867	5 065
10	3 046	3 564	3 927	5 150
11	3 066	3 589	3 970	5 205
12	3 086	3 614	4 013	5 260
13	3 106	3 639	4 056	5 315
14	3 126	3 664	4 099	5 370
15	3 146	3 689	4 142	5 425
16	3 166	3 714	4 185	5 480
17	3 186	3 739	4 228	5 535
18	3 206	3 764	4 271	5 590
19	3 226	3 789	4 314	5 645
20	3 246	3 814	4 357	5 700
21	3 271	3 844	4 400	5 755
22	3 296	3 874	4 443	5 810
23	3 321	3 904	4 486	5 865
24	3 346	3 934	4 529	5 920
25	3 371	3 964	4 572	5 975
26	3 396	3 994	4 615	6 030
27	3 421	4 024	4 658	6 085
28	3 446	4 054	4 701	6 140
29	3 471	4 084	4 744	6 195
30	3 496	4 114	4 787	6 250
35	3 581	4 259	4 872	6 425
40	3 666	4 404	4 957	6 600
45	3 751	4 549	5 042	6 775
50	3 836	4 694	5 127	6 950
55	3 921	4 839	5 212	7 125
60	4 006	4 984	5 297	7 300
65	4 091	5 129	5 382	7 475
70	4 176	5 274	5 467	7 650
80	4 630	5 870	6 135	8 532
90	5 084	6 466	6 803	9 414
100	5 538	7 062	7 471	10 296
200	10 078	13 022	14 151	19 116
300	14 518	18 982	20 831	27 936
Cena za každý další 1 kg nad 30 kg				
Od 30,1 do 70	17	29	17	35
Cena za každý další 5 kg nad 70 kg				
Od 70,1 do 300	227	298	334	441
Od 300,1 do 9 999	266	341	377	488

Dostupné do následujících zemí

- Belgie
- Bulharsko
- Dánsko
- Estonsko
- Finsko
- Francie
- Chorvatsko
- Irsko
- Itálie
- Litva
- Lotyšsko
- Lucembursko
- Maďarsko
- Monako
- Německo
- Nizozemsko
- Norsko
- Polsko
- Portugalsko
- Rakousko
- Rumunsko
- Recko
- Slovensko
- Slovinsko
- Španělsko
- Švédsko
- Švýcarsko
- Velká Británie

Obrázek 68 [39]



## 10.6 Reálné měření vibrací



Obrázek 69 Umístění senzorů na reálné jednotce

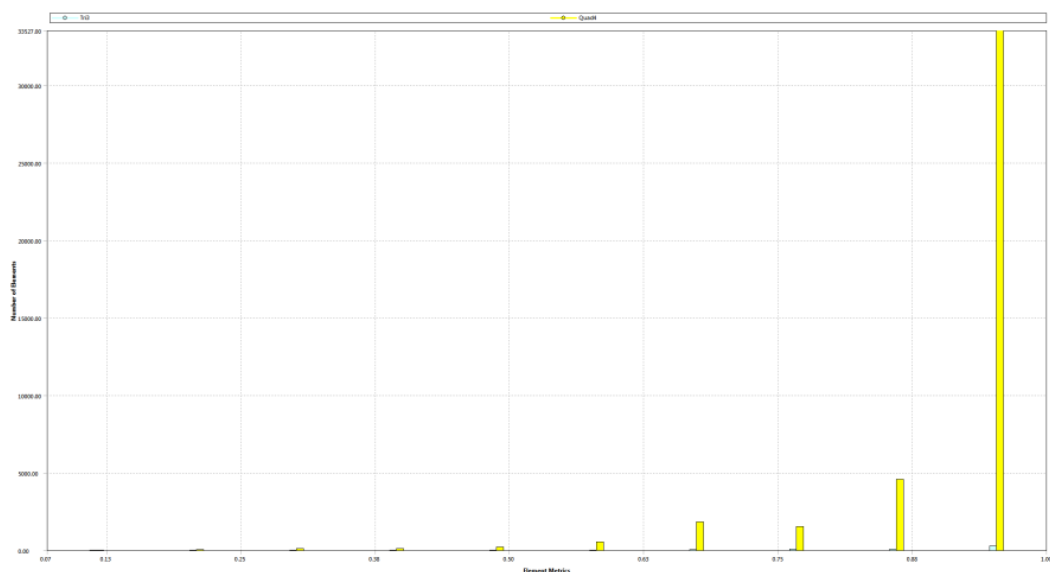


Obrázek 70 Umístění senzorů na reálné jednotce

## 10.7 Modální analýza - FMS

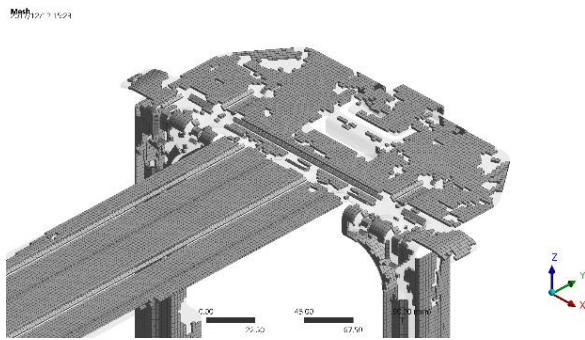
### 10.7.1 Kontrola sítě

Kontrola sítě je zobrazena na obrázku č. 71. Jak již bylo řečeno, k síťování modelu byla použita funkce „uniform“. Defaultní nastavení velikosti elementu bylo 1.848 [mm] a proto byl následně celý model zasíťován elementy o velikost 1.8 mm. Síť je tvořena pomocí hexaedrů a pentaedrů, jejich kvalita i výskyt zobrazen níže:

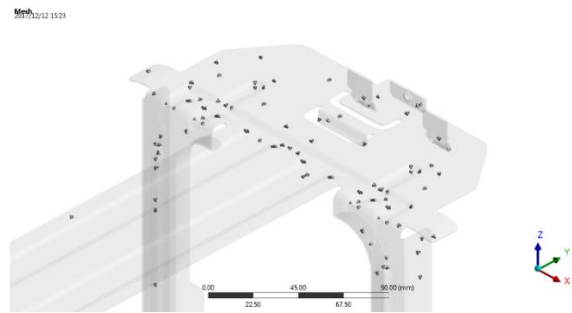


Obrázek 71

Na obrázku vlevo jsou zobrazeny hexaedry a na obrázku vpravo pentaedry.



Obrázek 72

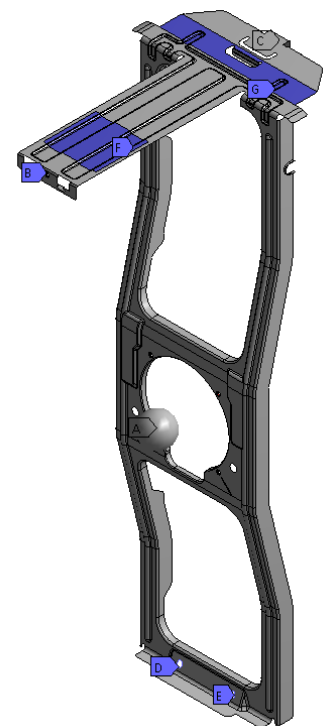


Obrázek 73

### 10.7.2 Vazby

V případě modální analýzy samotného FMS byl samozřejmě aplikován hmotný bod, jakožto vyjádření motoru a vrtule. Dále byly použity vazby typu „fixed support“ v místech, kde je FMS přišroubován k protikusům. To znamená ve spodní části dvakrát ke spodnímu plechu a v horní části dvakrát k hornímu plechu. Poslední vazba je typu „elastic support“, která má za úkol simulovat těsnění.

- A** Point Mass
- B** Fixed Support
- C** Fixed Support 2
- D** Fixed Support 3
- E** Fixed Support 4
- F** Elastic Support: 2.5 N/mm<sup>3</sup>
- G** Elastic Support 2: 2.5 N/mm<sup>3</sup>

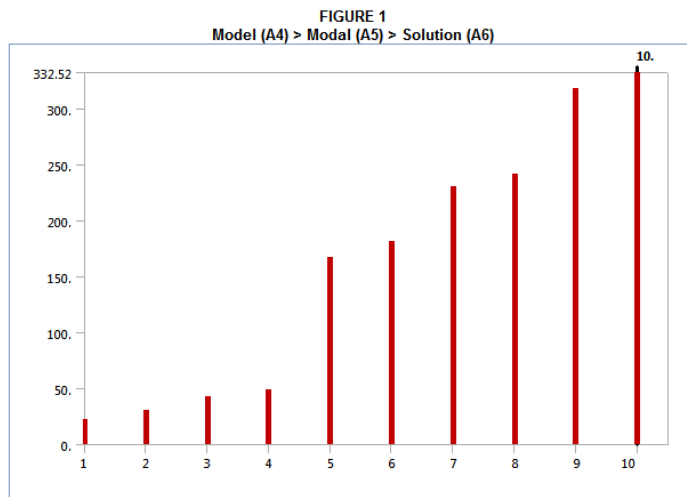


Obrázek 74

Obrázek 75

### 10.7.3 Výsledky

Na obrázcích níže jsou zobrazeny výsledky modální analýzy samotného FMS. Tedy prvních deset vlastních frekvencí. Důvodem, proč je to v této práci zmíněno je zobrazit co se stane, když se použijí vazby typu „fixed support“. V následující příloze budou zobrazeny výsledky modální analýzy celé skříně, které se poměrně výrazným způsobem liší.



Obrázek 76

TABLE 13  
Model (A4) > Modal (A5) > Solution (A6)

Mode	Frequency [Hz]
1.	22.714
2.	30.208
3.	43.27
4.	49.035
5.	167.51
6.	181.65
7.	230.41
8.	242.14
9.	318.58
10.	332.52

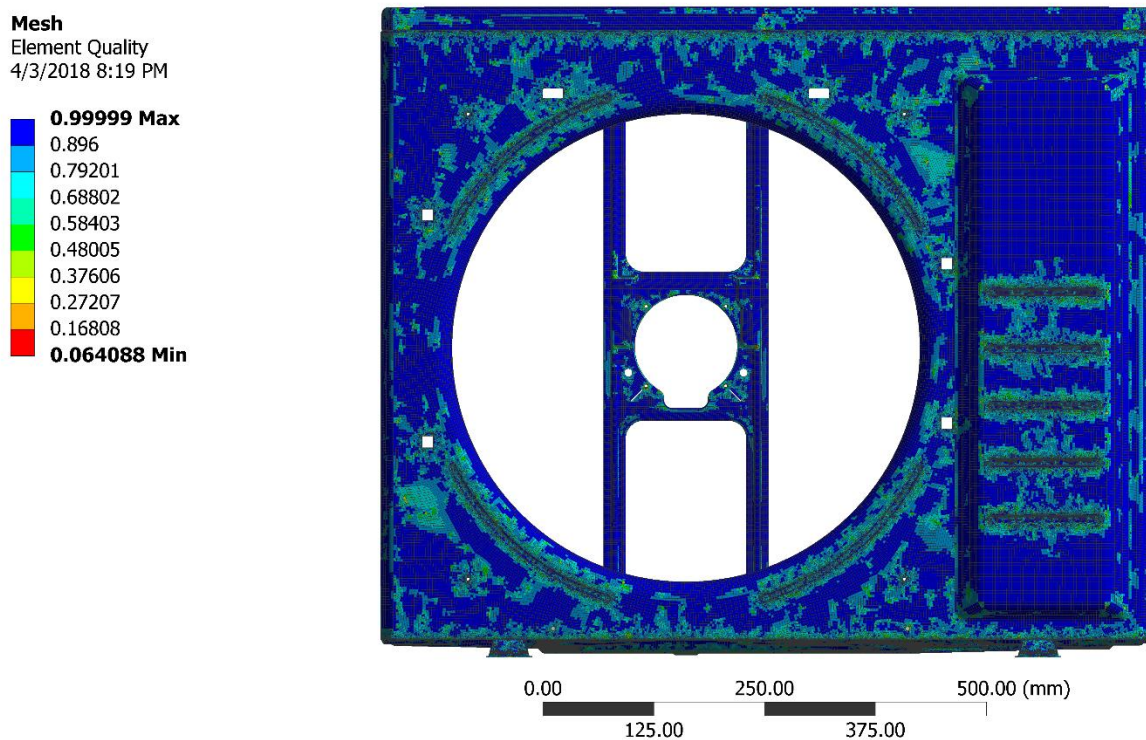
Obrázek 77

## 10.8 Modální analýza celé skříně

Aby úloha více odpovídala skutečnosti, byla do výpočtu zahrnuta celá skříň. To znamená FMS, spodní plech, horní plech, přední plech, pravý a levý plech.

### 10.8.1 Kontrola sítě

Na obrázku níže je zobrazeno hodnocení kvality elementů celé skříně v rozsahu od 0 do 1.

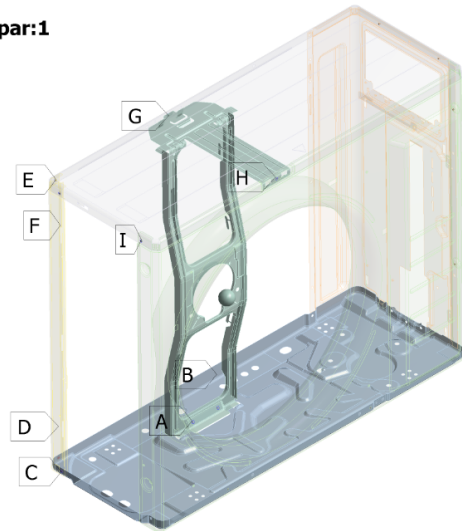


Obrázek 78

### 10.8.2 Vazby

**Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To fan\_motor\_stand\_surface.par:1**  
3/2/2018 8:16 PM

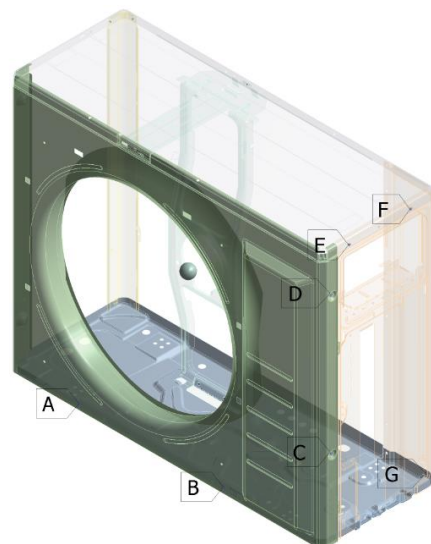
- A** Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To fan\_motor\_stand\_surface.par:1
- B** Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To fan\_motor\_stand\_surface.par:1
- C** Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To left\_side\_plat\_surface.par:1
- D** Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To left\_side\_plat\_surface.par:1
- E** Circular - left\_side\_plat\_surface.par:1 To top\_plate\_surface.par:1
- F** Circular - left\_side\_plat\_surface.par:1 To top\_plate\_surface.par:1
- G** Circular - fan\_motor\_stand\_surface.par:1 To top\_plate\_surface.par:1
- H** Circular - fan\_motor\_stand\_surface.par:1 To front\_plate\_surface.par:1
- I** Circular - front\_plate\_surface.par:1 To top\_plate\_surface.par:1



Obrázek 79

**Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To front\_plate\_surface.par:1**  
3/2/2018 8:17 PM

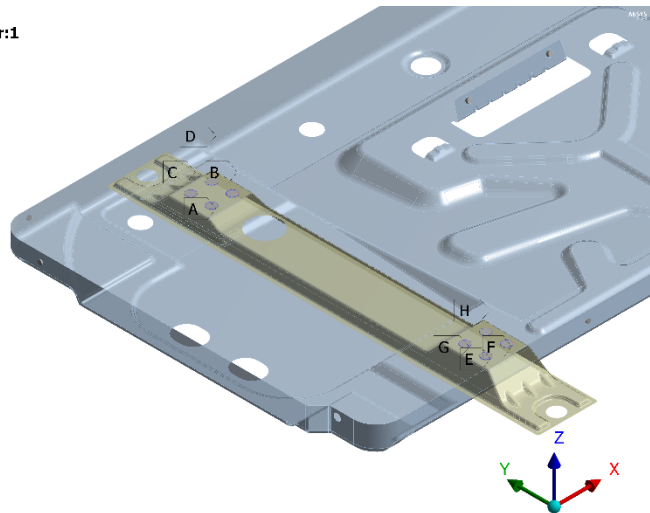
- A** Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To front\_plate\_surface.par:1
- B** Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To front\_plate\_surface.par:1
- C** Circular - right\_side\_plate\_surface.par:1 To front\_plate\_surface.par:1
- D** Circular - right\_side\_plate\_surface.par:1 To front\_plate\_surface.par:1
- E** Circular - right\_side\_plate\_surface.par:1 To top\_plate\_surface.par:1
- F** Circular - right\_side\_plate\_surface.par:1 To top\_plate\_surface.par:1
- G** Circular - bottom\_frame\_surface.par:1 To right\_side\_plate\_surface.par:1



Obrázek 80

Circular - installation\_leg\_surface.par:2 To bottom\_frame\_surface.par:1  
4/3/2018 8:26 PM

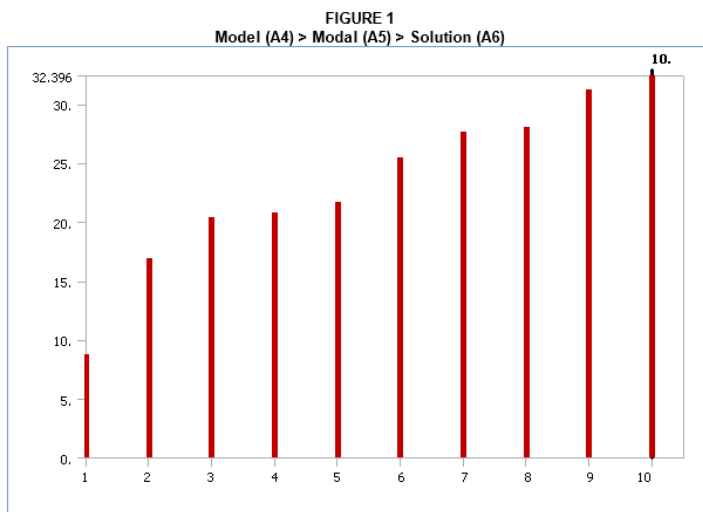
- A** Circular - installation\_leg\_surface.par:2 To bottom\_frame\_surface.par:1
- B** Circular - installation\_leg\_surface.par:2 To bottom\_frame\_surface.par:1
- C** Circular - installation\_leg\_surface.par:2 To bottom\_frame\_surface.par:1
- D** Circular - installation\_leg\_surface.par:2 To bottom\_frame\_surface.par:1
- E** Circular - installation\_leg\_surface.par:2 To bottom\_frame\_surface.par:1
- F** Circular - installation\_leg\_surface.par:2 To bottom\_frame\_surface.par:1
- G** Circular - installation\_leg\_surface.par:2 To bottom\_frame\_surface.par:1
- H** Circular - installation\_leg\_surface.par:2 To bottom\_frame\_surface.par:1



Obrázek 81

### 10.8.3 Výsledky

Na obrázcích níže jsou výsledky modální analýzy celé skříně s použitím vazby typu „beam“. Jak je z výsledků patrné, tak rozdíl je poměrně značný. Na základě toho výsledku bude pro další výpočty využíváný model celé skříně.



Obrázek 82

TABLE 19  
Model (A4) > Modal (A5) > Solution (A6)

Mode	Frequency [Hz]
1.	8.7195
2.	16.896
3.	20.355
4.	20.796
5.	21.624
6.	25.475
7.	27.629
8.	28.044
9.	31.24
10.	32.396

Obrázek 83