



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## SIMULACE MECHANISMU ZADNÍCH DVEŘÍ AUTOMOBILU

SIMULATION OF THE 5TH CAR DOOR MECHANISM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Martin Taušek

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2016

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Martin Taušek**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

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

### Simulace mechanismu zadních dveří automobilu

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na dynamickou analýzu zvedacího pístového mechanismu firmy SWELL. Konkrétně se jedná se o mechanismus zadních dveří osobního automobilu, který je řešený v prostředí ADAMS. Úkolem práce je integrovat fyzikální modely pracovního pístu do dynamického modelu zadních dveří a vyhodnotit výsledky simulací pro dané parametry soustavy pístového mechanismu.

#### Cíle bakalářské práce:

1. Analýza mechanismu zadních dveří automobilu.
2. Vytvoření modelu v prostředí ADAMS.
3. Volba parametrů mechanismu vzhledem k požadavkům na mechanismus.

#### Seznam literatury:

Haug, E. J. (1989): Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Allyn and Bacon.

Davies, G. (2012): Materials for Automobile Bodies, Elsevier, 404 s.

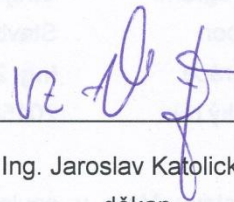
Karlberg, M., Löfstrand, M., Sandberg, S., Lundin, M. (2013): State of the art in simulation-driven design, International Journal of Product Development, 18 (1), s. 68-87.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 26. 11. 2015



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.  
ředitel ústavu



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



## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá simulací mechanismu otevírání pátých dveří automobilu v prostředí ADAMS, ve kterém byl vytvořen model mechanismu. Jednotlivým tělesům byly přiděleny tytéž parametry, jaké mají v reálném modelu. Zdvih je zajištěn dvěma plynovými vzpěrami, které bylo nutné dostatečně nadimenzovat, aby bylo dosaženo úplného a zároveň bezpečného otevření dveří. Práce obsahuje kinematickou a dynamickou analýzu mechanismu otevírání dveří.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Plynová vzpěra, MSC.ADAMS, simulace, kinematická analýza, dynamická analýza, stavové veličiny plynu, adiabatický děj

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with simulation of the 5th car door mechanism. The simulation runs in MSC.ADAMS software in which was made simulation model. The model contains several bodies which needed to have the same mechanical parameters as the CAD model of the real 5th door so the simulation was accurate. The opening of door is done by two gas springs, one on each side. These gas springs had to be correctly dimensioned to achieve fully opened door and safety movement as well. The thesis also deals with kinematic and dynamic analysis of the mechanism.

## KEYWORDS

Gas spring, MSC.ADAMS, simulation, kinematic analysis, dynamic analysis, ideal gas state variables, adiabatic process



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

TAUŠEK, M. Simulace mechanismu zadních dveří automobilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 46 s. Vedoucí závěrečné práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeněka Hadaše, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Martin Taušek



## PODĚKOVÁNÍ

Poděkování směřuje vedoucímu mé bakalářské práce docentovi Zdeňkovi Hadašovi za pomoc při tvorbě a poskytnuté rady. Dále bych chtěl poděkovat firmě SWELL, která mi téma bakalářské práce poskytla a za cenné zkušenosti a nové poznatky získané během letní stáže. Poděkování také patří Ing. Janu Tuhovčákovi za konzultace z termomechaniky. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině za podporu během mého studia.



## OBSAH

Úvod .....	9
1 Formulace problému a cíl práce .....	10
2 Plynové vzpěry .....	11
2.1 Princip plynových vzpěr .....	11
2.2 Rozdělení plynových vzpěr .....	12
3 Mechanismus otevírání.....	13
3.1 Kinematický rozbor – otevírání okna .....	14
3.2 Kinematický rozbor – otevírání dveří .....	17
4 Simulace otevírání .....	20
4.1 MSC Adams.....	20
4.2 Vytvoření modelu .....	21
4.3 Integrace fyzikálních modelů.....	22
4.3.1 Počáteční vstupní parametry.....	23
4.3.2 Integrace stavových proměnných .....	25
5 Výsledky simulace.....	26
5.1 Průběhy stavových veličin – pravá vzpěra .....	26
5.2 Výsledky stavových veličin – levá vzpěra.....	31
5.3 Výsledky kinematiky - okno.....	34
5.4 Výsledky kinematiky – víko .....	37
5.5 Výsledky dynamiky – okno .....	40
5.6 Výsledky dynamiky – víko .....	41
Závěr.....	42
Použité informační zdroje.....	43
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	44
Seznam příloh.....	46



## ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je simulace otevírání pátých dveří automobilu, analýza kinematiky a dynamiky celé soustavy a návržení plynových vzpěr, které otevírání zajišťují. Simulace probíhá v prostředí ADAMS, což je hojně využívaný výpočtový program využívaný nejen v odvětví automobilového průmyslu. Téma této bakalářské práce bylo zadáno firmou SWELL a.s., která má sídlo v Hořicích a pobočku v Mladé Boleslavi. Firma úzce spolupracuje se ŠKODA AUTO A.S., pro kterou poskytuje služby v oblastech konstrukce, numireckých simulací a výpočtů, ale má i řadu jiných zákazníků nejen z automobilového průmyslu. V oblasti konstrukce se firma dlouhodobě specializuje na vývojovou konstrukci, zejména přední a zadní části automobilů, svařované karoserie a interiéry. Z oblasti výpočtu firma poskytuje tvorbu a analýzu FE-modelů, frekvenční analýzy, crash analýzy, analýzy životnosti a optimalizace. Firma disponuje novou zkušebnou s ISO akreditací, kde provádí zátěžové zkoušky, životnostní analýzy, vibrační zkoušky, zkoušky vlivu prostředí a mnoho dalších. Mezi další oblast nabízených služeb patří konstrukce lisovacích nástrojů a lisování zejména prototypových dílů, konstrukce kontrolních a měřících přípravků. U firmy SWELL jsem měl možnost absolvovat dvouměsíční stáž, jejímž cílem bylo mimo jiné naučit se pracovat s programem ADAMS do takové míry, abych byl schopen samostatně vypracovat bakalářskou práci na zmíněné téma.

Otevírání mechanismu zajišťují dvě plynové vzpěry, kterých si můžeme všimnout v každodenním životě při otevírání pátých dveří automobilu a nejen zde. Například vysouvací píst kancelářské židle funguje na podobném principu. Plynové vzpěry se obecně využívají pro otevírání nejrůznějších vík, čímž nám ulehčují práci a zároveň slouží jako podpěra udržující víko otevřené.



## 1 FORMULACE PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Cílem práce je simulace otevírání pátých dveří automobilu. Simulace se skládá ze dvou úloh. Jednak jde o otevření pouze okna pro přístup uživatele do zavazadlového prostoru pro ukládání menších předmětů, druhá část úlohy se zabývá zdvihem dveří jako celku. Zdvih zajišťují dvě plynové vzpěry. Pravá vzpěra zaručuje zdvih okna při uvolnění zámku mezi oknem a víkem, levá společně s pravou vzpěrou zajišťují zdvih celých dveří po uvolnění zámku mezi víkem a karoserií. Správné nadimenzování sil vyvolané vzpěrami musí zajistit jejich úplné otevření, a zároveň nesmí způsobit příliš rychlé otevření, aby nedošlo ke zranění obsluhy během otevírání. Okno se musí otevřít pouze uvolněním zámku bez použití pomocné síly uživatele, naopak páté dveře se musí otevřít po uvolnění zámku s pomocí přídavné síly uživatele o velikosti  $50\text{ N}$  působící po dráze  $50\text{ cm}$ . Po překonání této dráhy uživatelská síla přestane působit a dveře se musí plně otevřít působením pouze vzpěr až do dosažení mezní polohy a v této poloze musejí dveře setrvat.

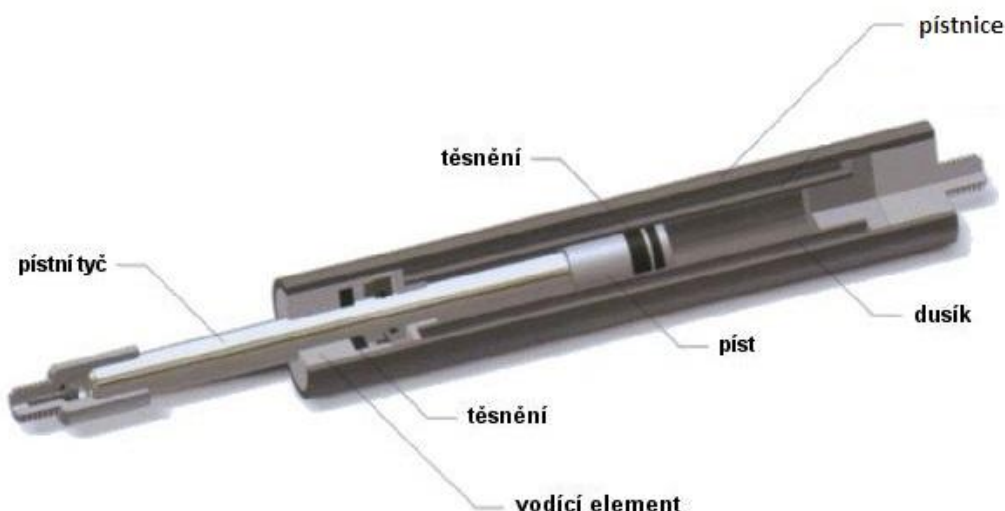


## 2 PLYNOVÉ VZPĚRY

Plynové vzpěry jsou hojně využívány zejména v automobilovém průmyslu pro zdvih pátých dveří a kapot. U pátých dveří se s využitím plynových vzpěr setkáme takřka ve sto procentech případů. Mimo jiné jsou vzpěry [1] také využívány k otevírání různých vík, krytů a dveří např. otevírání úložného prostoru u autobusů, otevírání úložných prostorů postelí, otevírání krytů polic, otevírání různých krytů strojů apod. Vzpěra zaručí otevření a zároveň slouží jako podpěra a zajišťuje stav plného otevření. Při zavírání slouží vzpěra jako tlumič, aby nedošlo k příliš prudkému zavření, kde by hrozilo poškození zámku apod. V této kapitole bude vysvětlen princip funkce a rozdělení vzpěr.

### 2.1 PRINCIP PLYNOVÝCH VZPĚR

Plynová vzpěra se skládá z: pístnice, pístu s přepouštěcím kanálkem, pístní tyče, vodícího elementu a těsnění (nejčastěji O-kroužky nebo těsnící manžety). Složení vzpěry znázorňuje obr. 2.1. Do pístnice je napuštěn stlačený plyn. V praxi se v zásadě používá dusík[2]. Kdyby byla vzpěra napuštěna stlačeným vzduchem, hrozilo by vznícení uvnitř pístnice při reakci s mazivem.



Obr 2.1 – Dvoukomorová plynová vzpěra[3]

Díky odlišným velikostem ploch nad a pod pístem, na které působí tlak stlačeného dusíku, směřuje výsledná síla ve směru z komory ven k pístní tyči. Velikost síly [3] tedy závisí na rozdílu ploch před a za pístem a také na velikosti tlaku stlačeného dusíku.

$$F_{1(2)} = p_{1(2)} \cdot S_{1(2)} \quad (2.1)$$

$$F_V = p_1 \cdot S_1 - p_2 \cdot S_2 \quad (2.2)$$

Tento princip si nechal v USA v roce 1875 patentovat inženýr francouzského původu Paul Giffard [4], avšak masová produkce plynových vzpěr začala až téměř o sto let později, až když byly známé metody přesnějšího obrábění, jež eliminovalo únik plynu z komory.



## 2.2 ROZDĚLENÍ PLYNOVÝCH VZPĚŘ

Vzpěry dělíme na tažné a tlačné. Princip tlačných vzpěr byl popsán v předešlé kapitole, tažné vzpěry jsou opatřeny pístem bez prepouštěcího kanálku a stlačený plyn je uzavřen pouze v jedné komoře. Velikost tlaku plynu uvnitř vzpěry pak udává velikost tlačné vzpěry. Po uvolnění víka dojde k vrácení pístu do původní polohy. Výrobci plynových vzpěr nabízí širokou škálu rozměrů vzpěr, různé tlakování komor a také různé koncovky vzpěr [5] pro uchycení vzpěry: zakončení axiálním kulovým kloubem, pouzdem pro kulový kloub, okem, vidlicí, případně univerzální zakončení se závitem pro výměnu koncovek. Mezi přední výrobce plynových vzpěr patří například Industrial Gas Springs, Inc. a Bansbach easylift®, oba sídlící v USA, Metrol Springs Ltd. sídlící ve Velké Británii a Ecold® sídlící ve Švýcarsku. Vzpěru výrobce natlakuje potřebným tlakem, aby vyvolala sílu požadovanou zákazníkem. V tabulce 2.1 je uvedeno rozdělení vzpěr dle velikosti a jejich maximální možné síly, které jsou schopny vyvinout.

Tabulka 2.1: Rozdělené vzpěr dle rozměrů a sil.[3]

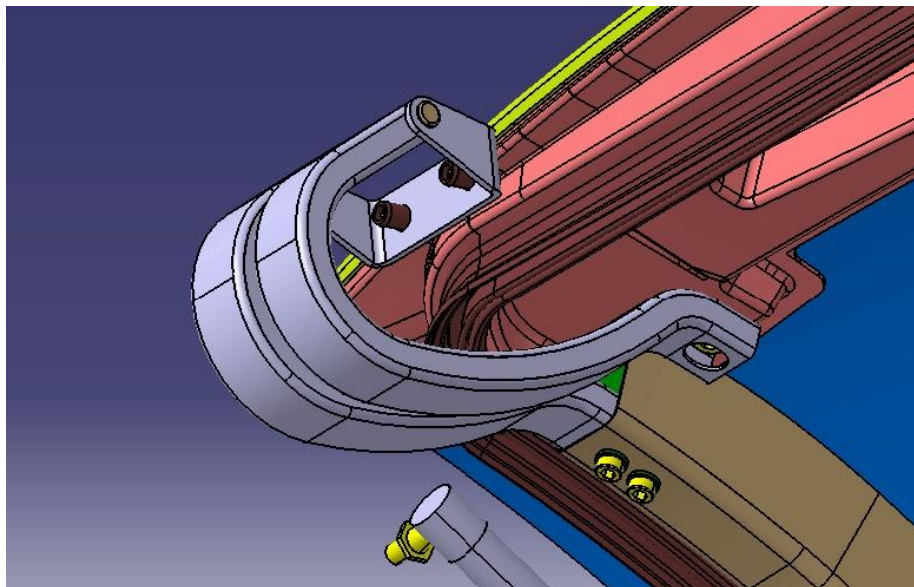
Typ	Ø pístní tyče	Ø válce	Minimální síla	Maximální síla
G 3/8	3 mm	8 mm	5 N	100 N
G 3/10	3 mm	10 mm	5 N	100 N
G 4/12	4 mm	12 mm	10 N	180 N
G 6/15	6 mm	15 mm	40 N	400 N
G 8/19	8 mm	19 mm	50 N	700 N
G 10/23	10 mm	23 mm	100 N	1200 N
G 14/28	14 mm	28 mm	150 N	2500 N
G 20/40	20 mm	40 mm	300 N	5000 N
G 22/40	22 mm	40 mm	500 N	6000 N
G 25/55	25 mm	55 mm	500 N	7500 N
G 30/65	30 mm	65 mm	750 N	10 000 N

Dle reálného modelu sestavy dveří bylo zjištěno, že byly pro otevírání vybrány dvě vzpěry G 8/19 pro otevírání dveří i okna s maximální silou 700N.



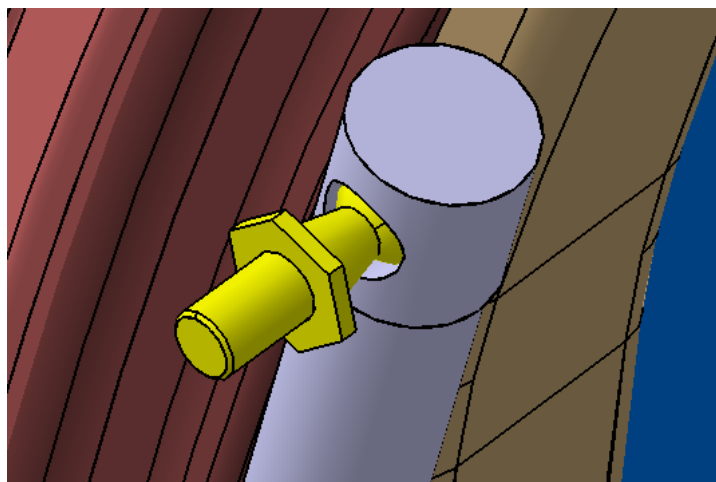
### 3 MECHANISMUS OTEVÍRÁNÍ

Ke karoserii jsou ukotveny symetricky čepy na pravé a levé straně a na každém čepu jsou dva panty. Vnitřní pant je uchycen k výztužnému rámu okna, zatímco levý pant je uchycen k výztuze dveří tak, jak ukazuje obr. 3.1. Tento mechanismus tedy zajišťuje oddělené otevírání okna se zajištěnými dveřmi.



*Obr. 3.1: Ukotvení dveří ke karoserii*

Plynové vzpěry jsou ke karoserii ukotveny kulovými čepu a stejně tak jsou ukotveny k víku a k oknu (obr. 3.2). Úloha otevírání dveří a okna bude pro znázornění v dalších podkapitolách řešena graficky jako inverzní úloha kinematiky. Inverzní úlohy kinematiky jsou úlohy, kde známe výslednou dráhu, rychlost nebo zrychlení tělesa a řešíme počáteční vstupní hodnoty. Pro tuto konkrétní úlohu to znamená, že známe rychlost otevírání dveří, respektive rychlost koncového bodu, který nás zajímá z hlediska bezpečnosti otevírání, a řešíme rychlost pístu pohybujícího se v pístnici.



*Obr. 3.2: Uložení kulového čepu ve vzpěře*

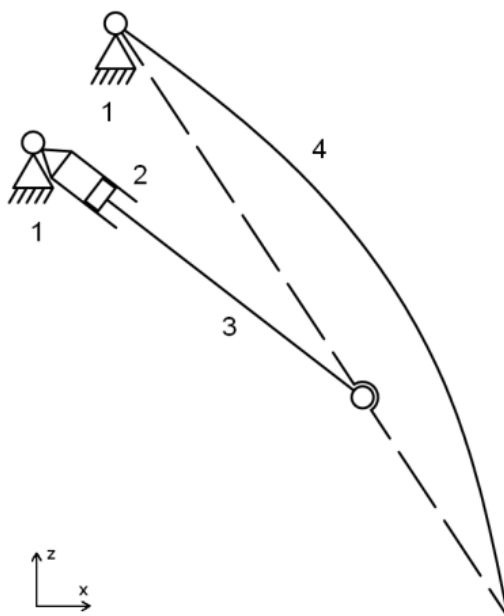


### 3.1 KINEMATICKÝ ROZBOR – OTEVÍRÁNÍ OKNA

Zjednodušené schéma otevírání okna je znázorněno na obr. 3.3. Skládá se celkem ze čtyř těles: základní těleso (karoserie automobilu) – 1, pístnice plynové vzpěry – 2, píst s pístní tyčí – 3, okno – 4. Schéma obsahuje tři rotační vazby reprezentující uložení vzpěr na kulových čepch, uložení na horním válcovém čepu spojeného s karoserií a jednu posuvnou vazbu reprezentující uložení pístu v pístnici. Tento mechanismus má jeden stupeň volnosti, kterým je rotace kolem osy  $Y$ , jak vyplývá z rovnice [6] (3.1), kde  $n$  značí počet pohyblivých těles, v závorce je uveden počet jednotlivých vazeb ( $r$  - rotační,  $t$  - translační,  $v$  - valivá),  $o$  značí počet obecných dvojic mechanismu.

$$i = 3 \cdot n - 2 \cdot (r + p + v) - o \quad (3.1)$$

$$i = 3 \cdot 3 - 2 \cdot (3 + 1 + 0) - 0 = 9 - 8 = 1 \Rightarrow 1^\circ \text{ volnosti}$$



Obr. 3.3: Schéma mechanismu otevírání okna; 1 - základní těleso (karoserie); 2 - pístnice plynové vzpěry; 3 - píst s pístní tyčí plynové vzpěry; 4 - okno;

Úloha otevírání bude pro znázornění řešena graficky jako nepřímá úloha kinematiky. Důvodem je požadavek na bezpečnost během otevírání. Proto je u koncového bodu okna uvedena bezpečná rychlost otevírání o velikosti  $7 \text{ m/s}$ , ze které lze dále analyzovat ostatní rychlosti na základě poznatků kinematiky, kdy známe vždy směry vektorů rychlostí ostatních těles, ale neznáme velikosti. Velikosti vektorů odvodíme z vektorových obrazců [6](obr. 3.5a) a přeneseme zpět do schématu. Obdobně bylo postupováno při určování zrychlení [6](obr. 3.5b).

Jednotlivá tělesa konají následující pohyby: těleso 3 vůči tělesu 1 – rotační pohyb  
 těleso 3 vůči tělesu 2 – translační pohyb  
 těleso 4 vůči tělesu 1 – rotační pohyb

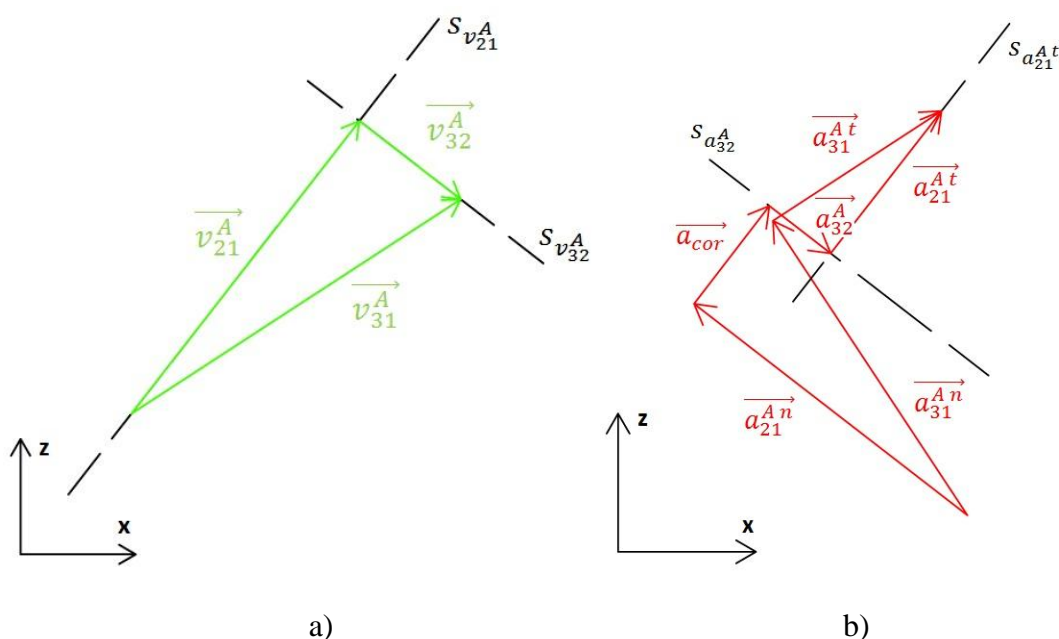




graficky, kdy nejsou známy velikosti zrychlení, ale jsou známy nositelky jednotlivých tečných zrychlení, které odpovídají nositelkám rychlostí stejných těles (obr. 3.5b). Z obrázků určíme i směry zrychlení, jelikož musí platit rovnice (3.3). Při konání složeného pohybu vzniká Coriolisovo zrychlení [6], a je nutné zjistit, zda je nebo není nulové. V této konkrétní úloze Coriolisovo zrychlení nulové není, takže musí být rovněž vneseno do schématu (obr. 3.5b).

$$\vec{a}_{41}^{An} + \vec{a}_{41}^{At} = \vec{a}_{31}^{An} + \vec{a}_{31}^{At} = \vec{a}_{21}^{An} + \vec{a}_{21}^{At} + \vec{a}_{32}^A + \vec{a}_{cor} \quad (3.3)$$

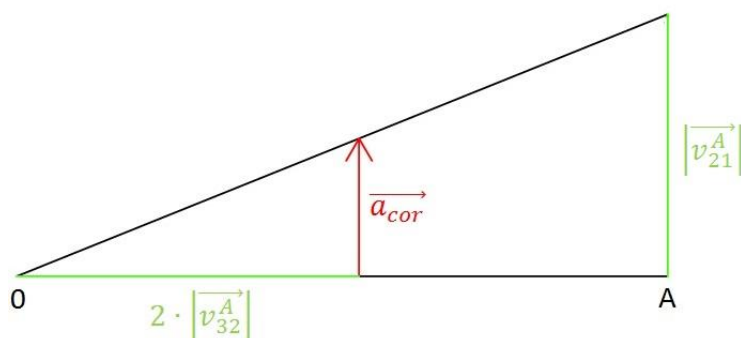
$$\omega = \frac{v}{R} \quad (3.4)$$



Obr. 3.5: Vektorové obrazce - okno; a) vektorový obrazec rychlosti b) vektorový obrazec zrychlení

Grafické určení velikosti Coriolisova zrychlení je uvedeno na obr. 3.6. Odvěsny pravoúhlého trojúhelníku [6] představují vzdálenost spojnice koncových bodů a velikost unášivé rychlosti, v této konkrétní úloze odpovídá unášivá rychlost rychlosti  $\vec{v}_{21}^A$ . Na odvěsně reprezentující vzdálenost je vynesena dvakrát velikost rychlosti posuvného pohybu a na konci této vzdálenosti je vztyčena kolmice. Velikost Coriolisova zrychlení je dána úsečkou definovanou koncovým bodem dvojnásobné velikosti rychlosti posuvného pohybu a průsečíkem kolmice s přeponou trojúhelníku. Směr Coriolisova zrychlení určíme pomocí pravidla pravé ruky [6] tak, že zrychlení svírá pravý úhel s vektorem úhlové rychlosti (směr vztyčeného palce), zároveň svírá pravý úhel s rychlostí posuvného pohybu (směr ukazováčku), prostředník udává směr Coriolisova zrychlení (3.5). Poté, co zjistíme směr a velikost Coriolisova zrychlení, zaneseme zrychlení do vektorového obrazce.

$$\vec{a}_{cor} = 2 \cdot (\vec{\omega} \times \vec{v}_{32}) \quad (3.5)$$

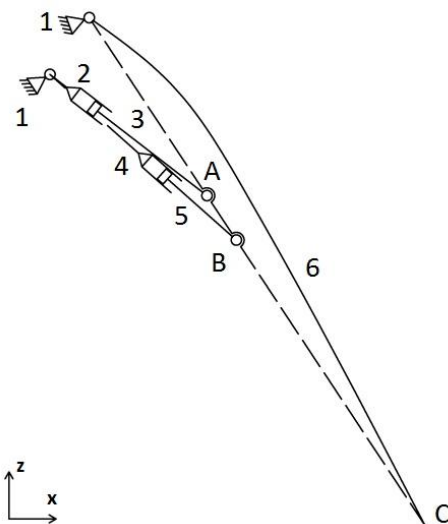


Obr. 3.6: Konstrukce Coriolisova zrychlení – otevírání okna

Z grafického řešení obdržíme pouze jednu konkrétní hodnotu pro vyšetřovanou rychlost, průběh rychlosti na čase/natočení a vysunutí vzpěry z grafického řešení nedokážeme zjistit, proto je nutné využít simulačního softwaru, který dokáže tuto úlohu řešit tak, že vypočítá jednotlivé kroky pohybu s referencí na krok předchozí.

### 3.2 KINEMATICKÝ ROZBOR – OTEVÍRÁNÍ DVEŘÍ

Při kinematickém rozboru otevírání dveří postupujeme zcela analogicky jako v případě otevírání okna. Z rovnice (3.1) vychází, že mechanismus má jeden stupeň volnosti, stejně jako v předchozím případě. Mechanismus se liší pouze v tom, že obsahuje dvě plynové vzpěry tak, jak je naznačeno na obr. 3.7. Výskyt 4 rotačních vazeb na obr. 3.7 je dán tím, že rotační vazby představující kulové čepy v karoserii se překrývají, což je dáno znázorněním mechanismu v dvourozměrném prostoru. Ve výpočtu (3.1) je počítáno s pěti rotačními vazbami.

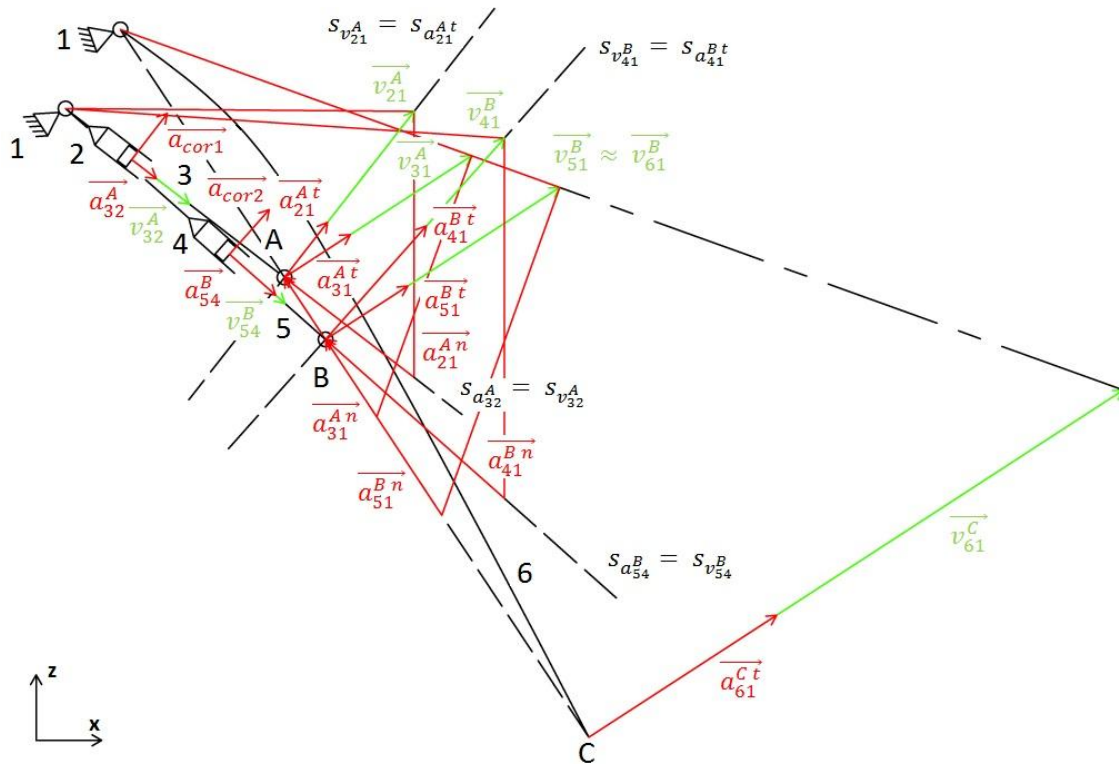


Obr. 3.7: Schéma mechanismu otevírání dveří; 1 – karoserie; 2 – pístnice pravé vzpěry, 3 – píst s pístní tyčí pravé vzpěry; 4 – pístnice levé vzpěry; 5 – píst s pístní tyčí levé vzpěry, 6 – víko;

$$i = 3 \cdot 5 - 2 \cdot (5 + 2 + 0) - 0 = 15 - 14 = 1 \Rightarrow 1^\circ \text{ volnosti}$$



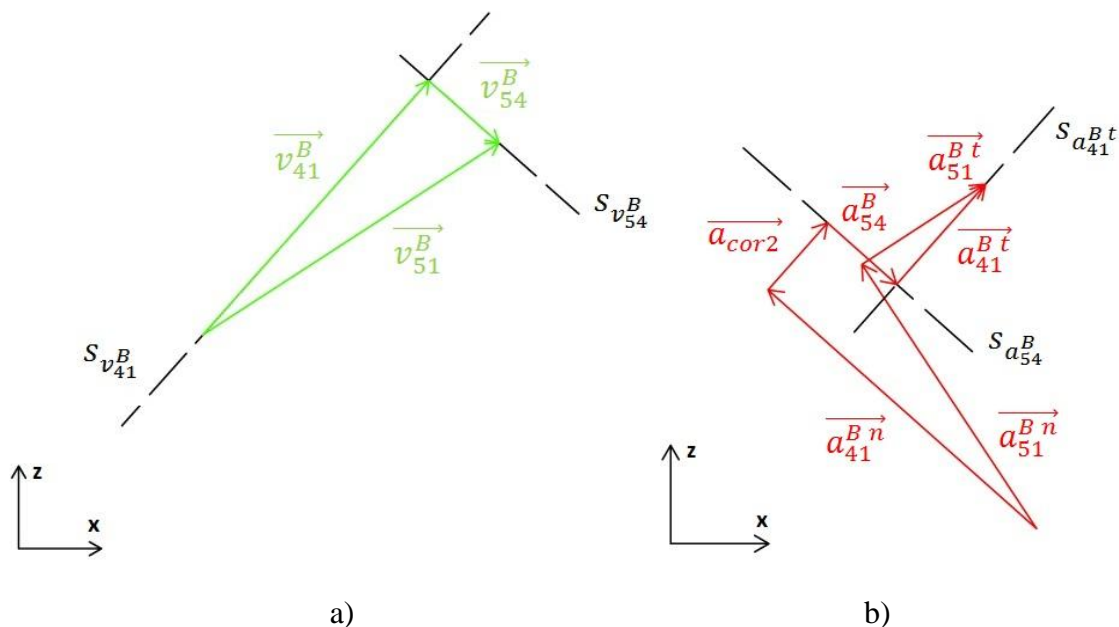
Jednotlivá tělesa konají následující pohyby: těleso 2 vůči tělesu 1 – rotační pohyb  
 těleso 3 vůči tělesu 2 – translační pohyb  
 těleso 4 vůči tělesu 1 – rotační pohyb  
 těleso 5 vůči tělesu 4 – translační pohyb  
 těleso 6 vůči tělesu 1 – rotační pohyb



Obr. 3.8: Grafické řešení rychlostí a zrychlení – otevírání víka

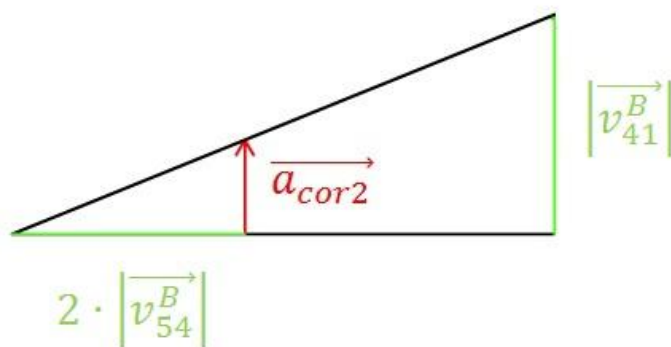


Obdobně jako v případě analýzy okna bylo postupováno u mechanismu dveří. Z rychlosti a zrychlení v bodě  $C$  byly následně graficky zjištěny jednotlivé velikosti a směry rychlostí jednotlivých těles a jejich tečná a normálová zrychlení pomocí rovnic (3.2),(3.3) a vektorových obrazců, jak je zobrazeno na obr. 3.9.



Obr. 3.9: Vektorové obrazce - víko; a) vektorový obrazec rychlosti b) vektorový obrazec zrychlení

A stejně jako v předchozím případě u určování Coriolisova zrychlení bylo postupováno v případě mechanismu otevírání víka obr. 3.11.

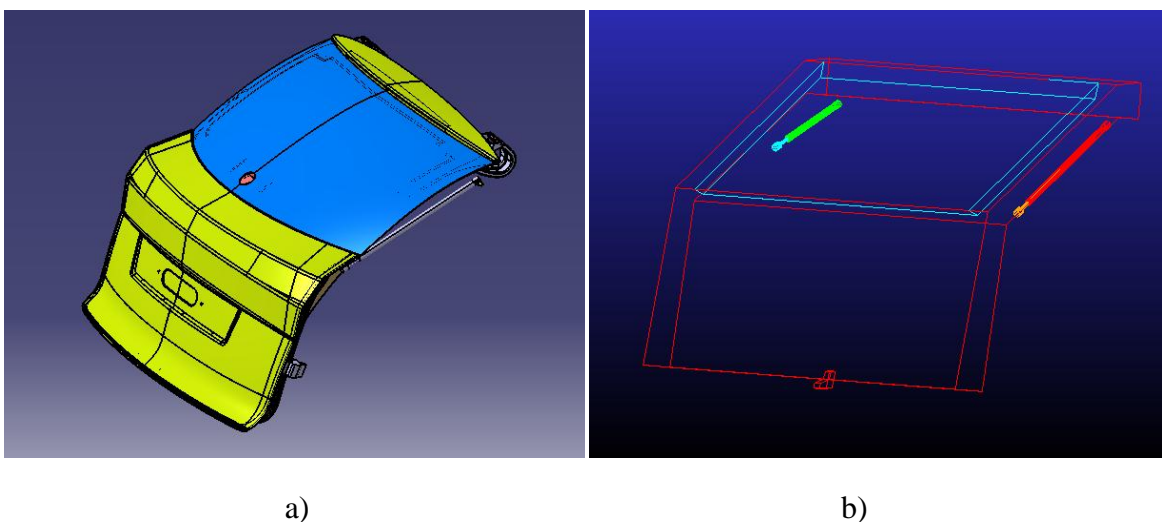


Obr. 3.11: Konstrukce Coriolisova zrychlení – otevírání dveří



## 4 SIMULACE OTEVÍRÁNÍ

K simulaci mechanismu byl použit program MSC ADAMS, ve kterém byl nejprve vytvořen zjednodušený model se stejnými vlastnostmi jako reálný model. Reálný model víka byl obdržen v prostředí CATIA V5. Následně byly vytvořeny a nakonfigurovány kinematické vazby a integrace fyzikálních modulů, které vedly k analýze dimenzace tlaku plynů ve vzpěrách. Z tlaků byly následně získány výsledné síly vzpěr zajišťující úplné a bezpečné otevření okna/víka.



Obr. 4.1: Modely dveří; a) reálný model v prostředí CATIA; b) zjednodušený model v prostředí ADAMS View

Simulace byla prováděna metodou SDD (simulation-driven design) [7], která se vyvíjí v několika oblastech a nemá zcela přesnou definici. Například definice dle Sellgrena (1995) [7] říká, že SDD je proces, při kterém jsou hlavní funkce a vedlejší procesy verifikovány a optimalizovány na základě počítačových modelů. Lockwood (2009) [7] definuje SDD jako proces konvergence k optimálnímu řešení v co nejkratším čase. Obecně by se dalo říci, že SDD je podpora konstrukční činnosti v oblasti výpočtů, kde si nelze vystačit s analytickým řešením a vede k rychlejším a přesnějším výsledkům. Ke korektní simulaci vede nejdříve vzhled do problému (v této úloze porozumění principu plynové vzpěry), analýza problému (požadavky na simulaci), vytvoření modelu, verifikace výsledků (chování simulace versus zkušenost ze skutečného prostředí) a optimalizace výsledků.

### 4.1 MSC ADAMS

MSC ADAMS [8] je produktem firmy MSC Software. Název ADAMS [9] v sobě ukrývá zkratku pro Automated Dynamic Analysis of Mechanical Systems. Jak už název napovídá, jedná se o výpočtový software používaný pro kinematickou a dynamickou analýzu mechanických systémů MBS - multibody systems [8], jak tuhých, tak i poddajných těles, která jsou mezi sebou vázána kinematickými vazbami. Tento program je jeden z nejpoužívanějších v oblastech kinematických a dynamických analýz mechanismů.

Balíček MSC ADAMS [10] obsahuje několik modulů jako je například ADAM View, ADAMS Car, ADAMS Chassi a další. Veškeré výpočetní operace probíhají přes modul



ADAMS Solver [8]. Do Solveru jsou posílána vstupní data, která Solver vyhodnocuje a následně vytváří matematické modely mechanických systémů. Pro konkrétní úlohu simulace otevírání pátých dveří bylo využito modulu ADAMS View [8], který umožňuje jednoduché modelování a vizualizaci těles, vytvoření kinematických vazeb mezi nimi, vytvoření působících sil na jednotlivá tělesa a integraci fyzikálních rovnic o více proměnných a diferenciálních rovnic, které jsou řešeny výše zmíněným modulem Solver; a také umožňuje snadnou vizualizaci průběhů kinematických a dynamických veličin. Grafy průběhů hodnot vyšetřovaných veličin obstarává modul ADAMS PostProcessor [8]. Ostatní moduly, jako je ADAMS Car [8] se využívají například k vytváření analýz jízdních vlastností vozidel, ale také třeba k analýze tuhosti karoserie apod. Modul ADAMS Chassi [8] se využívá například k analýze zatížení podvozkových částí automobilů.

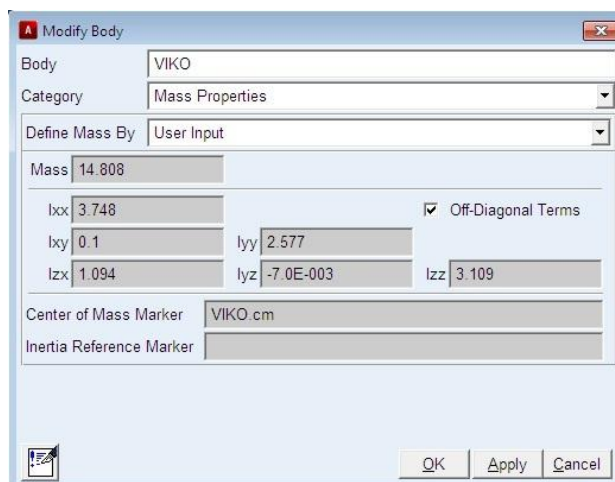
Při spuštění modulu ADAMS View dojde k otevření okna, které se skládá z grafického okna, kde probíhá vizualizace simulace vytvořeného nebo naimportovaného modelu, dále z klasického roletového menu obsahující editaci, nastavení, nástroje atd. Dále obsahuje lištu s několika podokny pro funkce modelování těles, vytvoření markrů (orientované body v prostoru), okno s vytvářením kinematických vazeb mezi jednotlivými tělesy nebo mezi tělesem a základním tělesem (tzv. ground). Dále obsahuje funkci naimportování pohybů, vytvoření vnějších sil, tlumičů a pružin. Lišta také obsahuje - pro tuto úlohu nezbytnou - funkci vytvoření lineárních a diferenciálních rovnic a také funkci tzv. Design Variables. Jako Design Variables lze nastavit konstanty (počáteční podmínky) vyskytující se v rovnicích, ale zároveň plní funkci při studiu optimalizace, kdy jim je udělen rozsah změny hodnoty a krok změny. Například systém obsahuje počáteční tlak 5 MPa, tato počáteční hodnota může být nastavena v rozsahu od 4MPa do 6MPa s krokem 0,1 MPa. Při spuštění studie začne program počítat jednotlivé varianty počátečního tlaku od 4MPa po 6MPa s daným krokem. Následná analýza odhalí ideální nastavení počátečního tlaku.

## 4.2 VYTVOŘENÍ MODELU

V programu Catia V5 bylo nejdříve odměřeno několik koncových bodů víka a tyto body byly přeneseny do prostředí ADAMS View. Spojením těchto bodů byl vytvořen obrys víka a pomocí funkce RigidBody:Extrusion v sekci Bodies byl vytvořen velmi zjednodušený model představující víko a stejným způsobem byl vytvořen i model okna. Funkce Rigid body [11] představuje tuhé těleso, což ve skutečnosti neplatí. Ve skutečnosti by měla být tělesa poddajná, ale deformace těles by byla zanedbatelně malá, takže využití tuhých těles (Rigid bodies) je přijatelné. Modul ADAMS View obsahuje funkci přímého naimportování modelu vytvořeného v CATIA, tzv. funkci Import CATPart. Jelikož je model sestavy dveří velmi náročný a obsahuje velké množství podsestav, bylo by jeho přenesení velmi časově a hardwarově náročné a stejně tak i simulace, a proto by přímá importace byla zbytečná a je jednodušší vytvořit model zjednodušený, který má stejné vlastnosti jako model reálný. Aby dveře a okno měly naprosto stejné kinematické a dynamické vlastnosti jako reálný model z prostředí CATIA, bylo nezbytné importovat do prostředí ADAMS správnou pozici těžiště dveří/okna, hmotnosti a také momenty setrvačnosti.



Hodnoty těchto veličin byly zjištěny v prostředí CATIA pomocí funkce Measure/Measure Inertia a následně exportovány do prostředí ADAMS View, což znázorňuje obr. 4.2.



Obr.4.2: Vlastnosti modelu VÍKO v prostředí ADAMS View

Po odměření výše popsaných bodů a veličin byly odměřeny body uchycení vzpěr a také horních pantů - umístění rotačních vazeb. Do místa horních pantů spojujících rám okna s karoserií a víko s karoserií byly umístěny otočné válcové vazby - Cylindrical joint. Do bodů reprezentujících uchycení vzpěr ke karoserii a k oknu/víku byly umístěny vazby kulové - Spherical joint. Body pro uchycení vazeb byly odměřeny v programu CATIA a přeneseny do ADAMS View. Po přenesení bodů byly vytvořeny modely vzpěr pomocí funkce RigidBody:Cylinder v sekci Bodies. Z modelu v CATIA vycházely i rozměry vzpěr. Pístnice vzpěry sloužící k otevření okna měří 240 mm a 225 mm měří píst s pístní tyčí, pístnice vzpěry na opačné straně víka měří 435 mm a 375 mm měří píst s pístní tyčí. Průměr obou dvou pístnic je 19 mm a průměr pístů činí 16 mm. Průměr pístních tyčí činí 10 mm. Mezi pístem a pístnicí byly vytvořené posuvné vazby - Translation joint. Ve všech vazbách bylo zahrnuto tření mezi jednotlivými komponenty k dosažení co nejpřesnějších hodnot. Po vytvoření modelu byla dále vytvořena pomocná síla, která představuje pomocnou sílu obsluhy při otevírání víka, která byla nastavena na 50 N - je konstantní a působí po dráze 50 cm. Do modelu bylo dále nutné vnést i síly vyvolané vzpěrami, které budou závislé na tlaku ve vzpěrách, jak je uvedeno v rovnici (2.2). Mezi tělesem představujícím okno a tělesem představujícím víko byla vytvořena vazba Fixed joint, která reprezentuje zámek okna a stejná vazba byla vytvořena mezi víkem a karoserií (ground) z důvodu nastavení, zda se jedná o simulaci otevírání okna (vazba okno - víko odemčena, vazba víko - karoserie uzamčena) nebo simulaci otevírání víka (vazba okno - víko uzamčena, vazba víko - karoserie odemčena). Po vytvoření modelu následovala integrace fyzikálních modulů, ze kterých vycházel průběh síly působící na píst vzpěry, která zajišťuje správné otevření dveří.

### 4.3 INTEGRACE FYZIKÁLNÍCH MODELŮ

K integraci fyzikálních modelů byla využita funkce System Elements v oddílu Elements (veškeré algebraické a diferenciální proměnné) a funkce Design Variables v sekci Design Exploration (veškeré konstanty a počáteční stavy soustav jako je obsah plochy nad a pod pístem, počáteční objemy komor, hmotnosti plynu apod.). Ze soustav rovnic jsou pro simulaci otevírání stěžejní tlaky, které působí na písty vzpěr. Z tlaků budou následně odvozeny síly



vycházející z rovnice (2.1). Detailní popis rovnic vedoucích k získání tlaků ve vzpěrách bude popsán v následujících kapitolách.

### 4.3.1 POČÁTEČNÍ VSTUPNÍ PARAMETRY

Plynové vzpěry jsou natlakované stlačeným dusíkem, který působí na stěny pístů. Rozdílné obsahy povrchů pístu způsobí rozdílné velikosti sil a tím pádem i pohyb pístu. Tím, jak se píst pohybuje, se ve vzpěře mění stavové veličiny (teplota, tlak, objem). Počáteční stav plynu v komorách zjistíme ze stavové rovnice [12] ideálního plynu (4.1).

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T \quad (4.1)$$

Pro výpočet hmotnostního toku [13], který proudí skrz přepouštěcí kanálek, byla použita rovnice (4.2):

$$G = p_i \cdot C \cdot \rho_{ref} \cdot \sqrt{\frac{T_{ref}}{T_i}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{p_0 - b}{p_i - b}\right)^2}, \quad (4.2)$$

kde veličiny s indexem  $i$  značí stavové veličiny na vstupu přepouštěcího kanálku, veličiny s indexem  $o$  značí stavové proměnné na výstupu kanálu a veličiny s indexem  $ref$  mají hodnoty referenčních stavů. Vstupní parametry v rovnici bylo nutné vnést jako Design Variable. Rovnice (4.2) platí pro hmotnostní tok při podzvukovém proudění [13], jelikož poměr tlaků na vstupu a výstupu je menší než poměr tlaků pro laminární proudění ( $\beta_{lam}$ ), a zároveň je větší než poměr tlaků pro nadzvukové proudění ( $\beta_{kr} = b$ ) dle rovnice (4.3).

$$\beta_{lam} > \frac{p_0}{p_i} > b \quad (4.3)$$



Veškeré vstupní parametry byly do prostředí ADAMS View vneseny pomocí funkce Design Variable s hodnotami uvedenými v tab. 4.1.

Tabulka 4.1: Vstupní parametry a počáteční hodnoty stavových proměnných.

Název	Značka	Hodnoty - Levá vzpěra	Hodnoty - Pravá vzpěra	Jednotka
Teplota	$T_{poč}$	293,15	293,15	$K$
Kapa	$\kappa$	1,4	1,4	
Průměr díry přepouštěcího kanálu	$d_k$	2	2	$mm$
Průměr pístu	$D_p$	16	16	$mm$
Průměr pístní tyče	$d_p$	10	10	$mm$
Vzdálenost od dna komory k pístu	$l_v$	92	46	$mm$
Kritický poměr tlaků	$b$	0,528	0,528	
Měrná plynová konstanta (dusík)	$r$	296,84	296,84	$J/kg/K$
Počáteční tlak	$p_{poč}$	37	6,83	$MPa$
Délka celé komory	$l_k$	395	200	$mm$
Výška pístu	$l_p$	10	10	$mm$
Hustota plynu	$\rho_{ref}$	1,185	1,185	$kg/m^3$
Obsah plochy pod pístem	$S_1$	$2,01 \cdot 10^{-4}$	$2,01 \cdot 10^{-4}$	$m^2$
Obsah plochy nad pístem	$S_2$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$m^2$
Objem komory pod pístem	$V_{1poč}$	$1,85 \cdot 10^{-5}$	$9,25 \cdot 10^{-6}$	$m^3$
Objem komory nad pístem	$V_{2poč}$	$3,59 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$m^3$
Nadzvuková konduktance	$C$	$5,12 \cdot 10^{-9}$	$5,12 \cdot 10^{-9}$	$m^3/(s \cdot Pa)$
Měrná tepelná kapacita	$c_v$	739	739	$J/kg/K$
Měrná tepelná kapacita	$c_p$	1038	1038	$J/kg/K$
Počáteční hmotnost plynu v komoře pod pístem	$M_1$	$7,87 \cdot 10^{-3}$	$7,26 \cdot 10^{-4}$	$kg$
Počáteční hmotnost plynu v komoře nad pístem	$M_2$	$1,53 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^{-3}$	$kg$
Celková hmotnost plynu ve vzpěře	$M_c$	$2,31 \cdot 10^{-2}$	$2,11 \cdot 10^{-3}$	$kg$



### 4.3.2 INTEGRACE STAVOVÝCH PROMĚNNÝCH

Pro vložení stavových proměnných byla využita funkce System Elements\State Variable. Jelikož uvažujeme dvě soustavy - soustavu nad pístem a soustavu pod pístem, které si předávají energii, tak nelze využít stavovou rovnici adiabatického děje [12] pro ideální plyn (4.4).

$$p \cdot V^\kappa = konst. \quad (4.4)$$

Plyn nad pístem je stlačen, zvýší se teplota a tlak a tento plyn je přepouštěn do soustavy pod pístem, ve které se teplota a tlak sníží. Plyn vykoná práci a změní se jeho energie. Tyto soustavy si předávají energii, proto je pro výpočet nutné využít první termodynamický zákon [12] a to jeho první formu (4.5), kdy pro adiabatický děj platí rovnice (4.6), která říká, že plyn si nevyměňuje energii s okolím a pouze se přeměňuje vnitřní energie (4.7) na práci (4.8).

$$dQ = dU + dA \quad (4.5)$$

$$dQ = 0 \quad (4.6)$$

$$dU = m \cdot c_v \cdot dT \quad (4.7)$$

$$dA = p dV \quad (4.8)$$

Dle zákona pro energetickou bilanci proměnného průtoku (4.9) platí, že změna energie je dána rozdílem energií soustav. Změna energie pro adiabatický děj [14] odpovídá změně vnitřní energie plynu.

$$E_1 - E_2 = \Delta E \approx \Delta U \quad (4.9)$$

Změny vnitřní energie [14] soustav jsou uvedeny v rovnicích (4.10), (4.11).

$$\Delta U_1 = A_1 - h_1 \cdot G \cdot t \quad (4.10)$$

$$\Delta U_2 = -A_2 + h_2 \cdot G \cdot t \quad (4.11)$$

přičemž měrná entalpie plynu  $h$  [14] odpovídá rovnici (4.12).

$$h = c_p \cdot dT \quad (4.12)$$

Pomocí těchto rovnic lze nyní vytvořit soustavu lineárních a diferenciálních rovnic, ze které je možné obdržet závislost tlaků na stavových veličinách. Hodnoty tlaků byly získány ze stavové rovnice pro ideální plyn (4.1), která byla upravena do diferenciálního tvaru. Z hodnot tlaků pomocí rovnice (2.2) byl následně získán průběh výsledné síly, kterou působí vzpěry na okno/víko.



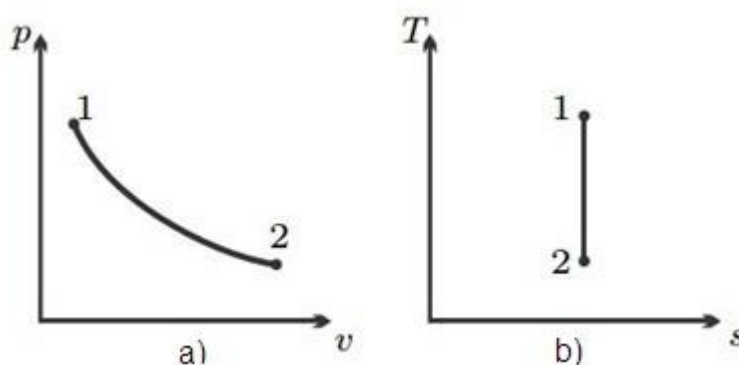
## 5 VÝSLEDKY SIMULACE

V této kapitole budou prezentovány průběhy jednotlivých veličin na čase. Jednak výsledky kinematiky, dále výsledky dynamiky a také průběhy stavových veličin definovaných v předchozí kapitole. Výsledky budou posuzovány z pohledu otevírání okna a z pohledu otevírání víka. Průběhy všech veličin byly vytvořeny v prostředí ADAMS View pomocí funkce Plotting, která vykresluje grafy v závislosti na čase a je zajišťována modulem ADAMS PostProcessor. Pro co nejhladší průběhy všech monitorovaných veličin bylo nastaveno trvání simulace na 1 sekundu s 200 000 kroky pro simulaci otevírání okna a pro simulaci otevírání pátých dveří bylo nastaveno trvání simulace na 1,5 sekundy s 300 000 kroky.

### 5.1 PRŮBĚHY STAVOVÝCH VELIČIN – PRAVÁ VZPĚRA

Děj, který probíhá v komorách, je považován za adiabatický. Z obr. 5.1 můžeme logicky odvodit, jak se stavové veličiny budou pravděpodobně chovat. Celý prostor pístnice byl rozdělen na dvě komory, jak již bylo zmíněno. Komora pod pístem byla označena jako *komora 1* a veškeré veličiny s indexem 1 budou považovány za veličiny definující stav plynu v komoře pod pístem a veškeré veličiny s indexem 2 tedy budou definovat stav plynu v komoře nad pístem.

Objem v *komoře 1* se bude časem zvětšovat tím, jak bude vyjíždět pístní tyč s pístem z pístnice a objem v *komoře 2* bude klesat, proto lze předpokládat dle obr. 5.1 a), že tlak se bude zvyšovat v *komoře 1* a klesat v *komoře 2*. Naopak teplota bude s rostoucím objemem klesat v *komoře 1* a v *komoře 2* bude teplota narůstat dle obr. 5.1 b). Nyní máme hrubou představu o chování plynu, ale neuvažujeme výměnu energie mezi soustavami. Nejdříve bude rozebrána vzpěra zajišťující zdvih okna, tedy vzpěra umístěná na pravé straně ve smyslu proti jízdě automobilu (při značení veličin v grafu přívlástek `_PV`). Rozdělení vzpěr na pravou a levou vychází z koncepce dodržované v automobilovém průmyslu, kdy se při vytváření modelu vozu drží pravidla, že osa *X* směřuje proti směru jízdy, osa *Z* je orientovaná kolmo vzhůru a osa *Y* dle pravidla pravé ruky je orientovaná ve směru doleva proti směru jízdy vozu.

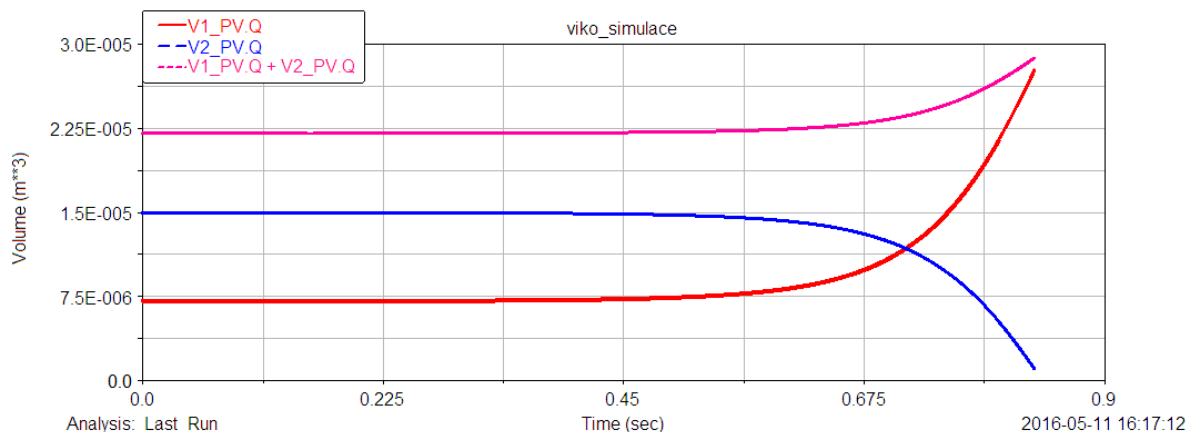


Obr. 5.1: Diagramy adiabatického děje[12]; a) adiabatický děj v  $p$ - $v$  diagramu; b) adiabatický děj v  $T$ - $s$  diagramu

Na obr. 5.2 je znázorněn průběh objemů komor. Objem byl získán pomocí funkce Displacement, která získává okamžitou hodnotu vzdálenosti mezi dvěma markery. Jeden marker byl umístěn na dno pístnice, druhý byl umístěn na spodní stranu pístu. Tuto hodnotu stačilo následně vynásobit plochou pístu, a tím byl získán okamžitý objem pod pístem.

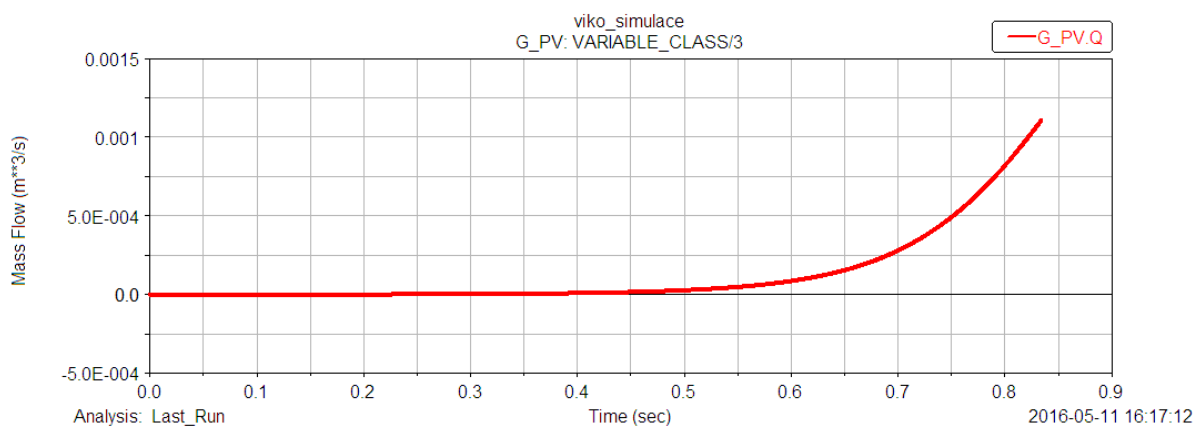


Důvodem využití markerů bylo to, že vzpěra při otevírání vykonává rotační pohyb, takže je potřeba odměřovat vzdálenost bodů v soustavě, která rotuje s tělesem, což umožňuje nastavení funkce Displacement v kolonce referenční marker. Nezbytné je ovšem zajistit, aby oba markery měly stejnou orientaci v prostoru. Zcela analogicky bylo postupováno při zjišťování objemu nad pístem. Červená křivka značí průběh objemu *komory 1*, modrá křivka představuje průběh objemu *komory 2* a fialová křivka představuje součet těchto objemů, který není konstantní a vzroste o objem části pístní tyče pístem vytlačené.



Obr. 5.2: Průběh objemů *komory 1* a *komory 2* pravé vzpěry – otevírání okna

Na obr. 5.3 je vynesena průběh hmotnostního průtoku pro podzvukové proudění z *komory 2* do *komory 1*, který je definovaný vztahem (4.2). Tato proměnná byla zanesena do prostředí pomocí funkce *IF*, která zajišťuje možný případ, kdy vznikne v *komoře 2* menší tlak než v *komoře 1*, a tudíž by se směr hmotnostního průtoku otočil. Funkce *IF* vyhodnocuje rozdíl tlaků obou komor. Pokud je rozdíl tlaků kladný (předpokládaný případ), tak dochází k hmotnostnímu průtoku z *komory 2* do *komory 1*. Pokud bude záporný, tak se v rovnici (4.2) prohodí tlak na vstupu a výstupu a stejně tak i teplota a plyn začne proudit do *komory 2*.



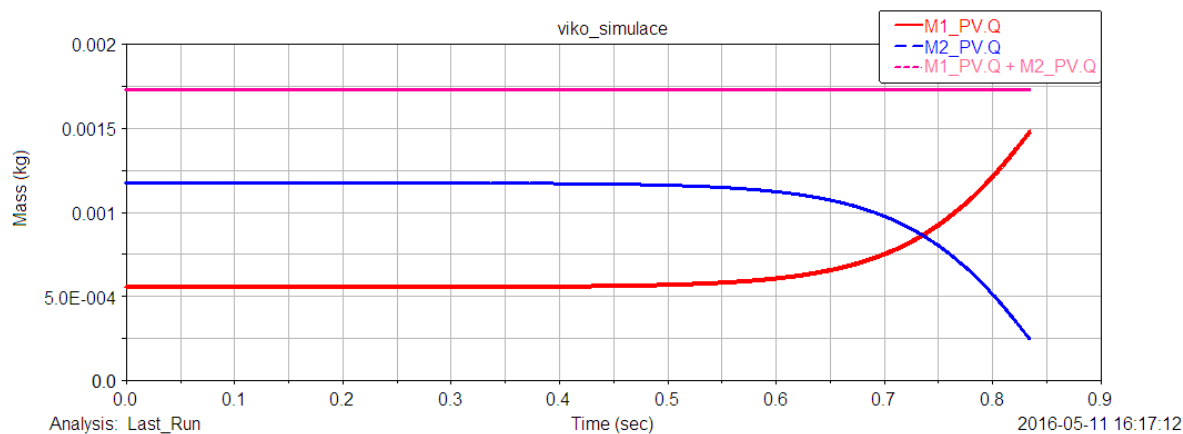
Obr. 5.3: Průběh hmotnostního průtoku pravé vzpěry – otevírání okna

Na obr. 5.3 je znázorněn průběh hmotností plynu v komorách. Na rozdíl od průběhu objemů je součet hmotností konstantní, protože nový plyn do vzpěry nepouštíme, ani nevypouštíme, což reprezentuje křivka fialové barvy. Tato funkce byla definována jako počáteční hmotnost plynu v *komoře*, která byla vyčíslena pomocí stavové rovnice pro ideální plyn (4.1)



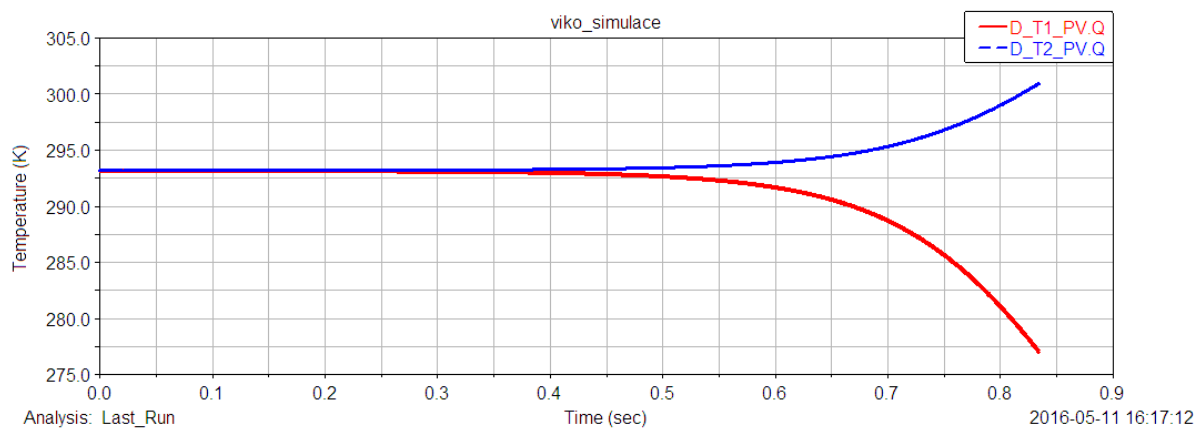
z počátečních vstupních hodnot (teplota, tlak, objem), ke které je přičten hmotnostní průtok vynásobený časovým krokem (5.1).

$$m = m_{poč} + (G \cdot t) \quad (5.1)$$



Obr. 5.4: Průběh hmotností plynu v komoře 1 a v komoře 2 pravé vzpěry – otevírání okna

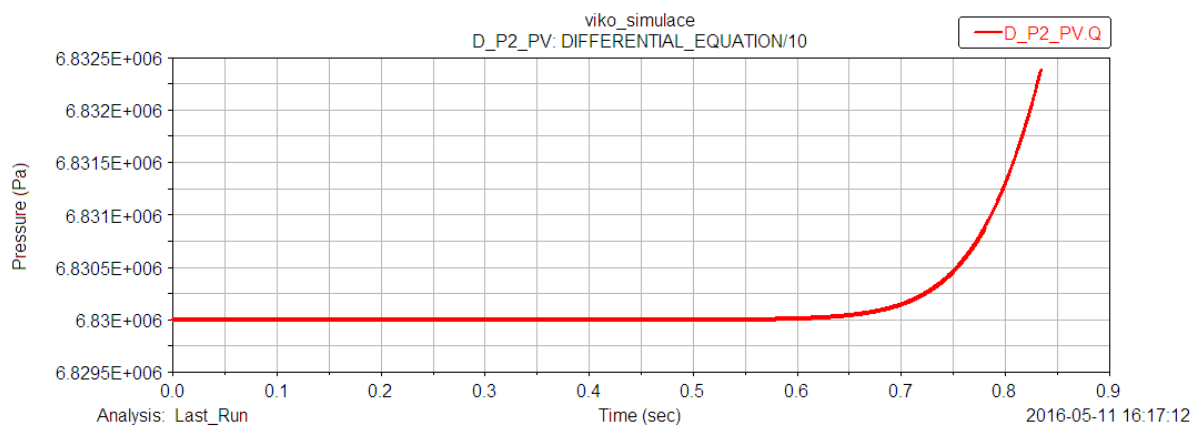
Na obr. 5.4 je znázorněna závislost teploty na čase, která potvrzuje, že prvotní úvaha o průběhu teplot v komorách byla správná. Pro výpočet hodnot teplot byla využita diferenciální rovnice (4.5), avšak pro tuto úlohu nebylo uvažováno s prostupem tepla skrz pístnici a plyn si nevyměňuje energii s okolím, tudíž tento výsledek je spíše orientační a od reality je do jisté míry vzdálený.



Obr. 5.5: Průběh teplot plynu v komoře 1 a v komoře 2 pravé vzpěry – otevírání okna



Pro zjištění výsledné síly bylo stěžejní zjistit průběh tlaků, které na píst ve vzpěře působí, a které vyvolávají výslednou sílu pístní tyče. Na obr. 5.6 je znázorněn průběh tlaku v komoře 2, který odpovídá úvaze s adiabatickým dějem.

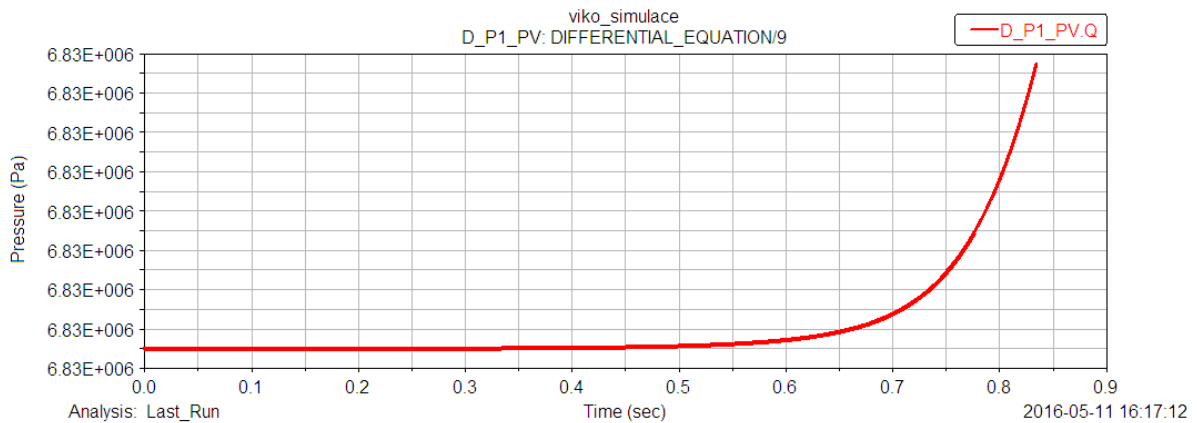


Obr. 5.6: Průběh tlaku plynu v komoře 2 pravé vzpěry – otevírání okna

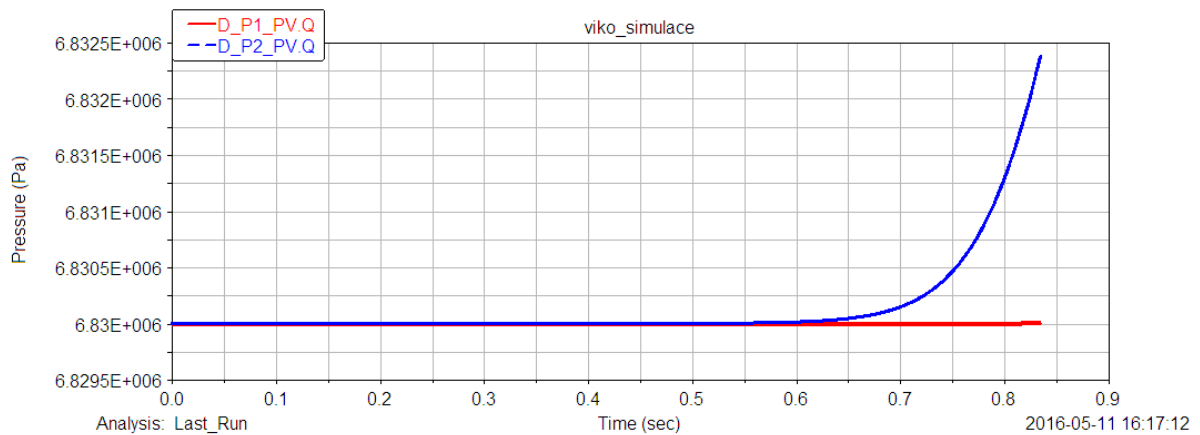


Na obr. 5.7 je znázorněn průběh tlaku v komoře pod pístem, u kterého, dle prvotní úvahy, bylo uvažováno s jeho poklesem, ale simulace vykazuje rostoucí tendenci, ačkoliv tlak v komoře 1 na počátku má téměř stejnou hodnotu jako na konci děje, což znázorňuje obr. 5.8. To je způsobeno tím, že je do komory 1 přiváděn plyn z komory 2 o vyšším tlaku a teplotě a předává tak energii plynu v komoře 1. Pro výpočet hodnot tlaků plynů byla využita rovnice (4.1), která byla převedena do diferenciálního tvaru (5.2).

$$p\dot{V} + p\dot{V} - GrT - mr\dot{T} = 0 \quad (5.2)$$



Obr. 5.7: Průběh tlaku plynu v komoře 1 pravé vzpěry – otevírání okna

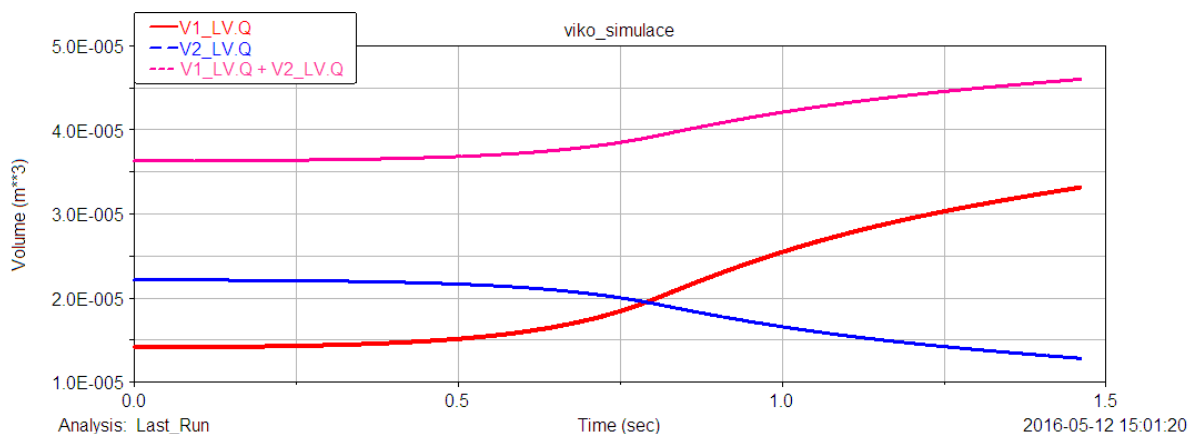


Obr. 5.8: Průběh tlaků plynu v komoře 1 a komoře 2 pravé vzpěry – otevírání okna



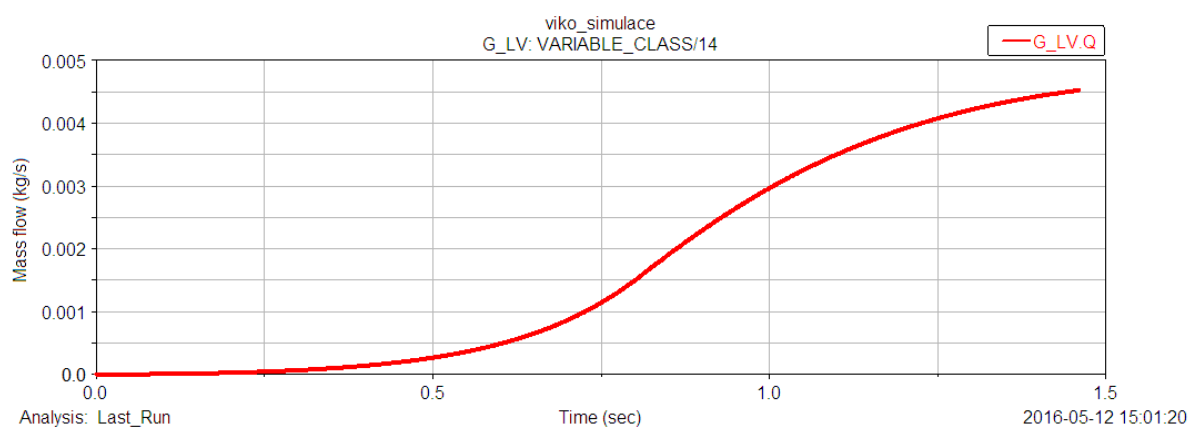
## 5.2 VÝSLEDKY STAVOVÝCH VELIČIN – LEVÁ VZPĚRA

Stejně tak jako byla provedena analýza jednotlivých veličin u pravé vzpěry, byla provedena i analýza levé vzpěry (veličiny s přívlaskem `_LV`). Na obr. 5.9 je znázorněn průběh objemů obou komor, jejichž součet není konstantní, protože se celkový objem navýší o hodnotu obsahu vytlačené pístnice. Stejně jako v předchozím případě byla použita funkce Displacement mezi dvěma markery, konkrétně mezi dnem pístnice a pístem.



Obr. 5.9: Průběh objemů plynu v komoře 1 a komoře 2 levé vzpěry – otevírání víka

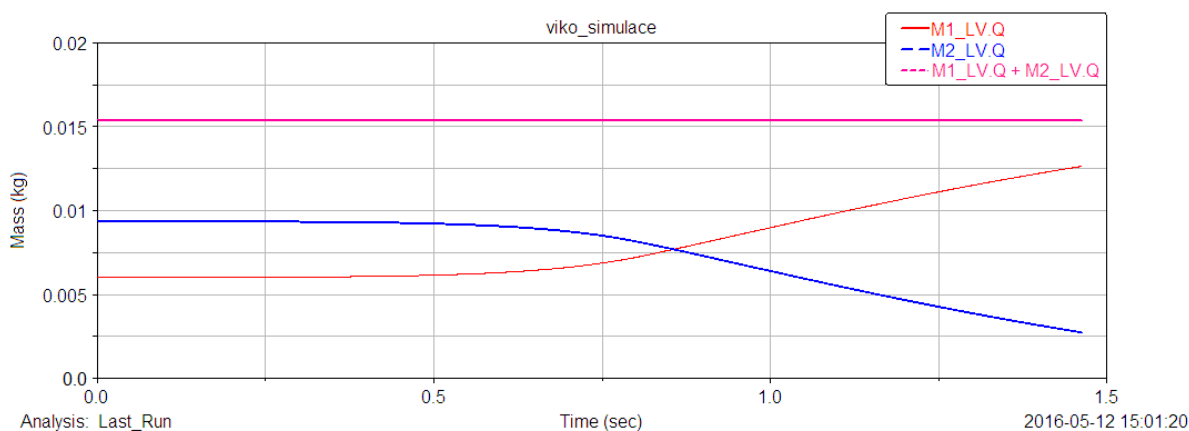
Na obr. 5.10 je znázorněn průběh velikosti hmotnostního průtoku na čase. Průběh se liší od průběhu levé vzpěry, což je dáno tím, že na víko působí vnější síla reprezentovaná pomocnou silou obsluhy.



Obr. 5.10: Průběh hmotnostního průtoku v levé vzpěře – otevírání víka

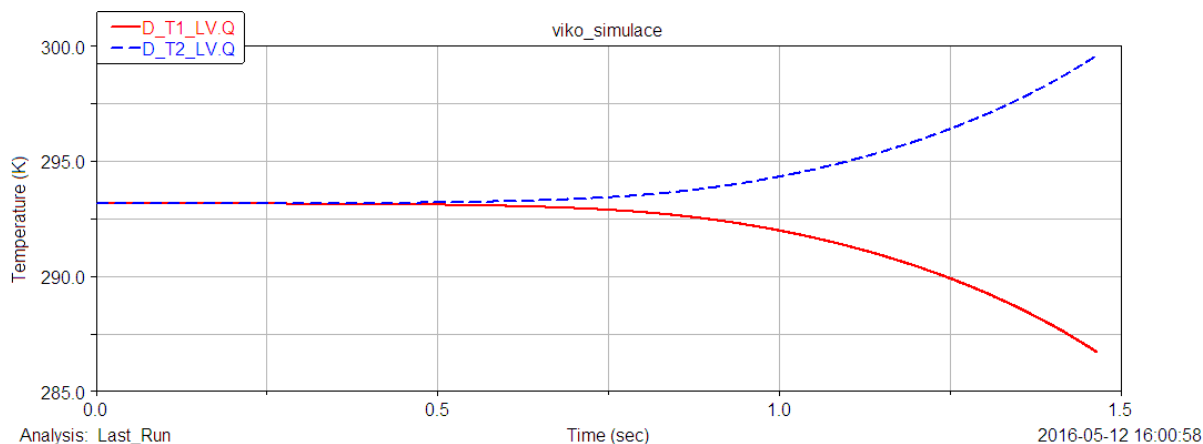


Na obr. 5.11 je znázorněn průběh hmotností na čase, který potvrzuje, že celková hmotnost soustavy se nemění.



Obr. 5.11: Průběh hmotnosti plynu v komoře 1 a v komoře 2 levé vzpěry – otevírání víka

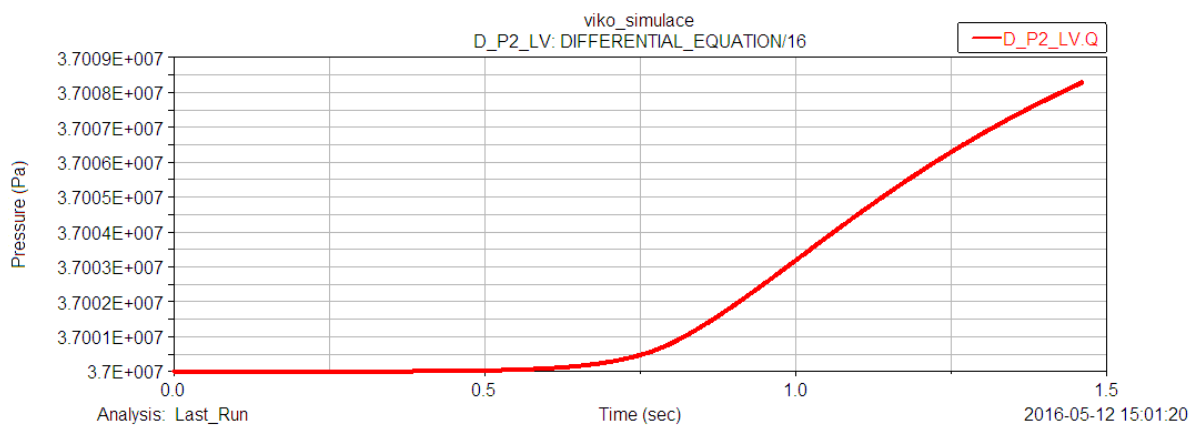
Na obr. 5.12 je znázorněn průběh teplot v obou komorách. Rozdíly mezi koncovými stavy teplot nejsou tak markantní jako v případě pravé vzpěry, což je dáno tím, že levá vzpěra má delší komoru, tím i větší objem a zároveň je vzpěra natlakovaná na podstatně větší tlak než vzpěra pravá, tím pádem obsahuje vzpěra plyn o větší hmotnosti a právě na hmotnosti závisí teplota nepřímo úměrně (4.1).



Obr. 5.12: Průběh teplot plynu v komoře 1 a v komoře 2 levé vzpěry – otevírání víka



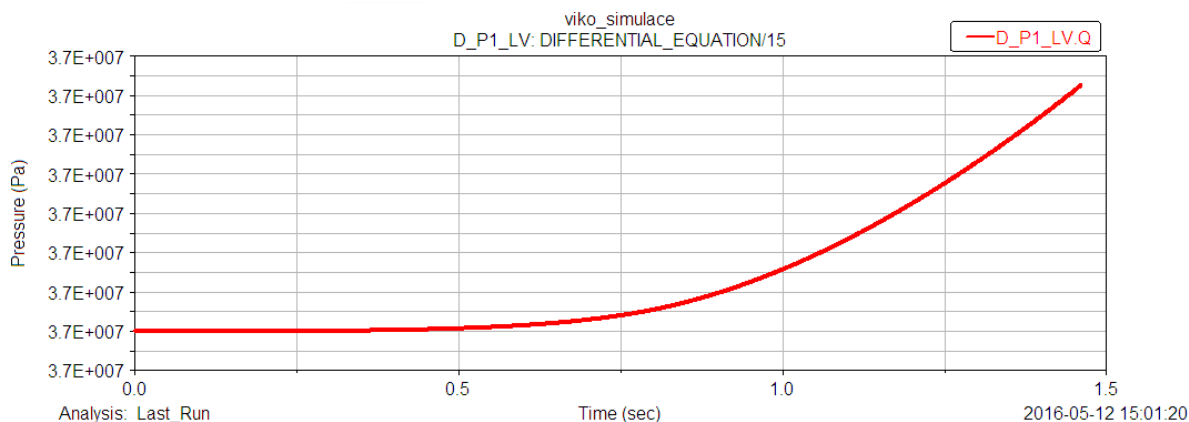
Stejně jako u analýzy okna, tak i u analýzy dveří lze předpokládat, že tlak v *komoře 2* bude mít tendenci se zvyšovat, což potvrzuje obr. 5.13.



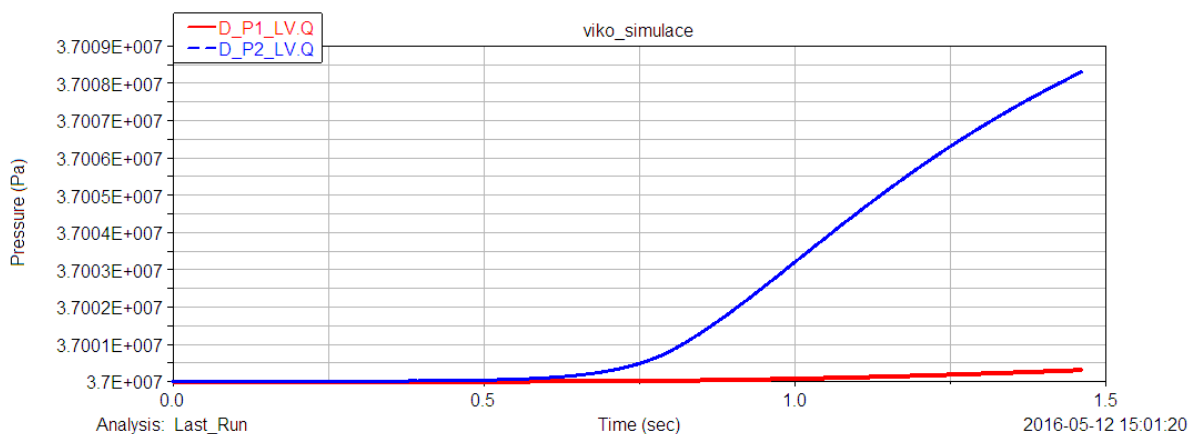
*Obr. 5.13: Průběh tlaku plynu v komoře 2 levé vzpěry – otevírání víka*



Na obr. 5.14 je následně vyobrazen průběh tlaku *komory 1* a na obr. 5.15 porovnání obou tlaků. Tlak v *komoře 1* dle obr. 5.15 lze považovat za konstantní, jeho hodnota se zvýší zhruba o  $0,5 \text{ kPa}$ , což je vzhledem k počátečnímu tlaku zanedbatelné.



Obr. 5.14: Průběh tlaku plynu v komoře 1 levé vzpěry – otevírání víka



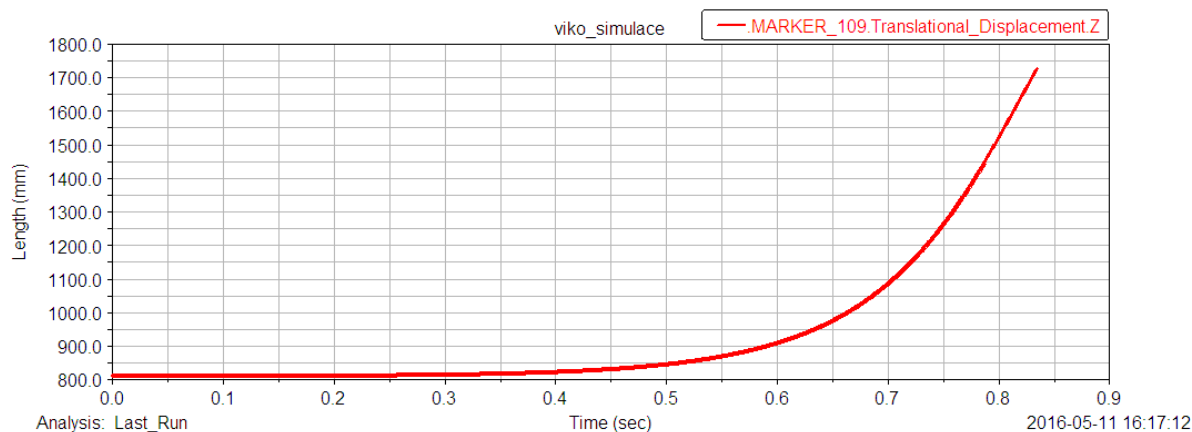
Obr. 5.15: Průběh tlaků plynu v komoře 1 a komoře 2 levé vzpěry – otevírání víka

### 5.3 VÝSLEDKY KINEMATIKY - OKNO

Podmínkou pro správnou funkci otevírání bylo plné otevření okna a zároveň rychlost otevírání pro bezpečnou manipulaci nesměla přesáhnout  $7 \text{ m/s}$ . Tyto dvě podmínky byly splněny, jak ukazuje provedená analýza. Analýza rychlosti je vztažena ke koncovému bodu okna, kde může nastat ohrožení obsluhy.

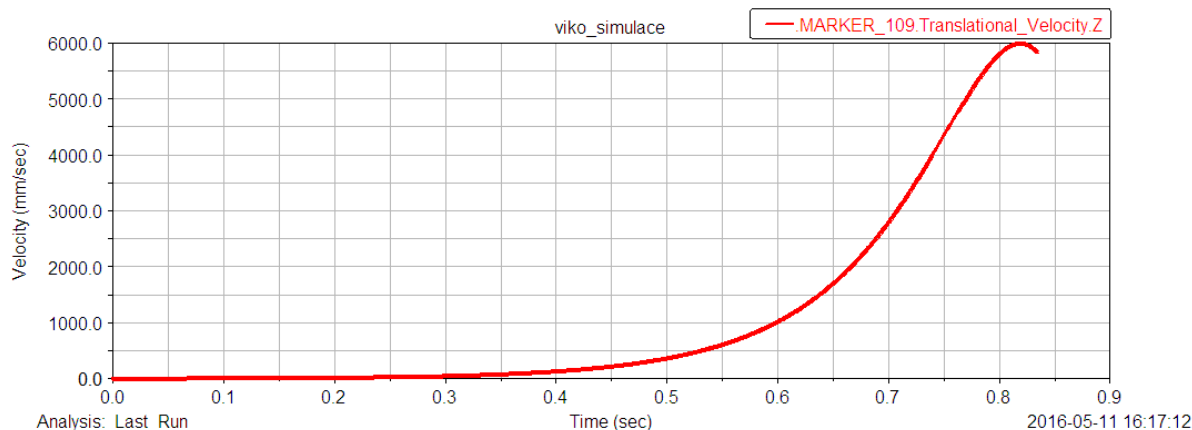


Obr. 5.16 znázorňuje posunutí koncového bodu okna na čase až do krajní pozice, při vysunutí pístu vzpěry o  $134\text{ mm}$ . Není využita celá trajektorie pístu vzpěry, protože výrobce plynových vzpěr nedoporučuje vysunutí pístu až do krajního bodu pístnice, mohlo by dojít k poškození. V simulaci byl tento aspekt zohledněn tím, že byla vnesena funkce Sensor, která simulaci zastaví před dosažením horního dna vzpěry. V reálném modelu je tento problém řešen umístěním dorazu na karoserii.



Obr. 5.16: Průběh posunutí - otevírání okna

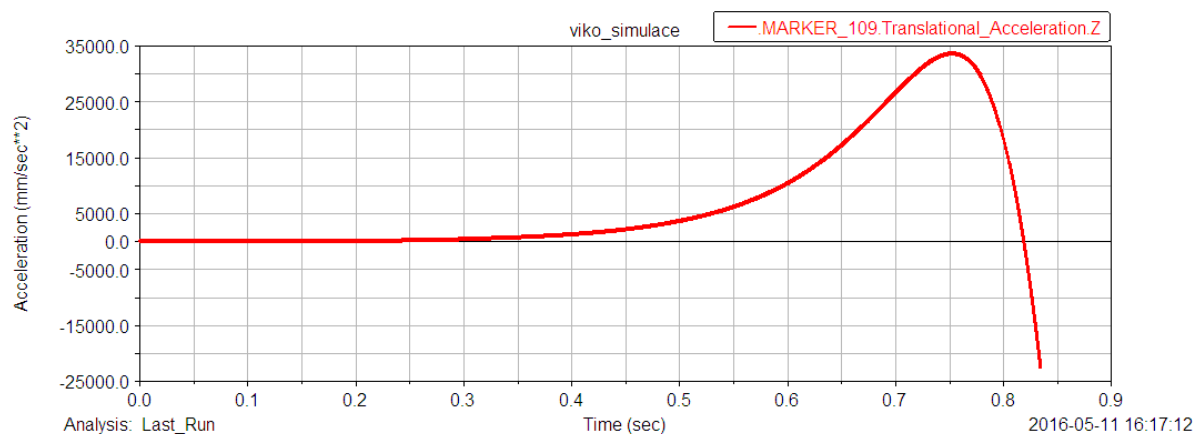
Na 5.15 je znázorněn průběh rychlosti koncového bodu okna na čase, kde je ukázáno, že nejvyšší rychlosti bod dosáhne v čase  $t = 0,82\text{ s}$ , kdy je okno téměř zcela otevřeno, a velikost rychlosti v tomto bodě činí  $v = 6\text{ m/s}$ . Tím je splněna podmínka pro bezpečnost obsluhy.



Obr. 5.15: Průběh zrychlení - otevírání okna



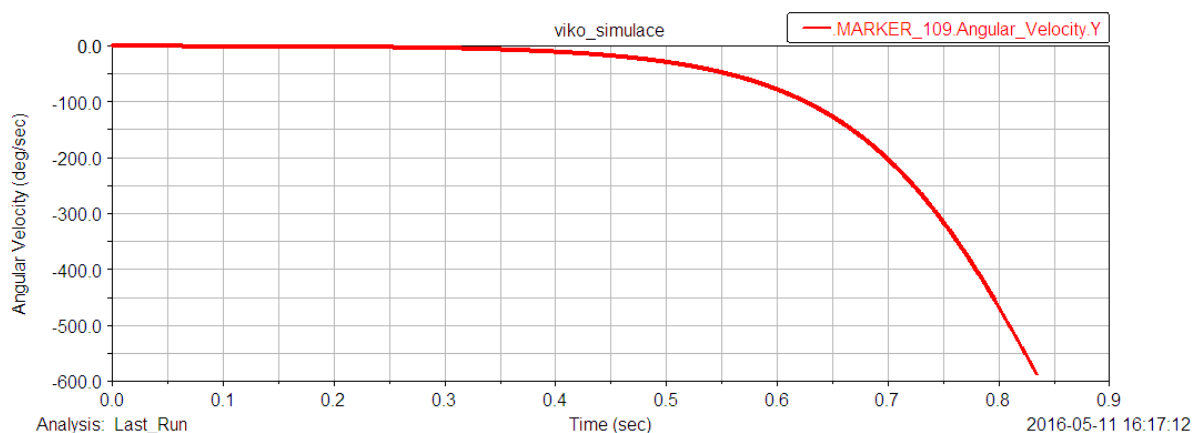
Na obr. 5.16 je znázorněn průběh zrychlení stejného bodu - jako v předchozích případech - na čase. Ze zkušeností u hojně rozšířených plynových vzpěr, které se v automobilovém průmyslu používají na otvírání pátých dveří, lze usoudit, že průběh zrychlení odpovídá předpokladu, kdy zrychlení při odjištění zámku začne narůstat a v určité poloze začne klesat, až dosáhne záporné hodnoty. Při otvírání pátých dveří automobilu si tohoto faktu můžeme všimnout, když dveře před dosažením plného otevření začnou zpomalovat.



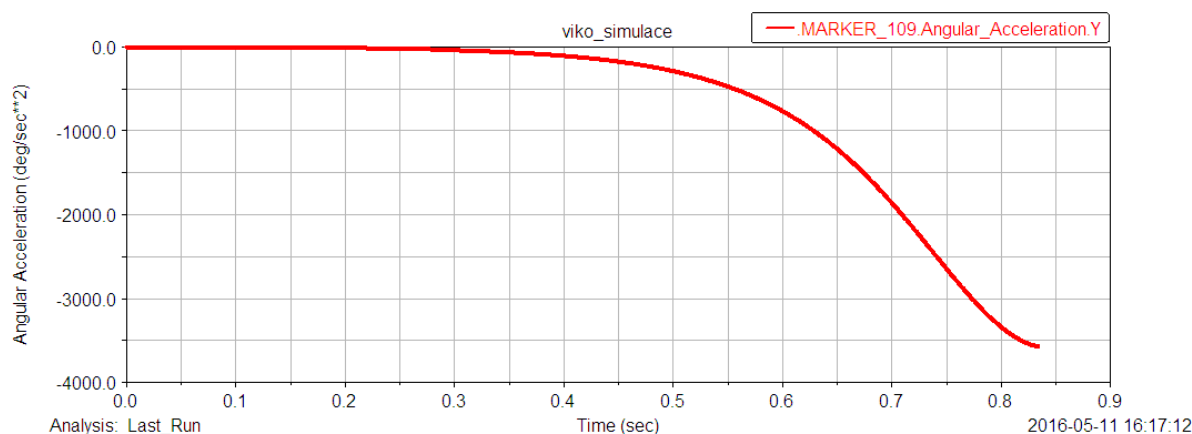
Obr. 5.16: Průběh zrychlení - otevírání okna



Na obr. 5.17 a obr. 5.18 je zachycen průběh úhlové rychlosti a průběh úhlového zrychlení. Veličiny nabývají záporných hodnot díky orientaci osy  $Y$ . Při vytváření modelu v ADAMS View byla zachována stejná orientace os jako u sestavy v prostředí CATIA.



Obr. 5.17: Průběh úhlové rychlosti – otevírání okna



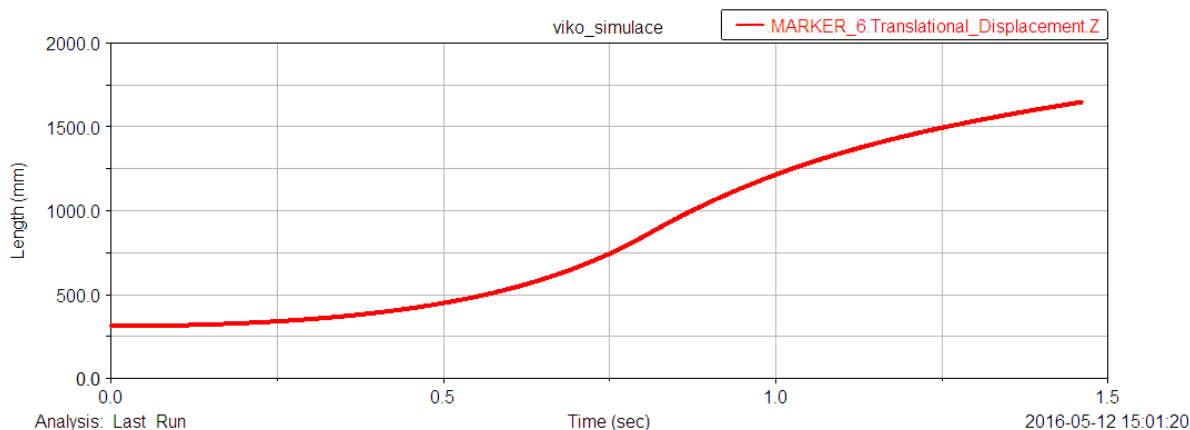
Obr. 5.18: Průběh úhlového zrychlení – otevírání okna

## 5.4 VÝSLEDKY KINEMATIKY – VÍKO

V této kapitole budou představeny výsledky kinematiky otevírání víka obdobným způsobem jako v kapitole zabývající se kinematikou okna. Podmínky pro správnou funkci byly splněny, což dokazují níže uvedené analýzy. Pomocná síla otevírání byla nadimenzována na  $50\text{ N}$  a působí po dráze o velikosti  $50\text{ cm}$ . Tato síla měla vliv na výsledky průběhu rychlosti a zrychlení.

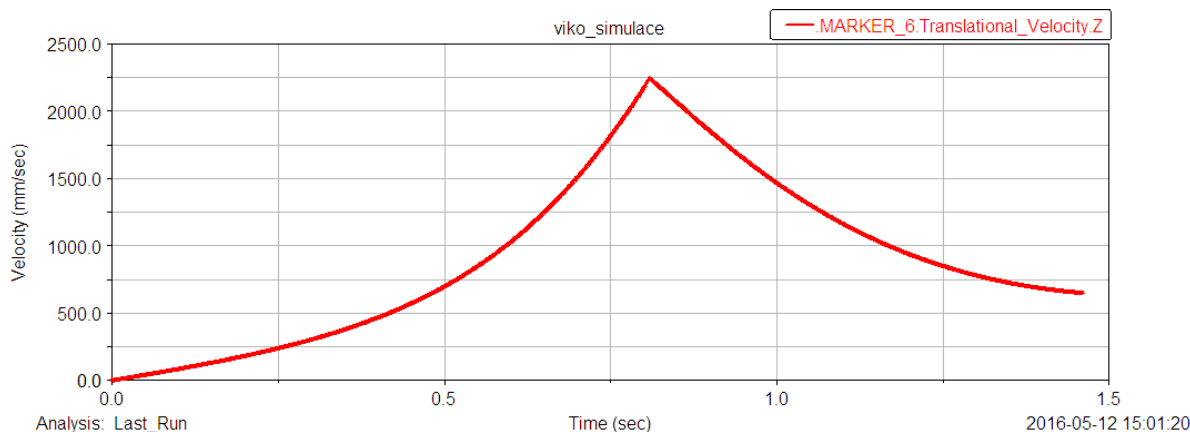


Na obr. 5.19 je znázorněn průběh posunutí bodu. Toto posunutí je dáno vysunutím pístu ve vzpěře o  $123,5\text{ mm}$ . Tím, že vzpěry nejsou stejné, je vysunutí levé vzpěry limitované vzpěrou pravou, u které dojde k maximálnímu bezpečnému vysunutí, ale levá vzpěra plně vysunutá nebude.



Obr. 5.19: Průběh posunutí - otevírání víka

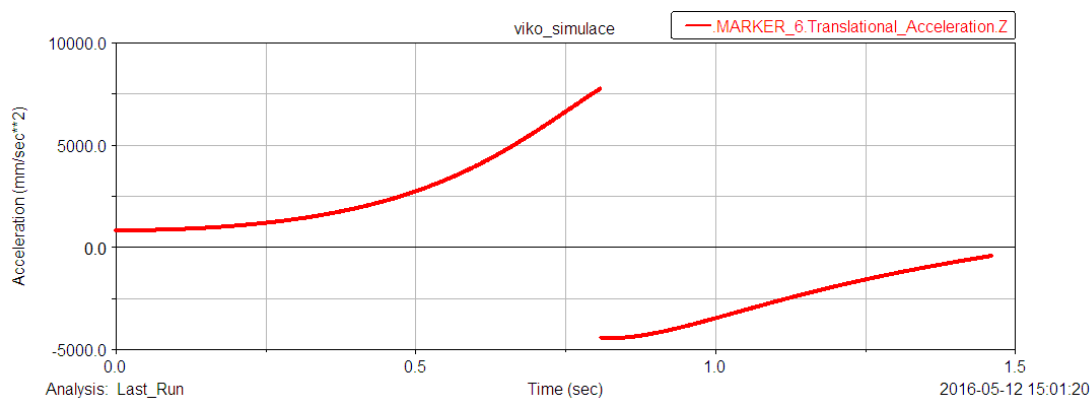
Na obr. 5.20 je znázorněn průběh rychlosti koncového bodu víka, kde je patrný bod, kdy přestane působit pomocná síla obsluhy. Tento průběh rychlosti lze považovat za správný, jelikož při procesu zavírání by měl být dveřím udělen počáteční impuls a dveře by se měly samovolně zavřít a zároveň dosáhnout takové rychlosti, aby dokázaly překonat odpor zámku a došlo k úplnému zajištění mechanismu. Tento fakt neplatí u zavírání okna, tam je potřeba působit silou obsluhy až do zajištění, aby nedošlo k poškození skla.



Obr. 5.20: Průběh rychlosti – otevírání víka

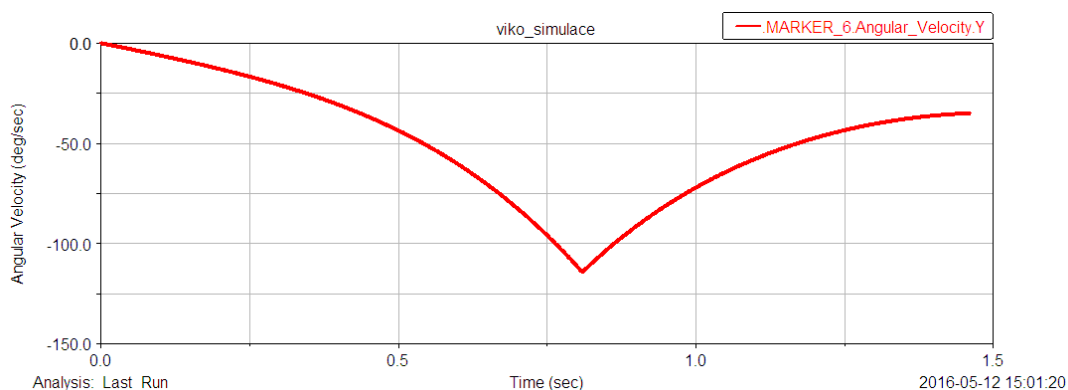


Na obr. 5.21 je znázorněn průběh zrychlení koncového bodu. Je zřejmé, že víko bude zrychlovat po dobu působení pomocné síly, která víku udělí dostatečnou hybnost k tomu, aby se plně otevřelo. Ke konci pohybu začne víko opět zrychlovat, což je způsobeno působením síly vzpěry, a to zajistí, že víko po otevření zůstane otevřené; k zavření víka je nutné dodat víku impuls. V čase simulace  $t = 0,8 \text{ s}$  nastane skoková změna síly (moment, kdy přestává působit pomocná síla), proto je na obr 5.21 a obr. 5. 23 zjevná skoková změna zrychlení.

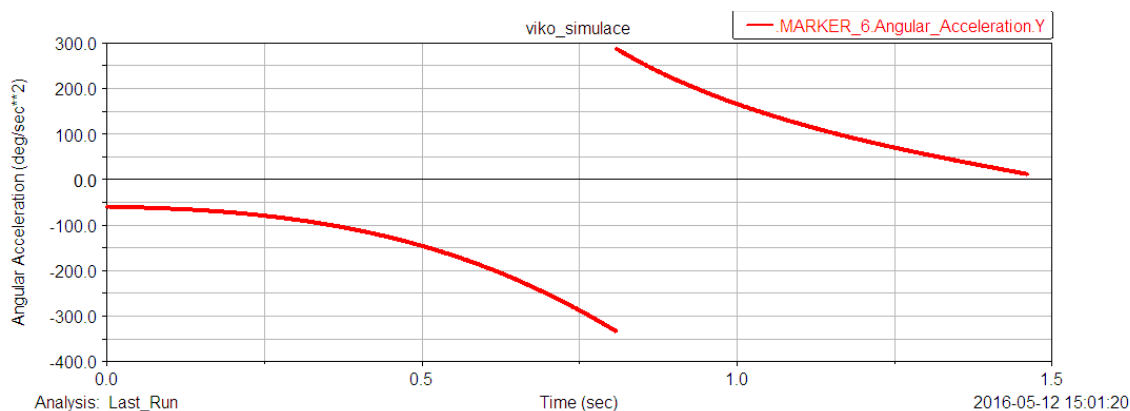


Obr. 5.21: Průběh zrychlení – otevírání víka

Na obr. 5.22 a orb. 5.23 je znázorněn průběh úhlové rychlosti a úhlového zrychlení. Důvod záporných hodnot rychlosti je, stejně jako v případě okna, dán orientací osy Y.



Obr. 5.22: Průběh úhlové rychlosti – otevírání víka

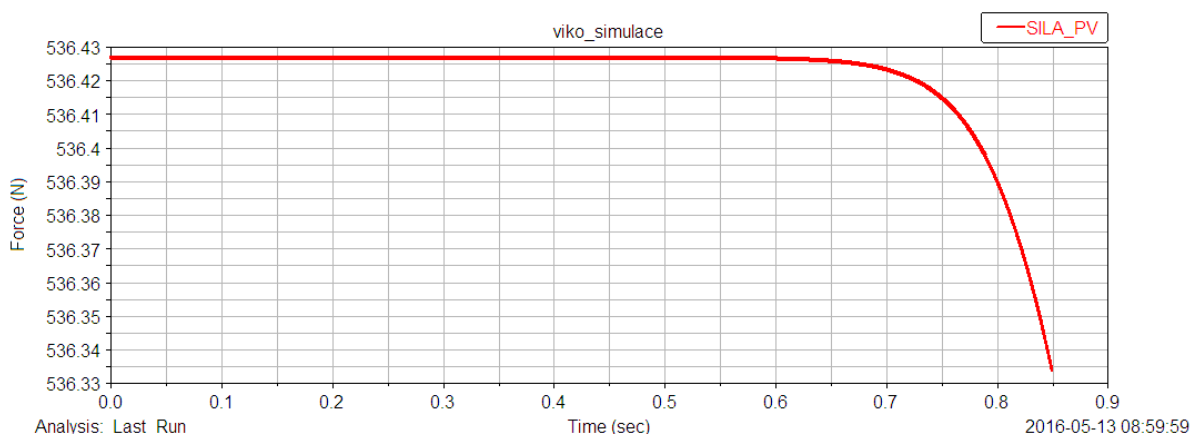


Obr. 5.23: Průběh úhlového zrychlení – otevírání víka



## 5.5 VÝSLEDKY DYNAMIKY – OKNO

V této kapitole budou prezentovány průběhy sil pravé vzpěry při otevírání okna. Výsledná síla byla získána pomocí rovnice (2.2), kdy obsahy povrchů jsou konstantní a průběhy tlaků v komorách byly získány ze stavové rovnice pro ideální plyn postupem, který byl vysvětlen v předchozích kapitolách. Do modelu bylo integrováno tření, které vzniká mezi pístem a pístnicí při vysouvání pístu, mezi čepem pantu a pantem uloženým v horní části karoserie a také tření v kulových kloubech sloužících k uchycení vzpěry k rámu okna a karoserii. Hodnoty součinitelů pro statické a dynamické tření [15] byly uvedeny v hodnotách  $0,08$  pro statické a  $0,025$  pro dynamické tření. Tyto hodnoty vychází pro tření dvou mastných povrchů rozhraní ocel-ocel. Na obr. 5.24 je znázorněn průběh síly pravé vzpěry na čase při jejím plném a bezpečném vysunutí. Vzpěru je nutné dimenzovat na  $536N$ , aby došlo k otevření.

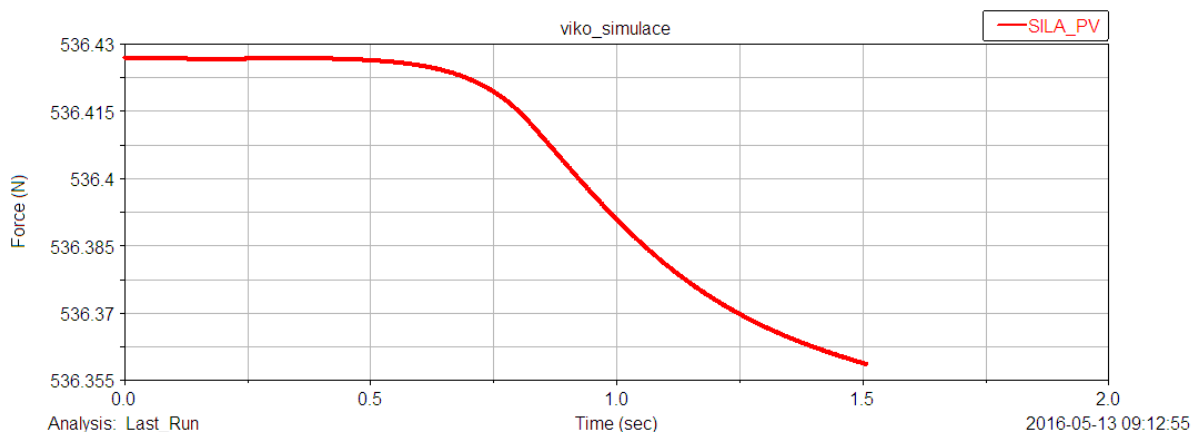


Obr. 5.24: Průběh síly pravé vzpěry – otevírání okna

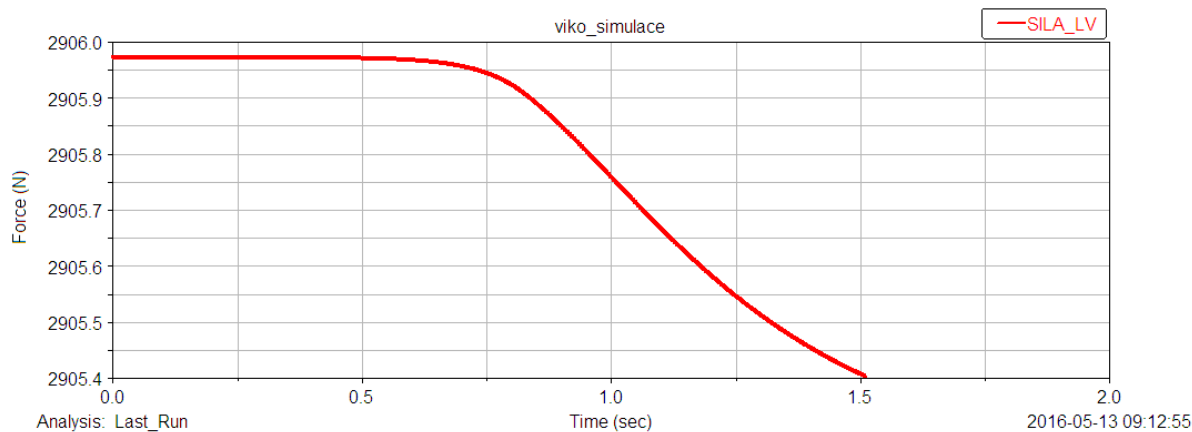


## 5.6 VÝSLEDKY DYNAMIKY – VÍKO

Obdobně jako v předchozím příkladu bylo postupováno při analýze sil vzpěr zajišťujících otevření pátých dveří. Z analýzy vyplývá, že levou vzpěru je nutné dimenzovat na téměř 3000 N (obr. 5.26). Pravá vzpěra je nadimenzována tak, aby zajistila otevření okna, a zároveň pomáhá při otevírání víka. Levá vzpěra byla namodelována v prostředí ADAMS View dle reálného modelu z prostředí CATIA, avšak takovou vzpěru nelze nadimenzovat na potřebnou sílu, jak uvádí výrobce tab. 2.1, je tedy nezbytné mechanismus vybavit vzpěrou robustnější, která již potřebnou sílu k otevření dokáže vyvinout. I v tomto případě bylo do modelu vneseno tření mezi jednotlivými komponenty, a to se stejnými hodnotami, které byly vneseny v případě otevírání okna. Výsledky průběhů sil obou vzpěr jsou uvedeny na obr. 5.25 a obr. 5.26.



Obr. 5.25: Průběh síly pravé vzpěry – otevírání víka



Obr. 5.26: Průběh síly levé vzpěry – otevírání víka



## ZÁVĚR

Cílem této práce byla simulace otevírání pátých dveří automobilu v prostředí ADAMS View, ve kterém byl namodelován zjednodušený model dveří a z reálného modelu mu byly přiděleny hodnoty hmotnosti, pozice těžišť a momentů setrvačnosti. Otevírání zajišťují dvě plynové vzpěry, u kterých bylo nutno dostatečně nadimenzovat tlak plynu, který obsahují tak, aby došlo k úplnému a bezpečnému otevření. Úloha se skládala ze simulace otevírání samotného okna a ze simulace otevírání celého víka. Pro úplné a bezpečné otevírání byl nastaven počáteční tlak ve vzpěře zajišťující otevírání okna na  $6,83 \text{ MPa}$  a ve vzpěře využitě k otvírání víka na  $37,0 \text{ MPa}$ . V obou dvou případech byly v reálném modelu vybrány vzpěry G 8/19, což je vyhovující u vzpěry pro okno, avšak nevyhovující pro vzpěru zajišťující otevírání víka. Tato vzpěra musí vyvinout sílu téměř  $3000 \text{ N}$  a vzpěra G 8/19 může být natlakovaná na maximální tlak vyvolávající sílu  $700 \text{ N}$ . Pro funkci otevírání víka je tedy nutné využít robustnější vzpěry G 14/28, případně uvážit, zda by nebylo výhodnější využít dvě méně robustní vzpěry například G 10/23, které by zajistily otevírání víka jako celku, a otevírání okna by bylo zajištěno elektromotorem. Výsledky analýzy je nutné porovnat s experimentem s reálnou vzpěrou k verifikaci výsledků. Model v prostředí ADAMS View je parametrický, takže veškeré vstupní hodnoty mohou být snadno změněny k dosažení ideálních parametrů vzpěr. Nalezení ideálních počátečních parametrů může být realizováno spuštěním studie ve zmíněném prostředí.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Foxtima s.r.o.*[online]. 2010 [cit. 2016-04-21]. Funkce plynové vzpěry. Dostupné z WWW: <<http://www.plynovevzpery.eu/plynove-vzpery.html>>
- [2] *Industrial gas springs* [online]. ©2007 [cit. 2016-04-21]. Technical info. Dostupné z WWW: <<http://www.indgassprings.com/how-gas-springs-work.html>>
- [3] *ECKOLD & VAVROUCH, spol. s r.o* [online]. © 2010 [cit. 2016-04-28]. Tlačné plynové pružiny. z WWW: <<http://www.eckold.cz/produkty/tlacne-plynove-pruziny-9>>
- [4] *Wikipedie* [online]. 28. 12. 2015 [cit. 2016-04-21]. Plynová vzpěra. Dostupné z WWW: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/Plynov%C3%A1\\_vzp%C4%9Bra](https://cs.wikipedia.org/wiki/Plynov%C3%A1_vzp%C4%9Bra)>
- [5] *Sodemann pružiny* [online]. © 2007 [cit 2016-04-23] Koncovky, Plynové vzpěry. Dostupné z WWW: <<http://www.sodemann-pruziny.cz>>
- [6] PŘIKRYL, Karel(2003): Kinematika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 142 s. (104, 105). ISBN 80-214-2412-5
- [7] KARLBERG, M., Löfstrand, M., Sandberg, S., Lundin, M. (2013): State of the art in simulation-driven design, *International Journal of Product Development*, 18 (1), s. 68-87.
- [8] *MSC.Software* [online]. © 2015 [cit. 2016-05-04]. Products, Integrated solution, Adams. Dostupné z WWW: <<http://www.mscsoftware.com/product/adams>>
- [9] *Wikipedie* [online]. 17. 4. 2016 [cit. 2016-05-21]. MSC ADAMS. Dostupné z WWW: <<https://en.wikipedia.org/wiki/MSADAMS>>
- [10] *ADAMS-HELP* [online]. 2012 [cit. 2016-05-04]. Adams Basic Package. Dostupné z WWW: <[file:///C:/MSC.Software/Adams/2012/help/wwhelp/wwhimpl/js/html/wwhelp.htm#hh=adams\\_view/learn\\_basics\\_setup.01.1.html](file:///C:/MSC.Software/Adams/2012/help/wwhelp/wwhimpl/js/html/wwhelp.htm#hh=adams_view/learn_basics_setup.01.1.html)>
- [11] HAUG, Edward J. (1989): *Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems*, Boston: Allyn and Bacon, s. 48-57. ISBN 0-205-1209-0
- [12] PAVELEK, Milan(2003): *Termodynamika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, Vyd. 3., přeprac. / v Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. 284 s. (26-39, 38-40), ISBN 80-214-2409-5
- [13] SANVILLE, F. E.(1971): *A New Method of Specifying the Flow of Pneumatic Fluid Power Valves*, Paper D3, s. 37-47.
- [14] JACOBS, P. W. M.(2013): *Thermodynamics*. London: Imperial College Press, 443 s. (248, 249, 250). ISBN 978-1-84816-971-5
- [15] *E-konstruktor* [online]© 2013 [cit. 2016-05-10] Součinitel tření. Dostupné z WWW: <<http://e-konstruktor.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[J]	Objemová práce plynu
$a^{A n}$	[m/s <sup>2</sup> ]	Normálové zrychlení vztažené k bodu A
$a^{A t}$	[m/s <sup>2</sup> ]	Tečné zrychlení vztažené k bodu A
$a^{B n}$	[m/s <sup>2</sup> ]	Normálové zrychlení vztažené k bodu B
$a^{B t}$	[m/s <sup>2</sup> ]	Tečné zrychlení vztažené k bodu B
$a^{C t}$	[m/s <sup>2</sup> ]	Tečné zrychlení vztažené k bodu C
$a_{cor}$	[m/s <sup>2</sup> ]	Coriolisovo zrychlení
b	[-]	Kritický poměr tlaků
C	[m <sup>3</sup> /s/Pa]	Nadzvuková konduktance
$c_p$	[J/kg/K]	Měrná tepelná kapacita plynu
$c_v$	[J/kg/K]	Měrná tepelná kapacita plynu
$d_k$	[mm]	Průměr díry přepouštěcího kanálku
$d_p$	[mm]	Průměr pístní tyče
$D_p$	[mm]	Průměr pístu
$E_1$	[J]	Energie soustavy nad pístem
$E_2$	[J]	Energie soustavy pod pístem
$F_{1(2)}$	[N]	Síla působící na vnější (vnitřní) stranu pístu
$F_v$	[N]	Výsledná síla působící na píst
G	[kg/s]	Hmotnostní průtok
h	[J/K]	Měrná entalpie
i	[-]	Počet stupňů volnosti
$l_k$	[mm]	Délka celé komory pístnice
$l_p$	[mm]	Výška pístu
$l_v$	[mm]	Délka komory pod pístem
m	[kg]	Hmotnost plynu
$M_1$	[kg]	Hmotnost plynu v komoře pod pístem
$M_2$	[kg]	Hmotnost plynu v komoře nad pístem
$M_C$	[kg]	Celková hmotnost plynu
$m_{poč}$	[kg]	Počáteční hmotnost plynu
n	[-]	Počet pohyblivých těles
o	[-]	Počet obecných dvojic mechanismu
p	[Pa]	Tlak plynu
$p_1$	[Pa]	Tlak plynu v komoře pod pístem



$p_2$	[Pa]	Tlak plynu v komoře nad pístem
$p_i$	[Pa]	Tlak plynu na vstupu přepouštěcího kanálku
$p_o$	[Pa]	Tlak plynu na výstupu přepouštěcího kanálku
$p_{poč}$	[Pa]	Počáteční tlak plynu v obou komorách
$Q$	[J]	Teplo předané do okolí
$r$	[J/kg/K]	Měrná plynová konstanta
$r$	[-]	Počet rotačních vazeb
$S_1$	[mm <sup>2</sup> ]	Obsah povrchu pod pístem
$S_2$	[mm <sup>2</sup> ]	Obsah povrchu nad pístem
$t$	[s]	Časový krok
$T$	[K]	Teplota
$T_i$	[K]	Teplota na vstupu přepouštěcího kanálku
$T_{poč}$	[K]	Počáteční teplota plynu v obou komorách
$T_{ref}$	[K]	Referenční teplota
$U$	[J]	Vnitřní energie
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem plynu
$v$	[-]	Počet valivých vazeb
$V_{1poč}$	[mm <sup>3</sup> ]	Počáteční objem komory pod pístem
$V_{2poč}$	[mm <sup>3</sup> ]	Počáteční objem komory nad pístem
$v^A$	[m/s]	Rychlost vztažená k bodu A
$v^B$	[m/s]	Rychlost vztažená k bodu B
$v^C$	[m/s]	Rychlost vztažená k bodu C
$\beta_{lam}$	[-]	Kritický poměr tlaků pro laminární proudění
$\kappa$	[-]	Poissonova konstanta
$\omega$	[rad/s]	Úhlová rychlost
$\rho_{ref}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Referenční hustota plynu



## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1) = Model simulace otevírání pátých dveří automobilu (Obsah na CD)