

Numerický model pneumatického lineárního aktuátoru

Lukáš Procházka

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Procházka**
Osobní číslo: **T12446**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Numerický model pneumatického lineárního
aktuátoru**

Zásady pro vypracování:

- Literární přehled
- Návrh numerického modelu
- Řešení modelu
- Vyhodnocení modelu

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: PROCHÁZKA LUKÁŠ

Obor: KTZ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 12.5.2014



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užíje-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jim dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá rozbořem chování pryžové membrány, přičemž geometrie a procesní parametry této membrány byly zadány firmou WOCO STV s.r.o.

V teoretické části diplomové práce se bude pojednávat o elastomerech a pryži, jako konstrukčních materiálech, jejich chování, vlastnostech, struktuře.

Praktická část bude zaměřena na seznámení s FEM software MSC MARC a MSC PATRAN, testování materiálu, vymodelování membrány a její simulace za podmínek, které budou splňovat požadavky zadavatele.

Cílem analýzy bude určit možné příčiny hystereze v pohybu táhla aktuátoru, které by mohly být způsobeny pouze konstrukcí a tvarem celého aktuátoru a jeho jednotlivých součástí.

Klíčová slova:

Elastomer, Pryž, MSC PATRAN, MSC MARC, Pneumatický lineární aktuátor

ABSTRACT

This Master's thesis is dealing with a behaviour of a rubber membrane, which geometry has been defined as well as its process parameters by WOCO STV s.r.o. company.

A theoretical part of Master's speaks about elastomers and rubber as a construction material, its behavior, properties and inner structure.

The aim of a practical part is an introduction to a FEM software MSC MARC and MSC PATRAN, testing a material, modeling of membrane with its simulation by cases, which fulfill a task of WOCO STV company.

The target is to determine a possibilities of hysteresis in actuator-rod movement, which could be only caused by geometry or construction of single a parts.

Keywords:

Elastomer, Rubber, MSC PATRAN, MSC MARC, Pneumatic Linear Actuator

Rád bych poděkoval v první řadě neskonale trpělivému vedoucímu této diplomové práce, panu docentu Jakobovi Javoříkovi, který mi vždy předal tolik zkušeností, abych se dostal o kus hlouběji v pochopení problematiky, kterou jsem se v rámci práce na numerickém modelu zabýval. Dále bych moc rád vyjádřil díky všem, kteří mne podpořili (i nepodpořili), neboť v obou případech jste mne drželi při síle a chuti usilovně pracovat.

„Každý člověk byl zrozen pro nějaké dílo. Každý, kdo chodí po této zemi, má nějaké povinnosti k životu.“

(Ernest Hemingway)

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

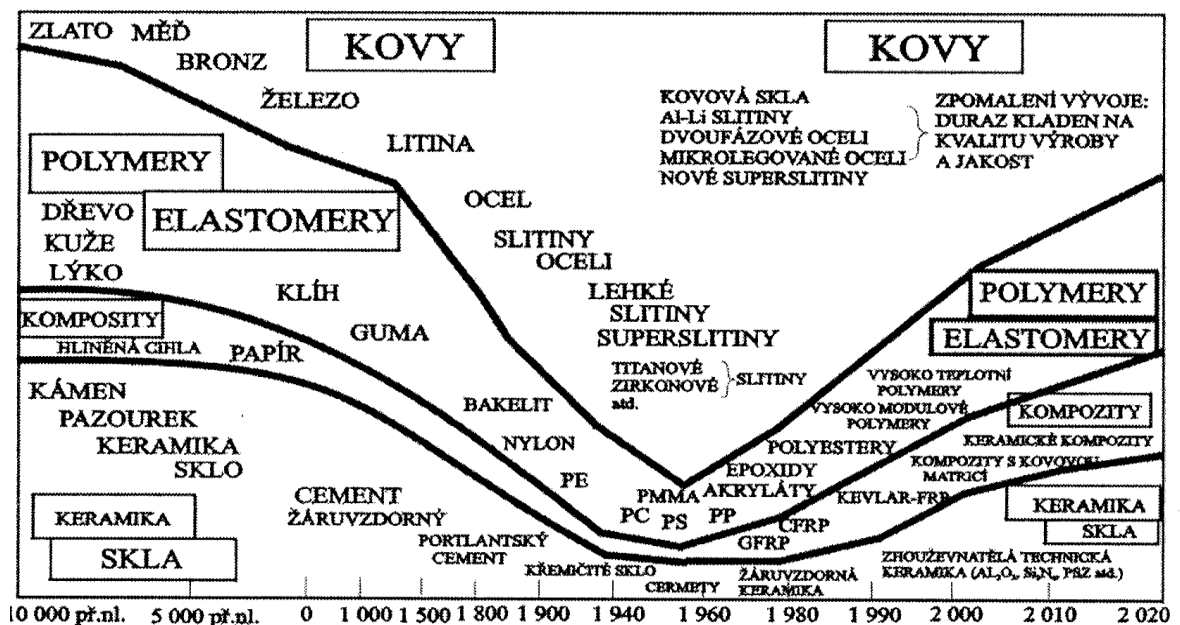
OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 PNEUMATICKÉ AKTUÁTORY	13
1.1 REGULACE TURBODMYCHADEL	13
1.1.1 Regulace klapkou WG (Waste - Gate)	13
1.1.2 Regulace VNT (Variable Nozzle Turbine).....	13
1.1.3 Regulace VGT (Variable Geometry Turbo)	15
1.2 DRUHY AKTUÁTORŮ DLE PRINCIPU.....	16
1.2.1 Aktuátor WG+ (přetlakový pro Waste – Gate systém)	17
1.2.2 Aktuátor WG- (podtlakový pro Waste – Gate systém)	17
1.2.3 Hodnocení současného stavu	18
2 POLYMERY	19
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY	19
2.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ.....	19
2.2.1 Dle tvaru molekul	19
2.2.2 Dle původu polymerů.....	20
2.2.2.1 Přírodní (Biopolymery).....	20
2.2.2.2 Uměle vytvořené (Syntetické)	20
2.2.3 Dle chování vnitřní struktury při tepelné zátěži.....	21
2.2.3.1 Termoplasty	21
2.2.3.2 Reaktoplasty	21
3 ELASTOMERY	22
3.1 OBECNÉ VLASTNOSTI PRYŽE	22
3.2 SLOŽENÍ KAUKUKOVÉ SMĚSI	24
3.2.1 Kaučuky	25
3.2.1.1 Přírodní kaučuky (NR – Natural Rubber)	25
3.2.1.2 Syntetické kaučuky	27
3.2.2 Plniva	32
3.2.2.1 Saze	34
3.2.2.2 Minerální plniva	34
3.2.3 Vulkanizační činidla	34
3.2.4 Aktivátory a urychlovače, retardéry.....	35
3.2.5 Ochranné látky proti degradaci a únavě	36
3.2.6 Změkčovadla	37
3.2.7 Pigmenty	38
3.2.8 Nadouvadla	38
4 HYPERELASTICITA PRYŽOVÝCH MATERIÁLŮ	39

4.1	SOUČASNĚ POUŽÍVANÉ HYPERELASTICKÉ MODELY VE FEM	42
4.1.1	Polynomická funkce	42
4.1.2	Neo-Hookean	42
4.1.3	Yeoh.....	43
4.1.4	Mooney-Rivlin	43
4.1.5	Arruda-Boyce.....	44
4.1.6	Gent.....	45
4.1.7	Ogden	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST	46
5	STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	47
6	VSTUPNÍ PARAMETRY K ANALÝZE.....	48
6.1	KONSTRUKCE AKTUÁTORU	48
6.2	MECHANICKÉ VLASTNOSTI PRYŽOVÉ MEMBRÁNY	51
6.3	PŘÍPRAVA GEOMETRIE PRO IMPORT DO FEM SOFTWARE.....	52
7	ANALÝZA MEMBRÁNY AKTUÁTORU VE FEM MSC. MARC.....	53
7.1	MSC. MARC/MENTAT A PATRAN FEM SYSTÉMY	53
7.2	PRE - PROCESSING V SYSTÉMU PATRAN.....	54
7.2.1	Import/tvorba geometrie.....	54
7.2.2	Tvorba materiálových vlastností	55
7.2.3	Tvorba konečně - prvkové sítě	57
7.2.4	Aplikace okrajových podmínek, případy zatížení.....	58
7.2.4.1	Ukotvení kraje membrány v pouzdře	58
7.2.4.2	Nasunutí kovového jádra na membránu	59
7.2.4.3	Aplikace podtlaku (1. a 2. cyklus).....	59
7.2.4.4	Uvolnění tlaku	59
7.2.4.5	Případy zatížení (Load Cases) a potvrzení úlohy řešiči	60
7.2.4.6	Závěr k práci v systému MSC.PATRAN	60
8	POST-PROCESSING V SYSTÉMU MSC MARC.MENTAT	61
8.1	ANALÝZA HYSTEREZE PRYŽOVÉ MEMBRÁNY	61
8.1.1	Simulace reálné funkce membrány.....	61
8.1.2	Hystereze pro model bez tkaniny	64
8.1.3	Porovnání vlivu tření na hysterezi pro ryze pryžovou membránu.....	66
	ZÁVĚR.....	67
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	68
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	71
	SEZNAM TABULEK.....	73
	SEZNAM GRAFŮ	74

ÚVOD

V současné době se v praxi člověk setkává stále více s nekovovými materiály, přičemž lze konstatovat, že se konstrukční materiály dělí na zhruba třetiny. Podíl kovových materiálů tedy výrazně klesl vzhledem k minulosti, a pakliže je to možné, hledají se alternativní řešení v materiálech nekovových. Druhou třetinu reprezentují materiály keramické, jakožto součást kompozitní struktury, které budou (dle predikovaného trendu) brzy plnit významnou roli v nahrazování standardních konstrukčních materiálů. Poslední skupinou jsou konstrukční polymery, jež doplňují tento celek konstrukčních materiálů.



Obrázek 1 – Chronologie využití konstrukčních materiálů (převzato z [5])

Mezi tyto polymery se řadí i tzv. elastomery, jejichž významnost utvrzuje ten fakt, že se mohou stát v součástkové základně stroje rozhodující vzhledem k životnosti i spolehlivosti. [1]

Vývoj národního hospodářství byl již v minulosti velmi úzce spjat se spotřebou elastomerů, a tedy pryžových výrobků, kdy mají i dnes veliký význam obzvláště pryžové komponenty pro automobilový, dopravní a strojírenský průmysl, pro těžbu nerostů či rudných surovin, stavebnictví, zemědělství, potravinářství a také zdravotnictví. [2]

V současnosti vykazuje rozvoj technologií zpracovávání polymerů meziroční nárůst zhruba 15 – 20% v souladu s rozvojem spotřebního a také průmyslu automobilového. [1]

Firma WOCO STV s.r.o. je jednou z firem na poli automobilového průmyslu, která se zabývá inovacemi funkčních řešení pro karoserie, pohony v oblasti akustiky, aktuatoriky a polymerních systémů.

Cílem této diplomové práce je dle zadání této firmy vytvořit konečně-prvkový model, analýzu a simulaci pryžové membrány, která je součástí aktuátoru.

I. TEORETICKÁ ČÁST

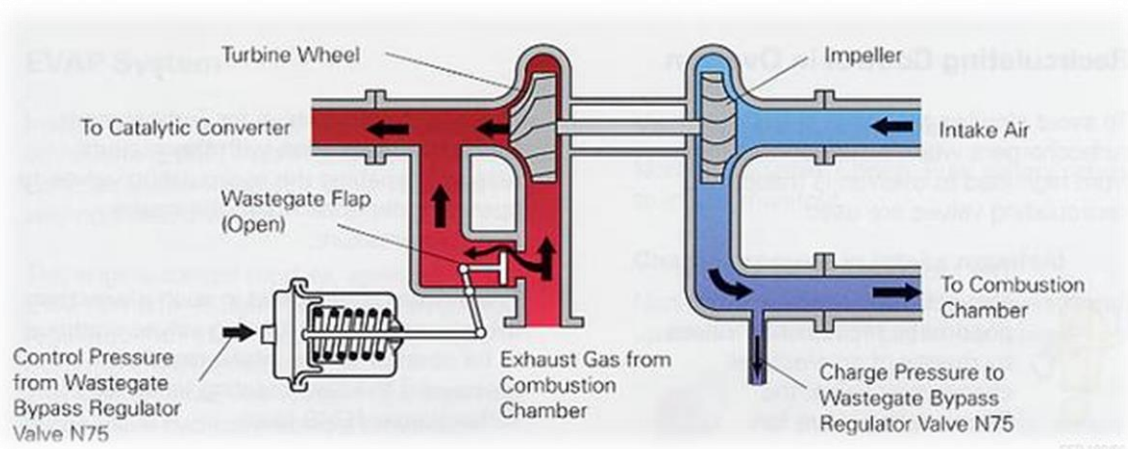
1 PNEUMATICKÉ AKTUÁTORY

Pneumatické aktuátory, dále jen aktuátory, slouží jako ovládací prvky pro WG (Waste - Gate) a VNT (Variable Nozzle Turbine) regulační systémy u turbodmychadel. [14]

1.1 Regulace turbodmychadel

1.1.1 Regulace klapkou WG (Waste - Gate)

Regulace za pomoci klapky Waste - gate je nejjednodušší formou regulace průtoku objemu výfukových zplodin turbínou s poměrně vysokou efektivností. V čase, kdy je WG ventil otevřen, výfukové plyny sníží pracovní tlak, který působí na turbínové kolo, přičemž dojde ke snížení užité práce turbodmychadla. Na straně turbíny je v důsledku toho regulována efektivita, stejně tak účinnost, v určitých nelineárních fázích, čímž je dosaženo pokrytí daného spektra otáček motoru. [14]



Obrázek 2 – Schéma turbodmychadla s regulací za pomoci WG klapky (převzato z [13])

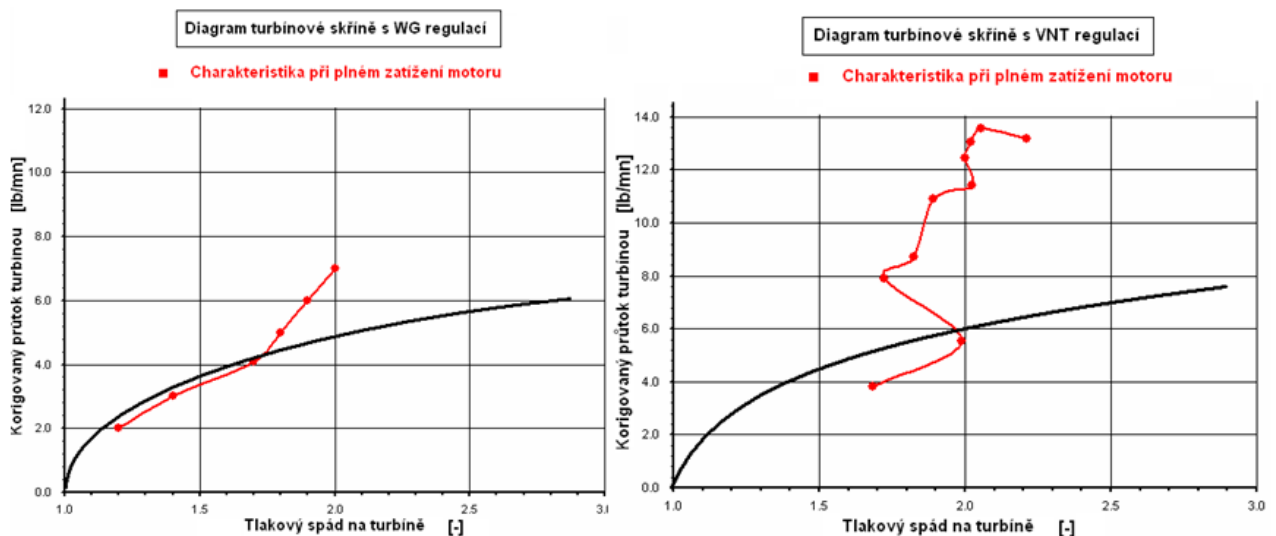
1.1.2 Regulace VNT (Variable Nozzle Turbine)

„Variable Nozzle Turbine“ nebo také „Variabilní Geometrie Lopatek“ je typ regulace turbodmychadla za účelem celkového zvýšení efektivity. Díky této technologii lze umožnit v podstatě plynulou změnu průtoku výfukových plynů turbínovou skříní, čímž lze také docílit zvýšení využití spektra otáček motoru. [14]

Z hlediska rozvoje a výzkumu má technologie regulace VNT velký potenciál se neustále zdokonalovat, nacházet nové cesty k funkčnímu řešení, optimalizaci, mechanické sofistikovanosti a hraje také velmi významnou roli pro nové emisní standardy. [14]



Obrázek 3 – Řez turbodmyhadla s regulací za pomoci VNT (převzato z [12])



Obrázek 4 – Porovnání charakteristik regulací WG a VNT (převzato z [14])

Porovnáním obou charakteristik můžeme tedy jednoznačně konstatovat, že s pomocí technologie VNT jsme schopni turbodmyhadlo regulovat i při zhruba dvojnásobném průtoku spalin turbinou.

Optimalizace parametrů díky nástupu technologie VNT:

[14]

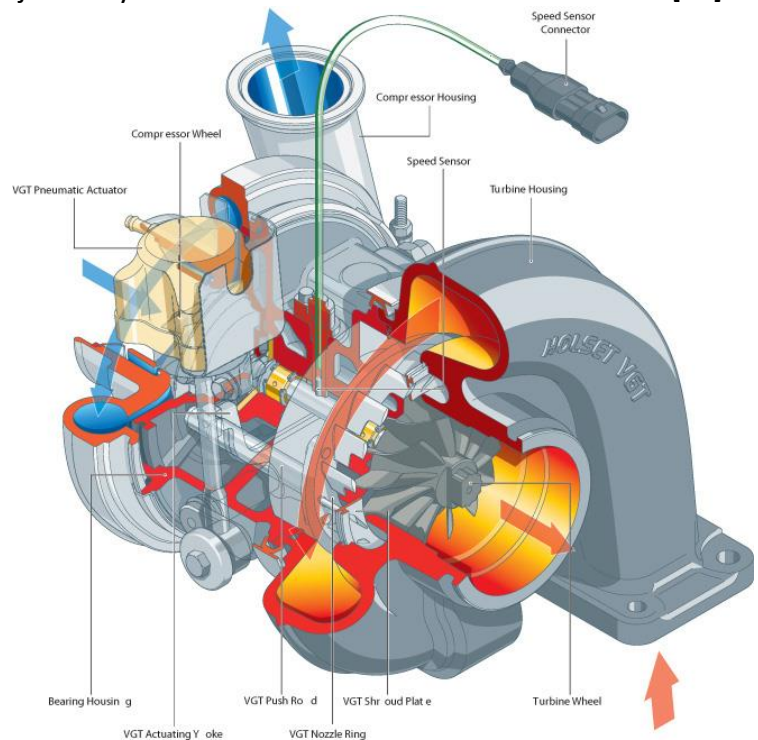
Přesná regulace poměru vzduch / palivo v širokém otáčkovém spektru motoru

- Snížení emisí oxidu dusíku a spotřebu pohonných hmot
- Zvýšení krouticího momentu motoru při nižších otáčkách
- Zvýšený výkon u přechodového zatížení
- Optimálně zvýšený výkon motoru
- Zvýšený maximální krouticí moment motoru
- Zvýšení brzdě účinnosti motoru
- Snížení reakční doby motoru při „kick - down“ režimu a z klidu
- Regulace výfukových plynů a jejich následná harmonizace

1.1.3 Regulace VGT (Variable Geometry Turbo)

Princip VGT je v podstatě obdobný jako u technologie VNT s tím rozdílem, že otevření obtoku je řízeno z axiálního směru turbínové skříně. Vývoj tohoto systému byl motivován nižšími výrobními náklady. Nyní se vývoj tohoto typu regulace ubírá směrem k aplikaci pro turbodmychadla osobních a nákladních automobilů. Technologie má tu výhodu, minimalizuje mechanicky pohyblivé díly, mnohem lépe využívá tlakových poměrů pro přeplňování a integrovaný kontrolní modul „On - Board – Control“, který přebírá diagnostiku a základní kalibraci místo řídicí jednotky motoru.

[14]



Obrázek 5 – Řez turbodmychadlem s regulací za pomoci VGT (převzato z [11])

1.2 Druhy aktuátorů dle principu

Regulace „Waste - Gate“ a „Variable Nozzle Turbine“ je ovládána pneumatickými aktuátory, přičemž rozeznáváme dva druhy těchto aktuátorů, podtlakové a přetlakové.

Podtlakové (-) a přetlakové (+) aktuátory byly prvními regulačními prvky realizovanými na regulační WG okruh. Prvek je ve své podstatě jednoduchým kinematickým mechanismem, který lze však využít s velkým potenciálem regulace. [14]

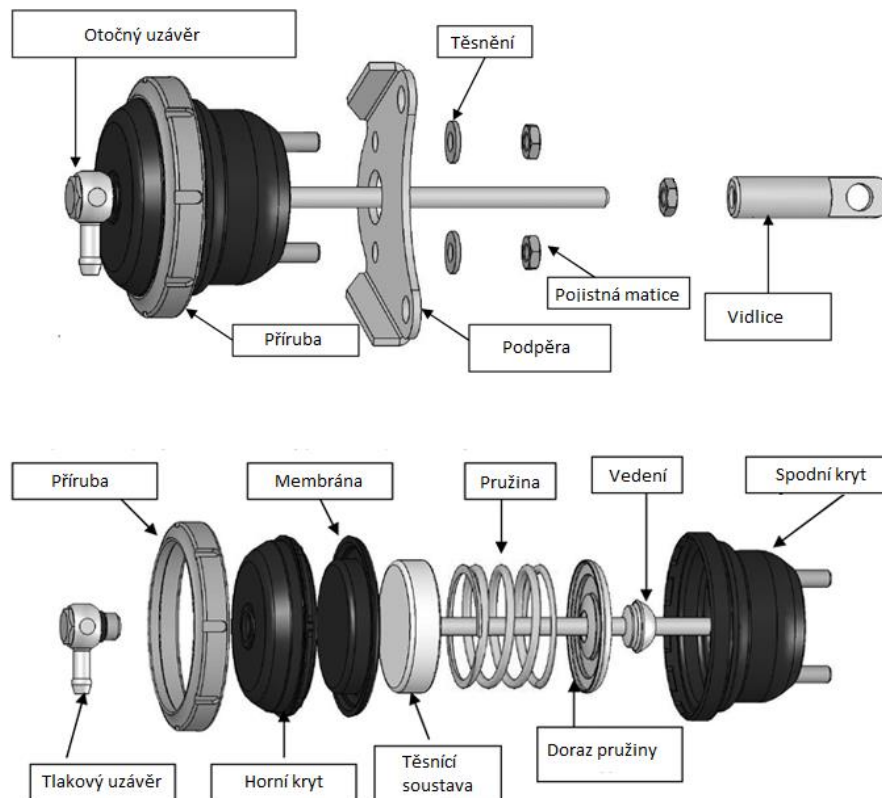
S postupem času se aktuátory rozšířily i na řízení VNT systémů menších turbodmychadel. Tento důmyslně konstruovaný prvek je založen na podstatě vzduchové regulace z vlastního okruhu turbodmychadla. Je řízeno buď podtlakem či přetlakem vzduchu. [14]

V oblasti testování turbodmychadel se aktuátory používají jednak jako regulační členy přímo pro termodynamický cyklus turbodmychadla, zároveň však hlavně jako regulační simulátor pro vyvození různých zátěžových cyklů, jež představují nárazová proudění zplodin turbínovou skříň. V současnosti se v praxi s převahou používají přetlakem ovládané aktuátory „Waste - gate řízený přetlakem“ (WG+), což je pro simulaci cyklických změn a také z hlediska celkové účinnosti obvodu nejspolehlivější, protože přetlakem ovládaný okruh není tolik náchylný na netěsnosti. [14]



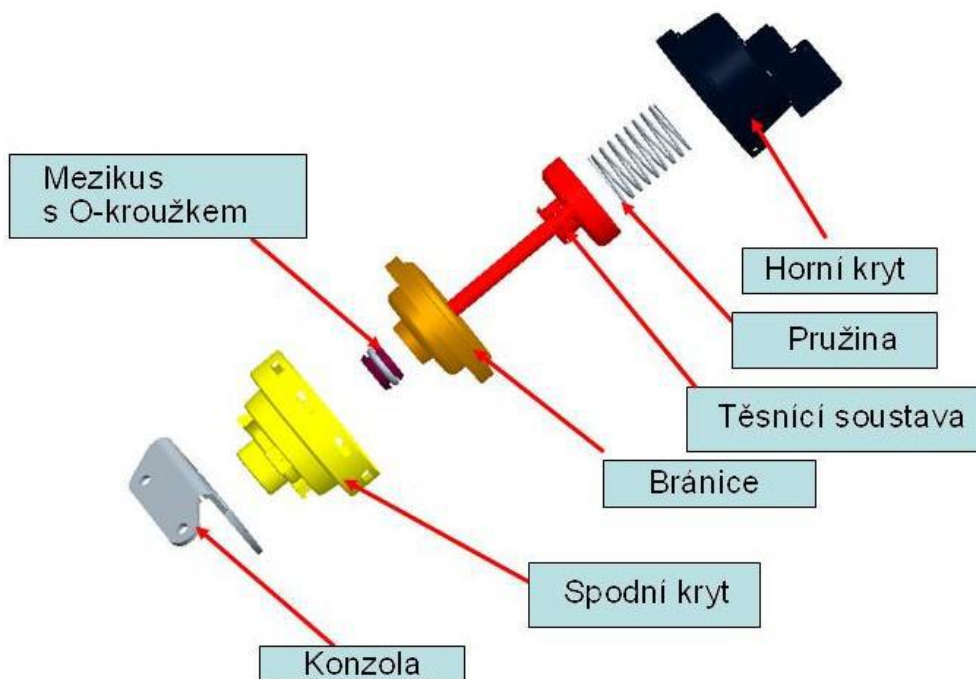
Obrázek 6 – Umístění aktuátoru k turbodmychadlu (převzato z [15])

1.2.1 Aktuátor WG+ (přetlakový pro Waste – Gate systém)



Obrázek 7 – WG+ aktuátor (převzato z [15])

1.2.2 Aktuátor WG- (podtlakový pro Waste – Gate systém)



Obrázek 8 – WG- aktuátor (převzato z [14])

1.2.3 Hodnocení současného stavu

V současnosti je zájmem konstrukce aktuátorů na základě polymerních materiálů, čímž lze minimalizovat rozměry a tím tyto prvky lépe zasadit do celkového konstrukčního řešení turbodmychadla. Dalším výhodou aktuátorů vyrobených z polymerů je redukování akustického tlaku. [14]

Toto je tzv. „metoda izolace“, kdy je snahou konstrukce, pohltit co možná největší množství akustické energie, neboť negativní vliv hluku na lidský organismus začíná již při hladině akustického tlaku okolo 60 dB. [7]

Mezi další výhody patří samozřejmě odolnost vůči korozi, eliminace sekundárních operací – pokovování lisování, čímž dochází ke snížení ceny výrobního materiálu, v jistých směrech lepší odolnost v pracovním prostředí. Největší otázkou, jíž bylo nutno si položit a bezprostředně řešit, byla problematika tepelné roztažnosti, odolnosti vůči cyklické únavě, creepu a relaxaci napětí, otěru. Rozmezí pracovních teplot bylo nutno udržet na hodnotách v rozmezí od -40°C do 180°C . [14]

V současnosti se také klade veliký důraz na elektronické řízení funkce systémů, což pro aktuátory jakéhokoliv typu znamená potřebu umístit snímači otevřené a zavřené polohy. Tím lze reagovat na zpětnou vazbu do řídicí jednotky motoru a lze sofistikovaněji regulovat celý motor. Aktuátory jsou pro určité turbodmychadla vybavovány snímači polohy. Nejjednodušší je snímači otevřené a zavřené polohy, a to v desítkové soustavě. V současné době se můžeme také setkat se snímači, jež pracují v celém rozsahu pracovního zdvihu aktuátoru. Velmi významně přispělo ke kontrole průběhu přepínání elektronické snímači polohy, zároveň také ke zvýšení efektivní účinnosti turbodmychadla a celkovému zlepšení vztahu k životnímu prostředí. [14]

2 POLYMERY

Protože prvek numerického (FEM) modelu aktuátoru, kterým se tato diplomová práce zabývá, je membrána vyrobená z pryže, bude tato kapitola věnována základním faktům, které je třeba si osvojit před zahájením následující kapitoly.

2.1 Základní pojmy

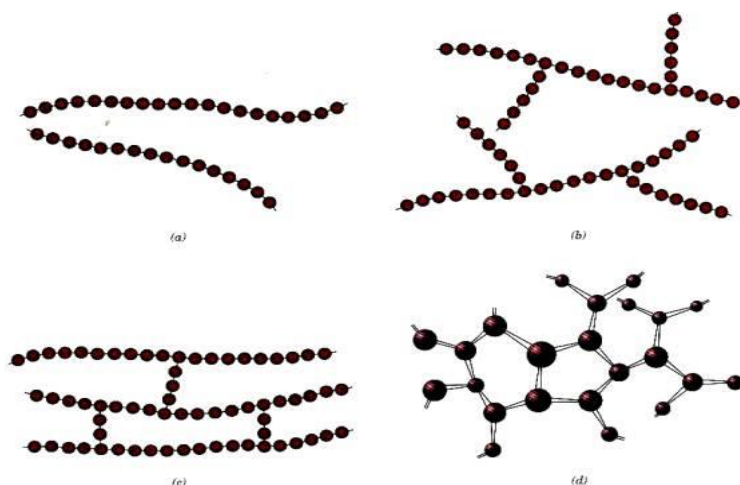
Polymer jsou makromolekulární látky. Význam slova polymer znamená doslova „mnoho částí“ (poly = mnoho, meros = část), kdy z jednoho meru (jedné části), vznikají polyreakcí dlouhé makromolekulární řetězcové struktury. [3]

Polyreakcí vznikají dlouhé makromolekulární řetězce, přičemž jejich struktura může být buď amorfní, semikrystalická nebo i krystalická. Typickým zástupcem amorfního polymeru je přírodní kaučuk, se svou náhodně uspořádanou molekulovou strukturou. Krystalické polymery jsou tvrdé a křehké a semikrystalické polymery, které jsou složeny v různých poměrech z krystalické i amorfní struktury, vykazují pružné deformace, tok (creep) i plastické deformace. [5]

2.2 Rozdělení polymerů

2.2.1 Dle tvaru molekul

Jednotlivé molekuly polymeru, respektive jejich uspořádání, vyobrazuje následující obrázek. Řetězce mohou být lineární (a), rozvětvené (b), se zkříženými články (c) a nebo sesíťované (d). [16]



Obrázek 9 – Struktura polymerů (převzato z [16])

- a) Lineární – Jednoduchá molekula, kdy ve dvou reakčních místech na každém konci řetězce chemicky navážou koncové molekuly sousední molekulu. Tak vznikají lineární struktury. Mezi těmito pružnými řetězci působí slabé Van der Waalsovy vazby (patří sem polyetylén, polyvinylchlorid, polystyrén, polymethylmetakrylát, nylon a též např. fluorokarbyny).
- b) Rozvětvené - Polymery s makromolekulami, kterým z hlavního řetězce vystupují postranní větve. Struktura rozvětveného polymeru má menší hustotu, než polymery lineární.
- c) Se zkříženými články - Sousední řetězce těchto polymerů jsou mezi sebou propojeny články, které jsou k sobě vázány pomocí silné kovalentní vazby. Sem patří zejména elastické materiály, jako je např. přírodní a syntetický kaučuk.
- d) Prostorově sesíťované - Trojrozměrné monomery, které mají tři aktivní kovalentní vazby, mohou vytvářet a spojovat strukturu také směrem do prostoru a vznikají tak prostorově zesíťované molekuly. Tyto polymery mají jiné fyzikální a chemické vlastnosti než polymery lineární. Patří sem epoxidy a fenolformaldehydy.

[16]

2.2.2 Dle původu polymerů

2.2.2.1 Přírodní (Biopolymery)

Mezi nejdůležitější biopolymery patří bílkoviny, polysacharidy, polynukleotidy a polymery dienů, kdy například glukosový polysacharid je základním stavebním materiálem většiny rostlin, ale i základem k výrobě viskózních vláken, které se nazývají umělé hedvábí, přírodních vláken (konopí, bavlna), přírodních pryskyřic (jantar, sosnová pryskyřice, olivová pryskyřice) a také přírodních kaučuků, o kterých bude podrobně psáno v následující kapitole. Biopolymery mohou být původní nebo chemicky modifikované. [3]

2.2.2.2 Uměle vytvořené (Syntetické)

Uměle vytvořené polymery jsou většinou založeny na řetězci uhlíkových atomů, přičemž se v řetězci i atomy O, N, S, silikony mají řetězec tvořený střídajícími se atomy Si a O.

Mezi syntetické polymery patří většina termoplastů (PE, PP,PVC, PS, PMMA, PA), reaktoplastů (PUR, PES, epoxidové a fenolové pryskyřice) a elastomerů (silikony, styrol-butadien, cys 1 - 4 polyizopren, butadien - akrylonitril) [8]

2.2.3 Dle chování vnitřní struktury při tepelné zátěži

2.2.3.1 Termoplasty

Plasty, které za působení tepla měknou, stávají se materiály viskózními. Při ochlazení se stávají opět látkami tuhými, a to při zachování stejného chemického složení. Mezi makromolekulami vznikají během procesu tuhnutí fyzikální vazby, které se opět rozpadají při ohřevu, proto je lze opakovaně tvarovat. Termoplast může být amorfní či krystalický.

[4]

2.2.3.2 Reaktoplasty

Plasty, které viskózním stavem procházejí pouze jednou, a to před sesíťováním, které je chemické povahy. Při vystavení reaktoplastu tepelné zátěži se chemicky mění, tvrdnou, po vytvrzení se jejich tvar teplem nemění a do plastického stavu je již nelze převést.

[4]

V porovnání s termoplasty vynikají reaktoplasty tuhostí a tvrdostí, teplotní odolností a tvarovou stálostí za tepla a s tím spojenou odolností proti degradaci vlivem povětrnosti. Závislost modulu pružnosti na teplotě není tak vysoká jako u termoplastů, proměnlivost provozních teplot není tedy příliš vysoká. Nevýhodou reaktoplastů je nízká tažnost.

[8]

3 ELASTOMERY

V této kapitole se bude diplomová práce zabývat podrobným popisem elastomerních materiálů (pryží), jejich charakteristikám, zařazení, zpracování a aplikaci v praxi.

Obecně lze elastomery považovat za vysoce kondenzované plyny, neboť velká část dílčích monomerů se vyskytuje v plynném skupenství. [5]

Elastomery jsou výjimečné svou velkou pružnou deformací. Mnoho elastomerních materiálů má při stejné teplotě (nad bodem skelného přechodu) přibližně stejné hodnoty smykového modulu G či tvrdosti, přičemž teplota a některé další parametry mají výrazný vliv na jejich vlastnosti. [5]

Kaučuky, jsou látky, které tvoří základní složku kaučukové směsi a následně i pryže, tedy vulkanizátu kaučukové směsi. Kaučuky se dle původu dělí na přírodní a syntetický kaučuk. [2]

3.1 Obecné vlastnosti pryže

Pryžové materiály se v mnoha směrech liší od standardních konstrukčních materiálů, zejména kovů a slitin. Elastomery jsou schopné díky své viskoelastické povaze ve velké míře pohlcovat kinetickou energii, což v podstatě znamená její přeměnu na energii tepelnou. Pryžové materiály se od standardních konstrukčních materiálů obecně liší: [6]

- Relativně úzkým teplotním intervalem použití
- Poměrně velký vliv času na všechny jednotlivé vlastnosti
- Schopností opakovaně a bez porušení, snášet poměrně velké deformace
- Vysoká elasticita (schopnost návratu do stavu před zatížením)
- Velká chemická stabilita (využití k ochraně kovů a jiných klasických konstrukčních materiálů před korozí)
- Velmi dobré elektroizolační vlastnosti
- Nepropustnost pro vodu i plyny
- Výsledné vlastnosti pryže určuje nejen skladba směsi před zvulkanizováním, ale i tvar finálního produktu, vulkanizační podmínky a typem výrobní technologie
- Pryžové dílce namáhané dynamicky nejprve degradují uvnitř struktury, teprve s podstatným odstupem času lze pozorovat trhliny na povrchu [1[6]

Rozdělení vlastností, které charakterizují materiál, lze provést do dvou základních skupin, a to dle využití pro konstrukční prvky, na fyzikální a chemické. Tyto vlastnosti se však mohou lišit za různých zpracovatelských podmínek, způsobu výroby či tepelné zátěže. Vlastnosti lze považovat za výhodné či nevýhodné dle konkrétního situačního řešení. Příkladem lze uvést tepelnou a teplotní vodivost nebo bobtnání. [5]

Zástupci v technické praxi jsou zejména takové fyzikální vlastnosti, jako tvrdost, pružnost, pevnost, houževnatost a plasticita materiálu. Pro potřeby konstruktéra je však potřeba rozdělit fyzikální vlastnosti podrobněji, konkrétně modul pružnosti E [MPa] v tahu či tlaku, ve smyku G [MPa], objemový modul pružnosti K [MPa] a poissonův poměr příčné kontrakce μ [-] [1]

Výše uvedené vlastnosti pryže jsou tedy dány složením směsi a strukturou použitého kaučuku, přičemž tyto vlastnosti popisuje kinetická teorie pružnosti, ze které vyplývá, že základní vlastností elastomerů je právě elasticita. [1]

Elasticita se projevuje tím způsobem, že lze elastomery deformovat poměrně malou silou v tahu, tlaku, ohybu, krutu či kombinovaně, a to i v mnohem větším rozsahu, než jiné konstrukční materiály. Míru deformace, které lze dosáhnout ovlivňuje skladba elastomeru, kdy se ve struktuře materiálu, podle kinetické teorie pružnosti, nacházejí v nezatíženém stavu řetězce, jako neuspořádaná makromolekulární klubka. Tyto řetězce se z klubek při působení zatížení rozvíjejí a napřimují své hlavní větve ve směrech působení deformace, což má přirozeně za následek vznik vnitřních napětí, a to z důvodu snahy zachovat svůj výchozí stav, tzn. Stav s větší entropií. U této teorie existuje předpoklad uspořádání řetězců do stavu tak, aby se při deformaci mohly segmenty řetězce pohybovat. [1]

Charakter všech elastomerů je dán uspořádáním jejich molekul a vzájemnými reakcemi během deformace mezi nimi. Vlastnosti pryže lze dále modifikovat vznikem primárních vazeb mezi molekulami, tedy vulkanizací. Mimo to existují mezi molekulami i mezimolekulové neboli sekundární vazebné síly, které jsou závislé na teplotě. [5]

Pro elastomery je důležitý tvar distribuční křivky molekulových hmotností, a to tak, že čím širší bude distribuce molekulových hmotností, tím méně bude plasticita ovlivňována teplotou. Nízkomolekulární frakce vulkanizují pomalu a ovlivňují tak celý vulkanizační proces. Vysokomolekulární frakce jsou houževnaté a tím zhoršují zpracovatelské vlastnosti v operacích před zvulkanizováním. [1]

Při výběru konkrétní pryže, respektive jejích vlastností, pro specifické účely, používáme normalizační třídění. Orientační třídění dodnes zahrnuje základní fyzikální vlastnosti, jakou jsou tvrdost, pevnost, tažnost, elasticita, strukturní pevnost atd. K těmto vlastnostem je však třeba uvést řadu dalších vlastností, jako odolnost proti vlivu prostředí, v němž dílec bude pracovat (světlo, ozón, maziva), odolnost proti dynamickému namáhání (často i za zvýšených teplot), elektrické vlastnosti při střídavém i stejnosměrném proudu (izolační odpor, ztrátový úhel, dielektrická konstanta, závislost na frekvenci) a jiné. Výběr vhodných vlastností pryže je tedy velmi závislý oblasti použití výrobku. [1]

Každý výrobek či komponent má určitou životnost a v případě elastomerů probíhají jisté procesy stále i po jejich vulkanizaci, zejména v závislosti na čase, teplotě a prostředí, po celou dobu jejich existence. Technický život pryží je tímto limitován. Zvýšená napětí vedou ke změně vlastností a destrukci prvku vlivem rozpadu vazeb uvnitř struktury. Na druhou stranu, při rychlých změnách odpovídajícího napětí a v odpovídajících amplitudách reagují pryže ze všech konstrukčních materiálů nejlépe. [5]

3.2 Složení kaučukové směsi

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, je třeba zohledňovat nejen složení směsi, poměry jednotlivých komponent, postup při zpracovávání, ale především také způsob vulkanizace a životnost produktu. Složení kaučukové směsi je ovlivněno zejména oblastí použití výsledného produktu, kterým je vulkanizát směsi. Tím je také dána požadovaná hlavní vlastnost výrobku, přičemž je vždy nutné udělat jistý druh kompromisu mezi vlastnostmi sekundárními, neboť míra jejich změny je v přímé úměře se změnami vlastnosti primární. [8]

Kaučuková směs zpravidla obsahuje tyto komponenty: [8]

- Kaučuky
- Plniva
- Vulkanizační činidla
- Aktivátory a urychlovače, retardéry
- Ochranné látky proti degradaci a únavě
- Antidegradanty, antiozonanty, antioxidanty
- změkčovadla
- pigmenty
- nadouvadla

[5]

3.2.1 Kaučuky

Základním komponentem kaučukové směsi či pryže je kaučuk, který obecně dělíme na přírodní a syntetický a obecně je definován jako polymer, který lze převést chemickým či fyzikálním zesíťováním v pryž. Obsah kaučuku může být od 5 – 95%, může být jednoho nebo i více druhů (podle čistoty, dostupnosti, účelnosti, atd.) a udává základní vlastnosti celé směsi i pryže. [5]

Ke kaučuku, jakožto hlavní složce se také často přidává regenerát, popřípadě i jiný polymer, čímž lze přidat další vlastnosti směsi nebo usnadnit její zpracovatelské vlastnosti, např. pokud bude regenerát jemný, směs se bude lépe vytlačovat, méně srážet a narůstat za hubicí, přičemž vytlačený profil se při volné vulkanizaci nebude deformovat. [5]

3.2.1.1 Přírodní kaučuky (NR – Natural Rubber)

Přírodní kaučuk nebo také „cis 1,4 – polyisopren“ je dnes asi nejdůležitějším polyisoprenem, který se získává ze stromů (kaučukovníků) *Hevea Brasiliensis*, které se od roku 1900 uměle pěstují v tropických pásmech Jižní Ameriky, jihovýchodní Asie a Afriky. [3]

Mezi největší dodavatele NR jsou nyní Thajsko, Indonésie a Malajsie. [9]

Po naříznutí kůry tohoto stromu vytéká bílá mlékovitá míza (latex), jež obsahuje 30 - 40% koloidních částic, tedy těch částic, které nejsou schopny krystalizace. *Hevea Brasiliensis* lze s výhodou pěstovat na plantážích, neboť na rozdíl od ostatních druhů kaučukovníku, jeho latex vytéká při opakovaném říznutí do kůry stromu intenzivněji. [5]



Obrázek 10 – Čepování latexu z kaučukovníku (převzato z [17])

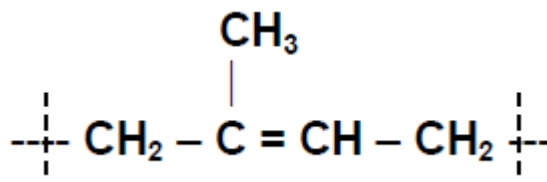
V této koloidní disperzi je obsah kaučuku zhruba 30% ve formě částic o průměru zhruba 5 μm , dále je zde obsaženo asi 1% proteinů, 1% lipidů, 1% uhlohydrátů a mnoho jiných látek v malém množství. [9]

Před vlastní přípravou směsi se zpracovává lámáním, což je proces štěpení příliš dlouhých řetězců účinkem vzdušného kyslíku v místě dvojných vazeb. Následně se kaučuk vysráží např. kyselinou mravenčí, vypere vodou a suší, buď jen teplým vzduchem (bílá krepa) nebo dýmem (hnědá krepa nebo také uzený kaučuk). [5]



Obrázek 11 – Bloky přírodního kaučuku (převzato z [18])

Vzhledem k rostoucí spotřebě přírodního kaučuku při výrobě pneumatik bylo potřeba najít alternativní zdroje, což neznameno nic jiného, než kaučuk syntetizovat. [5]



Obrázek 12 – Strukturní vzorec NR: Polyisopren (převzato z [9])

Mezi výhody vulkanizátu přírodního kaučuku patří zejména:

- vysoká mechanická pevnost i bez použití plniv (schopnost NR krystalizovat při napětí)
- vysoká elasticita, odolnost proti oděru
- velmi dobré dynamické vlastnosti (vibrační uložení, pružiny, pneumatiky)
- velmi dobré elektroizolační vlastnosti
- dobrá odolnost proti zředěným kyselinám bez oxidačního účinku, zředěným zásadám, alkoholům a ketonům

Příkladem nevýhod je:

- nízká odolnost proti UV – záření, ozonu a zvýšené teplotě
- špatná odolnost proti benzínu a naftě (nepolarita NR)

Teplotní rozmezí pro aplikaci NR je od -57 do 75°C. [9]

3.2.1.2 Syntetické kaučuky

V současnosti existuje stále širší výběr syntetizovaného kaučuku, ačkoliv zůstává přírodní kaučuk stále velmi významnou surovinou pro gumárenský průmysl. Syntetické polydienové kaučuky během zpracovávání, síťování i následných aplikacích, vykazují stejné chování, jako kaučuky přírodní a používají se převážně k výrobě pneumatik. Jsou také známy jako „syntetické kaučuky pro všeobecné použití“. [9]

Výhody syntetických kaučuků pro všeobecné použití mimo náhradu za NR můžeme považovat z ekonomického hlediska příznivou cenu společně s velkým objemem spotřeby a z hlediska technického nám jejich vulkanizáty dávají vysokou pevnost, dobrou odolnost proti oděru, nízkou hysterezi a vysokou odrazovou pružnost. [9]

Mezi nevýhody patří zejména nízká odolnost proti degradaci za zvýšených teplot a nízká odolnost vůči ozonu, což lze v jisté míře kompenzovat použitím antidegradantů ve směsi. [9]

Je zřejmé, že se technologové a chemici ve výzkumných týmech se snaží vytvářet stále nové, vhodné typy syntetizovaného kaučuku tak, aby co nejlépe splňovaly podmínky pro bezproblémové zasazení do provozu. V inženýrských aplikacích, kde jsou požadavky na dlouhodobé odolávání zvýšeným teplotám, povětrnosti, bobtnání, ozonu, aj., které syntetické kaučuky pro všeobecné použití zaručit nemohou, se užívají tzv. „speciální syntetické kaučuky“. Tyto kaučuky se používají převážně pro výrobky se specifickými aplikačními vlastnostmi. [9]

Pro větší přehled zde bude uvedeno a podrobněji popsáno několik typů syntetických kaučuků, které se v praxi běžně užívají.

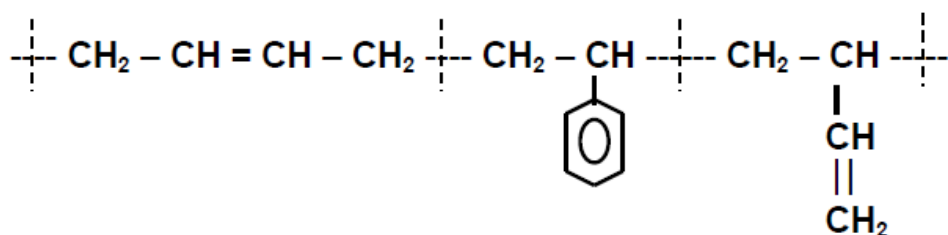
3.2.1.2.1 Butadien – Styrenový kaučuk (SBR)

Tento druh syntetizovaného kaučuku představuje zhruba 60% světové výroby syntetických kaučuků a používá se zejména pro výrobu pro tzv. technické pryže. [5]

Výchozí surovinou pro výrobu tohoto typu kaučuku je ropa a jedná se o kopolymer butadienu a styrenu, přičemž se vyrábí v emulzi (E-SBR) i roztoku (S-SBR) s různým obsahem styrenu. Pro dosažení dobrých mechanických vlastností vulkanizátu, je třeba užít ztužujících plniv. Vlastnostmi se SBR vulkanizáty podobají vulkanizátům NR, lze je však užít za vyšších teplot. Cenově se tyto dva kaučuky příliš neliší, a proto se SBR s výhodou používá při výrobě pneumatik, kde doplňuje použití NR. [9]

Za zmínku rozhodně stojí vlastnosti blokových kopolymerů SBS, které se řadí mezi tzv. „termoplastické elastomery“ (TPE). Styrenové bloky tvoří uzly sítě mezi butadienovými bloky a při pokojové teplotě jsou tuhé.

Butadienové bloky jsou naopak při běžných teplotách vysoce elastické, čímž lze TPE přiřadit chování vulkanizátů. Za zvýšených teplot lze TPE zpracovávat plastikářskými technologiemi, neboť styrenové bloky za takových podmínek měknou. [9]

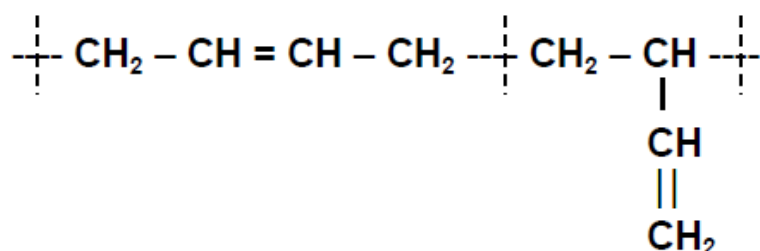


Obrázek 13 – Strukturální vzorec SBR: butadien 1,4; styren; butadien 1,2 (převzato z [9])

3.2.1.2.2 Polybutadienový kaučuk (BR)

Polybutadienové kaučuky se vyrábějí zejména za pomoci Ziegler – Nattových katalyzátorů roztokovou polymerací. Při tomto procesu vznikají produkty s vysokým podílem 1,4 - butadienových jednotek a ty polybutadieny, které vykazují vysoký podíl cis - 1,4 - butadienových jednotek, jsou známy pro svou vysokou odolnost vůči oděru, vzniku trhlin a také vyšší odrazovou pružnost, než přírodní kaučuk. Další výhodou je jeho dobrá snášenlivost plniva. [5]

Samotný BR je obtížně zpracovatelný, často se přimíchává do směsi s nepolárními kaučuky, jako např. NR či SBR. Použití polybutadienových kaučuků je díky svým vlastnostem hlavně v automobilovém průmyslu k výrobě pneumatik, přičemž koncentrace BR ve směsích pro běhouny je omezená, neboť snižují koeficient tření na mokré vozovce (adheze za mokra). Použití je také k přípravě houževnatého PS. [9]



Obrázek 14 – Strukturální vzorec BR: 1,4 – butadien; 1,2 – butadien (převzato z [9])

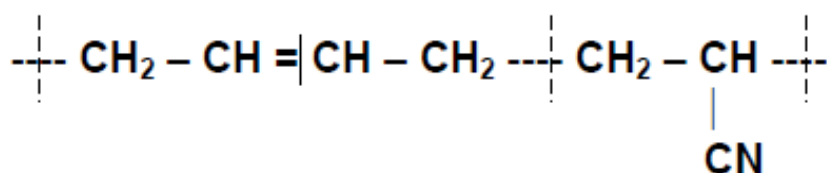
3.2.1.2.3 Butadien - akrylonitrilový kaučuk (NBR)

Tento typ speciálního kaučuku je emulzním kopolymerem butadienu a akrylonitrilu, který je polymerován za tepla (hot NBR) či za studena (cold NBR) v mnoha typech. Koncentrace akrylonitrilu je obvykle mezi 18 až 45% a jeho rostoucí obsah má přímouměrný vliv na polaritu kaučukových řetězců, odolnost proti kapalným uhlovodíkům, te-

plně antidegradční vlastnosti (lze dlouhodobě používat do cca 107°C) a klesá ohebnost při nízkých teplotách. [9]

Odolnost proti povětrnosti je špatná, lze ji však na úkor ohebnosti za nízkých teplot zvýšit přidáním PVC. Dobrých mechanických vlastností u NBR docílíme pouze zvlukaničováním s aktivními plnivými, jako je tomu i u BR či SBR. [9]

NBR je nejlevnější olejuvzdorný elastomer, je polární, tzn., že vykazuje dobrou odolnost proti nepolárním kapalinám a nízkou proti polárním rozpouštědlům (estery, ketony). Významná oblast použití je opět v automobilovém průmyslu jako komponenty pod kapotou, kde je třeba materiál se zvýšenou odolností proti tepelné degradaci. [9]

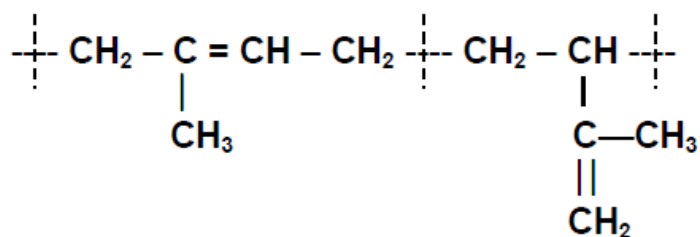


Obrázek 15 – Strukturní vzorec NBR: butadien; akrylonitril (převzato z [9])

3.2.1.2.4 Isoprenový kaučuk (IR)

Syntetizovaný cis - 1,4 polyisopren (IR) má vlastnosti podobné přírodnímu kaučuku (NR), avšak díky stabilnějším hodnotám molekulové hmotnosti vykazuje poněkud stabilnější zpracovatelské vlastnosti i rychlost vulkanizace, přičemž odpadá potřeba plastikace před zpracováním. Jednou z nevýhod oproti NR jsou nepravidelnosti ve struktuře, což snižuje sklon ke krystalizaci a tím pádem má i nižší strukturní pevnost. [9]

Isoprenový kaučuk se užívá v oblastech, kde existují zvýšené nároky na zpracovatelnost směsí a zároveň mohou být hodnoty konfekční lepivosti spolu s pevností za studena nižší než u NR. Při extruzi jsou vytlačovací rychlosti IR směsí v porovnání s NR vyšší, zachovávají hladký povrch extrudátů a vykazují také menší narůstání za hubicí. Cena IR je zhruba 2x větší než NR. [9]



Obrázek 16 – Strukturní vzorec IR: Isopren 1,4; isopren 3,4 (převzato z [9])

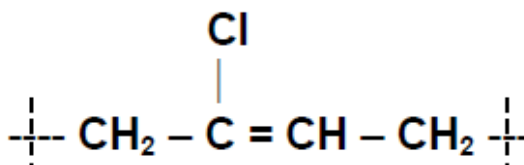
3.2.1.2.5 Chloroprenový kaučuk (CR)

Existuje mnoho druhů CR, jež se vyrábějí obvykle emulzní polymerací, přičemž struktura může být ovlivněna kopolymerací kopolymerací se sírou, což ve výsledku znamená velmi širokou paletu CR s různými fyzikálními i chemickými vlastnostmi. [9]

Přehled výhod ve srovnání se syntetickými kaučuky pro všeobecné použití:

- zlepšená odolnost proti degradaci, ozonu a slunečnímu záření
- zvýšená odolnost proti olejům a řadě chemikálií
- výborná houževnatost
- zvýšená odolnost proti hoření

Podobným způsobem, jako je tomu u NR, je CR schopen krystalizovat pod napětím, což znamená, že vykazuje vysoké pevnosti a dobré dynamické vlastnosti i v neplněných směsích, má však vyšší specifickou hmotnost a cenu na kilogram než NR. V současnosti užívání tohoto typu kaučuku poněkud upadá, neboť je nahrazován termoplastickým vulkanizátem na bázi EPDM. [9]



Obrázek 17 – Strukturální vzorec CR (převzato z [9])

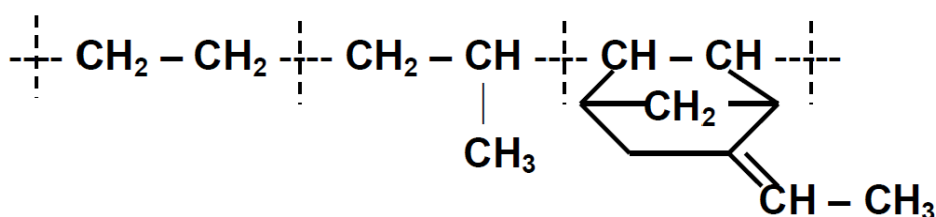
3.2.1.2.6 Etylen-propylenové kaučuky (EPM a EDPM)

Kopolymerací etylenu a propylenu vzniká EPM, který se chová jako kaučuk díky omezené krystalizaci polymerních řetězců během tohoto procesu. Vlastnosti výsledného EPM pak určuje molekulová hmotnost, jejich distribuce a poměr monomerů etylen/propylen. EPM nelze síťovat sírou, proto se vulkanizuje za pomoci peroxidů či radiace. Použití EPM je i jako modifikátor rázové houževnatosti plastů či jako přísada pro zlepšení viskozity mazacích olejů. [9]

V případě, že se ve struktuře nachází třetí monomer, kterým nejčastěji bývá nekonjungovaný dien ethylidennorboren, pak vzniká termopolymer EDPM, jenž lze síťovat mimo peroxidy také sírou. [9]

EDPM se chová za chladu podobně, jako NR, avšak maximální teploty pro dlouhodobé použití se uvádí 126 až 150°C, což je v závislosti na složení směsi. Stejně vlastnosti jako přírodní kaučuk má také v odolnosti proti nepolárním kapalným uhlovodíkům, tedy nízkou, je však odolnější proti působení polárních rozpouštědel (alkoholy, ketony) a odolnost vůči kyselinám a zásadám je podstatně lepší než u NR. [9]

Vulkanizáty EDPM jsou velmi odolné proti ozonu a povětrnosti, a to díky nasycenosti hlavního řetězce, používají se proto k výrobě těsnění pro okna či střešní folie. Bude-li NR směs obsahovat EDPM, dosáhne se zlepšení odolnosti proti ozonovému praskání, což lze využít ve směsích pro bočnice pneumatik. EDPM vulkanizáty jsou taktéž odolné proti vodě, což vede k jejich zasazení do výroby izolace vodních nádrží. Nepolárnost hlavního řetězce způsobuje vysoký elektrický odpor, což umožňuje používání tohoto typu kaučuku pro kabelovou izolaci. V automobilovém průmyslu se lze setkat s EDPM hlavně u různých těsnění, topení či hadic pro radiátory. [9]



Obrázek 18 – Strukturní vzorec EDPM: etylen; propylene; etylidennorbornen (převzato z [9])

3.2.2 Plniva

Použitím plniv do kaučukových směsí se sleduje úprava zpracovatelnosti společně s fyzikálními vlastnostmi vulkanizátů, což je primárním důvodem jejich užívání. Druhým důvodem je ekonomičnost, neboť přidáním levných plniv lze podstatně snížit cenu výrobku. V běžné praxi se plniva rozdělují do 3 skupin: [5]

- Saze
- Světlá plniva (aktivní, neaktivní)
- Ostatní

Použitím plniva, kterým je nejčastěji práškovitý materiál, v kaučukové směsi klesá plasticita materiálu a dochází ke zhoršení zpracovatelnosti, to vše za cenu změny prakticky všech vlastností (hustota, tvrdost, modul, tažnost, elasticita, strukturní pevnost, zpracovatelnost), především snížení ceny produktu. Plniva se v současné době podrobněji rozdělují dle: [5]

- Velikosti částic
- Velikosti povrchu plniva
- Tvaru částic
- Velikosti povrchové aktivity

Velikost částic plniva podstatným způsobem ovlivňuje mechanické vlastnosti pryže, přičemž nejméně, respektive velmi výjimečně se používají plniva o velikosti částic větších než 5 μm , neboť v tomto případě dochází ke zhoršení mechanických vlastností. Jemnější částice od 1 do 5 μm lze nazvat zředovaly a nijak zvláště mechanické vlastnosti pryže nemění, do této skupiny patří křída či vápenec. Ke zlepšení vlastností pryže dochází při plnění materiály o průměrné velikosti částic menších než 1 μm , přičemž podle jemnosti lze i tyto plniva rozdělit na skupiny poloztužujících a ztužujících plniv. Mezi nejjemnější plniva patří tektity a vermikulity, jejichž průměrná velikost částic se pohybuje okolo 1 nm a tyto plniva mají ztužující efekt největší. Obecně tedy platí, že čím menší má plnivo velikost částic, tím větší má aktivní povrch a tím je dána i míra vyztužení. [5]

Povrchová aktivita není závislá jen na velikosti, ale převážně také na tvaru částic, neboť hraje významnou roli při přenosu napětí do polymerní matrice. Výhodnější je použití plniva s anizotropním tvarem částic, tedy tvarem, kde se významně liší rozměry délky a šířky. Rozlišujeme několik základních tvarů částic plniva: [5]

- Kulovité (uhličitan vápenatý)
- Jehličkové (wolastonit)
- vláknové (uhličitá či skelná vlákna)
- destičkové (mastek, slída, kaolín)
- řetízkové (saze, sražená silika)

3.2.2.1 Saze

Saze patří jednoznačně mezi jedno z nejdůležitějších plniv kaučukových směsí, neboť upravují fyzikálně – mechanické vlastnosti (zejména modul, strukturální pevnost, tvrdost, tažnost, odolnost proti oděru, valivý odpor a jiné), dále pak zlepšují zpracovatelnost směsi a snižují cenu finálního produktu. Ztužující saze jsou převážně sférického tvaru částic, které se v různém rozsahu spojují do agregátů o velikosti nad 0,1 μm . [5]

3.2.2.2 Minerální plniva

Minerální nebo také světlá plniva jsou velkou skupinou plniv jak syntetických, tak získaných z přírody. Stejně, jako tomu bylo u sazí, ztužující účinek závisí na velikosti povrchu a také na schopnosti tvořit se základní matricí interakční vztah, podle čehož lze na minerální plniva pohlížet jako na: [5]

- aktivní
- neaktivní
- ostatní

Ke spojení povrchu plniva a kaučukové směsi dochází různým druhem a typem vazeb, převážně vazbou s oxidem kovů. Hlavním představitelem je silika, oxid křemičitý (SiO_2), jenž ve směsi působí podobně jako saze. Neaktivní a neztužující plniva mají převážně ekonomický význam a tyto minerální plniva sestávají z přírodnin na bázi sloučenin křemíku, hliníku, vápníku, aj. [5]

3.2.3 Vulkanizační činidla

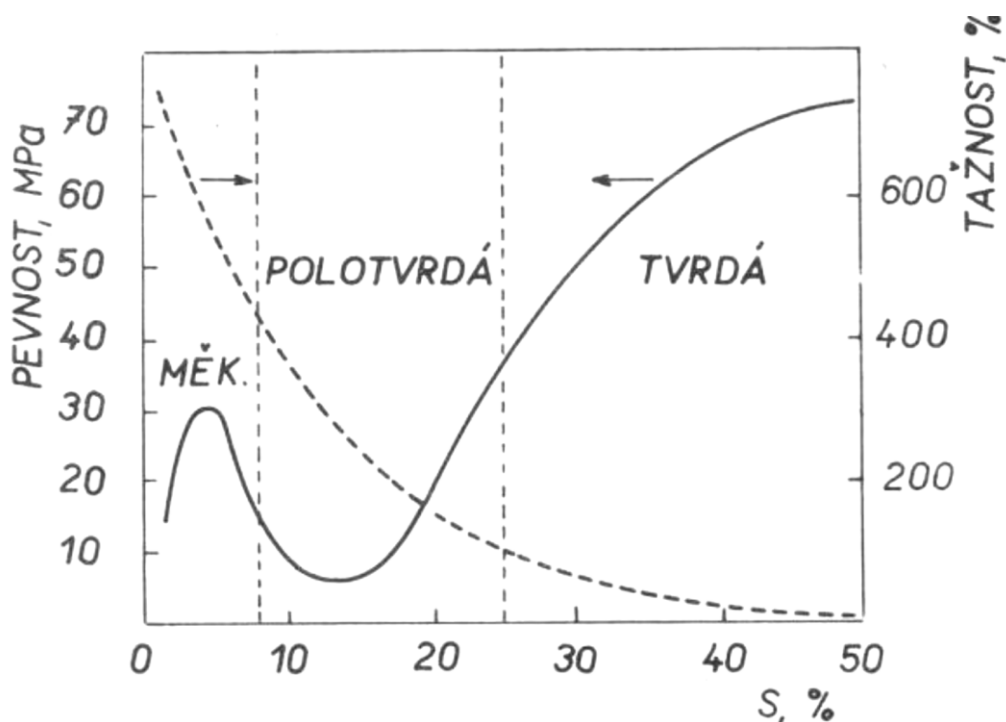
Vulkanizační činidla vyvábí chemickou reakcí příčné vazby mezi molekulami kaučuku při vulkanizaci, tzn. ději, při kterém dochází k přechodu plastického stavu kaučukové směsi na elastickou pryž. Tímto procesem se podstatně mění vlastnosti materiálu. Roste tvrdost a modul, snižuje se tažnost a trvalá deformace, dochází ke zlepšení vlastností, jako je odrazová pružnost, pevnost, odolnost proti nízkým i vysokým teplotám. [5]

Nejběžnější vulkanizací je tzv. sirná vulkanizace, při které, jak již název napovídá, se používá jako vulkanizační činidlo síra. Síra se během procesu vulkanizace váže na molekuly kaučuku a tvoří strukturu sítě. [5]

Výsledné vulkanizáty se dle množství vázané síry rozdělují na pryže: [5]

- Měkké – do 4 dsk síry, výrazně vratné deformace
- Polotvrdé - 12 – 25 dsk síry, omezené použití, špatné mechanické vlastnosti
- Tvrdé - omezená ohebnost, nepatrná tažnost, značná tvrdost

Množství přidané síry má přímospměrný vliv na tvrdost pryže. V současnosti se zkouší i jiná vulkanizační činidla, například peroxidy či vulkanizační pryskyřice. [5]



Obrázek 19 – Závislost obsahu síry ve vulkanizátu na tažnost a pevnost v tahu (převzato z [5])

3.2.4 Aktivátory a urychlovače, retardéry

Aktivátory vulkanizace jsou látky, které zvyšují síťovací účinnost vulkanizačního systému, a bez kterých by bylo potřeba samotný vulkanizační systém mnohem více dávkovat sírou či donorem síry. Mezi aktivátory se řadí oxidy různých kovů (ZnO, MgO, CaO, PbO, atd.) Aktivátory plně podporují využití síry a urychlovačů vulkanizace. [5]

Spolu se sírou a aktivátory tvoří celý vulkanizační systém i urychlovače. Díky urychlovačům jsme schopní celý proces vulkanizace zkrátit z hodin na minuty při snížení teploty vulkanizace a zpomalení stárnutí. [5]

Urychlovače vulkanizace celý proces nejen zrychlují, ale zvyšují také efektivnost vázání síry, čímž se přirozeně zlepší užitné vlastnosti pryže (odolnost proti stárnutí, teplovzdornost) a také upravují specifické vlastnosti vulkanizátu (modul, pevnost, odolnost proti opotřebení). Dle rychlosti vulkanizace rozdělujeme na: [5]

- Pomalé (aminy, guanidiny)
- Rychlé (tiazoly, sulfanoaminy)
- Velmi rychlé (tinamy, kombinace urychlovačů)
- Ultraurychlovače (ditiokarbamáty, xantogenáty)

Urychlovače se volí na základě mnoha okolností, především na volbě elastomeru, složení směsi, technologii vulkanizace a vlastnostech, kterými by měl výsledný vulkanizát disponovat. Všeobecně platí, že s rostoucí aktivitou urychlovače, se snižuje jeho potřebné množství ve směsi, což platí také pro síru, tím pádem lze uskutečnit proces vulkanizace za nižších teplot při získání optimálních vlastností vulkanizátu. [5]

Urychlovače vulkanizace musí splňovat několik kritérií:

- Bezpečnost při zpracování danou technologií
- Rychlost při vulkanizaci
- Příznivé ovlivnění vlastností kaučuku
- Zdravotní nezávadnost
- Ekonomičnost

Obsahuje-li směs příliš aktivní vulkanizační přísady, je nezbytné užít retardérů, aby nedošlo k předčasnému navulkanizování pryže při zpracování za zvýšených teplotních podmínek. Retardéry vulkanizace dělíme na organické (kalafuna, octan sodný) a anorganické (PbO, MgO). [5]

3.2.5 Ochranné látky proti degradaci a únavě

I po zvulkanizování v elastomerní struktuře vznikají nestabilní peroxidy či ozonidy, které se radikálově štěpí a poškozují dvojně vazby uvnitř této struktury, tím dochází ke stárnutí či degradaci pryže. Tato degradace má řadu příčin a její průběh se stabilizací snažíme zpomalit nebo dočasně kompletně zastavit čehož lze dosáhnout třemi způsoby. [5]

- 1) Zvolí se polymer, který vykazuje za požadovaných provozních podmínek dobrou odolnost proti degradaci
- 2) Modifikace polymeru nebo jeho povrchová ochrana
- 3) Zamíchání antidegradačních činidel do směsi

Antidegradanty lze obecně rozdělit do skupin:

[5]

- Antioxidanty, antiozonanty (nejpodstatnější)
- Pohlcovače UV záření
- Ochranné vosky
- Přísady, které potlačují hydrolýzu funkčních skupin
- Akceptory rozkladných produktů

3.2.6 Změkčovadla

Změkčovadla jsou většinou kapalné nebo tuhé organické látky, jež dodávají polymerům tvárnost, vláčnost, ohebnost a snižují jejich teplotu skelného přechodu T_g a viskozitu taveniny. Taková přísada musí disponovat schopností pronikat mezi makromolekulární řetězce a ty o sebe oddělovat, což znamená, že pro daný polymer musí být rozpouštědlem. Protože rozpustnost je přímo závislá na polaritě, lze změkčovadla dělit:

[5]

- 1) Pro nepolární a málo polární kaučuky

Většinou se jedná o olejovité produkty rafinace ropy, některých vedlejších produktů ze zpracování uhelného dehtu nebo také z chemického zpracování dřeva (smrkový dehet)

- 2) Pro polární kaučuky

Pro tyto olejovzdorné kaučuky se používají syntetická změkčovadla, mezi které patří estery dikarboxylových kyselin (ftalové, adipové a sebakové) nebo vyšších alkoholů (2 – etylhexanol či butanol).

Je potřeba počítat s faktem, že přidáním změkčovadla do směsi zhoršíme mechanické vlastnosti pryže, někdy je však nadměrným přidáním plniv do směsi snížena zpracovatelnost natolik, že změkčovadla plní významnou roli nejen v dovedení procesu k výslednému vulkanizátu, ale také k ekonomičtější a energeticky méně náročné výrobě.

Na změkčovadla jsou kladeny požadavky převážně, co se týče: [5]

- Dobré mísitelnosti s kaučukem
- Chemické a tepelné stability během procesu zpracování
- Nízké těkavosti
- Nízké viskozity a její malé závislosti na teplotě

3.2.7 Pigmenty

Pigmenty jsou látky, jejichž zamícháním do směsi, určujeme barvu a odstín výsledného produktu. V současné době rozeznáváme dva druhy pigmentů, minerální (anorganické) a organické, přičemž organické pigmenty postupně vytlačují minerální, z důvodu necitlivosti vůči vulkanizační teplotě a síře. Organické pigmenty jsou však dražší. [5]

Soubor vlastností, které musejí nebo naopak nesmějí pigmenty mít, zahrnuje:

- kvalitní disperzi v kaučuku
- nerozpustnost
- odolnost proti vulkanizačním teplotám a přítomnosti ostatních přísad
- neovlivnitelnost mechanicko-fyzikálních vlastností a průběhu vulkanizace
- neměnnost odstínu

3.2.8 Nadouvadla

Nadouvadla jsou látky, které slouží k výrobě lehčené pryže. Princip spočívá v rozkladu této látky na plynnou v důsledku působení zvýšené teploty během vulkanizace. Teplota rozkladu je různá pro různé druhy použitého nadouvadla a lze ji ovlivnit zamícháním dalších přísad, aktivátorů rozkladu nadouvadla, do směsi. Je třeba, aby kaučuková směs, vykazovala dostatečnou plasticitu, ke správnému a požadovanému průběhu procesu. [5]

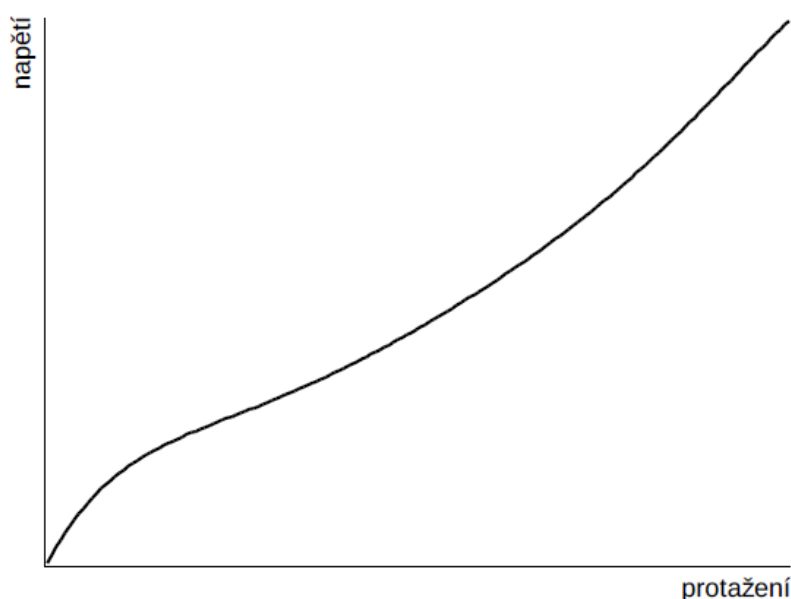
4 HYPERELASTICITA PRYŽOVÝCH MATERIÁLŮ

Nejpodstatnější charakteristikou elastomerních materiálů, kterou se zároveň liší od většiny ostatních ideálně elastických materiálů, je již dříve zmiňovaná hyperelastická. [1]

Jedním z hlavních rysů hyperelastivity je schopnost dosažení mnohonásobně větších vratných deformací, než u ideálně elastických látek, tažnost materiálu bývá i několik set procent původní délky prvku. [1]

Objemový modul pružnosti nabývá hodnot v řádech až stovek tisíců MPa a objemová tuhost většiny těchto materiálů je velmi vysoká. Vezmeme-li v potaz tato fakta, Poissonův poměr se tudíž blíží hodnotě 0,5; z čehož vyplývá, že tyto materiály lze teoreticky považovat za objemově nestlačitelné. [1]

Hyperelastické materiály se deformují již účinkem malých sil, přičemž závislost napětí na deformaci je v porovnání s ideálně elastickými materiály cca 10 000x menší. Tato závislost je silně nelineární a její průběh má esovitý tvar. Časová závislost deformace je další charakteristikou elastomerů, která se projevuje určitým zpožděním elastických deformací, což je způsobeno viskózními odpory uvnitř kaučukové struktury, která se jeví současně jak viskózně, tak elasticky, tedy viskoelasticky. [1]



Obrázek 20 – Závislost napětí na deformaci zatěžovaného elastomeru (převzato z [1])

Teplota taktéž velmi ovlivňuje mechanické chování elastomerů, a to tím způsobem, že čím bude její hodnota blíže k teplotě skleného přechodu (méně než 50°C), tím poroste tuhost pryže a její vlastnosti se tak mohou blížit vlastnostem kovů. Naopak je tomu při teplotách vysokých (okolo 100°C), kdy dochází k výraznému poklesu tuhosti. [1]

Vezmeme-li v potaz všechna tato fakta, jednoznačně můžeme konstatovat, že pro použití Hookeova zákona nejsou splněny základní podmínky lineární závislosti napětí s deformací, které navíc přesahují 2%. Pro zpřesnění výpočetních metod je nutno využít nelineárního popisu závislosti napětí a deformace, který v současné době tvoří velké množství nelineárních hyperelastických materiálových modelů, jež jsou založeny na definici vztahu pro potenciál deformační energie W . [1]

Od 2. poloviny 20. století probíhá intenzivní vývoj těchto modelů, kdy v posledních letech zahrnují i závislost na rychlosti a historii deformace. Určitá část těchto modelů funguje na bázi mikromechanických modelů vnitřní struktury elastomerního prvku, jsou to např. modely Neo-Hookean či Arruda-Boyce a materiálové konstanty v nich mají jednoznačný fyzikální význam. Další částí jsou modely, jež byly navrženy na základě pozorování deformačně-napěťového chování elastomerů do takové míry, aby aproximovaly co nejlépe toto pozorování. Tyto modely jsou nazývány fenomenologickými a jejich materiálové konstanty zpravidla nemají konkrétní fyzikální význam. Příkladem fenomenologického hyperplastického modelu je např. polynomický, Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh či Gent. [1]

Současné hyperplastické modely obecně formulují vztah pro hustotu deformačního potenciálu, který má tvar:

$$W = W(I_1, I_2, I_3\{M\})$$

nebo také

$$W = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\{M\}) \quad (1)$$

Kde: I_i – invariant pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace

λ_i – hlavní směr protažení

$\{M\}$ – množina materiálových konstant

Protažení λ_i je dáno nepřímoúměrným vztahem mezi protažením v daném směru a původní délkou:

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{0i}} \quad [-] \quad (2)$$

Kde: l_i – deformace ve daném směru i

l_0 – původní délka

Deformační invarianty lze určit dle vztahů: [1]

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Přičemž invariant I_3 bude pro nestlačitelné materiály roven 1.

Derivací známé funkce W , podle příslušných složek deformace, lze vypočítat napětí.

$$S_{ij} = 2 \frac{\partial W}{\partial C_{ij}} \quad (4)$$

S_{ij} jsou složky 2. Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí a C_{ij} složky pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace, který lze definovat v případě shodného souřadného systému s hlavními směry deformace následovně:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Na základě rovnice:

$$S_{ij} = 2 \frac{\partial W}{\partial C_{ij}} \quad (4)(6) \text{ jsme schopni určit vztah pro skutečné}$$

napětí:

$$\tau_{ij} = -p \delta_{ij} + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \cdot C_{ij} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} C_{ij}^{-1} \quad (7)$$

Kde: p – nespecifikovaný tlak

δ_{ij} – Kronekerovo delta: $\delta_{ij} = 1 \Leftrightarrow i = j$

$\delta_{ij} = 0 \Leftrightarrow i \neq j$ [1]

Protože praktická část této práce zahrnuje užití konečně-prvkového softwaru, je vhodné uvést v současnosti nejhojněji používané hyperelastické modely v těchto systémech.

4.1 Současně používané hyperelastické modely ve FEM

4.1.1 Polynomická funkce

Tuto formu lze aplikovat pro deformaci až do 300% a je založena na I. a II. deformačním invariantu. [1]

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (8)$$

Kde: c_{ij} – materiálové konstanty

$N = 1$ až ∞ (obvykle však ne vyšší než 3)

4.1.2 Neo-Hookean

Tento model lze považovat za podmnožinu polynomické funkce pro $N = 1$, $c_{01} = 0$, $c_{10} = \mu/2$ a patří mezi nejjednodušší a nejstarší modely. Je založen na termodynamických principech a statickém přístupu modelování elastomerní vnitřní struktury, přičemž nedokáže věrohodně popsat závěrečnou vyztužovací fázi napětově-deformační odezvy elastomerů. Při smykových deformacích navíc vykazuje Neo - Hookean lineární chování a lze jej používat do 40% deformace při jednoosém namáhání. [1]

$$W = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3) \quad (9)$$

Kde μ je počáteční smykový modul a vztah pro jeho výpočet je:

$$\mu = nkT \quad (10)$$

Kde: n – počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu

k – Boltzmannova konstanta

T – absolutní teplota

4.1.3 Yeoh

Hyperelastický model Yeoh má podobnou formu jako polynomická funkce s tím rozdílem, že nepoužívá druhý deformační invariant, samotný se obtížněji vyhodnocuje a poskytuje méně přesné výsledky. Výhodou Yeoh modelu je jeho jednoduchost ve formě:

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (11)$$

Kde: c_{i0} – materiálová konstanta

$N = 1$ až ∞ (obvykle však ne vyšší než 3)

Tří - parametrový ($N=3$) Yeoh model je vhodný pro deformace velkého rozsahu, neboť poskytuje dobré výsledky, pro nižší hodnoty deformace tomu může být naopak. [1]

4.1.4 Mooney-Rivlin

30 let po té, co Mooney navrhl fenomenologický model o dvou parametrech, které byly založeny na předpokladu lineárního chování mezi zatížením a smykem při jednoduché smykové deformaci, modifikoval tento model Rivlin tak, aby získal vyjádření funkce hustoty deformační energie za pomoci deformačních invariantů. [1]

Model Mooney - Rivlin lze taktéž považovat za zvláštní formu polynomické funkce a používá se dvou, tří, pěti či devíti - parametrové. [1]

- Dvou-parametrový
 - Ekvivalentní polynomické formě ($N=1$)
 - Nejvíce používaný

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \quad (12)$$

Kde: c_{10} ; c_{01} – materiálové konstanty

Model o dvou parametrech je využíván pro tahové deformace v rozmezí 90 - 100%, nemusí však dobře charakterizovat chování v tlaku. [1]

- Tří - parametrový
 - Ekvivalentní polynomické formě ($N=2$ a $c_{20} = c_{02} = 0$)

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (13)$$

Kde: c_{10} ; c_{01} ; c_{11} – materiálové konstanty

- Pěti-parametrový [1]
 - Shodný s polynomickou formou ($N=2$)
 - Používán pro deformace do 300%

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (14)$$

Kde: c_{10} ; c_{01} ; c_{11} ; c_{20} ; c_{02} – materiálové konstanty

- Devíti-parametrový [1]
 - Shodný s polynomickou formou ($N=3$)
 - Používán pro deformace do 300%

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) + c_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \quad (15)$$

Kde: c_{10} ; c_{01} ; c_{11} ; c_{20} ; c_{02} ; c_{12} ; c_{21} ; c_{30} ; c_{03} – materiálové konstanty

4.1.5 Arruda-Boyce

Tento model lze brát jako rozšíření Yeoh modelu pro $N=5$, kdy mají materiálové konstanty reálný význam a vychází z mikromechaniky vnitřní struktury elastomerů. Arruda-Boyce je vhodné použít pro deformace do 300%. [1]

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (16)$$

Kde: μ – počáteční smykový modul

λ_L – limitní protažení (sít se dál neprotahuje a napětí se blíží nekonečnu)

$\lambda_L = \infty \Rightarrow$ Neo - Hookean

Vztahy pro určení konstant C_i :

$$C_1 = \frac{1}{2}C_2 = \frac{1}{20}C_3 = \frac{11}{1050}C_4 = \frac{19}{7000}C_5 = \frac{519}{673750} \quad (17)$$

4.1.6 Gent

Gent nevychází z modelu vnitřní struktury elastomerů, ale stejně jako Arruda-Boyce využívá konceptu limitního protažení. [1]

$$W = -\frac{El_m}{6} \ln \left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m} \right) \quad (18)$$

Kde: E – počáteční modul pružnosti (3μ pro nestlačitelné materiály)

I_m – limitní hodnota členu (I_1-3) , analogie k λ_L (viz. model Arruda-Boyce)

Dvě materiálové konstanty činí z Gent jednoduchý model, který je schopen postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napěťově-deformační odezvy. [1]

4.1.7 Ogden

Velmi používaným je v současné době model, který navrhl Ogden a je vyjádřen v hodnotách hlavních protažení. Výhodný je zejména díky schopnosti vystihnout chování elastomerů i při velkých deformacích (do 700%) [1]

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (19)$$

Kde: μ_i, α_i – materiálové konstanty (nemají konkrétní fyzikální význam)

$N = 1$ až ∞ (obvykle však ne vyšší než 3)

Vzhledem k předpokladu objemové nestlačitelnosti elastomerů jsou dříve zmiňované vztahy nezávislé na třetím invariantu (I_3) pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru a pakliže je potřeba objemovou stlačitelnost zahrnout, vstoupí do funkce W navíc aditivní člen W_{vol} , který na I_3 závislý je. Následuje přehled používaných tvarů W_{vol} v uvedených modelech. [1]

$$W_{vol} = \frac{K}{2} (J - 1)^2 \quad W_{vol} = \frac{K}{4} [(J - 1)^2 + (\ln J)^2]$$

$$W_{vol} = K(J \ln J - J + 1) \quad W_{vol} = \frac{9K}{2} (J^{\frac{1}{3}} - 1)^2 \quad W_{vol} = \frac{K}{2} \left(\frac{J-1}{2} - \ln J \right)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI

V této části diplomové práce bude popsán postup při přípravě analýzy, se softwarem, který je na poli vyhodnocování hyperplastických materiálů velmi cenným nástrojem, průběhem analýzy a konzultací výsledků.

Předmětem této studie bude primárně pryžová membrána, kterou lze pozorovat na těchto fotografiích.



Obrázek 21 – Fotografie skutečné pryžové membrány

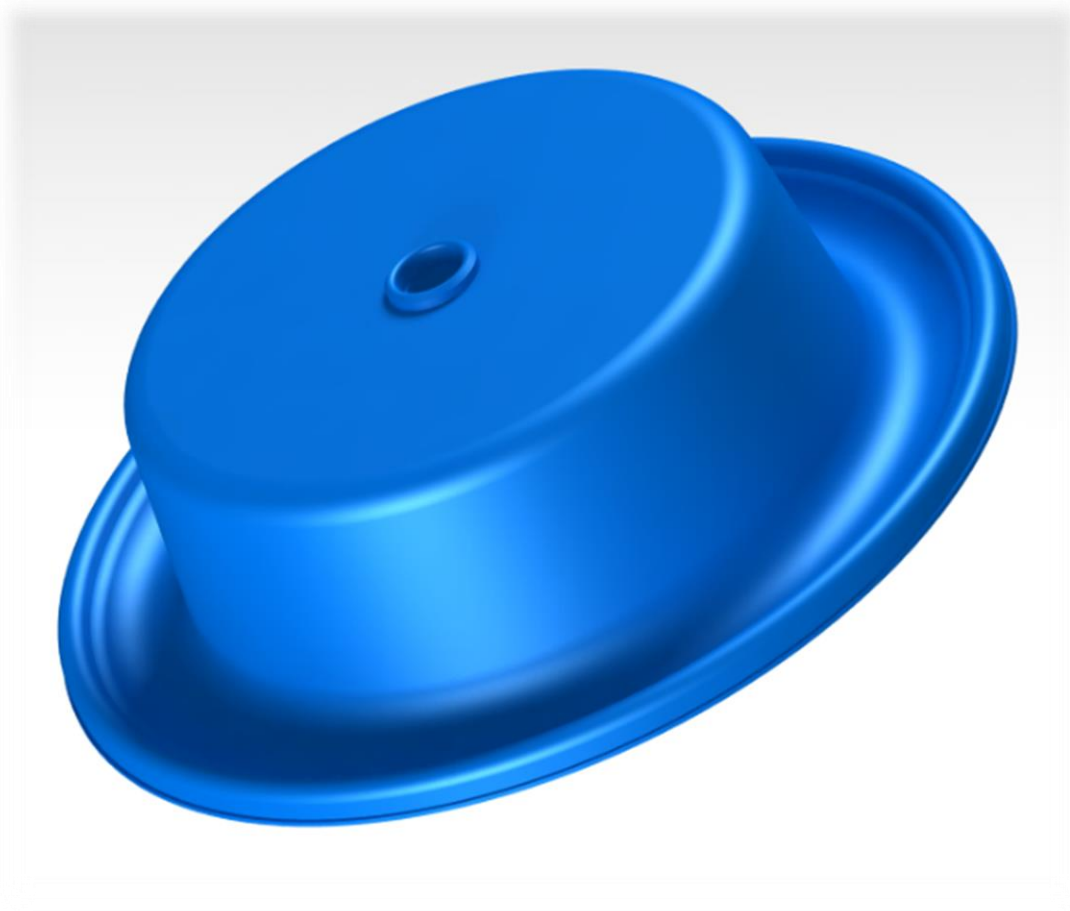
Cílem této analýzy je určit možné příčiny hystereze v pohybu táhla, které by mohla způsobit pouze konstrukce či geometrie pneumatického aktuátoru a jeho součástí. Analýza bude zahrnovat také hyperelastické chování materiálu membrány, které může být další příčinou hystereze.

6 VSTUPNÍ PARAMETRY K ANALÝZE

6.1 Konstrukce aktuátoru

Před vlastní analýzou je třeba učinit několik zásadních kroků, bez kterých bychom výsledku nedosáhli. Jedním z nich je přirozeně příprava modelu způsobem, který bude nejvhodnější jak po stránce jednoznačnosti v pochopení funkce, tak v jednoduchosti pro rychlost výpočtu v příslušném softwaru tak, aby ale reprezentoval realitu v co možná největší možné míře.

Geometrický model aktuátoru byl poskytnut společností WOCO STV s.r.o.

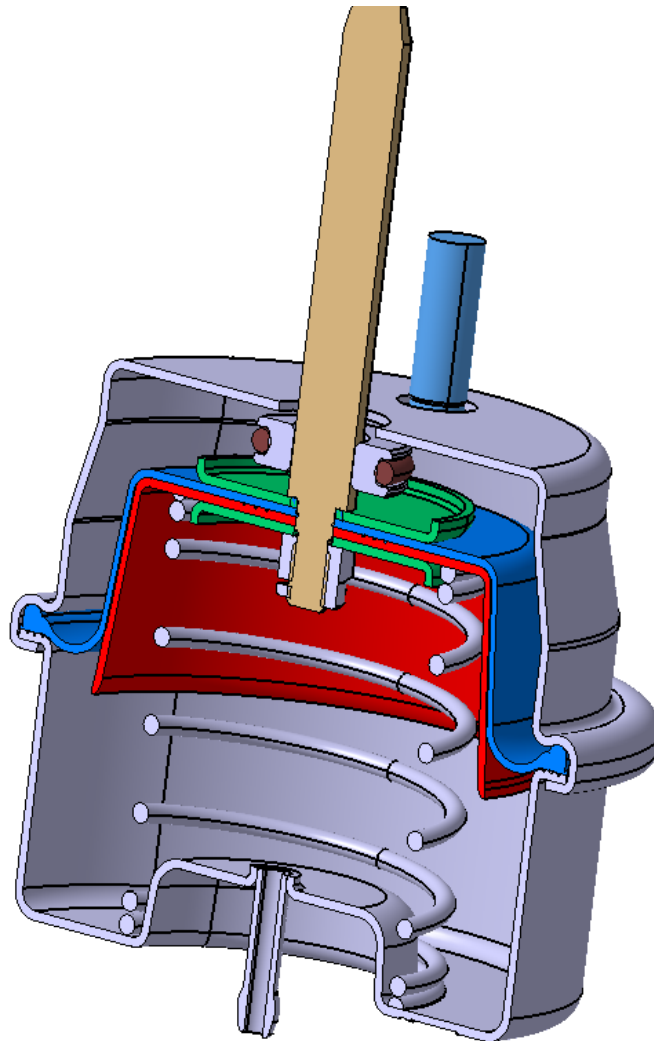


Obrázek 22 – Model pryžové membrány

Tato membrána, která jakožto komponent aktuátoru, jako jediná není vyrobena z kovu, je upevněna mezi dvěma kroužky a je nasunuta na jádro, o které se opírá pružina

z jedné (vnitřní) strany. Z vnější strany je šroubovým spojem vedeným v ose membrány připojeno táhlo. Tento celý komplet je vložen do dvou - dílného pouzdra.

Aby výsledek analýzy poskytoval co možná nejlepší výsledky, je třeba znát reálnou funkci aktuátoru, aby se v jisté fázi mohly vytvořit parametry, které tuto funkci budou simulovat. Řez sestavou poskytne mnoho informací o její reálné funkci.

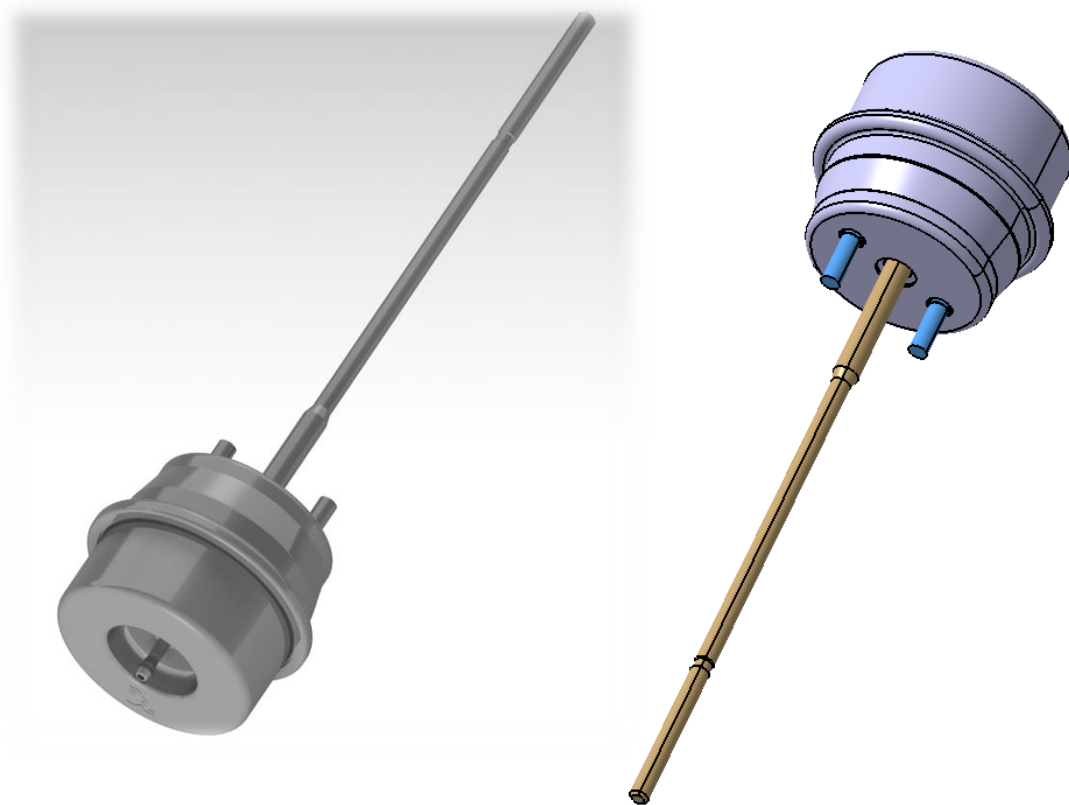


Obrázek 23 – Řez sestavou aktuátoru

Analýza tohoto řezu vypovídá o tom, že z hlediska principu, se jedná o aktuátor podtlakový. Odvod vzduchu zařízen ventilem umístěným v ose aktuátoru, ve spodní části pouzdra. Po té, co přestane podtlak působit, vrátí pružina kinematickou sestavu do původní polohy.

Na řezu lze pozorovat barevně odlišené klíčové komponenty, o kterých byla zmínka v předchozích odstavcích. Membrána (modrá) by měla v ideálním případě po celou dobu práce mechanismu obepínat kovové jádro (červená) maximální možnou plochou. Táhlo (béžová) ovládá uzavírání / otevírání Waste - Gate ventilu viz Obrázek 2.

Lem na okraji membrány by měl být stlačen oběma částmi pouzdra tak, aby nedošlo nežádoucímu uvolnění membrány z tohoto uložení.



Obrázek 24 – Pohled na aktuátor vně

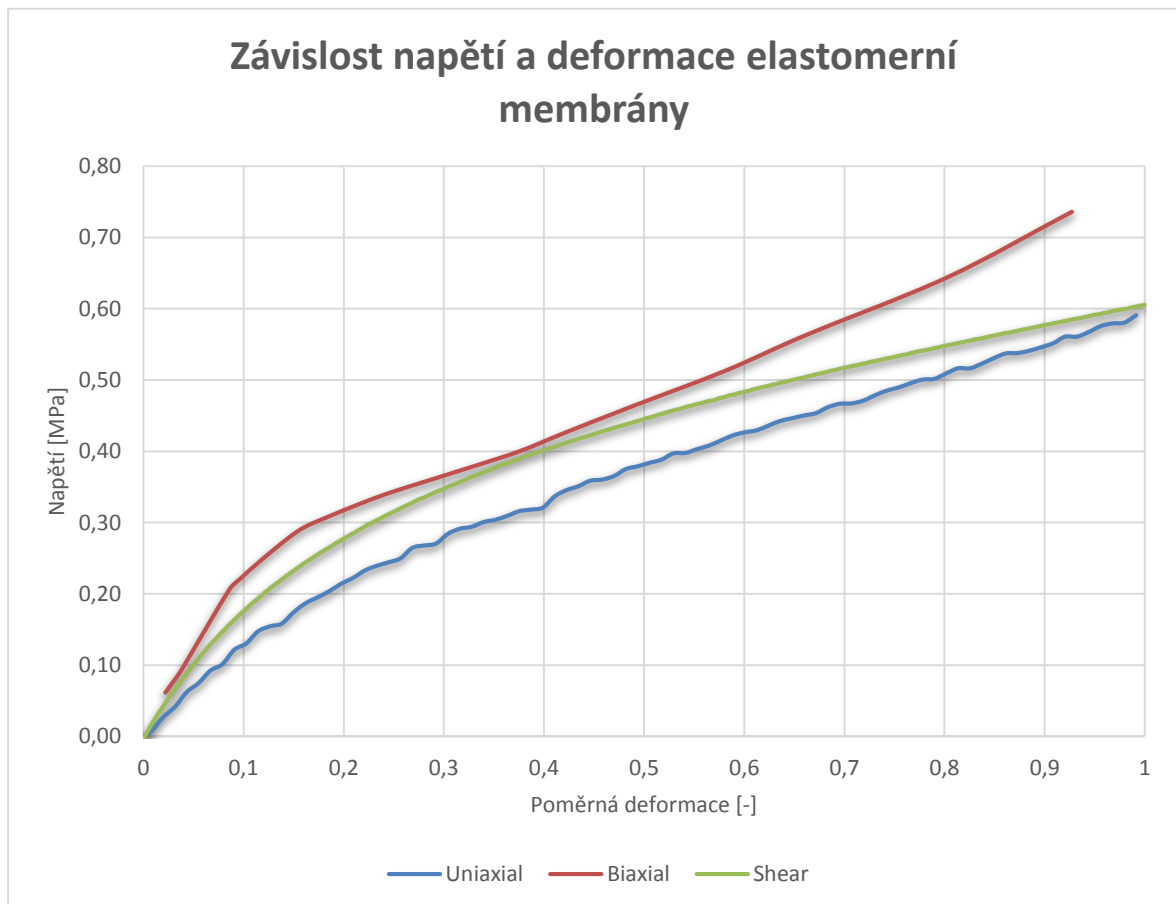
Tímto rozborem bylo docíleno pochopení práce celého mechanismu a lze v budoucnu přiřadit translační a rotační vlastnosti, okrajové podmínky jednotlivým částem modelu ve FEM systému.

6.2 Mechanické vlastnosti pryžové membrány

Mechanické vlastnosti membrány závisí přirozeně na materiálu, ze které je vyrobena, přičemž je na místě zmínit, že se v tomto případě jedná o materiály dva. Z převážné části je tento komponent zhotoven z elastomerního materiálu, jak již bylo mnohokrát zmíněno, aby však došlo ke zlepšení funkčnosti, je ze strany kovového jádra přivulkanizovaná tkanina.

Aby bylo možno určit hyperelastické konstanty pro materiálový model, je potřeba získat data ze tří různých zkoušek pro elastomerní materiál. Jedná se o zkoušky v jednoosém (uniaxiálním) tahu, dvouosém (biaxiálním) tahu a smyku (shear). V případě tkaniny se jednalo o zkoušku tahem ve směru vlákna tkaniny.

Napěťově - deformační závislosti z naměřených dat lze pozorovat v následujícím grafu.

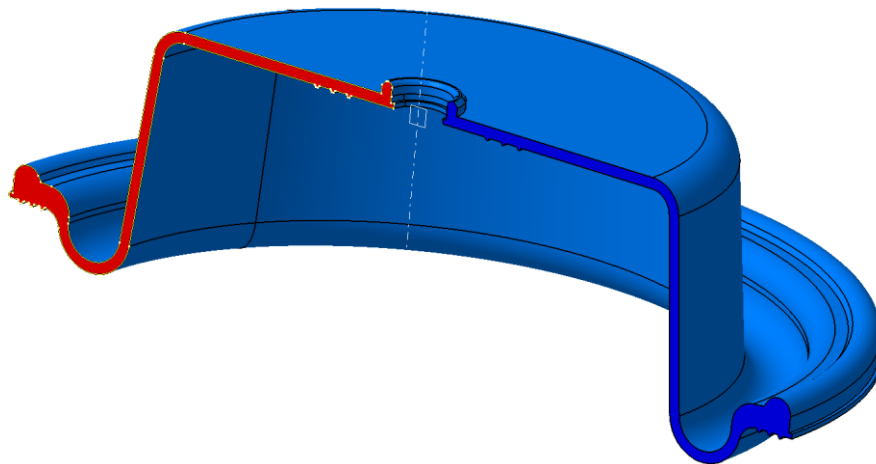


Graf 1 – Výsledek testování závislosti napětí a deformace elastomerní membrány (Excel)

Hodnoty, které posloužily k vykreslení těchto závislostí, v budoucnu použijeme k určení materiálových konstant a vhodného hyperelastického modelu.

6.3 Příprava geometrie pro import do FEM softwaru

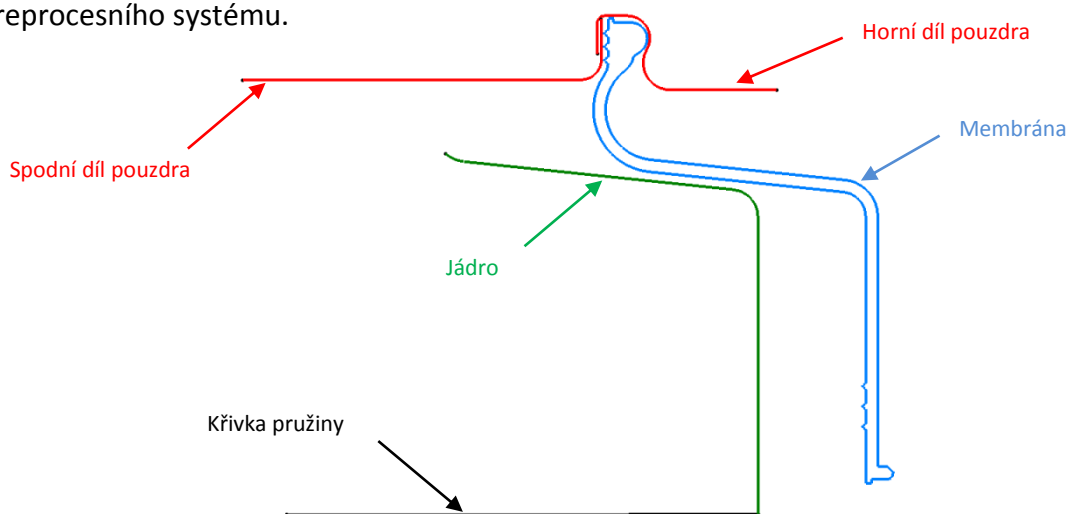
Pro FEM analýzu v našem případě bohatě poslouží, pokud bude geometrie membrány definována jako osově symetrická ve 2D prostředí.



Obrázek 25 – Řez membránou

Hraniční křivka řezu v polovině membrány bude exportována do formátu „.igs“, který bude jedním z geometrických vstupů do FEM.

Stejným způsobem lze modelovat i většinu zbylých křivek a prvků potřebných do preprocesního systému.



Obrázek 26 – IGES křivky připravené pro export do FEM systému

7 ANALÝZA MEMBRÁNY AKTUÁTORU VE FEM MSC. MARC

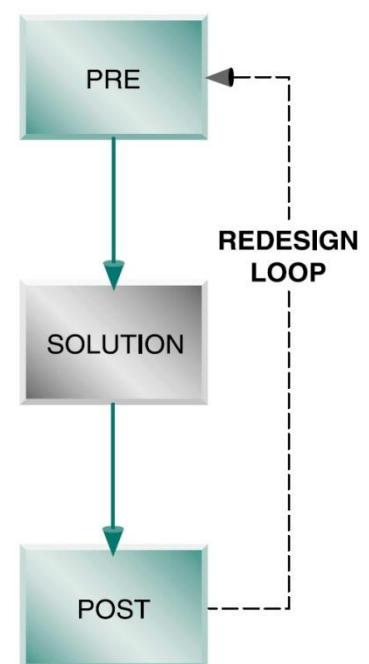
7.1 MSC. MARC/MENTAT a PATRAN FEM systémy

Vlastní analýza membrány bude probíhat v softwaru od společnosti MSC, jenž byla založena roku 1963 pod jménem MacNeal-Schwendler Corporation, odtud tedy zkratka. Společnost se již od začátku podílela na rozvoji prvních softwarů strukturních analýz v kosmonautice a dřívějších technologiích metody konečných prvků. V současnosti lze počítačovou podporou společně se softwarem této společnosti řešit široké spektrum úloh, predikovat napětí a deformace, vibrace a dynamiku, akustiku a tepelnou analýzu pro mnoho typů materiálů, které mohou vykazovat silně nelineární chování, jako například elastomery.

Proces analýzy s podporou výpočetní techniky probíhá v několika krocích znázorněných na schéma.

- Preprocessor – Zadání vstupních parametrů
- Solver – Řešení výpočetní analýzy
- Postprocessor – Vyhodnocení analýzy

Společnost MSC vydala několik programů, které spolu komunikují a vytvářejí jistou hierarchii v procesu řešení problematiky. V tomto případě je možno jako *preprocessor* i *postprocessor* užít systému **MSC.MENTAT** či **MSC.PATRAN**, postup v nich je téměř identický. Pro řešení numerického modelu lineárního pneumatického aktuátoru byl jako preprocessor vybrán program **MSC.PATRAN**.



Obrázek 27 – Obecné schéma postupu při řešení analýzy ve FEM

Solver neboli řešič je system, který komunikuje s preprocesorem a postprocesorem, čerpá data z preprocesu, vyhodnocuje je a výsledky odesílá do postprocesu, na základě čehož se případně upraví vstupy tak, aby příští vyhodnocení proběhlo s uspokojivějším výsledkem. V tomto případě se jedná o Solver s názvem **MSC.MARC**.

MSC své výpočetní systémy neustále zdokonaluje a již několik desítek let se řadí mezi špičkové softwary pro řešení nelineárních úloh.

7.2 Pre - processing v systému PATRAN

Pre - processing zahrnuje několik kroků, které je potřeba dodržet. Sled kroků v některých případech nehraje roli, ale ve většině případů je nutné chronologii dodržet.

7.2.1 Import/tvorba geometrie

Vedle vlastní tvorby geometrie, která je obdobná, jako ve většině softwarů, podporuje systém Patran import geometrie z většiny známých, hojně užívaných programů (CATIA, Pro-E, Unigraphics, Euclid 3, I-DEAS) či formátů STEP, ACIS, IGES, STL, VDA. Vezme-li se v potaz několik základních faktů, o kterých bylo psáno v předchozí kapitole, export geometrie ve formátu IGES ze systému CATIA bude nejvhodnějším řešením, neboť přímý import křivek z CATIA V5 nepodporuje licence systému PATRAN, který je k dispozici v rámci této diplomové práce.

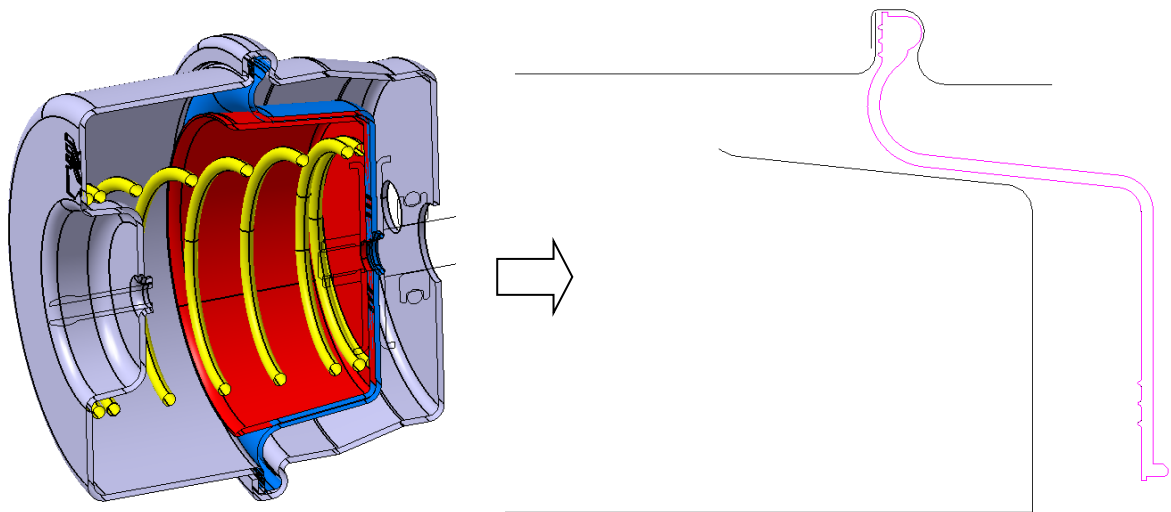
Pro jednodušší manipulaci v systému PATRAN byly v CATIA V5 vytvořeny 2 různé spojité křivky, které v budoucnu poslouží k tvorbě plochy průřezu membrány, přičemž jedna z křivek ponese parametry tkaniny.



Obrázek 28 – Verze křivek membrány v CATIA V5

IGES geometrie byla úspěšně importována do systému PATRAN připravena k další manipulaci.

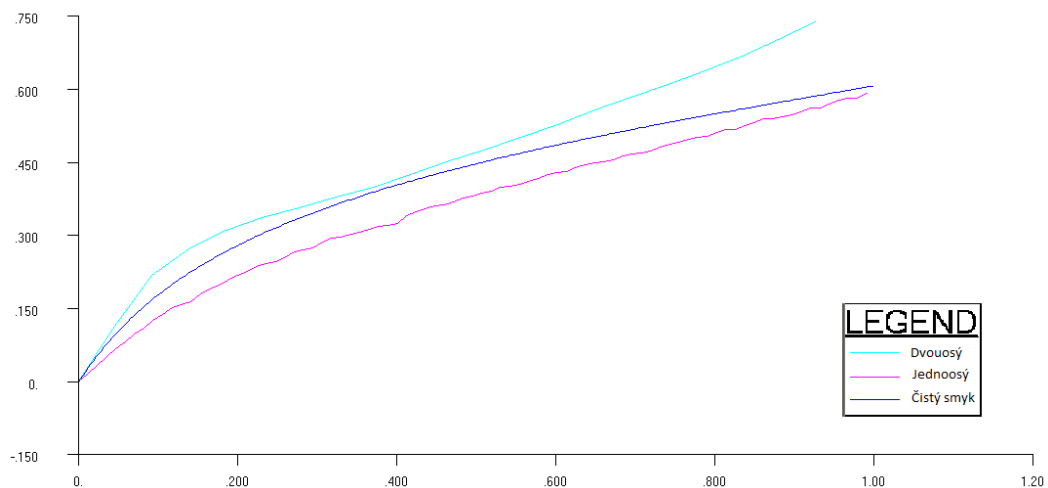
Stejnou cestou byly naimportovány i ostatní křivky, které budou figurovat v analýze. Jedná se o křivky osy pružiny, jádra, horní a spodní stěny pouzdra.



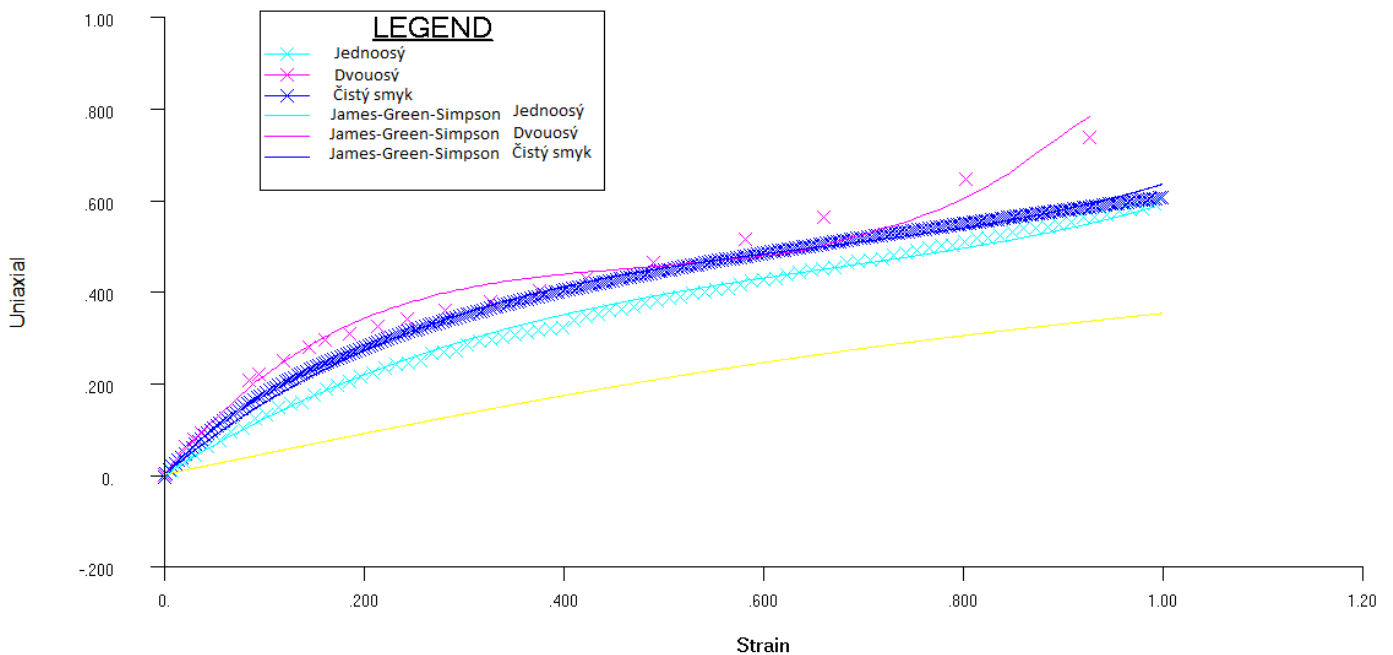
Obrázek 29 – Import geometrie do systému PATRAN (vpravo) porovnání reálného modelu (vlevo)

7.2.2 Tvorba materiálových vlastností

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, aby bylo možno určit materiálové konstanty u pryže, je třeba provést testy materiálu na smyk, jednoosý a dvouosý tah. Naměřené hodnoty se nyní použijí pro určení nejvhodnějšího hyperelastického modelu v PATRANu.



Graf 2 - Výsledek testování závislosti napětí a deformace elastomerní membrány (PATRAN)



Graf 3 – Srovnání závislosti naměřených hodnot a predikce hyperelastického modelu

PATRAN je schopen na základě naměřených dat vypočítat chybu, o kterou se liší od těchto dat určitý hyperelastický model. Nejmenší chybu spočítal PATRAN pro hyperelastický model „3rd Order Deformation“, též nazýván James – Green – Simpson, jehož materiálové konstanty jsou uvedeny v následující tabulce.

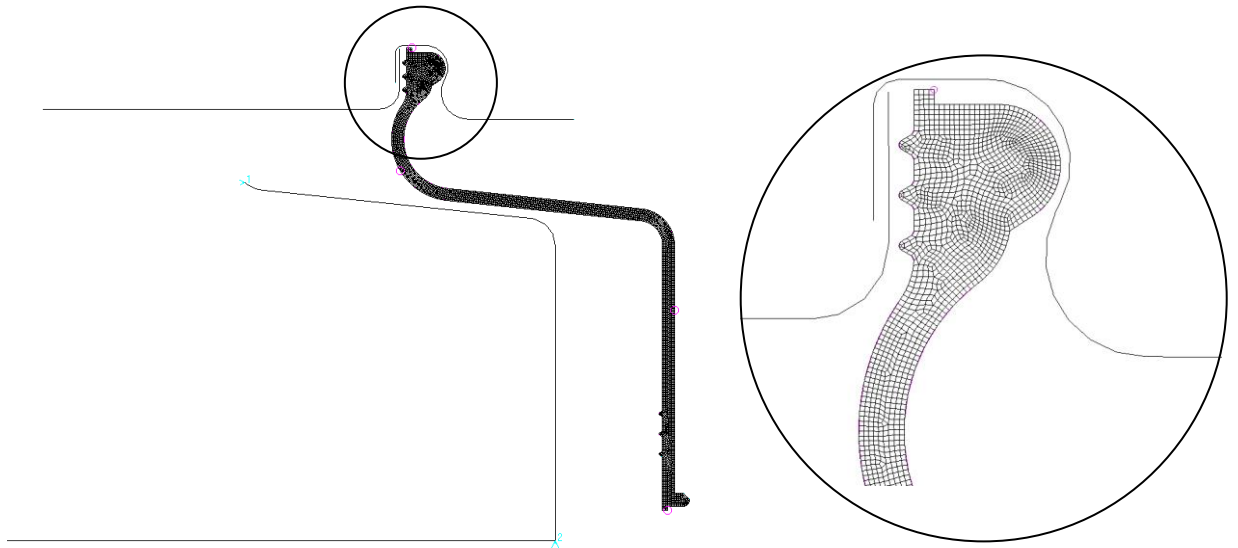
Materiálová konstanta	Hodnota [MPa]
C_{10}	0,299312590
C_{01}	-0,064954360
C_{11}	0,007784718
C_{20}	-0,041177675
C_{30}	0,005538627

Tabulka 1 – Materiálové konstanty použitého hyperelastického modelu

Dalším materiálem, který je třeba definovat, je textil, tedy materiál tkaniny, která je z vnitřní strany přilepena k membráně. Přiřazení vlastností u tkaniny proběhlo podstatně jednodušší cestou, tedy definováním modulu pružnosti $E = 700$ [MPa] a poissonova poměru příčné kontrakce $\mu = 0,3$ [-]. Tloušťka textilové vrstvy byla určena jako 0,4 mm.

7.2.3 Tvorba konečně - prvkové sítě

Důležitým procesem pre - processingu je také tvorba konečně - prvkové sítě, přičemž obecně platí, že hustota nebo také počet elementů sítě přímoúměrně ovlivňuje přesnost výpočtu. Jinými slovy, čím více elementů síť obsahuje, tím přesnější výsledky lze z analýzy získat. Nutno však dodat, že přesnost výpočtu znamená zvýšené nároky na hardware počítače, z tohoto důvodu je tedy nutné zamyslet se, které parametry je potřeba skutečně do FEM analýzy zahrnout a které je možné zanedbat, neboť i drobná úprava sítě v komplikované geometrii může znamenat časově náročnější výpočet, u mnoha případů i v řádech hodin.



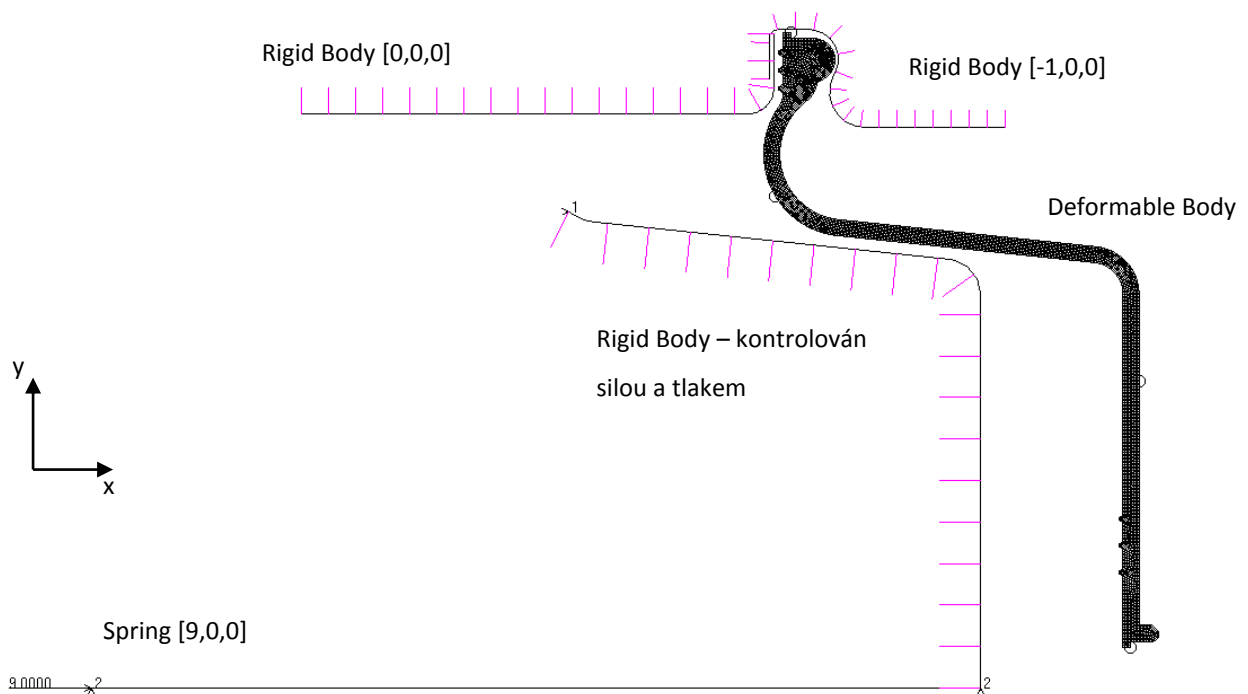
Obrázek 30 – Síť čtyř-elementová plochy průřezu membrány

Síť pro poměrně jednoduchou geometrii membrány byla zvolena čtyř - elementová o délce hrany 0,1 mm a rozložena byla na ploše. Křivka pro síť tkaniny byla definována elementem „bar“ opět o délce 0,1 mm, přičemž následně byla užita funkce pro ekvivalenci uzlových bodů, aby do výpočtu systém správně zakomponoval její vlastnosti.

7.2.4 Aplikace okrajových podmínek, případy zatížení

Pro správné definování okrajových podmínek bylo již provedeno mnoho kroků, jako například funkce aktuátoru, avšak některá další fakta je třeba uvést na pravou míru.

Předpoklad pro analýzu bude takový, že se v prvním kroku membrána upne v příslušném prostoru mezi horní a dolní částí pouzdra. Následně se na membránu nasune kovové jádro a aplikuje podtlak (1. cyklus). Vzhledem ke stanovenému cíli ohledně hystereze bude tlak přerušen, jádro se vrátí do původní polohy a tlak se aplikuje podruhé (2. cyklus).



Obrázek 31 – Aplikace okrajových podmínek

7.2.4.1 Ukotvení kraje membrány v pouzdře

V prvním bylo provedeno uchycení membrány mezi dvěma částmi pouzdra, která byla stanovena jako dokonale tuhá tělesa, neboť z hlediska této studie průběh analýzy neovlivní a tedy je lze považovat za zanedbatelné.

- Spodní část – „Rigid Body“ s posutím [0,0,0]
- Horní část – „Rigid Body“ s posunutím [-1,0,0]
- Membrána – „Deformable Body“ s vlastnostmi elastomeru na elementech 4 - uzlové sítě
- Tkanina – „Deformable Body“ s vlastnostmi textilu na elementech „Bar“

7.2.4.2 Nasunutí kovového jádra na membránu

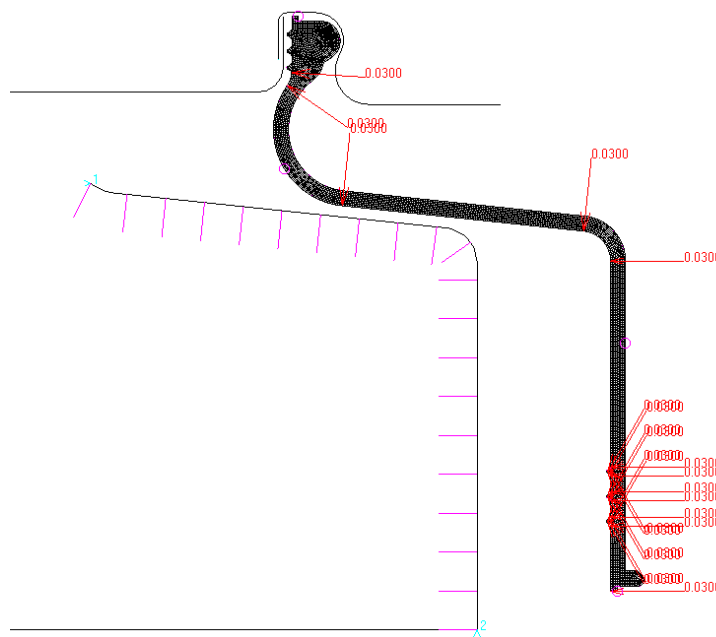
V druhém kroku se k definicím z kroku prvního přidaly podmínky pro posunutí jádra i s pružinou.

- Pružina – „Bar“ element s definicí „Spring“ (pružiny) o tuhosti $k = 3 \text{ N/mm}$ a možností pro pohyb pouze v ose symetrie (UX). Posunutí [9,0,0]
- Jádro – „Rigid Body“ kontrolované dvěma uzlovými body s možností pohybu pouze v ose symetrie. Těleso bylo nastaveno pro pohyb na základě působení vnějších sil.

Takto definované podmínky umožní spojení jádra s pružinou a společné interakci v následujících krocích.

7.2.4.3 Aplikace podtlaku (1. a 2. cyklus)

Tento krok zahrnuje pouze definování záporného tlaku na křivku membrány ze strany jádra, který má hodnotu: $p = -0,0299999 \text{ MPa}$.



Obrázek 32 – Definice zatížení tlakem

7.2.4.4 Uvolnění tlaku

V tomto kroku přestane působit podtlak, tj. jeho hodnota bude opět 0 a pružina navrátí celou pohybovou soustavu do původní polohy.

7.2.4.5 Případy zatížení (Load Cases) a potvrzení úlohy řešiči

Pro případy zatížení bylo vytvořeno 5 kroků, které v sobě nesou výčet všech okrajových podmínek, kterých se konkrétní případ týká, a ty pak byly před spuštěním samotné analýzy seřazený chronologicky.

- Ukotvení membrány
- Nasunutí jádra do membrány
- Aplikace podtlaku
- Uvolnění zatížení podtlakem
- Aplikace podtlaku v druhém cyklu

Tímto lze přejít do záložky analýzy a provést poslední příkazy, kterými by se měl výpočtový systém řídit. V tomto případě jde převážně o zahrnutí/ignorování koeficientu smykového tření a zanedbání tlaku v kroku uvolnění, lze však též nastavit počet kroků v analýze, které řešiči povolíme. Ve zkratce řečeno tak existuje možnost vyhnout se dlouhému čekání na výsledek analýzy, který s největší pravděpodobností nenalezl konce.

7.2.4.6 Závěr k práci v systému MSC.PATRAN

Software MSC.PATRAN je velmi citlivý na změny v okrajových podmínkách a v samotném nastavování případů zatížení. Je potřeba klást skutečně veliký důraz na správnost každého kroku, neboť i zdánlivě jednoduchá definice pro pryžovou membránu tak může trvat i desítky hodin. Přes všechno je však tento systém velmi přehledný a logicky postavený s příjemným prostředím pro konstruování jakéhokoliv nelineárního případu.

8 POST-PROCESSING V SYSTÉMU MSC MARC.MENTAT

Přímým výstupem z výpočtového systému MSC.Marc je soubor, který lze číst a dále zpracovávat opět v systému PATRAN a nebo MENTAT. Jako post – processingový software byl zvolen MENTAT, a to z důvodu přehlednější manipulace s vyhodnocením analýzy.

Nemalou výhodou je též skutečnost spustit výstup analýzy ihned po jejím samotném zahájení, čímž lze opticky kontrolovat průběh simulované problematiky a případně analýzu předběžně ukončit a verifikovat.

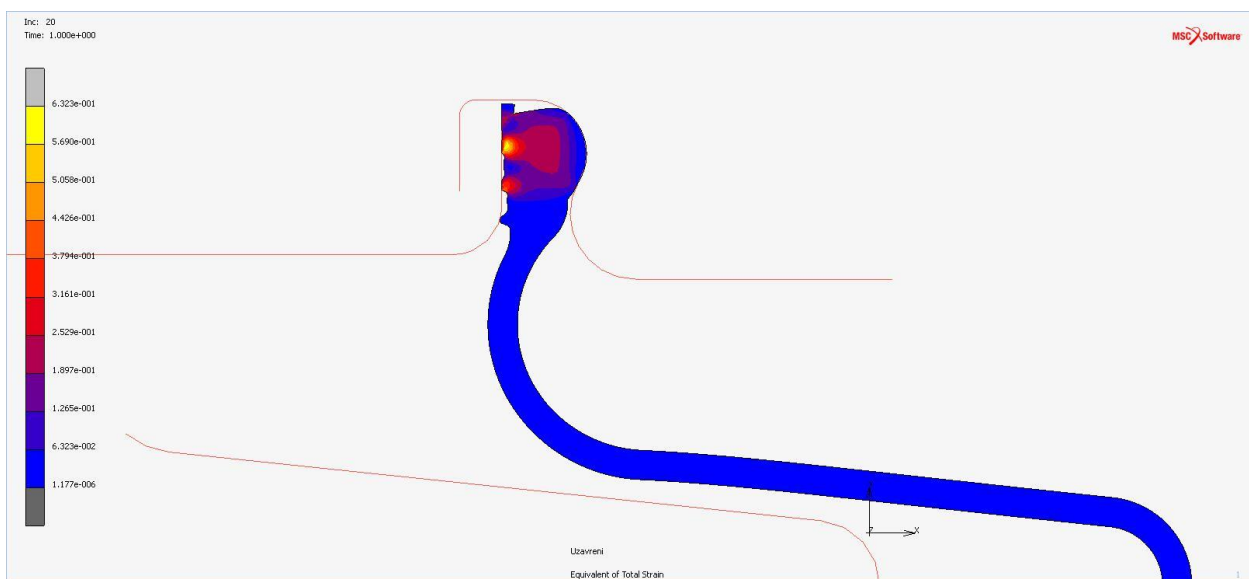
8.1 Analýza hystereze pryžové membrány

Pro analýzu, do jaké míry je způsobena hystereze, byly vytvořeny 2 modely s různými parametry tak, aby bylo možno ověřit si jisté předpoklady, uvést výsledky a formulovat závěr.

Simulace probíhala pro všechny modely vesměs stejně, a protože hlavním důvodem procesu výpočtové analýzy bylo stanovení závislosti posunutí na čase, byl v systému MENTAT nastaven parametr pro vykreslování míry deformace pro větší názornost.

8.1.1 Simulace reálné funkce membrány

- 1. krok – Ukotvení membrány do dvoudílného pouzdra

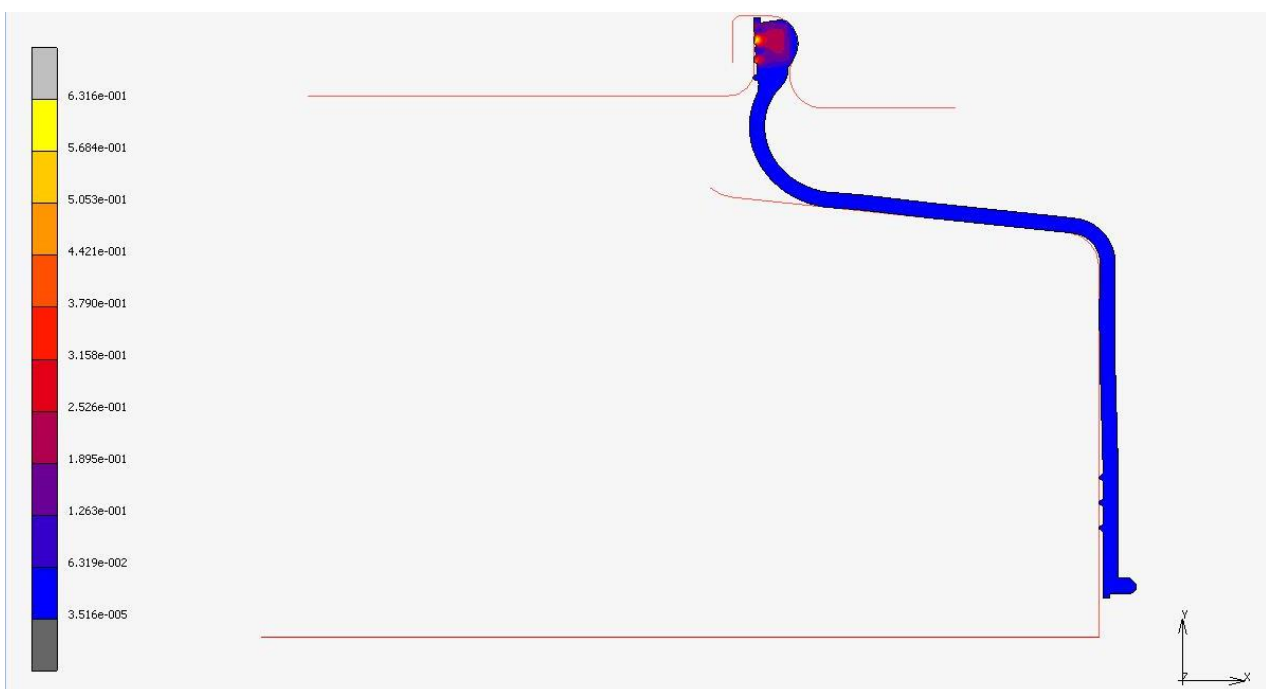


Obrázek 33 – Simulace uzavření pouzdra

V tomto kroku bylo třeba drobně experimentovat s posunutím vrchní části pouzdra, neboť definování přílišného stlačení mohlo mít za následek neúspěšný výpočet, materiál v jisté chvíli začal klást příliš velký odpor a pouzdro tedy nikdy nemohlo dosáhnout požadovaného posunutí.

V opačném případě docházelo k úplnému vyvlečení okraje membrány z místa ukotvení a takový výpočet pak může probíhat i několik hodin, komunikace s programem MENTAT je tedy velmi doporučena.

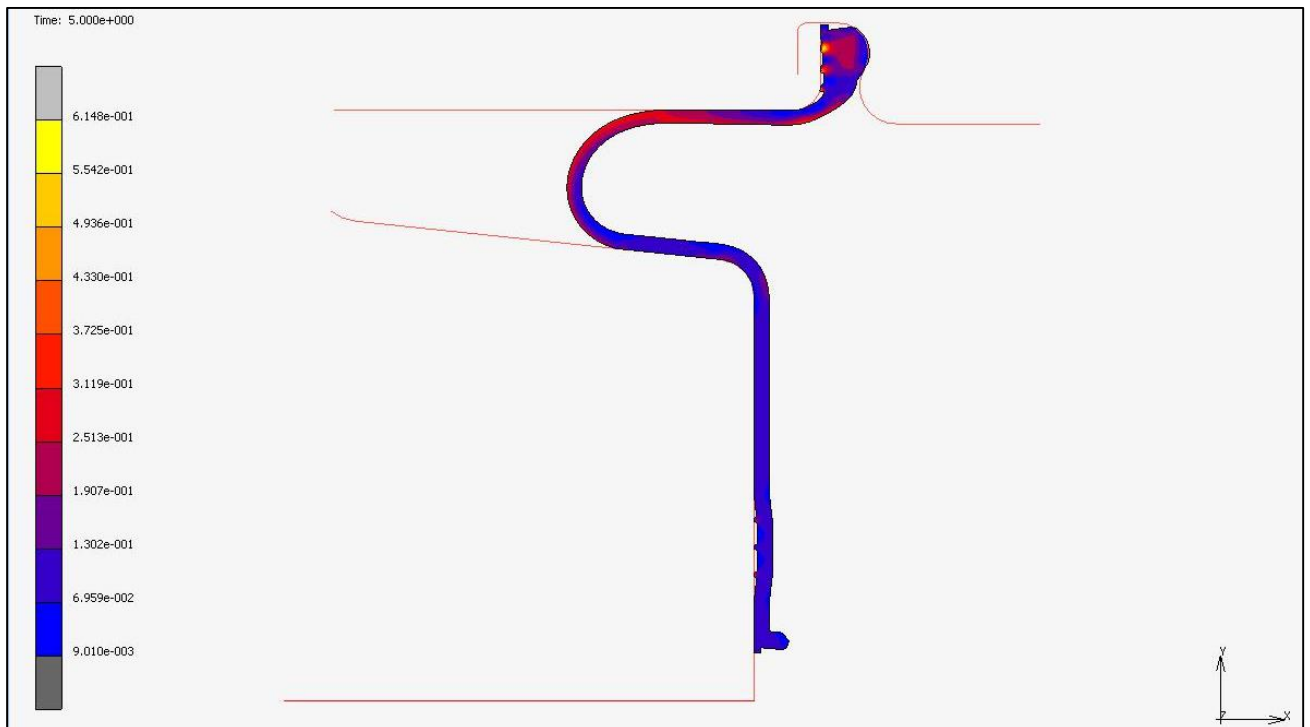
- 2. krok – Nasunutí jádra



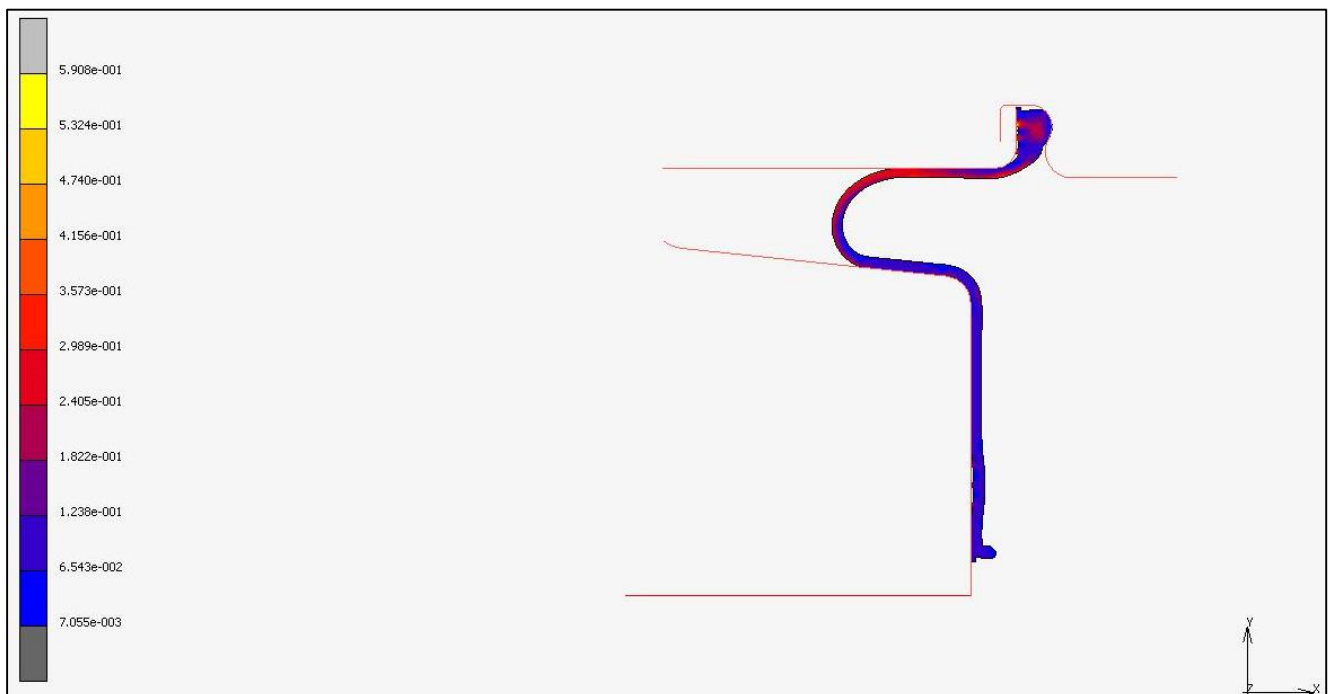
Obrázek 34 – Simulace nasunutí jádra na membránu

- 3. krok – Aplikace podtlaku

Podtlak působil ze strany jádra a jeho práce s mechanismem byla velmi elegantní a bez nežádoucích deformací. Hodnota tlaku byla zadána a její velikost byla **-0,03 MPa**.



Obrázek 35 – Simulace aplikace podtlaku pro ryze pryžovou membránu

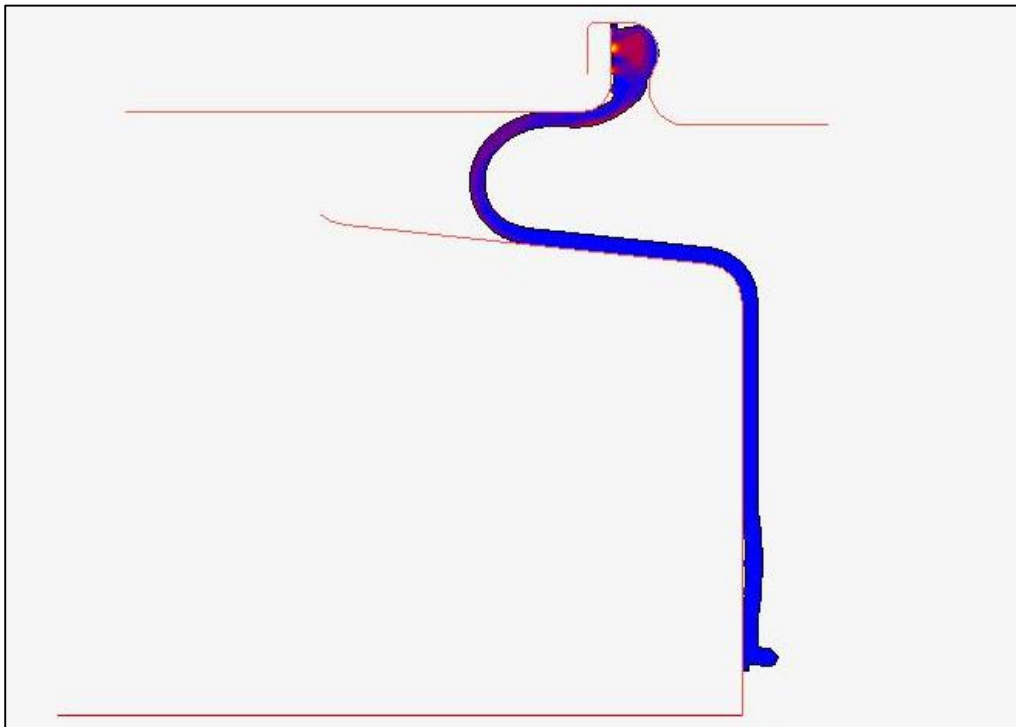


Obrázek 36 - Simulace aplikace podtlaku pro pryžovou membránu s tkaninou

Deformaci membrány lze pozorovat na výše uvedených obrázcích z analýzy a její průběh je pro oba typy membrány, ryze pryžovou a nebo podporou tkaninou, téměř identický.

- 4. krok – Fáze uvolnění

Fáze uvolnění podtlaku měla za následek návrat jádra do původní polohy díky pružině, čímž byl ukončen jeden z mnoha cyklů, kterému je membrána v praxi běžně vystavena.

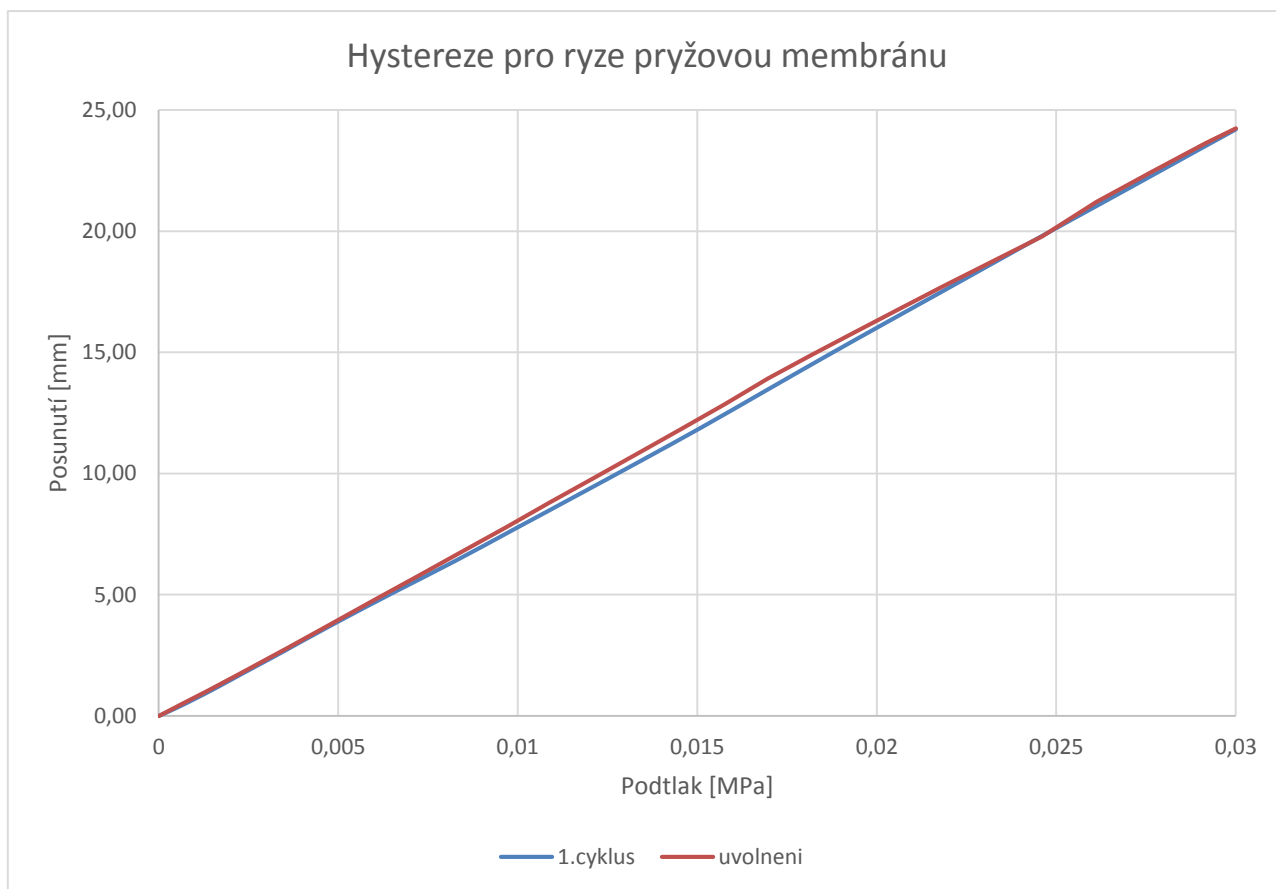


Obrázek 37 – Simulace aplikovaného podtlaku

8.1.2 Hystereze pro model bez tkaniny

Jedním z předpokladů je, že výsledky tahových zkoušek pro elastomer poskytly natolik přesná data, že následně určený hyperelastický model ve své formulaci, respektive materiálových konstantách, již zahrnuje zkoumanou hysterezi. Z tohoto důvodu byl vytvořen model jak pro membránu ryze pryžovou, tak pro membránu s podporou tkaniny pro porovnání rozdílů.

Předmětem této studie je hysterezní křivka, kterou lze získat drobnými úpravami závislosti posunutí na čase získané s pomocí systému MENTAT.

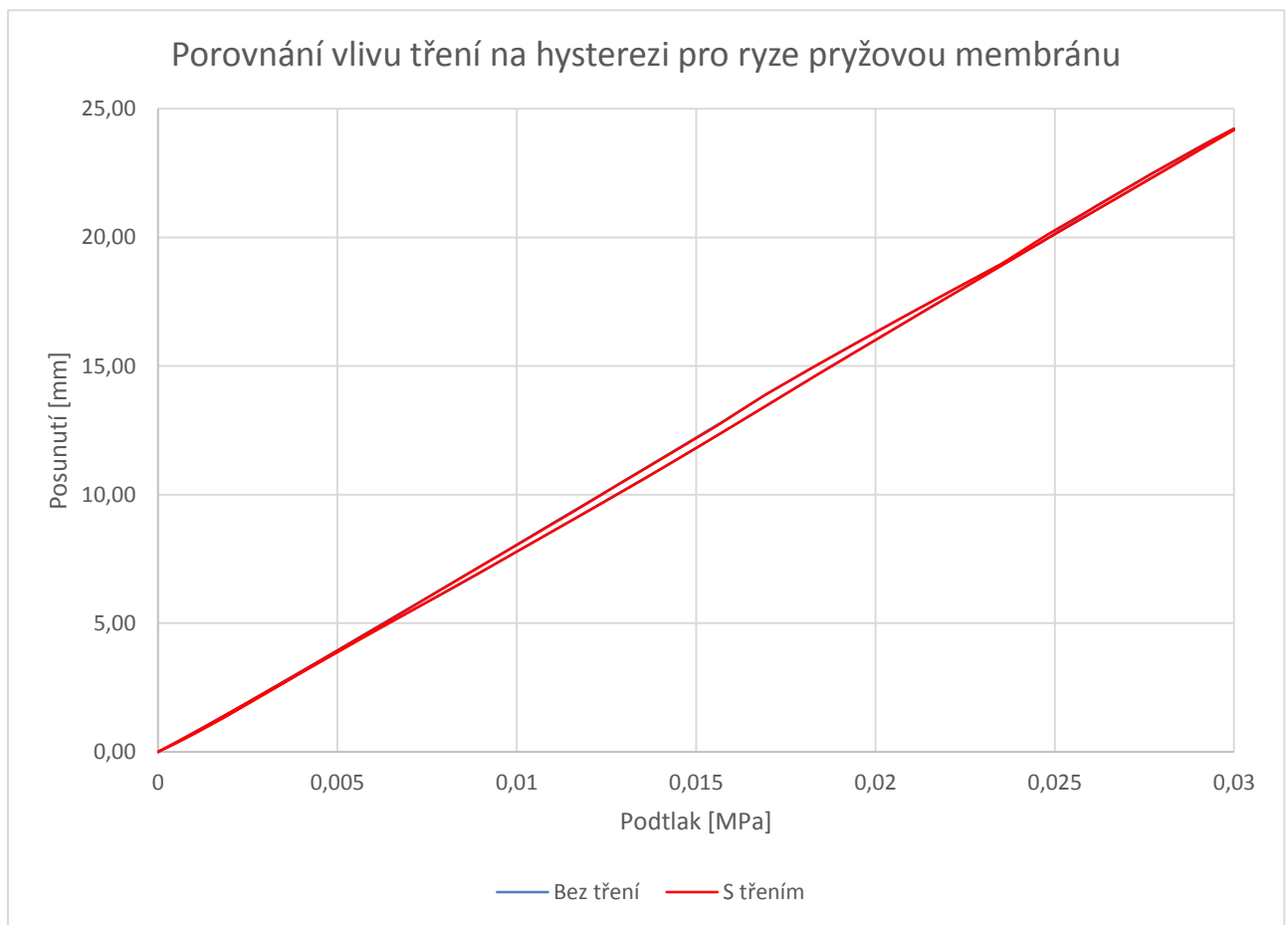


Graf 4 – Hysterezní křivka pro ryze pryžovou membránu

Tímto vykreslením hysterezní křivky bylo potvrzeno, že materiálový model již obsahoval informace o hysterezi, a to s chybou, kterou lze pozorovat nejnázorněji zhruba v době poloviny pracovního zdvihu táhla. Hystereze v tomto případě nabývá hodnoty **0,065 mm**.

8.1.3 Porovnání vlivu tření na hysterizi pro ryze pryžovou membránu

Jedním z dalších předpokladů je také vliv koeficientu smykového tření na hysterizi. Hodnota smykového koeficientu byla zadána jako $f = 0,07$ a pro testování byly oba výše zmíněné modely upraveny a předdefinovány.



Graf 5 - Porovnání vlivu tření na hysterizi pro ryze pryžovou membránu

Z výsledného srovnávacího grafu není příliš patrné, že smykové tření ovlivňuje hysterizi. Z naměřených dat však bylo možno odečíst rozdíl posunutí a při zahrnutí koeficientu $f = 0,07$ dle požadavku došlo ke zvýšení hysterize o $0,0101\text{mm}$.

ZÁVĚR

V praktické části diplomové práce byl postupně modelován proces řešení numerického modelu pneumatického lineárního aktuátoru, o jehož principu a funkcionalitě bylo pojednáváno v teoretické části.

Díky velmi silnému softwarovému nástroji od společnosti MSC bylo možno řešit tuto nelineární úlohu s možností simulovat reálné pracovní podmínky pryžové membrány, která je součástí aktuátoru.

Výsledkem bylo vykreslení hysterezních křivek, na základě kterých bylo možno konstatovat závěry pro zadavatele, společnost WOCO STV s.r.o.

Na závěr lze tedy konstatovat, že vliv tkaniny na hysterezi membrány je prakticky zanedbatelný. Vliv smykového tření však zanedbatelný již není, neboť v závislosti na konstrukční složitosti do jisté míry hysterezi ovlivňuje. V tomto případě byla hodnota rozdílu hysterezí 0,0101 mm.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Dvořák, Z., Javořík, J., Elastomerní konstrukční materiály. Zlín: UTB, 2009
- [2] Knedla, B., Technická pryž. Praha: SNTL, 1975
- [3] Rybníkář, F., Makromolekulární chemie I, Brno: VUT, 1988
- [4] Stoklasa, K., Zpracovatelské inženýrství I – Základy gumárenské a plastikářské technologie. Zlín: UTB, 2007
- [5] Dvořák, Z., Zpracovatelské procesy gumárenské. Zlín: UTB, 2011
- [6] Holub, J., Pryž jako konstrukční materiál. Praha: SNTL, 1967
- [7] Nový, R., Hluk a chvění, ČVUT v Praze, 2000
- [8] Dvořák, Z., Javořík, J., konstrukce výrobků – Konstrukční materiály elastomerní a formy pro jejich výrobu. Zlín: UTB, 2013
- [9] Maláč, J., Gumárenská technologie. Zlín: UTB, 2005
- [10] Ducháček, V., Změkčovadla, Zlín: ČSPCH, 2010
- [11] Motors Garage, [online], [cit.2014-12-02], Dostupný z:
<http://www.motorsgarage.in/2012/07/variable-geometry-turbocharger-vgt.html>
- [12] Motors Sports Center, [online], [cit.2014-12-02], Dostupný z:
http://www.motorsportscenter.com/printer_165.shtml
- [13] Audi S4 wiki, [online], [cit.2014-12-02], Dostupný z:
http://s4wiki.com/wiki/Wastegate_bypass_regulator_valve
- [14] Interní materiály Honeywell s.r.o.: zveřejněny v DP, Staněk, L., VUT v Brně, 2011
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/2851/2011_BP_Stanek_Lukas_120304.pdf?sequence=2
- [15] Turgo Smart, [online], [cit.2014-12-02], Dostupný z: <http://www.turbosmart.com.au>
- [16] Motors Garage, [online], [cit.2014-12-02], Dostupný z:
<http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/FMkomplet3.htm>
- [17] Rubber Country, [online], [cit.2014-12-02], Dostupný z:
<http://www.rubbercountry.com/uploads/news/2012/9/1348551838.jpg>
- [18] Motors Garage, [online], [cit.2014-12-02], Dostupný z:
<http://ttgroup.com.vn/FileManager/News/ImagesSmall/129201314639608.jpg>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

BR	Butadien Rubber (Butadienový kaučuk)
CR	Chloroprenový kaučuk
EPM	Etylen – propylenový kaučuk
E-SBR	Styrénový kaučuk z emulze
FEM	Finite Element Method (Metoda konečných prvků)
IR	Isopren Rubber (Izoprenový kaučuk)
NBR	Nitril – Butadien Rubber (Butadien – akrylonitrilový kaučuk)
NR	Natural Rubber (Přírodní kaučuk)
PA	Polyamid
PE	Polyetylén
PES	Polyester
PMMA	Polymethylmetakrylát
PP	Polypropylen
PS	Polystyrén
PUR	Polyuretan
PVC	Polyvinilchlorid
SBR	Styren – Butadien Rubber (Butadien – Styrénový kaučuk)
S-SBR	Styrénový kaučuk z roztoku
TPE	Termoplastický elastomer
UV	Ultrafialové záření
VGT	Variable Geometry Turbo ()

VNT Variable Nozzle Turbine (Variabilní geometrie lopatek)

WG Waste - Gate

MSC MacNeal – Schwendler Corporation

WG- Podtlakem řízený Waste - Gate

WG+ Přetlakem řízený Waste - Gate

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Chronologie využití konstrukčních materiálů (převzato z [5])	10
Obrázek 2 – Schéma turbodmychadla s regulací za pomoci WG klapky (převzato z [13])	13
Obrázek 3 – Řez turbodmychadla s regulací za pomoci VNT (převzato z [12])	14
Obrázek 4 – Porovnání charakteristik regulací WG a VNT (převzato z [14])	14
Obrázek 5 – Řez turbodmychadlem s regulací za pomoci VGT (převzato z [11])	15
Obrázek 6 – Umístění aktuátoru k turbodmychadlu (převzato z [15]).....	16
Obrázek 7 – WG+ aktuátor (převzato z [15])	17
Obrázek 8 – WG- aktuátor (převzato z [14]).....	17
Obrázek 9 – Struktura polymerů (převzato z [16])	19
Obrázek 10 – Čepování latexu z kaučukovníku (převzato z [17])	26
Obrázek 11 – Bloky přírodního kaučuku (převzato z [18]).....	26
Obrázek 12 – Strukturní vzorec NR: Polyisopren (převzato z [9])	27
Obrázek 13 – Strukturní vzorec SBR: butadien 1,4; styren; butadien 1,2 (převzato z [9])	29
Obrázek 14 – Strukturní vzorec BR: 1,4 – butadien; 1,2 – butadien (převzato z [9])	29
Obrázek 15 –Strukturní vzorec NBR: butadien; akrylonitril (převzato z [9])	30
Obrázek 16 – Strukturní vzorec IR: Isopren 1,4; isopren 3,4 (převzato z [9]).....	30
Obrázek 17 – Strukturní vzorec CR (převzato z [9])	31
Obrázek 18 – Strukturní vzorec EDPM: etylen; propylene; etylidennorboren (převzato z [9])	32
Obrázek 19 – Závislost obsahu síry ve vulkanizátu na tažnost a pevnost v tahu (převzato z [5])	35
Obrázek 20 – Závislost napětí na deformaci zatěžovaného elastomeru (převzato z [1])	39
Obrázek 21 – Fotografie skutečné pryžové membrány.....	47
Obrázek 22 – Model pryžové membrány	48

Obrázek 23 – Řez sestavou aktuátoru	49
Obrázek 24 – Pohled na aktuátor vně	50
Obrázek 25 – Řez membránou	52
Obrázek 26 – IGES křivky připravené pro export do FEM systému	52
Obrázek 27 – Obecné schéma postupu při řešení analýzy ve FEM	53
Obrázek 28 – Verze křivek membrány v CATIA V5	54
Obrázek 29 – Import geometrie do systému PATRAN (vpravo) porovnání reálného modelu (vlevo).....	55
Obrázek 30 – Síť čtyř-elementová plochy průřezu membrány.....	57
Obrázek 31 – Aplikace okrajových podmínek.....	58
Obrázek 32 – Definice zatížení tlakem.....	59
Obrázek 33 – Simulace uzavření pouzdra.....	61
Obrázek 34 – Simulace nasunutí jádra na membránu.....	62
Obrázek 35 – Simulace aplikace podtlaku pro ryze pryžovou membránu	63
Obrázek 36 - Simulace aplikace podtlaku pro pryžovou membránu s tkaninou.....	63
Obrázek 37 – Simulace aplikovaného podtlaku.....	64

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Materiálové konstanty použitého hyperelastického modelu	56
---	----

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Výsledek testování závislosti napětí a deformace elastomerní membrány (Excel)	51
Graf 2 - Výsledek testování závislosti napětí a deformace elastomerní membrány (PATRAN)	55
Graf 3 – Srovnání závislostí naměřených hodnot a predikce hyperelastického modelu.....	56
Graf 4 – Hysterezní křivka pro ryze pryžovou membránu	65
Graf 6 - Porovnání vlivu tření na hysterezi pro ryze pryžovou membránu	66