

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA DOPRAVNÍ**

ÚSTAV LETECKÉ DOPRAVY

Vícenásobně použitelné kosmické systémy

Diplomová práce

**Autor:** Bc. Robert Tománek

**Praha 2017**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K621..... Ústav letecké dopravy**

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Robert Tománek**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy**

Název tématu (česky): **Vícenásobně použitelné kosmické systémy**

Název tématu (anglicky): Reusable Launch Space Systems

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Důvody vzniku, vytyčené cíle
- Projekty vícenásobně použitelných kosmických systémů
- Aspekty ovlivňující možnost vícenásobného použití
- Ekonomická analýza
- Opakovaně použitelné prostředky jako budoucnost kosmické dopravy



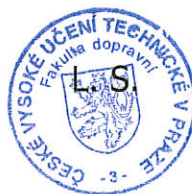
- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Wertz, J.R.; Larson, W.J.: Space mission analysis and design, Microcosm, Pennsylvania, 1999.  
POLÁK, Michal., Cesty k raketoplánům, 2012.  
ISAKOWITZ, Steven J., International reference guide to space launch systems : AIAA American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2016**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2017**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

Ing. Jakub Kraus, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu letecké dopravy



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

.....  
Bc. Robert Tománek  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 30. června 2017

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám žádný závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 1. 11. 2017

.....

Robert Tománek

---

## **Poděkování**

*Touto cestou bych rád poděkoval doc. Ing. Jakubu Hospodkovi, Ph.D. za jeho pomoc, odborné vedení a věcné připomínky.*

---

## **ABSTRAKT**

Práce se zaměřuje na kosmické dopravní prostředky, jejichž vlastností je vícenásobná použitelnost. Klade si za cíl popsat současný stav znovupoužitelnosti v oblasti kosmických systémů a rozebrat znovupoužitelnost současných nosných raket Falcon. Dále je cílem práce stanovit využití a dopady technologie znovupoužitelnosti kosmických systémů.

### **Klíčová slova:**

opakovaně použitelné kosmické systémy, opakovaně použitelné kosmické dopravní prostředky, kosmický raketoplán, kosmická loď, nosná raketa, kosmický let, komerční vesmírné lety, vesmírný průmysl

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is multiple usability of space systems. It aims to describe the current state of reusability in the field of space systems and to analyze the reusability of current Falcon launch vehicles. Next, to determine the uses and impacts of reusability technology.

### **Key words:**

reusable launch system, reusable launch vehicle, spacecraft, spaceplane, launch vehicle, spaceflight, commercial spaceflight, space industry

1	Úvod.....	8
2	Vývoj vícenásobně použitelných kosmických dopravních prostředků.....	10
2.1	Důvody vzniku z historického hlediska .....	10
2.1.1	Základní cíle .....	10
2.1.2	Historický pohled .....	10
2.2	Počátky – projekt Silbervogel .....	10
2.3	Rozvoj v období tzv. Studené války.....	11
2.3.1	Kosmický výzkum.....	11
2.3.2	Raketoplány STS .....	11
2.3.3	Raketoplán Buran .....	11
2.4	Evropská kosmická agentura .....	12
2.4.1	Evropské projekty v oblasti opakovaného použití.....	12
2.4.2	Evropský raketoplán Hermes.....	12
2.4.3	Nosná raketa Ariane 5 .....	12
2.5	Soukromé projekty .....	13
2.5.1	Vývoj soukromých projektů.....	13
2.5.2	Program NASA COTS.....	14
2.5.1	Program NASA CRS .....	14
2.5.2	Space Exploration Technologies Corporation .....	15
2.5.3	Další společnosti v oblasti znovupoužitelnosti .....	17
3	Aspekty ovlivňující vícenásobnou použitelnost.....	18
3.1	Opakované použití nosné rakety .....	18
3.1.1	Opakované použití prvního stupně rakety .....	18
3.1.2	Opakované použití druhého stupně rakety.....	21
3.1.1	Opakované použití rakety na tuhé pohonné látky .....	22
3.1.2	Opakované použití dalších částí rakety .....	23
3.2	Opakované použití kosmické lodi .....	23
3.2.1	Opakované použití kosmické lodi.....	24
3.3	Opakované použití raketoplánu .....	27

3.3.1	Vícenásobně použitelný raketoplán .....	27
3.3.2	Rozdělení raketoplánů.....	27
3.3.3	Letový profil raketoplánu .....	28
4	Projekty vícenásobně použitelných kosmických systémů.....	29
4.1	Kosmické raketoplány.....	29
4.1.1	STS Space Shuttle.....	29
4.1.2	Program Eněrgija - Buran .....	30
4.1.3	SpaceShipOne .....	31
4.1.4	Boeing X-37.....	32
4.1.5	Dream Chaser .....	33
4.2	Vícenásobně použitelné nosné rakety.....	34
4.2.1	Rakety SRB .....	35
4.2.2	Rakety Falcon - SpaceX.....	36
4.2.3	New Shepard a New Glenn - Blue Origin.....	38
4.2.1	Raketa Eněrgija .....	40
4.3	Kosmické lodě .....	41
4.3.1	Kosmická loď SpaceX Dragon .....	41
4.3.2	Boeing CST100 Starliner .....	43
4.3.3	Projekt Kliper .....	43
5	Znovupoužitelnost z ekonomického pohledu .....	45
5.1	Analýza znovupoužitelnosti nosné rakety Falcon 9.....	45
5.1.1	Stanovení předpokladů pro úspěch znovupoužitelnosti.....	45
5.1.2	Vliv opakovaného použití na dostupnost .....	47
5.1.3	Vliv opakovaného použití na bezpečnost a spolehlivost.....	49
5.1.4	Vývoj .....	49
5.1.5	Výroba.....	51
5.1.6	Provoz .....	52
5.1.7	Vliv znovupoužitelnosti na nosnost.....	55
5.1.8	Rozbor nákladů na start rakety Falcon.....	57
6	Opakovaně použitelné prostředky jako budoucnost kosmické dopravy .....	63
6.1	Znovupoužitelnost v kosmické dopravě .....	63



## Obsah

---

6.1.1	Částečná znovupoužitelnost.....	63
6.1.2	Kompletní znovupoužitelnost.....	63
6.1.3	Zlevnění kosmické dopravy .....	63
6.2	Kosmická doprava .....	64
6.2.1	Mezinárodní vesmírná stanice .....	65
6.2.2	Vynášení satelitů a satelitní konstelace .....	66
6.2.3	Vesmírná turistika.....	69
	Závěr .....	71
	Seznam použitých zkratk .....	72
	Zdroje informací .....	73

# 1 Úvod

Práce se zaměřuje na kosmické dopravní prostředky, jejichž vlastností je vícenásobná použitelnost. Klade si za cíl popsat současný stav znovupoužitelnosti v oblasti kosmických systémů a rozebrat znovupoužitelnost současných nosných raket Falcon. Dále stanovit využití a dopady technologie znovupoužitelnosti kosmických systémů.

Typickým opakovaně použitelným kosmickým dopravním prostředkem je raketoplán. Fenomémem současnosti v kosmonautice jsou však opakovaně použitelné nosné rakety na kapalné palivo. Znovupoužitelnost také nedávno dosáhla na kosmické lodě klasického typu. Opakovaně používány byly však i nosné rakety na tuhé palivo. Jen teoreticky lze zatím uvažovat o vícenásobném použití u dalších kosmických systémů, jako jsou sondy nebo družice.

Vývoj vícenásobně použitelných kosmických dopravních prostředků započal v první polovině dvacátého století (mezi lety 1935 a 1945) projektem Silbervogel. V následném poválečném období zažívala kosmonautika rychlý vývoj, který vyústil v pilotovaný kosmický let a přistání na Měsíci v roce 1969. Vícenásobně použitelné kosmické dopravní prostředky se staly výrazným předmětem vývoje na počátku sedmdesátých let. Toto období také dalo vzniknout dosud největšímu projektu v oblasti vícenásobně použitelných kosmických dopravních prostředků. Jednalo se o program STS Space Shuttle, který se jako první znovupoužitelný kosmický prostředek dočkal operačního nasazení. V současnosti jsou tyto raketoplány již vyřazeny z důvodů technických a ekonomických. Nedošlo k naplnění některých ekonomických a provozních cílů projektu. Další znovupoužitelné kosmické systémy se tak dostávají do provozu až nyní, po několika desetiletích od uvedení STS.

V současnosti lze hovořit o období po raketoplánech STS, které je charakteristické přechodem od státních agentur k soukromým projektům. Zejména v případě vývoje kosmických dopravních systémů a dopravy na oběžnou dráhu Země. Soukromé projekty v současnosti často nabízejí nižší náklady na vývoj kosmických prostředků a dopravu do vesmíru, než za jaké jsou tyto funkce schopné vykonávat státem řízené organizace. Státní

organizace však mají stále nezastupitelnou úlohu, zejména v posouvání současných hranic kosmonautiky.

Po opakovaně použitelných raketoplánech se trend vývoje posunul k opakovaně použitelným nosným raketám. V roce 2015 byly poprvé zachráněny první stupně nosných rakety na kapalné palivo řízeným motorickým přistáním. O dva roky později dochází již k opakovanému využití prvních stupňů. Vývoj směřuje k opakovanému použití celé nosné rakety.

Raketoplány přesto nejsou minulostí, zejména v experimentální podobě. Ve službě se nyní nachází americký experimentální raketoplán X-37, jehož nynější oficiální poslání je zkoušet nové technologie pro opakované lety do vesmíru, provádět experimenty v prostředí mikrogravitace a další. Další raketoplány jsou nyní ve vývoji, ale vždy jde o zařízení relativně menších rozměrů a menších nosností. Současné raketoplány již nedosahují obdivuhodných rozměrů STS. Vývoj se ubírá spíše směrem menších zařízení, která jsou z mnoha pohledů méně náročná.

## **2 Vývoj vícenásobně použitelných kosmických dopravních prostředků**

### **2.1 Důvody vzniku z historického hlediska**

#### **2.1.1 Základní cíle**

Základní myšlenou vzniku vícenásobně použitelných kosmických dopravních prostředků je snížení provozních nákladů a možnost vysoké frekvence startů.

V případě raketoplánů STS bylo zamýšleno se startem až stokrát za rok. Rakety Falcon 9 si kladou podobně vysoké cíle, a to schopnosti startovat již do 24 hodin po přistání [11].

#### **2.1.2 Historický pohled**

Z historického hlediska byly důvody vzniku převážně politické, což je rozvedeno v kapitole 2.3. Plány na opakované použití jsou zde již od počátku kosmonautiky, nicméně až v případě projektů z posledních několika let lze uvažovat o smyslu znovupoužitelnosti z čistě ekonomického pohledu. V současnosti je vícenásobná použitelnost jedním ze základních prostředků pro zlevnění kosmické dopravy.

## **2.2 Počátky – projekt Silbervogel**

První vícenásobně použitelný kosmický dopravní prostředek v dnešním pojetí byl vyvíjen od roku 1935 do roku 1945 na území dnešního Německa. Projekt měl název Silbervogel (Stříbrný pták) a stál za ním rakouský raketový odborník Dr. Eugen Sänger [12]. Jednalo se o suborbitální raketoplán. V rámci projektu Silbervogel byly navrženy technologie, které jsou používány dodnes, například regenerativní chlazení raketových motorů vlastním

palivem. Výpočty, modely a provedené experimenty byly využity i o několik desítek let později v programu STS Space Shuttle.

## **2.3 Rozvoj v období tzv. Studené války**

### **2.3.1 Kosmický výzkum**

Kosmický výzkum takřka od počátku tlačila kupředu světová politika. V období tzv. „Studené války“ zažívala kosmonautika mimořádně rychlý vývoj. Kosmický výzkum byl velice prestižní. Byly vydávány obrovské sumy peněz. Probíhalo schvalování projektů, které by bez podpory armády a bez hrozby války pravděpodobně nevznikly.

### **2.3.2 Raketoplány STS**

První operačně nasazené vícenásobně použitelné kosmické prostředky byly raketoplány STS. Vznikaly v období tzv. Studené války a zároveň v období tzv. Hvězdných válek (období Strategické obranné iniciativy - SDI). Tehdejší americký prezident Ronald Reagan vyzval vědce a inženýry k vytvoření prostředku, který by učinil jaderné zbraně beznadějně zastaralými. Raketoplány USA vznikly přímo jako součást strategie Hvězdných válek a měly mít i vojenské využití. Hlavním důvodem vstupu armády USA do projektu raketoplánu bylo získání schopnosti rychlého vynášení objemných nákladů, opravy satelitů na oběžné dráze a související schopnost vést boj a špionáž v kosmickém prostoru.

### **2.3.3 Raketoplán Buran**

Vývoj sovětského raketoplánu Buran začal především jako reakce na americký program. Raketoplány navržené a postavené na obou stranách Atlantiku byly významně ovlivněny požadavky armády. Sovětský svaz považoval raketoplány z vojenského hlediska za nepoužitelné už před započítáním vývoje svého raketoplánu Buran.

---

## 2.4 Evropská kosmická agentura

### 2.4.1 Evropské projekty v oblasti opakovaného použití

V Evropě v minulosti vzniklo několik projektů na raketoplán a kosmickou loď. Projekty vznikaly pod hlavičkou Evropské kosmické agentury, ale i v jednotlivých státech. Zejména ve Francii, Německu a Itálii. U některých těchto projektů se podařilo vyrobit testovací prototyp, nicméně žádný z nich nakonec neobstál.

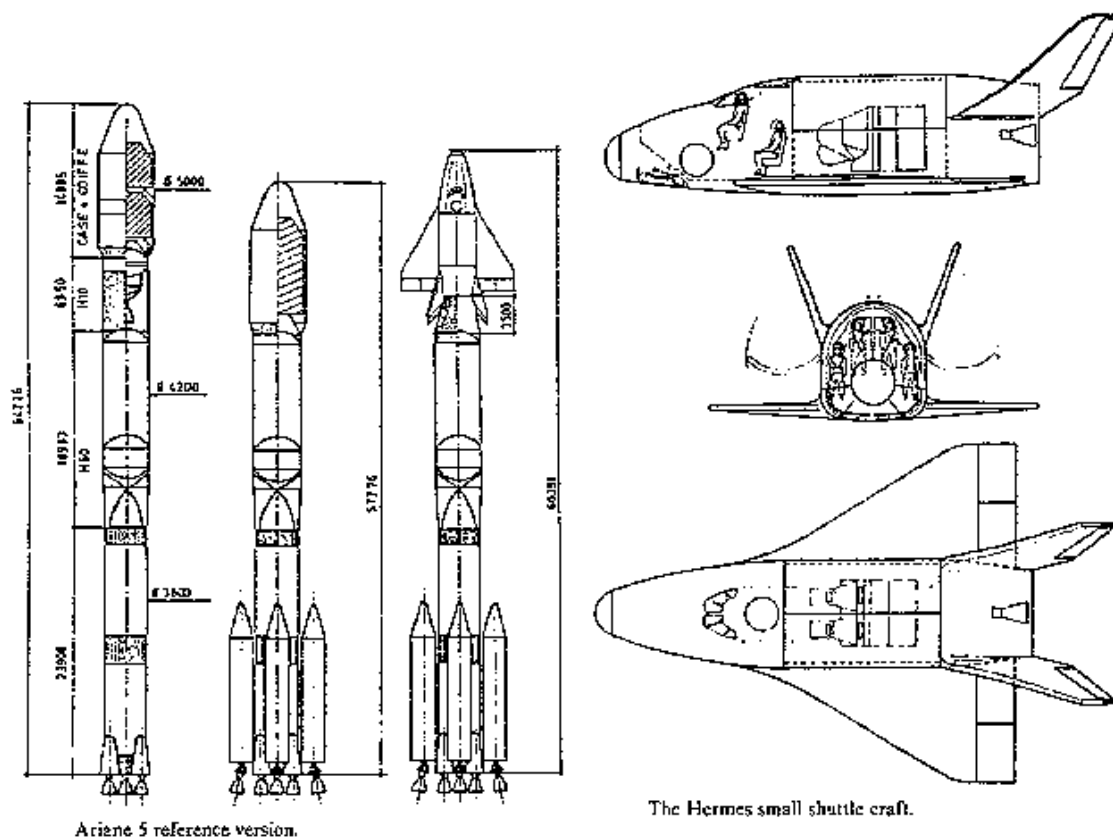
### 2.4.2 Evropský raketoplán Hermes

Nejblíže k realizaci měl evropský raketoplán Hermes vyvíjený mezi lety 1984 až 1992 [21]. Vynášet jej měla raketa Ariane 5 z jihoamerického kosmodromu Kourou. Raketoplán měl sloužit jako obsluha kosmické stanice, vědecká laboratoř a k opravě družic. Při návratu do atmosféry měl odhodit obslužný modul a přistát jako kluzák. Při startu se počítalo s hmotností přibližně 20 tun a délkou stroje 20 metrů. Hermes spolu s Ariane 5 je vyobrazen na obrázku 1.

### 2.4.3 Nosná raketa Ariane 5

U evropské rakety Ariane 5 lze v současnosti nalézt žádný, nebo jen základní stupeň vícenásobné použitelnosti. Centrální stupeň rakety je určen pro jedno použití a po využití je zničen. Raketa využívá také dva pomocné startovací motory na tuhé palivo, které se vrací na zem. Tyto stupně jsou pak využity ke zkouškám [20]. S opětovným použitím těchto stupňů se z ekonomických důvodů nepočítá. V budoucí generaci raket Ariane se předpokládá zmenšení těchto startovacích motorů, což jejich možnou vícenásobnou použitelnost dále znevýhodňuje.

Společnost Airbus v roce 2015 představila koncept Adeline, který byl reakcí na vícenásobně použitelné první stupně společnosti SpaceX. Koncept představil záchranu speciálního motorového stupně rakety v podobě klouzavého řízeného přistání na letišti.



Obrázek 1: Evropský raketoplán Hermes [21]

## 2.5 Soukromé projekty

### 2.5.1 Vývoj soukromých projektů

Soukromé společnosti se účastní kosmických projektů již od projektu Apollo. Kosmická doprava však byla ještě donedávna doménou převážně národních kosmických agentur a vlád. Doprava do vesmíru, podobně jako jiné oblasti, zažívá s rozvojem technologií značné proměny. Do vesmíru stále častěji pronikají komerční společnosti, a dokonce v některých oblastech začínají převládat nad národními agenturami. Tento nástup soukromých společností znamená v kosmonautice poměrně zásadní posun, zvláště v případě americké

kosmonautiky. Soukromé společnosti se starají o vývoj dopravních prostředků a dopravu na ISS. Tento krok uvolňuje kapacity NASA, které je možné využít k původnímu poslání posouvání hranic kosmonautiky.

### **2.5.2 Program NASA COTS**

Agentura NASA v roce 2006 spustila program Commercial Orbital Transportation Services (zkráceně COTS), v rámci kterého NASA poskytla soukromým americkým firmám dotace na vývoj moderní technologie potřebné pro dopravu nákladu a později také posádky na Mezinárodní vesmírnou stanici.

O dotace v programu COTS se ucházelo několik firem od společností Boeing a Lockheed Martin, po několik menších. V první fázi NASA vybrala společnosti SpaceX a Rocketplane Kistler. Rocketplane Kistler byla nahrazena společností Orbital Sciences (později Orbital ATK), protože nezvládala plnit závazky.

NASA do programu COTS investovala 800 milionů dolarů. Společnost SpaceX získala dotaci na vývoj nosné rakety Falcon 9 a automatické zásobovací lodi Dragon ve výši 396 milionů dolarů. Společnost Orbital Sciences (později orbital ATK) získala dotaci 288 milionů dolarů na vývoj rakety Antares a automatické zásobovací lodi Cygnus. SpaceX absolvovala první misi na ISS v roce 2012, Orbital ATK o rok později. Tím byl program COTS završen. NASA program COTS vyhodnotila jako velice úspěšný.

Zásobovací mise ISS byly objednávány a spravovány pod souvisejícími programy Commercial Resupply Services a Commercial Crew.

### **2.5.1 Program NASA CRS**

V souvislosti s programem COTS byl spuštěn související program Commercial Resupply Services (CRS). V rámci CRS NASA v roce 2008 uzavřela kontrakty na zásobovací mise na ISS se společnostmi SpaceX (12 misí) a Orbital ATK (8 misí).



Program COTS v roce 2013 úspěšně završen. Následně byl vyhodnocen jako velice úspěšný. V roce 2014 bylo rozhodnuto o spuštění soutěže o druhou fázi Commercial Resupply Services (CRS) pro zásobování ISS v letech 2019 až 2024. Uspěly společnosti SpaceX, Orbital ATK a Sierra Nevada Corporation. Sierra Nevada Corporation s vícenásobně použitelným raketoplánem Dream Chaser (viz kapitola 3.1.5).

## **2.5.2 Space Exploration Technologies Corporation**

### *2.5.2.1 Vícenásobná použitelnost*

Space Exploration Technologies Corporation (SpaceX) byla založena v roce 2002. SpaceX již od svého založení měla za cíl vyvinout znovupoužitelný nosný raketový systém, který by umožnil snížení cen startů a nastartoval tak kosmickou ekonomiku. Podle zakladatele společnosti Elona Muska je dlouhodobým cílem společnosti významně snížit náklady na cestu do vesmíru a tím do budoucna umožnit lidstvu kolonizaci Marsu. V současnosti jde o nejdůležitější společnost v oblasti opakovaného použití kosmických dopravních systémů. Společnost vyvíjí a vyrábí vícenásobně použitelné raketové nosiče Falcon a vícenásobně použitelnou kosmickou loď Dragon. Společnost se v současnosti významným způsobem podílí na komerčním vypouštění družic a na dopravě na ISS. V současnosti má za sebou přes padesát úspěšných startů raket Falcon 9 a také již první úspěšné komerční starty s použitými stupni nosné rakety.

Společnost má zázemí na kosmodromu Cape Canaveral na Floridě, na základně Vandenberg v Kalifornii, a buduje vlastní kosmodrom v Texasu.

### *2.5.2.2 Úspěchy a prvenství*

SpaceX jako soukromá společnost dosáhla několika významných úspěchů a prvenství. 28. září 2008 dosáhla oběžné dráhy s raketou na kapalné palivo. 9. prosince 2010 dosáhla oběžné dráhy se soukromou kosmickou lodí a bezpečně se vrátila na zem. 25. května

2012 došlo k úspěšnému připojení kosmické lodi k Mezinárodní vesmírné stanici. 3. 12.

2013 se stala první soukromou společností, která vynesla satelit na geostacionární dráhu.

Prvenství v oblasti opakovaného použití:

22. 12.2015 přistání s prvním stupněm rakety Falcon 9,

31. 3. 2017 znovupoužití již letěného stupně rakety Falcon 9,

3. 6. 2017 znovupoužití kosmické lodě Dragon C106 (při druhém letu byla použita většina původních systémů) [3].

### 2.5.2.3 *Princip znovupoužitelnosti*

Společnost SpaceX využívá k naplnění svého cíle, kterým je poskytovat dostupnou dopravu do vesmíru, princip znovupoužitelnosti. Nové verze nosných raket se vyznačují stále vyšší mírou opakovaného použití. V dohledné době se připravuje experimentální záchrana druhého stupně rakety, což bude představovat další významný milník. Kromě stále vyšší znovupoužitelnosti prvních stupňů a připravované experimentální záchrany druhého stupně již proběhlo i několik záchran aerodynamických krytů nákladového prostoru. Vývoj klade důraz na opakovanou použitelnost a směřuje k opakovanému použití celku, tedy celé nosné rakety a kosmické lodě (koncept ITS a BFR). Koncepty opakovaného použití společnosti SpaceX jsou z hlediska současné kosmonautiky v naprosto mimořádném rozsahu. Jedná se také o důvod proč společnost SpaceX v současnosti vzbuzuje značnou pozornost a velké očekávání.

Vzhledem k významu v oblasti opakovaného použití jsou nosným raketám SpaceX Falcon a kosmickým lodím SpaceX Dragon věnovány i další kapitoly této práce.

## 2.5.3 Další společnosti v oblasti znovupoužitelnosti

### 2.5.3.1 *Blue Origin*

Významnou konkurenci pro SpaceX na poli znovupoužitelných prostředků by mohla v budoucnu představovat společnost Blue Origin, která se také intenzivně zabývá vývojem technologie opakované použitelnosti nosných raket. Blue Origin v roce 2015 úspěšně motoricky přistála se suborbitální raketou New Shepard (viz kapitola 4.2.3). Společnost vyvíjí až třístupňovou nosnou raketu New Glenn s vícenásobně použitelným prvním stupněm [38]. Vývoj rakety započal v roce 2012. První starty rakety jsou plánovány přibližně na rok 2020. Konkurencí zde bude již etablovaná SpaceX, která má již nyní na kontě komerční starty prvních použitých stupňů raket a další poměrně významné úspěchy s pokročilou znovupoužitelností. Ve více zmíněné době již bude pracovat na kompletně znovupoužitelné raketě (viz další kapitoly).

### 2.5.3.2 *Ostatní současné projekty v oblasti znovupoužitelnosti*

Další společnosti raketového průmyslu se ke znovupoužitelnosti staví zatím velice opatrně. Jmenovat je možné United Launch Alliance (ULA), což je společný podnik společností Boeing a Lockheed Martin. Společnost provozuje nosné rakety Atlas V, Delta II a Delta IV. Dle zveřejněných informací ULA u své budoucí rakety Vulcan zatím zvažuje pouze znovupoužitelnost raketových motorů [39]. Mohlo by se jednat o samostatný raketový stupeň, který by byl součástí prvního stupně. Znovupoužitelnost v této podobě by mohla být zavedena nejdříve v roce 2025. Na podobném konceptu pracuje také Airbus (Ariane). Jedná se zde tedy zatím o úvahy o základním stupni znovupoužitelnosti.

Pokud se přesuneme od nosných raket k raketoplánům, v současnosti je v běhu několik zajímavých projektů, které jsou rozpracovány v kapitole 4.1. Jedná se zejména o projekt Boeing X-37 (kapitola 4.1.4.) a Dream Chaser (kapitola 4.1.5.).

## 3 Aspekty ovlivňující vícenásobnou použitelnost

### 3.1 Opakované použití nosné rakety

Nosná raketa je dopravní prostředek poháněný raketovými motory a určený k vynášení užitečných nákladů do vesmíru. Ačkoliv je nosná raketa zařízení konstruované obvykle pro jedno použití, není tomu tak vždy, zvláště pak v poslední době. Prvním operačně používaným případem znovupoužitelné nosné rakety byla raketa na tuhé pohonné látky Space Shuttle Solid Rocket Booster (SRB). Dosud se jedná o nejvýkonnější raketové motory na tuhé palivo. SRB byly využívány jako pomocný startovací stupeň raketoplánů STS. Z dnešního pohledu je však významná především znovupoužitelnost raket na kapalné pohonné látky, která se začíná prosazovat v podobě nosných raket Falcon, a právě této problematice budou především věnovány následující kapitoly.

#### 3.1.1 Opakované použití prvního stupně rakety

U vícestupňových raket je první stupeň nejdražší částí rakety a tvoří zhruba 70 % celkové ceny startu. Z pohledu znovupoužití se tedy jedná o primární část.

SpaceX se znovupoužitelností prvních stupňů raket zabývá již od prvních startů Falcon 1. U raket Falcon 1 bylo zkoušeno přistání prvního stupně pomocí padáku. Přistání na padáku se ale ukázalo jako nevhodné. K prvnímu úspěšnému přistání na pevnině došlo v prosinci 2015 s raketou Falcon 9. K prvnímu úspěšnému přistání na plovoucí plošině (ASDS) došlo v dubnu 2016 (CRS-8) [3].

Start rakety Falcon 9 probíhá standardně vertikálně ze startovací rampy. Primárním úkolem je vynést náklad. Sekundárním úkolem je návrat prvního stupně rakety. První stupeň se oddělí od rakety po přibližně 3 minutách letu ve výšce kolem 70 kilometrů a rychlosti okolo 1700 m/s. Z důvodu záchrany musí zůstat prvnímu stupni palivo. Druhý stupeň tedy musí vykonat více práce, což ale v obvyklých podmínkách nepředstavuje problém.

Přistání stupně je automatické. Je řízené výpočetní jednotkou stupně, která zpracovává vstupní data z přístrojů, vyhodnocuje rychlost stupně, jeho polohu atd. Navádění probíhá pomocí GPS, INS a radiomajáku (umístěného na přistávací rampě, nebo na ASDS). Řídící jednotka ovládá tah a vektor tahu. Dále jsou k dispozici pomocné prostředky pro stabilizaci. Sestávají z roštových kormidel a trysek se stlačeným vzduchem v horní části prvního stupně.

Po oddělení se první stupeň otočí proti směru letu a provede se zpětný zážeh (boostback). Tah motorů stupeň zpomalí až o polovinu a tím se zkrátí vzdálenost místa přistání od místa startu. V případě přistání na pevnině jsou zažehnuty 3 motory, pro přistání na plovoucí plošinu 1 motor. Při nedostatku paliva je možné zpětný zážeh vynechat. První stupeň pak letí po balistické křivce (v tomto případě je samozřejmě možné pouze přistání na plovoucí plošině).

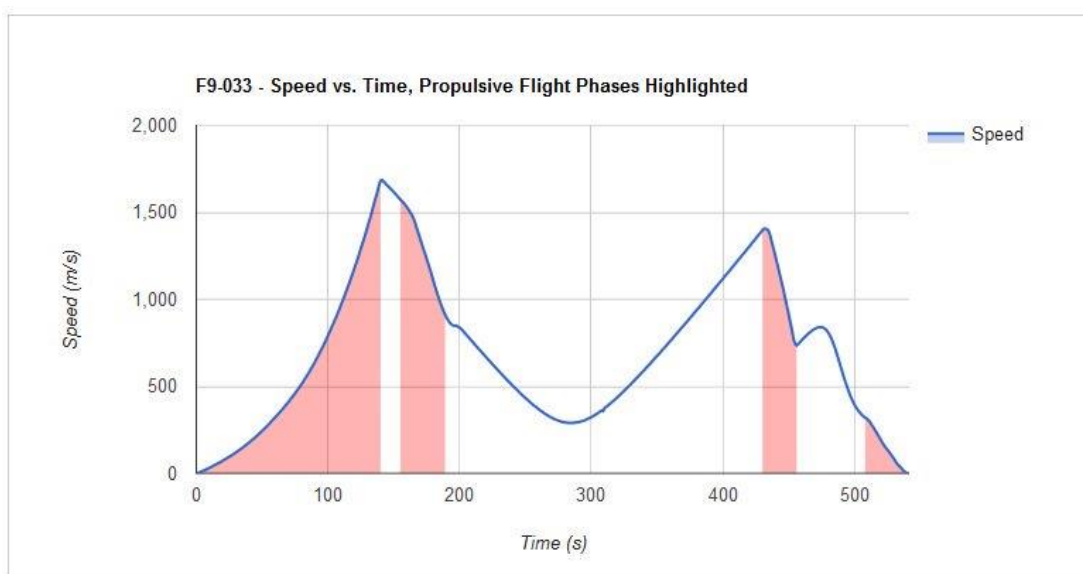
Při vstupu stupně do atmosféry Země se provádí druhý zážeh (tzv. vstupní). Zážehem se stupeň dostatečně zpomalí pro úspěšný průchod atmosférou. Tento zážeh zároveň brání poškození motorů rychle proudícím vzduchem.

Před samotným přistáním nastává třetí zážeh, který zpomalí raketu pro měkké dosednutí. Přistání probíhá na pevnině nebo na plovoucí plošině. Je určeno povahou konkrétní mise a především množstvím paliva, které má stupeň pro přistání k dispozici. Dostupné množství paliva je ovlivněno hmotností nákladu a cílovou oběžnou dráhou nákladu. Průběh letu je demonstrován na obrázcích 2 a 3.

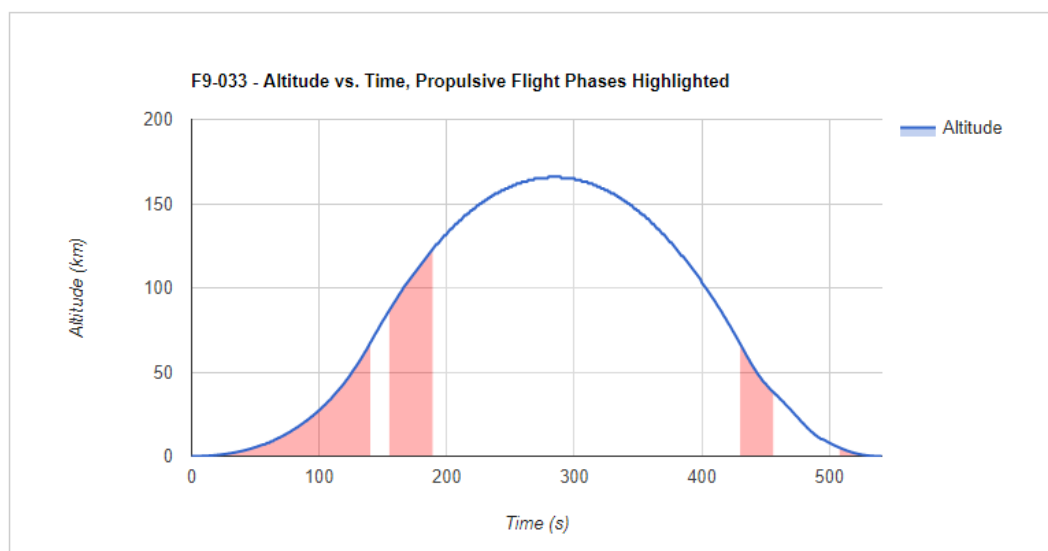
Bez možnosti záchrany stupně jsou nyní některé náročnější případy, například náklad přesahující 5,5 tuny na přechodovou dráhu ke geosynchronní dráze (GTO). Tato hranice je postupně zvyšována.

Stupeň přistává na pevnině nebo na plovoucí plošině, což je určeno charakterem konkrétní mise. Raketa po přistání na plovoucí plošině je vyobrazena na obrázku 4. V současnosti je pro návrat prvních stupňů využíváno pouze motorické vertikální přistání. Záchrana s návratem stupně pomocí padáku se v případě motorů na kapalné palivo neosvědčila (např. Falcon 1). První stupeň rakety Falcon 9 váží při návratu přibližně 20 000 kg. Padák by tedy musel být velice rozměrný a těžký. Záchrana na hladinu bez plošiny představuje z pohledu opakovaného použití problém. V případě motorů na kapalné palivo by slaná, a tedy silně korozivní voda, napáchala značné škody. Toto řešení bylo v minulosti využíváno v případě raket na tuhé palivo, u kterých přistání přímo na

hladinu není tak problematické, vzhledem k poměrně jednoduché konstrukci. Čistě teoretickou možností je zatím využití klouzavého přistání raketového stupně (viz 4.2.1).



Obrázek 2: rychlostní průběh letu prvního stupně<sup>1</sup> [13]



Obrázek 3: průběh výšky letu, času a běhu motorů<sup>2</sup> [13]

<sup>1</sup>, Mise NROL-76, křivka znázorňuje výšku, zvýraznění čas běhu motorů

<sup>2</sup>, Mise NROL-76



Obrázek 4: První stupeň rakety Falcon 9, po přistání na ASDS [28]

### 3.1.2 Opakované použití druhého stupně rakety

Druhý stupeň rakety dosahuje orbitálních rychlostí. Záchrana tohoto stupně je tedy podstatně náročnější než v případě stupně prvního. Pro návrat na zem a průchod atmosférou je nutné stupeň podstatněji zpomalit. První možností je zažehnout motor v opačném směru letu a eliminovat část rychlosti, což vyžaduje značné množství paliva. Další možností je brždění o atmosféru Země. Tento způsob nevyžaduje palivo, ale nevýhodou je obrovské tepelné zatížení a z toho vyplývající nutnost použít tepelný štít. Náročnější než u prvního stupně je i zpomalení v konečné fázi přistání. Motor druhého stupně je navržen pro fungování ve vakuu. V atmosféře jej není bez zásadních úprav možné použít. Motor upravený pro provoz ve vakuu má například výrazně zvětšenou expanzní trysku. Navíc je vzhledem k váze druhého stupně příliš výkonný. Pro motorické přistání je tedy nutné použít sekundární motory. Toto se však může vývojem změnit.

SpaceX s opakovaným využitím druhého stupně počítá v následující generaci nosných raket. Tento stupeň zde má být již od počátku navrhován jako znovupoužitelný.

Experimentální záchrana druhého stupně je plánována na rok 2018 (Shotwell, 2017).

Ačkoliv se o záchraně prvních stupňů vážněji hovoří až v nedávné době, nejde o úplnou novinku. SpaceX prezentovala znovupoužitelnost druhých stupňů rakety Falcon 9 již v roce 2011.

Z konstrukčního pohledu druhý stupeň obvykle sestává z trupu, jednoho raketového motoru, nádrží na palivo a okysličovadlo a řídicího systému.

### **3.1.1 Opakované použití rakety na tuhé pohonné látky**

Historickou zajímavostí je opakované použití raket na tuhé pohonné látky. Rakety na tuhé pohonné látky byly vůbec prvním operačně používaným opakovaně použitelným kosmickým zařízením spolu s raketoplánem STS. Space Shuttle Solid Rocket Booster (SRB), využívané jako pomocný startovací stupeň raketoplánů STS, byly až desetinásobně opakovaně použitelné, po nutné kontrole a opětovném naplnění tuhého raketového paliva. Dosud jde o nejvýkonnější raketové motory na tuhé palivo. Raketám SRB je věnována kapitola 4.2.1.

Rakety na tuhé pohonné látky se v kosmonautice používají převážně jako pomocné startovací motory a z pohledu opakovaného použití v současnosti nejsou v centru pozornosti. Momentálně neprobíhá žádný významnější projekt, který by s jejich opakovaným použitím počítal. Je to zřejmě z důvodu relativní jednoduchosti tohoto druhu raketového nosiče. Zachráněné stupně bývají využity pouze ke zkouškám.



## 3.1.2 Opakované použití dalších částí rakety

### 3.1.2.1 Záchrana aerodynamických krytů

Aerodynamický kryt raket Falcon je dvoudílná ochranná skořepina z hliníku a uhlíkového kompozitu, která tvoří vrchní část rakety. Jeho účelem je během startu chránit raketu a nesený náklad před působením atmosféry (dynamický tlak, aerodynamický ohřev, akustické vlivy a znečištění). Společnost SpaceX pracuje také na záchraně těchto aerodynamických krytů. Při misi SES-10 došlo k první experimentální záchraně a kryty úspěšně přistály na padácích na hladině oceánu. Účelem experimentu bylo ověřit schopnost krytu dostat se na určené místo v jednom kuse. Následně probíhaly záchranu těchto krytů i v případě několika dalších misí. Kryty se po oddělení od rakety stabilizují pomocí manévrovacích trysek, následně byly kryty navedeny pomocí říditelných padáků do dopadové oblasti.

S opětovným použitím zachráněného krytu se ale prozatím nepočítá.

U misí s lodí Dragon tvoří vrchní část rakety samotná loď, kryt se tedy nevyužívá.

## 3.2 Opakované použití kosmické lodi

Kosmická loď je systém, který je schopen dopravy za hranice zemské atmosféry, kam se dopravuje vlastními prostředky, nebo kam je vyneseno, například pomocí nosné rakety.

V kosmickém prostoru se jedná o umělé kosmické těleso, které slouží jako dopravní prostředek.

V současnosti je provozováno několik typů kosmických lodí. Jedná se o ruskou pilotovanou loď Sojuz a bezpilotní zásobovací loď Progress, americkou komerční bezpilotní zásobovací loď Dragon 1 a komerční bezpilotní zásobovací loď Cygnus, dále pak čínskou pilotovanou loď Šen-čou a japonskou bezpilotní zásobovací loď HTV. Další jsou ve vývoji, nebo také již ve výslužbě.

Z výše uvedeného výčtu v současnosti provozovaných kosmických lodí je opakovaně použitelná loď Dragon, které je věnována kapitola 4.3.1. Opačným směrem se ale po změnách projektu vydal projekt kosmické lodi Orion, u kterého se nakonec s opakovaným použitím nepočítá, ačkoliv ještě v rámci programu Constellation se s opakovanou použitelností Orionu počítalo.

Kosmická loď je (podle definice) také raketoplán (například vyřazený STS). Raketoplány však v dosavadním pojetí tvoří pro svou specifičnost spíše samostatnou kategorii.

### **3.2.1 Opakované použití kosmické lodi**

#### *3.2.1.1 Návrat kosmické lodi*

Návrat kosmické lodi je jedna z neobtížnějších částí vesmírného letu. Může probíhat několika způsoby.

První pilotované kosmické lodě přistávaly po balistické křivce, nebo po balistické dráze, s možností jen minimálních korekcí.

Kosmická loď zahajuje přistání na oběžné dráze při rychlosti přibližně 7,9 km/s ( $v_1$ ). Tření o svrchní část atmosféry loď zpomalí a současně zahřeje na velmi vysokou teplotu. Loď musí být tedy chráněna tepelným štítem. Během průletu atmosférou přijde o velkou část rychlosti.

#### *3.2.1.2 Přistání pomocí padákového systému*

Nejjednodušší způsob přistání je s konečným dobrzděním pomocí padákového systému. Tento postup je nejméně přesný. Je zde významný vliv povětrnostních podmínek. Není vhodný k přistání na pevnině pro vysokou dopadovou rychlost a s tím související poškození, ačkoli se uvažovalo například o zachytávání lodi do obřích sítí. Tento nápad však nebyl nikdy realizován. Na moři je problémem vysoce korozivní mořská voda. Nevýhodou padákového systému je také relativně vysoká hmotnost. Loď SpaceX Dragon při přistání na hladině je vyobrazena na obrázku 5.

Teoreticky je také možná kombinace padákového a motorického brždění, používaná v současnosti u lodi Sojuz. Loď je pak schopná přistávat na pevninu, kde je nejdříve použit padák a v konečné fázi při cca 25 km/h se aktivují raketové motory pro dobrždění. V tomto případě se ale nejedná o znovupoužitelné řešení.

### *3.2.1.3 Vertikální motorické přistání*

Dalším způsobem je vertikální motorické přistání pomocí raketových motorů. Výhodou je vysoká přesnost a možnost přistávat na pevnině. Nevýhodou je samozřejmě náročnost na palivo. Tento způsob je nyní testován společností SpaceX na lodích Crew Dragon. Loď Crew Dragon je vyobrazena na obrázku 6.

### *3.2.1.4 Klouzavé přistání*

Posledním způsobem je horizontální řízené klouzavé přistání, které je používáno především u raketoplánů. Loď v tomto případě musí mít tvar vztlakového tělesa. Kromě raketoplánů, kde je tento způsob návratu obvyklý, bylo s tímto způsobem počítáno i v rámci ruského projektu kosmické lodi Kliper. Okřídlená varianta lodi měla být schopna přistávat horizontálně na letišti. Lodi Kliper je věnována kapitola 4.3.3.



Obrázek 5: Kosmická loď Dragon, návrat z ISS, rok 2015 [28]



Obrázek 6: Loď Crew Dragon, pad abort test, 2015 [28]

---

## 3.3 Opakované použití raketoplánu

### 3.3.1 Vícenásobně použitelný raketoplán

Typickým opakovaně použitelným kosmickým dopravním prostředkem je raketoplán. Kosmický raketoplán je dopravní prostředek schopný letu v atmosféře Země, který je určený k dopravě za hranice zemské atmosféry, kam se dopravuje vlastními raketovými motory, nebo nosným raketovým systémem (nosnou raketou), případně za pomoci pomocného raketového systému. Sestává zpravidla z družicového stupně (tzv. orbiteru, nebo kosmoplánu) a startovacích stupňů (např. nosného raketového systému, případně dalších částí, jako jsou odhazovací nádrže na palivo). Typickou vlastností raketoplánu je jeho vícenásobná použitelnost, avšak není to podmínkou.

### 3.3.2 Rozdělení raketoplánů

Raketoplány lze rozdělit podle výkonu na suborbitální (atmosférické) a orbitální raketoplány. Do kategorie orbitálních raketoplánů patří raketoplány STS a raketoplán Buran. Nutným rysem strojů této kategorie je schopnost dosáhnout během vzletu první kosmické rychlosti a schopnost pohybovat se po oběžné dráze okolo planety. Suborbitální raketoplány nejsou schopny dosáhnout první kosmické rychlosti. Raketoplán po ukončení činnosti motoru pokračuje setrvačností v letu po tzv. balistické křivce, jejíž vrchol leží nad hranicí vesmíru (100 km). Do této kategorie patří několik současných komerčních projektů, např. SpaceshipTwo (viz kapitola 4.1.3). Raketoplán v obvyklém pojetí je v podstatě letadlo/letoun. V určitých režimech (oblastech rychlosti) je schopen využívat vztahové síly vznikající na nosných plochách, a v nízkých oblastech rychlosti (při přistání) také aerodynamické řízení (např. směrové kormidlo atd.).

### 3.3.3 Letový profil raketoplánu

Start raketoplánu ze Země probíhá vertikálně nebo horizontálně. Může probíhat svépomocí, případně může být raketoplán vynesena nosnou raketou nebo letadlem. Návrat na Zemi probíhá klouzavým nebo motorovým letem s přistáním na vhodném letišti. Tento druh přistání je nejméně dynamický. Je tedy relativně komfortní pro posádku a umožňuje snadné snášení citlivých materiálů zpět na Zem (např. citlivé výsledky experimentů). Působí zde podstatně nižší přetížení oproti obvyklým návratovým kabinám současných kosmických lodí. V kosmickém prostoru se raketoplán pohybuje jako kosmická loď.

## 4 Projekty vícenásobně použitelných kosmických systémů

V této kapitole budou rozebrány jednotlivé realizované a jinak významné projekty vícenásobně použitelných kosmických systémů, se zaměřením na opakované využití celků a jednotlivých částí.

### 4.1 Kosmické raketoplány

#### 4.1.1 STS Space Shuttle

Space Shuttle STS (Space Transportation System) byl americký program provozovaný vládní organizací NASA. V jeho rámci byly uskutečňovány pilotované lety do vesmíru za pomoci kosmických raketoplánů. Lety probíhaly v období od roku 1981 do roku 2011, s celkovým počtem 135 startů. Dosud se jedná o zdaleka největší projekt vícenásobně použitelného kosmického dopravního systému.

Raketoplán Space Shuttle se z konstrukčního hlediska dělí na 3 hlavní části. Sestává z družicového stupně (tzv. orbiteru) a dvou startovacích stupňů sestávajících z vnější palivové nádrže (External Tank) a dvou pomocných startovacích raket na tuhé pohonné látky SRB (Solid Rocket Booster). Družicový stupeň včetně motorů SSME a pomocné startovací rakety SRB jsou opakovaně použitelné.

Družicový stupeň raketoplánu je hlavní a nejsložitější částí raketoplánu. V obecném pojetí je tato část tzv. vlastní raketoplán. Z konstrukčního hlediska jde o letadlo typu kluzák s delta křídlem. Družicový stupeň slouží k dopravě osob a nákladu na oběžnou dráhu a zpět. Pouze tato část raketoplánu se dostávala do vesmírného prostoru. Trup raketoplánu má délku 37 metrů a je rozdělen na několik částí. V přední části je přetlakovaná sekce s kabinou pro posádku. V prostřední následuje nákladová sekce, do které bylo možné umístit náklad o hmotnosti 20 000 - 29 500 kg a rozměrech 18 m x 5 m.

Motory jsou umístěny na zádi v motorové části, kde jsou ve svazku po třech uloženy Space Shuttle Main Engine (SSME). SSME jsou raketové motory na kapalné pohonné látky, které spalují kapalný kyslík a vodík. Motory SSME byly opakovaně použitelné. Životnost motorů do generální opravy byla 28 600 s (55 startů). Při startu raketoplánu běžely motory nepřetržitě 520 s. Po každém letu byly motory demontovány a zkontrolovány.

Start raketoplánu probíhal vertikálně pomocí raketových motorů a přídavných raketových motorů. Po startu ve výšce přibližně 45 kilometrů docházelo k oddělení SRB (viz 4.2.1). Po dosažení určeného bodu dráhy se následně od orbitálního stupně oddělila i palivová nádrž. Tato nádrž pak zanikala v horní vrstvě atmosféry Země. Případné neshořelé zbytky nádrže dopadaly do Indického, nebo Tichého oceánu. Jednotlivé stupně se oddělovaly pomocí výbušných šroubů. Přistání raketoplánu na Zemi probíhalo řízeným klouzavým přistáním.

Pomocným startovacím raketám SRB je věnována kapitola 4.2.1.

#### **4.1.2 Program Eněrgija - Buran**

Vývoj sovětského raketoplánu Buran započal především jako reakce na americký program STS. Program byl po jednom úspěšném letu ukončen. Hlavním důvodem byl zřejmě nedostatek financí a změna priorit ve financování na základě geopolitických změn.

Na první pohled je patrná značná podobnost projektu s raketoplány STS. Na příčině této podobnosti se zdroje neshodují. Podle některých zdrojů jde o učebnicovou ukázkou průmyslové špionáže. Podle jiných jsou důvodem neúprosné fyzikální zákony v kombinaci s danou úrovní znalostí. Může také jít o kombinaci těchto faktorů.

Významnou odlišností raketoplánu Buran je koncepce pohonu (oproti STS), kde hlavní nosné motory nejsou v orbitální části (tzv. kosmoplánu). Raketoplán Buran se skládá z kosmoplánu a nosné rakety. Toto řešení má několik významných dopadů, zejména zjednodušuje přípravu pro následující let, zvětšuje nosnost a také dolet při návratu v klouzavém letu. Buran měl startovat pomocí nosné rakety Eněrgija. Opakovaně použitelný měl být nejen samotný raketoplán, ale předpokládalo se i vícenásobné použití nosné



rakety (viz 4.2.1).

### **4.1.3 SpaceShipOne**

SpaceShipOne (Scaled Composites Model 316) je první soukromý pilotovaný raketoplán, který uskutečnil první pilotovaný let 21. června 2004 [24]. Jedná se o experimentální suborbitální raketoplán poháněný raketovým motorem, schopný dosáhnout hranice vesmíru a bezpečně dopravit pilota, náklad a posádku zpět na Zemi. SpaceShipOne byl vyvinut firmou Scaled Composites a zainvestován ze značné části Paulem Allenem, spoluzakladatelem společnosti Microsoft [25]. Vývoj raketoplánu stál přibližně 25 milionů dolarů. Raketoplán SpaceShipOne je nyní umístěn v Národním leteckém a vesmírném muzeu ve Washingtonu DC.

Na úspěšný projekt SpaceShipOne navazuje projekt suborbitálního raketoplánu SpaceShipTwo, který je nyní ve vývoji. Cílem projektu SpaceShipTwo je vyvinout pilotovaný raketoplán, který by sloužil jako dopravní prostředek pro vesmírnou turistiku (pro dopravu vesmírných turistů do vesmírného prostoru, nad hranici 100 Km). Dosud byly vyrobeny 2 raketoplány Scaled Composites Model 339 SpaceShipTwo. První z nich havaroval v roce 2014, druhý (VSS Unity) se nyní testuje. Raketoplán má velice zajímavou konstrukci se sklopnými křídly. Dále se uvažovalo také o orbitálním raketoplánu SpaceShipThree, což je ale zatím pouze koncept s nejasnou budoucností. Vývoj SpaceShipThree je podmíněn úspěchem SpaceShipTwo.

#### 4.1.4 Boeing X-37

Boeing X-37 (Orbital Test Vehicle OTV) je projekt experimentálních kosmických raketoplánů. Původně civilní projekt spravovaný agenturou NASA převzalo v roce 2004 Ministerstvo obrany Spojených států amerických a program se stal tajným [9]. Prototyp označovaný jako X-37A absolvoval první samostatný let 7. dubna 2006. V roce 2006 byl oznámen vývoj X-37B. První známý let X-37B startoval 22. dubna 2010. Raketoplány X-37B startují vertikálně pomocí nosné rakety (Atlas V a Falcon 9). Raketoplán X-37B má délku přibližně 9 metrů a šířku 4,5 metru. Nákladový prostor má rozměry 2,1 x 1,2 metru. Hmotnost raketoplánu X-37B je asi 5 tun. Raketoplán je pokryt tepelným štítem, který umožňuje návrat zpět na Zemi a následné horizontální přistání na přistávací dráze. Raketoplán X-37B je znázorněn na obrázku 7. X-37B není schopen nést posádku. Posádku by měla být schopna nést plánovaná verze X-37C, která byla oznámena v roce 2011 společností Boeing. X-37C je plánovaná zvětšená varianta X-37B. Tato varianta má být oproti X-37B o 60-80% větší a zároveň má umožnit přepravu až šesti členů posádky [10].



Obrázek 7: X-37B Orbital Test Vehicle [48]

#### 4.1.5 Dream Chaser

Dream Chaser je vícenásobně použitelný raketoplán vyvíjený firmou Sierra Nevada Corporation. Raketoplán byl v roce 2016 zařazen agenturou NASA do programu nepilotovaného zásobování ISS CRS-2 pro roky 2019 až 2024.

Původně byl navržen jako pilotovaný, v současnosti se však připravuje pouze jako nákladní (zásobovací).

Dream Chaser má délku 9 metrů, s rozpětím křídel 7 metrů, a hmotnost 11,3 tuny. V plně naloženém stavu dosahuje hmotnosti 20 tun. Ve srovnání s raketoplány STS

je Dream Chaser přibližně čtvrtinový, někdy je tedy označován jako „miniraketoplán“.

Raketoplán počítá s vertikálním startem pod aerodynamickým krytem nosné rakety a s horizontálním přistáním. Je koncipován jako okřídlené vztlakové těleso a je pokryt tepelným štítem, který umožňuje návrat zpět na Zemi, kde raketoplán přistane stejně jako raketoplány STS, tedy na letišti, podobně jako běžné letadlo. Dream Chaser je znázorněn na obrázku 8.

Raketoplán je určen především k dopravě na ISS, s přepravní kapacitou 5000 Kg v přetlakované části a 500 Kg v nepřetlakovaném nákladním kontejneru. Nákladní kontejner po ukončení mise shoří v atmosféře. V pilotované variantě raketoplánu se počítalo s dopravou až 7 osob. Na této variantě se však momentálně nepracuje.

S prvním letem do vesmíru se počítá v roce 2020.



Obrázek 8: Raketoplán Dream Chaser [14]

## 4.2 Vícenásobně použitelné nosné rakety

Nosná raketa je dopravní prostředek poháněný raketovými motory a určený pro vynášení užitečných nákladů do vesmíru.

Rakety vynášející užitečný náklad na oběžnou dráhu jsou obvykle konstruovány jako vícestupňové. Používá se dva a více raketových stupňů, které se postupně odhazují.

Raketa se tak postupně zbavuje těžkých již zbytečných částí. Jednostupňové rakety je možné efektivně použít pouze k vynášení nejlehčích nákladů v řádu maximálně několika málo kilogramů. Jednostupňová konfigurace v podstatě dokáže vynést na oběžnou dráhu jen sama sebe, bez dalšího užitečného nákladu. Například první stupeň rakety Falcon 9 by byl bez jakéhokoli nákladu údajně schopen dosáhnout oběžné dráhy (Musk, 2015), což je názorným příkladem této problematiky<sup>3</sup>. Motory Merlin, používané na raketě Falcon 9, mají nejlepší poměr výkonu k hmotnosti, ze všech v současnosti operačně používaných raketových motorů. Samotná raketa a nádrže jsou také navíc poměrně lehké, vyrobené z lehké slitiny hliníku a lithia.

Nosná raketa je v současnosti stále určena obvykle pro jedno použití. Nosné rakety Falcon 9 jsou v současnosti jediné komerčně používané nosné rakety se schopností znovupoužitelnosti některých částí.

Z pohledu vícenásobné použitelnosti nosných raket byl přelomový rok 2015. První stupeň orbitální nosné rakety Falcon 9 (kapitola 4.2.2) a první stupeň suborbitální rakety New Shepard (4.2.3) zvládly první úspěšné motorické přistání. Nejedná se však o první pokusy o znovupoužitelnou nosnou raketu. Právě tyto výjimečné a speciální případy jsou rozebrány v rámci této kapitoly.

---

<sup>3</sup> Konstatování pochází z internetového prohlášení Elona Muska, zakladatele a zároveň technického ředitele SpaceX.

### 4.2.1 Rakety SRB

Raketa na tuhé pohonné látce Space Shuttle Solid Rocket Booster SRB je pomocný startovací stupeň raketoplánů STS. Byl připevněn v páru k nádrži ET na raketoplánu. Jedná se o dosud nejvýkonnější operačně používané motory na tuhé palivo.

U SRB se předpokládalo až desetinásobné opakované použití.

Konstrukčně jsou motory tvořeny osmi segmenty [19]. Od výrobce odchází ve čtyřech částech, které jsou sestaveny na kosmodromu. Doba činnosti motorů SRB je 124 sekund a je dána množstvím pohonné látky. Každý z motorů SRB v okamžiku vzletu raketoplánu vyvíjí tah 11,5 MN. Startovací rakety SRB dodávaly 71 % tahu pro vzlet raketoplánu.

Maximální tah produkují motory v průběhu prvních sekund letu, tah pak postupně klesá, aby v místě největšího aerodynamického odporu a překonávání zvukové bariéry nepřekročilo přetížení hodnotu 3G [22]. Po ukončení činnosti ve výšce 44,5 kilometrů dojde k jejich oddělení a vzdálení se od raketoplánu pomocí menších raketových motorů. SRB setrvačností vystoupají do výšky kolem 66 km. Následně se volným pádem vracejí k Zemi. Přibližně 225 s po oddělení od nádrže ve výšce 4,8 km se odhodí přední aerodynamický kryt a vypustí se výtažný a stabilizační padák s průměrem 16,6 m. Ve výšce 1,8 km se odhodí stabilizační padák a otevřou se tři hlavní padáky, každý o průměru 41,5 m. SRB přistává rychlostí 25 m/s do Atlantského oceánu, přibližně 260 km od místa startu. Po přistání na hladinu motory plavou. Vzduch uvnitř spalovací komory zajistí, že se nepotopí. To umožňuje jejich odvězení pomocí speciální lodě a dále jejich opětovné použití, čemuž předchází celá řada úkonů končící opětovným naplněním tuhého raketového paliva[22]. Zajímavostí je, že přestože SRB přistává do slané vody, je opakovaně použit. Toto řešení je možné pouze v případě raket na tuhé palivo, kde přistání do moře není tak problematické, vzhledem k podstatně jednodušší konstrukci. U motoru na kapalné palivo by slaná voda napáchala značné a pravděpodobně nenávratné škody.

SRB (a rakety odvozené od SRB) jsou využity v několika dalších projektech. V minulosti se předpokládalo využití (upravené rakety SRB) jako prvního stupně nosné rakety Ares I a startovacího pomocného stupně rakety Ares V (Program Constellation). I v tomto případě se počítalo opakovaným použitím (stejně jako u SRB). Projekt byl v roce 2010 ukončen. Z

rakety Ares V vychází nyní vyvíjená nosná raketa Space Launch System SLS. Rakety odvozené od SRB (prodloužené, s větším tahem a delší dobou činnosti) budou využity při prvních startech (Blok 1 a 1B) plánované rakety Space Launch System SLS [27]. Důvodem použití je urychlení vývoje a snížení nákladů. Na rozdíl od programu STS nebudou rakety SRB použity opakovaně. První let SLS je nyní naplánován na rok 2019 [27].

#### 4.2.2 Rakety Falcon - SpaceX

Falcon 9 je opakovaně použitelná nosná raketa, vyvinutá americkou soukromou společností SpaceX.

Jedná se o dvoustupňovou nosnou raketu na kapalné palivo. První stupeň je osazen devíti motory na kapalné palivo, středový řídicí motor s vektorováním tahu obklopuje osm motorů v kruhu (octaweb). Druhý stupeň je osazen jedním raketovým motorem na kapalné palivo, který je optimalizován pro provoz ve vakuu. Vrchní část rakety je tvořena aerodynamickým krytem nebo kosmickou lodí Dragon.

První stupeň rakety je konstruován pro vertikální motorické přistání. Pro tento účel jsou nad motorovou sekci umístěny čtyři přistávací nohy. Nohy jsou vyrobené z uhlíkového vlákna a voštinového kompozitního hliníku. Hmotnost přistávacího zařízení je v současné verzi 2 100 kg (F9 Block 4). Při vzletu je přistávací zařízení „zatažené“ podél trupu. Před přistáním je vytaženo pomocí stlačeného hélia. Rozpětí přistávacího zařízení je 18 metrů. Ovladatelnosti rakety při přistání napomáhají výsuvná roštová kormidla vyrobená z titanu (F9 Block 4/5). Zařízení rakety je předmětem vývoje. Parametry se tedy mohou měnit.

Primární úkol rakety Falcon je vynést náklad, sekundárním úkolem je návrat částí rakety a jejich přistání (záchrana). Rakety Falcon jsou od počátku konstruovány jako opakovaně použitelné. Již u rakety Falcon 1 (první soukromě financovaná kosmická nosná raketa, která vynesla na oběžnou dráhu Země družici) se počítalo s přistáním prvního stupně na padácích. Současné rakety Falcon (Falcon 9 a Falcon Heavy) přistávají motoricky [3]. Současné raketové motory Merlin mají životnost přibližně 40 startů. SpaceX v další generaci motorů počítá s ještě výrazně větší životností. Vývoj rakety Falcon klade důraz na maximální možnou opakovanou použitelnost. Směřuje k opakovanému použití celé

rakety. Záchrany aerodynamického krytu a kosmické lodi Dragon již probíhají. Počítá se i se záchranou druhého stupně rakety. Následující generace nosných raket SpaceX (nyní označované jako BFR) již bude navrhována jako kompletně znovupoužitelná (Shotwell, 2017).

Falcon Heavy je těžká nosná raketa, která je v současnosti vyvíjena společností SpaceX. Raketa sestává z upraveného prvního stupně rakety Falcon 9, který je doplněn o dva pomocné raketové stupně, což jsou opět upravené první stupně Falcon 9. Velice zjednodušeně řečeno jde o tři první stupně rakety Falcon 9 složené dohromady. Raketa disponuje dohromady 27 (3 x 9) motory Merlin. První stupeň a pomocné motory jsou znovupoužitelné a jsou konstruovány k vertikálnímu autonomnímu řízenému motorickému přistání, stejně jako raketa Falcon 9.



**Obrázek 9: Falcon 9 před startem, Vandenbergova letecká základna [28]**

## 4.2.3 New Shepard a New Glenn - Blue Origin

### 4.2.3.1 *New Shepard*

New Shepard je znovupoužitelný suborbitální kosmický dopravní prostředek, který je vyvíjen soukromou společností Blue Origin. Je koncipován jako nosná raketa s vertikálním startem a vertikálním motorickým přistáním. New Shepard je plně znovupoužitelný a skládá se z přetlakovaného modulu kabiny pro posádku a nosné rakety označované jako pohonný modul (Shepard Booster) [17].

Cílem projektu New Shepard je vyvinout dopravní prostředek pro vesmírnou turistiku (pro dopravu vesmírných turistů do vesmírného prostoru, nad hranici 100 Km).

23. listopadu 2015 New Shepard (Shepard Booster) dosáhl nadmořské výšky 100,5 km a následně zároveň provedl úspěšné vertikální přistání. První zkušební lety s posádkou jsou naplánovány na rok 2018 [17].

New Shepard je pojmenován podle prvního amerického člověka ve vesmíru, Alana Shepada.

New Shepard (Booster) je vyobrazen na obrázku 10.

### 4.2.3.2 *New Glenn*

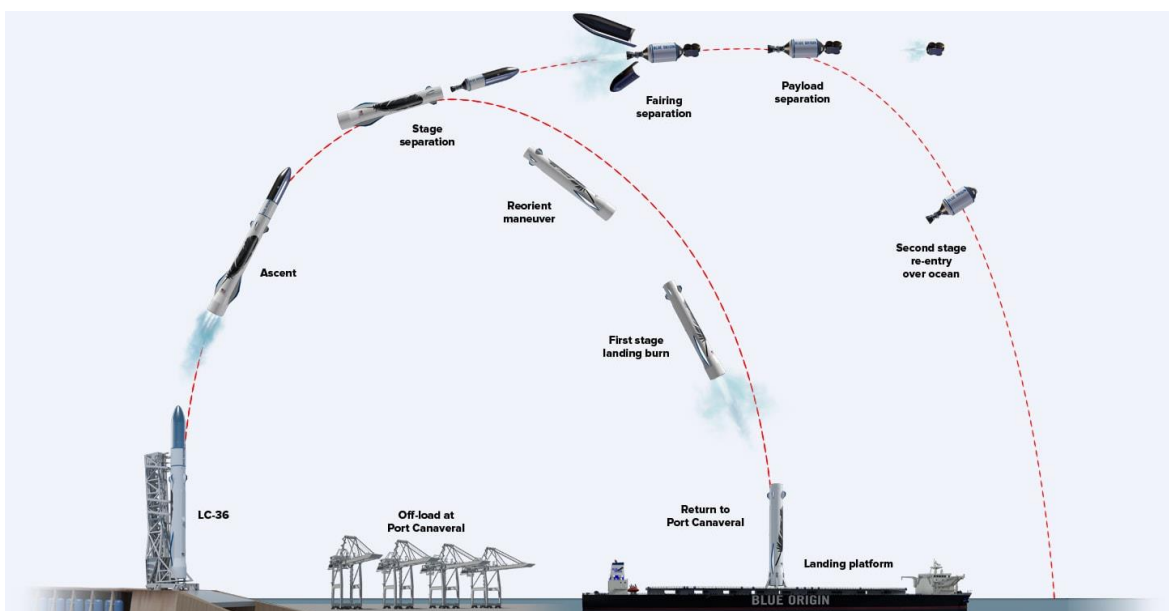
Blue Origin také vyvíjí dvou až třístupňovou nosnou raketu New Glenn, která by měla poprvé startovat v roce 2020. První stupeň má být znovupoužitelný, s motorickým přistáním, včetně přistání na plovoucí loď/plošinu. Společnost pro raketu vyvíjí moderní kyslíko-metanové motory [40]. Letový profil nosné rakety New Glenn je uveden na obrázku 11.

Společnost Blue Origin se intenzivně zabývá vývojem technologie znovupoužitelnosti. Předpokládá se, že by společnost mohla v příštích letech tvořit významnou konkurenci společnosti SpaceX, která se již v oblasti znovupoužitelnosti etablovala.





Obrázek 10: Start New Shepard booster, již jednou letěný stupeň, 2016 [18]



Obrázek 11: Průběh letu New Glenn, přistání prvního stupně na lodi [40]

## 4.2.1 Raketa Eněrgija

### 4.2.1.1 Projekt kompletní vícenásobné použitelnosti Eněrgija II (Uragan)

Těžká nosná raketa Eněrgija, která měla sloužit zejména pro vynášení raketoplánu Buran, měla být jen částečně znovupoužitelná. Další plánovaná generace rakety Eněrgija byla označována jako Eněrgija II nebo také Eněrgija Uragan. V případě tohoto nosiče se počítalo s již takřka kompletní vícenásobnou použitelností [41].

Navrhovaná konstrukce nosné rakety Eněrgija II je z dnešního pohledu velice zajímavá. Počítá s využitím znovupoužitelného centrálního stupně a také znovupoužitelných menších postranních pomocných stupňů. Centrální i postranní stupně měly být schopné řízeného návratu na zem klouzavým přistáním, včetně samostatného přistání na běžném letišti, podobně jako samotný raketoplán Buran. Stupně měly být také zcela autonomní [42].

Centrální stupeň nosné rakety měl dosahovat rychlosti 7,9 km/s, proto se počítalo s velice těžkým tepelným štítem. Měl být opatřen vysouvacími stavitelnými křídly, podvozkem a kormidly. Případné užitečné zatížení mělo být vypouštěno z přední části centrálního stupně nosné rakety [42]. Postranní stupně měly být také opatřeny stavitelnými křídly, kormidly a vysouvacím podvozkem. Dále také brzdícími a ovládacími plochami, nebo také proudovým motorem [42].

Program byl předčasně ukončen. Nosná raketa Eněrgija startovala jen dvakrát, z toho jednou s raketoplánem Buran. Eněrgija II pak zůstala pouze ve fázi projektu. Na projekt Eněrgija později navázal projekt raket Angara.

### 4.2.1.2 Eněrgija II dnešním pohledem

Současné nosné rakety využívají k návratu vertikální motorické přistání. Zde jde o využití horizontálního klouzavého přistání. Z konstrukčního pohledu by se jistě jednalo o velice náročné řešení. Znovupoužitelnost v této podobě by si vyžádala značné množství přidané hmotnosti a tedy zároveň snížení užitečné nosnosti rakety. Ačkoliv jde z dnešního pohledu o náročnou koncepci, nemusí se jednat o koncepci překonanou.

---

## 4.3 Kosmické lodě

### 4.3.1 Kosmická loď SpaceX Dragon

Dragon je kosmická loď vyvíjená soukromou společností SpaceX. Loď Dragon je od počátku konstruována pro zvládnutí opakovaného použití. Loď byla vyvinuta pro program COTS za pomoci prostředků NASA.

První zkušební let lodi Dragon proběhl v prosinci 2010 na nosné raketě Falcon 9. Následně Dragon na padácích bezpečně dosedl na hladinu oceánu. Dragon se tímto zapsal do historie jako první komerční kosmická loď, která dosáhla oběžné dráhy a následně se bezpečně vrátila na Zemi. V říjnu 2012 loď Dragon odstartovala k prvnímu zásobovacímu letu na ISS. 3. června 2017 došlo v rámci mise CRS-11 k znovupoužití lodi Dragon při zásobovacím letu ke stanici ISS (byl použit Dragon z mise CRS-4). Dragon je momentálně jediná nepilotovaná kosmická loď, která dokáže dopravit náklad jak směrem na ISS, tak zároveň zpět na Zemi. Jde především o výsledky experimentů a vzorky.

Dragon V1 (označován také jako Cargo Dragon) je kosmická loď klasického typu. Sestává z návratové kabiny a tzv. trunku. Návratová kabina disponuje přetlakovaným prostorem o objemu 10 m<sup>3</sup>. K návratové kabině je připojen tzv. trunk (v překladu kufr), což je nehermetizovaná část lodi, ke které jsou připojeny solární panely. Dutý vnitřek se využívá pro přepravu nákladu, který je schopný přečkat podmínky vesmírného vakua. Během návratu na Zemi je trunk odhozen. Následně dojde k jeho zániku (shoření) v atmosféře, což umožňuje také likvidaci odpadu z ISS.

Loď disponuje opakovaně použitelným tepelným štítem z materiálu PICA-X. Je ovládána pomocí 18 motorů Draco. Pro přistání se používají dva výtažné a tři hlavní padáky. Dragon přistává na hladinu oceánu. U budoucích variant lodi se počítá i se schopností přesného motorického přistání na pevnině.

Dragon je opakovaně použitelný, a to včetně tepelného štítu. Mise CRS-11 byla první, kde byl použit již jednou letěný Dragon. Předtím byly opakovaně použity pouze některé komponenty lodi.

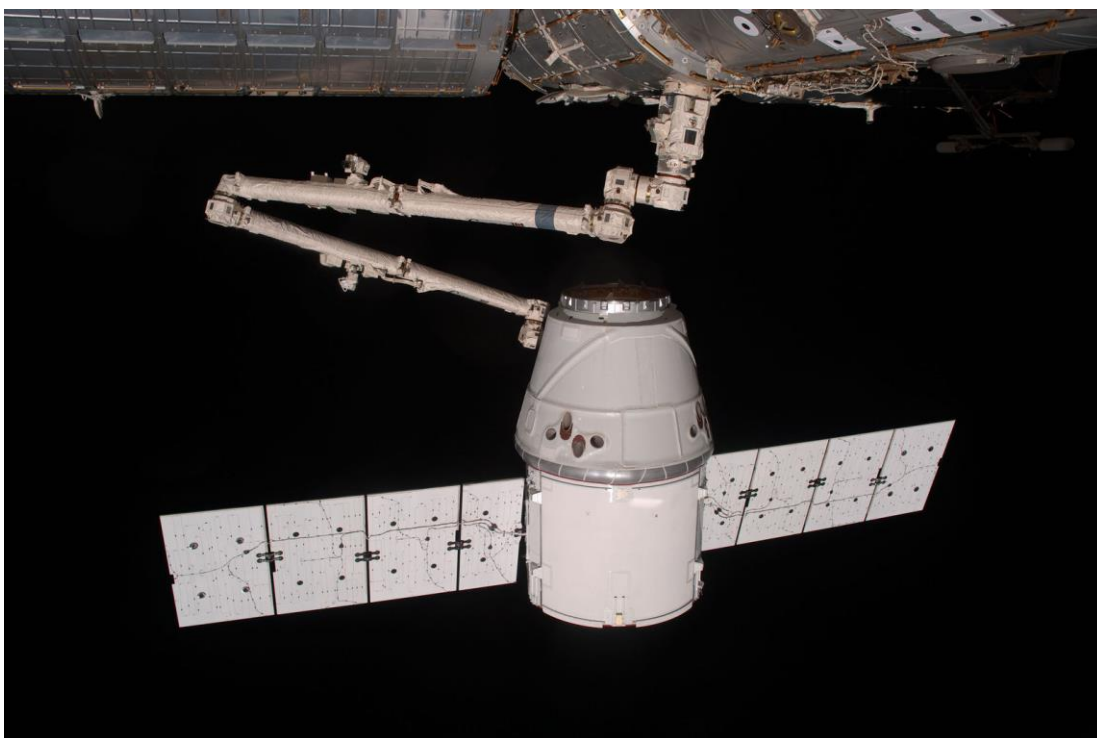
Loď je vynášena nosnou raketou (Falcon 9). Jde tedy o loď s vertikálním startem a vertikálním přistáním pomocí padákového systému. Některé varianty mají v budoucnu

umožňovat i motorické přistání (např. Crew Dragon). Kosmická loď Dragon 1 je vyobrazena na obrázku 12.

Dragon V2 (označován také jako Crew Dragon) je vyvíjená pilotovaná verze kosmické lodě Dragon. Loď vychází z návrhu lodi Dragon V1 a má pojmout až 7 astronautů. Loď má disponovat raketovými motory SuperDraco, které mají umožňovat také velice přesné motorické přistání na pevnině a které dále slouží jako únikový systém pro záchranu posádky ve všech fázích letu. Během pilotovaných misí pro NASA bude Dragon 2 přistávat pomocí padáků na mořské hladině. Motory SuperDraco zde budou sloužit pro účely únikového systému.

Cargo Dragon 2 je nyní ve vývoji. Přesné specifikace nejsou dosud známé. Předpokládá se, že se bude jednat o upravený Crew Dragon, bez použití motorů SuperDraco.

Red Dragon je nyní zrušená varianta lodi Crew Dragon, která měla být schopná přistání na povrchu Marsu.



**Obrázek 12: Kosmická loď Dragon, připojení ISS (pomocí Canadarm) [28]**

### 4.3.2 Boeing CST100 Starliner

CST-100 Starliner (Crew Space Transportation 100) je vícenásobně použitelná kosmická loď vyvíjená společností Boeing. Hlavním účelem Starlineru je doprava astronautů na Mezinárodní vesmírnou stanici nebo případné další vesmírné stanice. Starliner je koncipován pro vertikální start pomocí nosné rakety (Atlas, Falcon) a vertikální přistání. Rozsah opakovaného použití se předpokládá až na 10 startů. Loď je určena pro dopravu až sedmičlenné posádky [16]. Starliner je vyobrazen na obrázku 13.

První start je naplánován na červen 2018, s posádkou pak na srpen 2018.



Obrázek 13: Boeing CST100 Starliner [16].

### 4.3.3 Projekt Kliper

Kliper je projekt vícenásobně použitelné kosmické lodi vyvíjený od roku 2000 ruskou společností RKK Eněrgija. Měl být pokračovatelem a v budoucnu také náhradou kosmické lodi Sojuz [15].

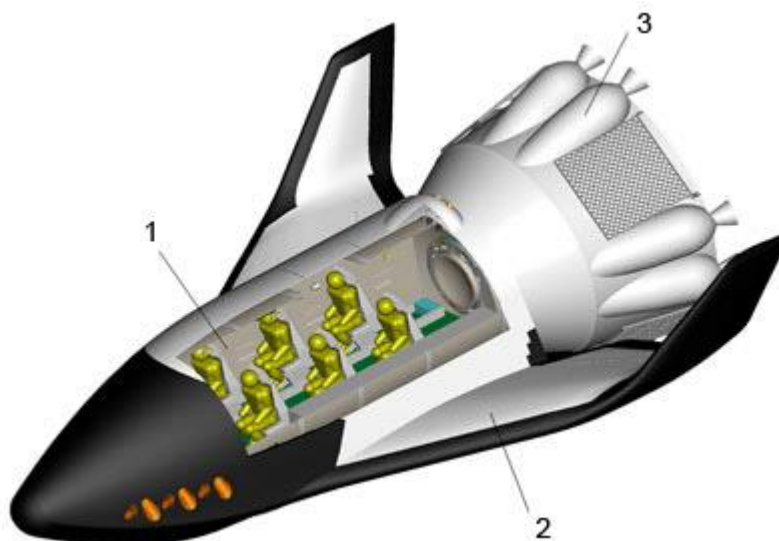
Hlavní zvláštností je opakovaně použitelný návratový modul typu vztlakového tělesa. Tvar lodi v podobě vztlakového tělesa dovoluje provést klouzavý sestup v horních vrstvách atmosféry, což snižuje tepelné namáhání a umožňuje využít mnohonásobně použitelný

tepelný štít.

Počítalo se s vysokou mírou opakovaného použití, v rozsahu až 25 startů bez podstatné rekonstrukce [44]. Loď byla projektována v několika variantách, lehčí bezkřídlová varianta a těžší okřídlené varianty.

Lehčí bezkřídlová varianta počítala s přistáním pomocí padákového systému. Konstrukčně tato varianta sestává z návratového modulu a orbitálního úseku. Orbitální úsek byl konstruován na základě orbitálního úseku lodi Sojuz. Nejhodnotnější částí, jako je řídicí část elektrického systému lodi je umístěna v návratovém modulu. 80% lodi mělo být opakovaně použitelných [44].

Těžší okřídlené varianty mají schopnost přistání na letišti. Varianta pro delší lety s pevným delta křídlem má zlepšené letové vlastnosti. Tato varianta také umožňuje návratovému modulu relativně velký boční manévr (oproti lodi Sojuz až desetinásobek). V případě okřídlených variant se počítalo s téměř kompletní znovupoužitelností [44]. Koncept okřídlené varianty je zobrazen na obrázku č. 14. Práce na projektu jsou v současné době zastaveny. Důvodem je zřejmě nedostatek financí.



Obrázek 14: Loď Kliper<sup>4</sup> [26]

<sup>4</sup> 1 - kabina pro posádku, 2 - křídla, 3 - raketové motory

## **5 Znovupoužitelnost z ekonomického pohledu**

### **5.1 Analýza znovupoužitelnosti nosné rakety Falcon 9**

V následujících kapitolách budou rozebrány jednotlivé ekonomické kategorie znovupoužitelnosti nosné rakety Falcon 9. Rozbor nákladů na jeden start nosné rakety je pak uveden v kapitole 5.1.8.

#### **5.1.1 Stanovení předpokladů pro úspěch znovupoužitelnosti**

##### *5.1.1.1 Hlavní cíle znovupoužitelnosti*

Za hlavní cíle technologie znovupoužitelnosti považují snížení ceny za start a zvýšení frekvence startů. Oba tyto cíle mají zásadní dopad na dostupnost kosmické dopravy. Úspěšnost projektu tedy bude hodnocena z pohledu možného naplnění těchto dvou hlavních cílů.

##### *5.1.1.2 Zasazení do kontextu*

Pouze dvěma významnějším projektům se podařilo dostat přes všechny stádia vývoje až do operačního nasazení. Prvním byl projekt raketoplánů STS, který byl ukončen v roce 2011. Druhým je pak projekt vícenásobně použitelné rakety Falcon, který je nyní na počátku operačního provozu.

Rovnou je možné uvést, že v případě raketoplánů STS došlo k nesplnění uvedených cílů. Ukázalo se, že náklady na inspekci, údržbu a přípravu raketoplánu na další start byly příliš vysoké. Ve výsledku by bylo levnější a jednodušší použít klasickou nosnou raketu, která by byla po výnosu užitečného nákladu zničena.

Příčin nesplnění cílů v podobě počtu letů, kdy nakonec proběhlo pouze několik startů za rok, a výsledných nákladů na jeden start, je celá řada. Mezi nejvýraznějšími byly následující příčiny: velice dlouhá a náročná poletová údržba spočívající v rozebrání téměř celého raketoplánu, kontrola složitých systémů, včetně těch na podporu života, důkladná kontrola složitých kyslíko-vodíkových motorů a rozsáhlého tepelného štítu, kterým byl pokryt téměř celý raketoplán.

Dle dostupných informací stála stavba jednoho raketoplánu STS přibližně 2 miliardy dolarů. Cena za jeden start se pohybovala mezi 500 a 750 milióny dolarů, a roční údržba čtyřčlenné flotily si vyžádala další dvě miliardy dolarů. Nosné rakety Falcon v současnosti nabízí ceny podstatně nižší. Standardní cena za výnos nákladu raketou Falcon 9 pro rok 2018 je 62 milionů dolarů. U rakety Falcon Heavy je cena stanovena na 90 milionů dolarů [47].

Raketa Falcon 9 je oproti raketoplánům STS podstatně jednodušší systém, kde v podstatě stačí zkontrolovat relativně jednodušší motory (oproti STS) na speciální letecký petrolej a několik dalších systémů. V následujících kapitolách se tedy pokusím rozebrat, proč by vícenásobně použitelné rakety Falcon mohly naplnit stanovené cíle.

### *5.1.1.3 Stanovené předpoklady pro úspěch znovupoužitelnosti*

S přihlédnutím k výše uvedenému je možné stanovit několik předpokladů pro úspěch znovupoužitelnosti raket Falcon. Základním předpokladem je schopnost vysoké frekvence startů a snížení ceny za start, zároveň doprovázené bezpečností a spolehlivostí technologie. Dalším milníkem je překonat nákladný a náročný vývoj technologie znovupoužitelnosti, která přejde v nízkonákladovou výrobu a především nízkonákladový provoz.

Nakonec je důležité následné prosazení znovupoužitelnosti v kosmické dopravě. Jde v podstatě o „dostatek zákazníků“ pro znovupoužitelné prostředky, který má návaznost a souvislost se základními předpoklady v podobě schopnosti vysoké frekvence startů, snížení ceny za start a bezpečnosti a spolehlivosti technologie. Na prosazení těchto prostředků bude mít také vliv pokrok v kosmickém průmyslu, jako rozvoj kosmické



---

turistiky a změny v satelitním průmyslu.

Jednotlivé stanovené kategorie jsou rozebrány v následujících kapitolách.

1. Schopnost vysoké frekvence startů a snížení ceny za start - Kapitola 5.1.2.
2. Bezpečnost a spolehlivost technologie - Kapitola 5.1.3.
3. Překonat náročný vývoj technologie - Kapitola 5.1.4.
4. Nízkonákladová výroba - Kapitola 5.1.5.
5. Nízkonákladový provoz - Kapitola 5.1.6 až 5.1.8.
6. Prosazení znovupoužitelnosti v kosmické dopravě - Kapitola 6.

### **5.1.2 Vliv opakovaného použití na dostupnost**

V této kapitole bude rozebrán vliv opakovaného použití na dostupnost z pohledu zvýšení frekvence startů a zkrácení čekacích lhůt na start. Hlavním cílem a přínosem již použitých stupňů je dřívější start, spolu s nižší cenou za start.

#### *5.1.2.1 Technologická omezení*

Dle vyjádření zakladatele společnosti SpaceX Elona Muska je cílem dosáhnout stavu, kdy první stupeň bude po přistání schopen znovu letět do 24 hodin (Musk, 2017). To je poměrně vysoce ambiciózní cíl, který zřejmě bude možné v dohledné době splnit jen v ojedinělých případech, pokud vůbec. Nicméně vývoj prvního stupně rakety Falcon 9 směřuje do stavu, kdy nebude během několika letů potřeba provádět žádné výměny částí rakety v rámci přípravy stupně na další start. Dle SpaceX by tohoto stavu mělo být dosaženo již u verze Falcon 9, Block 5 (Falcon 9, verze 2.5) v roce 2018. Tato raketa má být schopna 10 startů bez výměn součástí mezi starty a až 100 letů s menšími opravami (Musk, 2017).

### 5.1.2.2 Provozní omezení

Z pohledu vícenásobné použitelnosti je přistání na plovoucí plošině značně komplikovanější než přistání na pevnině. Záchrana prvního stupně na moři zabere značné množství času a je také samozřejmě finančně nákladnější. Plošina ASDS potřebuje několik dní na cestu k místu přistání a další dny na cestu zpět (obvykle přibližně 3 + 3 dny). SpaceX pracuje na optimalizaci tohoto procesu. Součástí optimalizace je také využití automatického (dálkově ovládaného) robota na zajištění rakety po přistání na plošině (Musk, 2017).

Dalším faktorem je příprava startovací rampy na další start, která nyní trvá od několika dní po několik týdnů. Nicméně, SpaceX má v současnosti k dispozici několik startovacích ramp a další přibývají. Staví také úplně nový kosmodrom v Texasu. Vzhledem k uvedenému kapacita zřejmě nebude představovat problém.

Je zde také vliv počasí, který značně ovlivňuje možnosti startu a následné záchranu rakety. Starty jsou samozřejmě možné pouze tehdy, pokud je počasí v příslušných mezích. Start rakety se záchranou klade na počasí zvýšené nároky.

### 5.1.2.3 Zvýšení dostupnosti startu

Závěrem lze konstatovat, že potenciální přínosnost znovupoužitelnosti rakety Falcon 9 pro zvýšení frekvence startů, zkrácení čekacích lhůt na start a z toho vyplývající zvýšení dostupnosti startů je obrovská. Vzhledem ke snahám SpaceX lze předpokládat, že raketa bude po přistání vyžadovat relativně málo práce na přípravu k dalšímu startu.

Tento závěr je stanoven v rámci znovupoužitelného proti jednoúčelovému řešení.

Jednoúčelové řešení je vztaženo k výrobě nové rakety, která trvá v současnosti přibližně jeden rok. Jde navíc o náročnou kusovou výrobu s vysokými náklady. Jednotlivých raket je také možné vyrobit jen omezené množství. V případě SpaceX jde o přibližně 20 kusů ročně (Shotwell, 2017). Tyto kapacity budou pravděpodobně růst, nikoliv však rapidně.

Další významný vliv na dostupnost má snížení ceny startu, které bude rozebíráno v dalších kapitolách.

### **5.1.3 Vliv opakovaného použití na bezpečnost a spolehlivost**

#### *5.1.3.1 Teoretický pohled*

Problematika použitých stupňů je v oblasti bezpečnosti a spolehlivosti nesmírně složitá a individuální. K opakovanému použití dochází pouze u částí a celků, které byly k opakovanému použití již od počátku konstruované. Od počátku se tedy počítalo s opotřebením a životností. Obecně lze říci, že použité stupně mohou být při opakovaném použití stejně bezpečné a spolehlivé jako stupně nové. Vzhledem k jejich dodatečné operační prověřenosti (úspěšný let) mohou být v některých případech dokonce i o něco bezpečnější a spolehlivější než stupně nové. Z určitého pohledu lze říci, že opakovaně použité rakety, nebo jejich části, jsou „zalétnuté“, podobně jako je zálet prováděn v letectví k dosažení vysokého stupně bezpečnosti.

#### *5.1.3.2 Praktický pohled*

Případy opakovaného použití již letěných stupňů jsou zatím jen v řádu jednotek. Z takového vzorku tedy není možné vyvozovat spolehlivé závěry. Je možné pouze konstatovat pozitivní výhled, který se opírá o teoretický pohled a dosavadní absenci zveřejněných vážných provozních incidentů, které by měly souvislost s opakovaným použitím.

### **5.1.4 Vývoj**

#### *5.1.4.1 Financování vývoje*

SpaceX do vývoje znovupoužitelnosti investovala již přibližně miliardu dolarů (Musk, 2017). Projekt znovupoužitelnosti financuje společnost SpaceX ze soukromých zdrojů, bez přímé finanční podpory NASA. Nicméně, kontrakty od NASA na dopravu zásob na ISS (v budoucnu také osob), lze považovat pro SpaceX za významné a také poměrně finančně

výhodné. Tyto kontrakty zřejmě významně usnadnily SpaceX možnosti financování vývoje technologie znovupoužitelnosti. Následně také SpaceX získala významnou dotaci na vývoj další generace raketových motorů [45].

#### *5.1.4.2 Znovupoužitelnost prvních stupňů rakety*

SpaceX se znovupoužitelností prvních stupňů raket zabývá již od prvních startů Falcon 1. U rakety bylo zkoušeno přistání prvního stupně pomocí padáku, ale ukázalo se jako nevhodné. Rozvoj znovupoužitelnosti nastal s nástupem Falconu 9 přibližně v roce 2012 (první lety Grasshopperu). Společnost vyvíjela a testovala přistávání pomocí experimentální rakety Grasshopper. Následně se přešlo k testování přistání prvního stupně samotné rakety Falcon 9. První pokusy o přistání skončily nezdarem, nebo následně částečným nezdarem. K prvnímu úspěšnému přistání na pevnině došlo v prosinci 2015. K prvnímu úspěšnému přistání na plovoucí plošině (ASDS) došlo v dubnu 2016 (CRS-8).

#### *5.1.4.3 Schopnost záchrany celé nosné rakety*

Technologii znovupoužití prvních stupňů rakety Falcon 9 lze již v současnosti považovat za zvládnutou, což je z ekonomického pohledu zásadní (jak již bylo uvedeno, první stupeň představuje 70 % celkové ceny startu).

Připravuje se záchrana druhého stupně. Experimentální záchrana je plánována na rok 2018. S opakovaným použitím druhých stupňů rakety se počítá až u příští generace nosných raket. Druhý stupeň tvoří přibližně 20 % celkové ceny startu.

SpaceX pracuje také na záchraně aerodynamického krytu rakety. Přestože si SpaceX kryt vyrábí sama, jejich výroba je náročná a nákladná. Opakované použití by tedy v budoucnu mohlo dávat smysl i z ekonomického hlediska. Cena krytu je nyní 6 milionů dolarů, dle vyjádření SpaceX (Musk, 2017). Důležitější než úspora nákladů ale může být spíše dosažení milníku v podobě schopnosti opakovaného použití celé nosné rakety (všech

části).

#### 5.1.4.4 *Následující milníky znovupoužitelnosti*

Významným krokem z pohledu opakovaného použití bude nástup kyslíko-metanových raketových motorů s uzavřeným cyklem. SpaceX vyvíjí a testuje takové motory pod označením Raptor [45]. Metan má několik výhod. Je levný, relativně snadno dostupný a hoří čistěji než vysoce rafinovaný petrolej (RP-1). Dochází k menšímu zanášení motorů spaliny, což je z pohledu snadné znovupoužitelnosti důležité.

### 5.1.5 Výroba

Společnost SpaceX je v mnoha ohledech až vizionářskou společností. Z praktického pohledu jde o velmi inovativní společnost přinášející na trh kosmické dopravy mnoho nových technologií, které mají potenciál stát se revolučními. Z dnešního pohledu se jedná především o technologii znovupoužitelnosti v oblasti nosných raket.

Projekt STS některé cíle nenaplnil, protože byl velice náročný z pohledu výrobního a provozního. Projekt raket Falcon má oproti STS značnou výhodu v technologickém pokroku, jenž proběhl od návrhu STS. Projekt efektivně využívá technologie a znalosti, jež byly získány během předchozích dekád vývoje a provozu v kosmickém průmyslu. Byly vyvinuty také úplně nové technologie. Jedním z největších zdrojů těchto technologií a zkušeností je NASA, což společnost SpaceX opakovaně přiznává. V rámci programu COTS (kapitola 2.5.2.) měly vybrané komerční společnosti možnost využívat znalosti a technologie dříve vyvinuté v NASA.

Příklady využití nových technologií je několik. Jedná se zejména o pokrok v elektrotechnice a výpočetní technice (umožňuje jednodušší návrh řídicího a navigačního vybavení), v technologii lehkých tepelných štítů a technologii raketových motorů a 3D tisk.

Z ekonomického pohledu jsou také důležitým faktorem optimalizace výroby. SpaceX vyrábí většinu částí rakety tzv. „in-house“, což přispívá ke snížení nákladů a snadnému

řízení výroby. SpaceX vyrábí svépomocí přibližně 75 – 90 % částí nosných raket. Jedná se o nejdůležitější části, jako raketové motory, řídicí navigační zařízení, ale i samotný trup stupňů.

V případě výroby v malých dávkách je těžké, nebo rovnou nemožné, dosáhnout nízké ceny. Minulost ukázala, že pro snížení ceny je výhodnější větší produkce. Je to strategie, která proslavila automobilku Ford nebo v českém případě podnik Baťa. SpaceX se ubírá podobným směrem. Příklady této snahy o výrobu ve větších dávkách je několik, například nosná raketa Falcon Heavy představuje v podstatě jen 3 první stupně rakety F9. Raketové motory Merlin prvního a druhého stupně jsou také prakticky totožné. Jejich výroba dosáhla takové míry, že je SpaceX v současnosti největší výrobce raketových motorů na světě. Dle dostupných informací SpaceX vyrobí několik stovek kusů motorů Merlin ročně. Vyrábí a vyvíjí také několik dalších typů motorů.

Zajímavost v oblasti optimalizace představuje relativně nízký průměr raket, který umožňuje jejich snadné převážení po silnici pro výrobní a provozní účely.

Výroba nosné rakety nedosahuje extrémní náročnosti jako v případě STS, přesto se stále jedná o náročnou kusovou výrobu s vysokými náklady. Výroba rakety Falcon 9 trvá v současnosti přibližně jeden rok, vyrábí se přibližně 20 kusů ročně (Shotwell, 2017).

Nejvýraznější úsporu nákladů v porovnání s raketoplány STS představuje celkově výrazně méně složitá koncepce, zvolený méně náročný typ raketových motorů a pokrok v elektronice a výpočetní technice. V budoucnosti lze také očekávat uplatnění nových perspektivních technologií, jako je například 3D tisk (již nyní se uplatňuje např. při výrobě motorů pro kosmickou loď Crew Dragon).

## **5.1.6 Provoz**

### *5.1.6.1 Počátky provozní znovupoužitelnosti*

V současnosti SpaceX již prokázala, že je znovupoužití prvních stupňů rakety Falcon 9 možné. Zachráněných stupňů je již celá řada. Potvrzeno je nyní i několik komerčních startů s jednou letěným prvním stupněm (např. Iridium-4, Iridium-5). V současnosti

dokonce i NASA schválila možnost použití jednou letěného stupně při zásobovací misi CRS (CRS-14) [46].

SpaceX již dříve uvedlo, že náklady na znovupoužití zachráněného prvního stupně jsou nižší, než polovina ceny nového stupně [23][29]. Tyto náklady se budou zřejmě ještě dále výrazně snižovat (viz vývoj znovupoužitelnosti F9, kap. 5.1.2.1).

SpaceX za použití již letěného stupně Falconu 9 však v současnosti nabízí jen minimální slevu, neboť společnost potřebuje nyní alespoň částečně splácet investice do vývoje technologie znovupoužitelnosti. Odhady se většinou shodují na tabulkové slevě 10% za použití již letěného stupně, což bylo nepřímo potvrzeno i zástupci SpaceX [23]. Úspora se tedy zatím výrazně neprojevuje na koncové ceně pro zákazníka. Dalším faktorem je, že SpaceX není k poskytování výrazných slev příliš motivována současnou situací na trhu, protože již nějakou dobu nabízí obvykle nižší ceny startu, než konkurence.

SpaceX má dle zveřejněných informací v současnosti celkově smluvně zajištěné desítky startů v celkové hodnotě přibližně 10 miliard dolarů [3]. I tato skutečnost ukazuje, že existuje poměrně značná poptávka po levnější dopravě do vesmíru. Ve většině případů jde ale zatím o starty s novou nosnou raketou.

SpaceX má pro svou technologii znovupoužitelnosti také vlastní využití. I v případě, že by o lety s použitými stupni nebyl v nejbližších letech výrazný zájem, nemusí to představovat pro SpaceX kritický problém, protože je využije pro svůj vlastní projekt. Připravuje satelitní konstelaci, která spoléhá na znovupoužitelnost nosných raket Falcon 9. Více o tomto projektu je uvedeno v kapitole 6.2.2.

Zachráněné první stupně rakety Falcon 9 (z roku 2016) jsou vyobrazeny na obrázku 15.

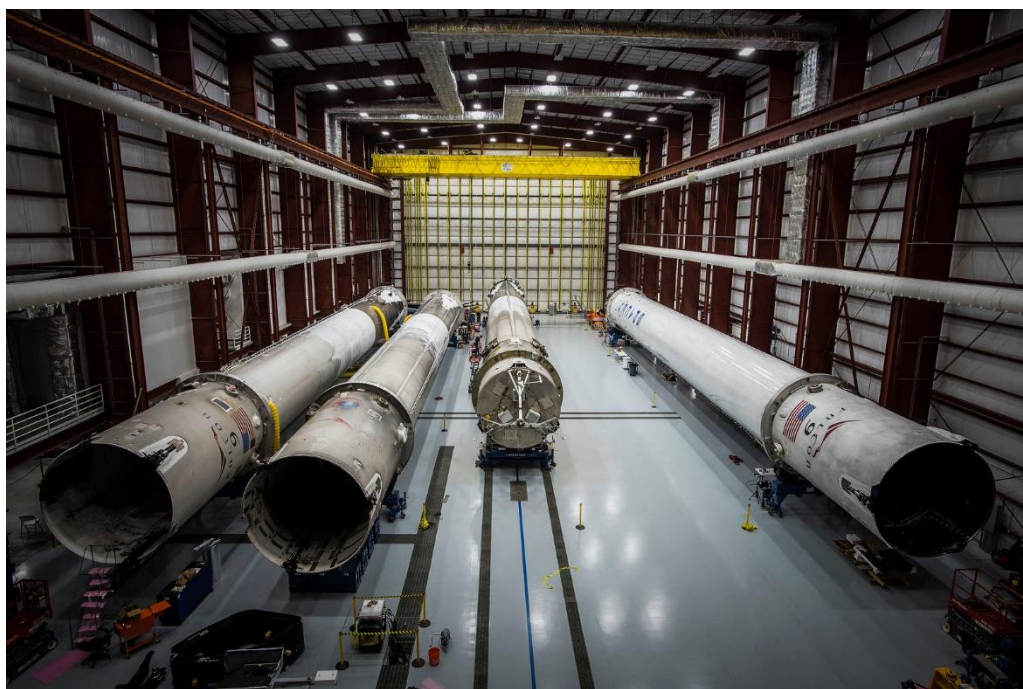
#### *5.1.6.2 Výrazné zlevnění startů*

Na základě předešlé kapitoly lze konstatovat, že již nyní je prostor pro snížení ceny startu. V některých případech tedy může být sleva startu výraznější, ale zatím se jedná

pravděpodobně především o speciální případy. Při prvním letu již použitého stupně na misi SES-10 pro lucemburskou společnost SES se spekovalo o slevě až 30 % (jde však pouze o spekulaci). Nicméně další zákazník následně zveřejnil slevu ve výši 40%<sup>5</sup> [31]. Tabulková sleva za znovupoužití je v současnosti pravděpodobně 10%. V konkrétních případech pak bude velice individuální.

V průběhu několika let se dá očekávat výraznější zlevnění startů, protože SpaceX začne naplno těžit z úspor, které umožní znovupoužitelnost raket.

Rozbor nákladů na start rakety Falcon 9 je uveden v kapitole 5.1.8.



Obrázek 15: Zachráněné první stupně Falcon 9, rok 2016 [28]

---

<sup>5</sup> Jde konkrétně o vyjádření prezidenta společnosti Telkom, Alexe J. Sinaga na CNN



### 5.1.7 Vliv znovupoužitelnosti na nosnost

Daní za znovupoužitelnost je obvykle nárůst hmotnosti. S větší životností je potřeba mít konstrukci dostatečně robustní. V případě znovupoužitelné rakety nelze příliš počítat s lehkou nesamonosnou konstrukcí, která drží tvar jen pod tlakem. Jsou také potřeba další zařízení, zejména přistávací. Tohle vše snižuje nosnost a vyžaduje palivo navíc. Speciálním případem je pak motorické přistání, které vyžaduje další palivo pro přistání. Přistávací zařízení aktuální verze Falconu 9 váží 2 100 Kg (Falcon9, Block 4) a po vysunutí má 18 metrů v průměru. Jedná se z pohledu výnosu nákladu o poměrně značné množství „mrtvé hmotnosti“. U technologie znovupoužitelnosti je potřeba vždy uvážit, kolik přidané hmotnosti bude technologie vyžadovat a tedy její vliv na nosnost. Na druhou stranu, výkon motorů Merlin nosné rakety Falcon 9 se vývojem daří průběžně zvyšovat. Tím roste i maximální nosnost rakety. Do provozu bude také uvedena vícenásobně použitelná nosná raketa Falcon Heavy s nosností až 63 800 Kg. Závěrem lze tedy říci, že ztráta nosnosti je sice výrazná, ale nepředstavuje překážku rozšíření technologie znovupoužitelnosti. Snížení nosnosti rakety se odhaduje přibližně na 30% v případě záchrany 1. stupně (Falcon 9 FT: maximální nosnost na GTO 8 300 Kg/přibližně 5 300 Kg se záchranou[36]). Snížení nosnosti je dáno především samotnou hmotností přistávacího zařízení, a dále potřebným množstvím paliva pro návrat, které udává charakter konkrétní mise (hmotnost nákladu, cílová oběžná dráha). V případě potřeby využít maximální nosnost je možný start v režimu bez záchrany stupně. Stalo se tak například v případě mise Intelsat 35e, kde byla nákladem družice o hmotnosti 6 761 Kg. Tato družice měla původně startovat na raketě Falcon Heavy, ale od podepsání smlouvy se nosnost rakety Falcon 9 natolik zvýšila, že byla nakonec použita místo Falconu Heavy.

Falcon 9 (současná varianta) měří na délku 70 metrů a má průměr 3.7 metru. Hmotnost rakety je 549 054 kg. Maximální hmotnost nákladu je na 22 800 kg na LEO, 8 300 kg na GTO a 4 020kg na Mars [35]. Maximální rozměry nákladu vynášeného pod aerodynamickým krytem jsou 13.1 metrů krát 5.2 metru, v případě použití lodi Dragon 8.1 metrů krát 3.7 metru [35]. Maximální nosnosti dalších nosných raket jsou uvedeny v tabulce 1.

---

	Maximální nosnost na LEO (platné k 9/2017):	Maximální nosnost na GTO (platné k 9/2017):
Falcon Heavy	<b>63 800 kg</b>	<b>26 700 kg</b>
Delta IV Heavy	<b>28 790 kg</b>	<b>14 220 kg</b>
Ariane 5	<b>21 000 kg</b>	<b>10 500 kg</b>
Falcon 9	<b>22 800 kg</b>	<b>8 300 kg/ ~ 5 300 Kg*</b>
Atlas V	<b>20 050 kg</b>	<b>8 200 kg</b>

**Tabulka 1: Maximální hmotnost vynášeného nákladu, \* se záchranou**

### 5.1.8 Rozbor nákladů na start rakety Falcon

Cena startu nosné rakety je tvořena cenou samotné nosné rakety a náklady souvisejícími se startem a přistáním, které jsou představovány zejména náklady na palivo, dopravou rakety, testování a další. V případě opakovaného použití rakety jsou zde náklady na znovupoužití a snížení hodnoty rakety opotřebením (amortizace), renovaci a testování rakety ke znovupoužití, dále náklady na provoz ASDS. Rozbor nákladů na start rakety s nákladem pod aerodynamickým krytem je znázorněn v tabulce 2.

<i>Kategorie ceny:</i>	<i>Položky ceny:</i>
<i>Cena nosné rakety:</i>	Cena prvního stupně
	Cena druhého stupně
	Cena aerodynamického krytu
<i>Náklady na start:</i>	Palivo
	Služby řízení letu
	Služby startovací rampy
	Přeprava rakety
	Testování
<i>Náklady znovupoužitelnosti:</i>	Amortizace
	Poletová údržba
	Náklady na přistání (rampa/ASDS)
	Přeprava rakety
	Testování

**Tabulka 2: Rozbor nákladů na start rakety.**

### 5.1.8.1 Cena nosné rakety Falcon

Cena nosné rakety Falcon sestává z ceny prvního stupně, ceny druhého stupně a ceny aerodynamického krytu<sup>6</sup>.

Cena prvního stupně sestává z ceny motorů Merlin (9x), trupu prvního stupně, řídicího, navigačního a přistávacího systému, a dále nádrží. Cena raketového motoru Merlin nebyla zveřejněna, ale odhaduje se na 1 500 000 dolarů za kus. Většinu částí si SpaceX vyrábí svépomocí, včetně motorů, řídicího a navigačního systému.

Cena druhého stupně rakety sestává z ceny motoru Merlin (1x), trupu druhého stupně, řídicího systému a nádrží. Náklady jsou rozepsány v tabulce 3 a 4. Celková modelová úspora při znovupoužití prvního stupně je znázorněna v tabulce 5.

Jednotlivé položky	Předpokládaná cena:
Podíl prvního stupně na ceně startu (A)	(70%) <sup>7</sup>
Podíl druhého stupně na ceně startu (B)	(15 – 20%) <sup>8</sup>
Cena aerodynamického krytu (C)	(6*) <sup>9</sup>
Cena motoru Merlin 1D+ (hrubý odhad)	~1.5 (x 9)*
Cena motoru Merlin 1D vakuum (hrubý odhad)	~1.6*
Tabulková cena startu [47] (P)	62*

Tabulka 3: Náklady na start F9

<sup>6</sup> V případě startu nosné rakety v konfiguraci s lodí Dragon není aerodynamický kryt použit.

<sup>7</sup>; <sup>8</sup>; <sup>9</sup> (Musk, 2017)

\* cena v milionech USD

### 5.1.8.2 Náklady na start, přistání a přípravu k znovupoužití

Náklady na start sestávají z nákladů na palivo, přepravu rakety, prohlídku, testování, řízení letu, startovací rampu a náklady na živé vysílání startu.

Náklady na přistání a přípravu k znovupoužití sestávají z nákladů na renovaci rakety po startu, a dále nákladů na přistávací rampu, nebo v případě přistání na hladině, nákladů na provoz ASDS a přepravních nákladů.

Samostatnou položkou jsou náklady na pojištění startu a samotného nákladu. Náklad pojišťuje zákazník.

Palivo a okysličovadlo tvoří obvykle méně než 0,3 % ceny startu nosné rakety F9.

	<b>Předpokládaná cena: <sup>10</sup></b>
Cena prvního stupně celkem (A)	30 – 40 (30)
Cena druhého stupně celkem (B)	7,5 – 12 (8)
Cena nové rakety celkem (A+B+C)	44
Náklady na palivo	0,2 – 0,3 (0,2)
Náklady na záchranu a přípravu stupně na start (R)	8 - 15 (10)
Provozní náklady spojené se startem (S)	4

**Tabulka 4: Náklady na start F9**

Tabulka 5 představuje modelový případ úspory nákladů na start při opakovaném použití pouze prvního stupně. Model je pouze demonstrací úspor. Vzhledem ke složitosti problematiky nemůže zobrazovat přesné hodnoty. Většina hodnot vychází z vyjádření a materiálů vydaných společností SpaceX. Hodnoty jsou bez započítání možných slev. Konkrétní hodnoty budou v reálných případech velice individuální, podle konkrétních

<sup>10</sup> Předpokládaná cena, v milionech USD.

podmínek startu. Model klade důraz na přímé náklady. Z nepřímých nákladů jsou zohledněny jen ty nejnütnější. Ostatní nepřímé náklady, jako například pojištění, tvoří samostatnou kapitolu každého startu.

Náklady na záchranu a přípravu stupně na start (R). Dle vyjádření zástupců společnosti SpaceX již v případě prvních znovupoužití stupňů představovaly náklady na opakované použití méně než polovinu výrobních nákladů nového stupně (Shotwell, 2017). Následující verze F9 mají zlepšené možnosti opakovaného použití. Nastupující varianta F9 Block 5 má být schopna až 10 startů bez výměn součástí. Pro účely modelu je tedy stanovena cena (R) na 1/3 ceny stupně nového (A). Lze očekávat, že bude docházet k rozšiřování znovupoužitelnosti a optimalizacím souvisejících procesů, které budou představovat další snížení nákladů.

	<b>Falcon 9</b>	<b>F9 znovupoužitý <sup>11</sup></b>
Cena prvního stupně (A    R)	30	10
Cena druhého stupně (B)	8	8
Cena aerodynamického krytu (C)	6	6
Cena nosné rakety celkem (F) <sup>12</sup>	44	24
Provozní náklady spojené se startem (S)	4	4
Náklady na palivo (K)	0,2	0,2
Náklady na start celkem (N)=(F+S+K)	48,2	28,2
Zisk (P-N)	13,8	33,8
Zisk v %	22%	55%
Tabulková cena startu F9 (P)	62	62

**Tabulka 5: Model úspory při znovupoužití prvního stupně Falcon 9, hodnoty jsou v milionech USD**

<sup>11</sup> hodnoty jsou v milionech USD

<sup>12</sup> (F)= (A||R)+(B)+(C)

Tabulka 5 znázorňuje nárůst zisku o přibližně 30%, což odpovídá hodnotám, které byly v této souvislosti uváděny zástupci společnosti SpaceX. Hodnoty také odpovídají některým výraznějším slevám z ceny startu ve speciálních případech, které byly zmíněny v rámci kapitoly věnované provozním začátkům znovupoužitelnosti F9 (viz kapitola 5.1.6).

V případě těžké nosné rakety Falcon Heavy lze očekávat ještě výraznější úspory, což bude znázorněno prostřednictvím tabulky 6. Raketa konstrukčně vychází ze standardní rakety Falcon 9, která je doplněná o dva pomocné raketové stupně. Pomocné stupně jsou také upravené první stupně Falcon 9. Z pohledu znovupoužití jde v podstatě o tři první stupně rakety F9, které startují dohromady a následně přistávají samostatně.

	<b>Falcon Heavy</b>	<b>FH znovupoužitý<sup>13</sup></b>
Cena prvního stupně (3 x A    3 x R)	90	30
Cena druhého stupně (B)	8	8
Cena aerodynamického krytu (C)	6	6
Cena nosné rakety celkem (F) <sup>14</sup>	104	44
Provozní náklady spojené se startem (S)	4	4
Náklady na palivo (K)=(~3xK)	0,6	0,6
Náklady na start celkem (N)=(F+S+K)	108,6	48,6
Zisk (P-N)	-18,6	41,4
Zisk v %	-21%	46%
Tabulková cena startu FH (P)	90	90

**Tabulka 6: Model úspory při znovupoužití Falcon Heavy, hodnoty jsou v milionech USD**

<sup>13</sup> hodnoty jsou v milionech USD

<sup>14</sup> (F)= 3(A||R)+(B)+(C)

U těžké nosné rakety Falcon Heavy je z tabulky 6 patrný nárůst významu znovupoužitelnosti. Je zřejmý dramatický rozdíl v nákladech na start u varianty na jedno použití, oproti znovupoužití variantě. Tento nárůst není překvapivý, protože zde dochází k záchraně hned 3 stupňů, oproti jednomu stupni u F9.

Varianta bez znovupoužití má náklady evidentně přesahující tabulkovou cenou za start. V této konfiguraci by tedy byl start ztrátový. V reálném případě by byl rozdíl pravděpodobně ještě výraznější, neboť model počítá spíše s nižšími cenami jednotlivých položek. SpaceX tedy u FH již plně spoléhá na znovupoužitelnost. Vzhledem k úctyhodné nosnosti 63 800 kg na LEO je takový krok pochopitelný. Lze také očekávat, že v případě náročných startů, které budou probíhat bez záchrany, bude cena startu zřejmě nad cenou tabulkovou.

Účelem modelu bylo demonstrovat význam znovupoužitelnosti pro připravovanou těžkou nosnou raketu Falcon Heavy.



## **6 Opakovaně použitelné prostředky jako budoucnost kosmické dopravy**

### **6.1 Znovupoužitelnost v kosmické dopravě**

#### **6.1.1 Částečná znovupoužitelnost**

Znovupoužitelnost v dopravě do kosmického prostoru zavedly raketoplány STS, kde je ale na místě mluvit spíše o částečné znovupoužitelnosti. Po jejich ukončení provozu v roce 2011 dochází k pozvolnému nástupu dalších opakovaně použitelných prostředků. Nejvýraznějším nástupcem jsou částečně opakovaně použitelné nosné rakety. Dochází k zachraňování prvních stupňů nosných raket a některých dalších částí, jako jsou aerodynamické kryty, nebo samotné motory a pomocné stupně.

#### **6.1.2 Kompletní znovupoužitelnost**

Ačkoliv v současnosti jsou opakovaně používány jen některé části nosných raket, zejména se jedná o první stupně, společnost SpaceX do budoucna počítá se znovupoužitelností celé nosné rakety, včetně orbitálního stupně. V budoucí generaci nosných raket společnosti SpaceX má být i tento stupeň již od počátku navrhován jako znovupoužitelný.

#### **6.1.3 Zlevnění kosmické dopravy**

Znovupoužitelnost v oblasti nosných raket je inovativní přístup ke zvýšení dostupnosti kosmické dopravy. Doprava do vesmírného prostoru je v současnosti velice nákladná. Vynesení 1 kilogramu nákladu na oběžnou dráhu stojí řádově miliony korun. Výroba nosné rakety s motory na kapalné palivo je vysoce nákladná záležitost. Jde o kusovou výrobu, která trvá relativně dlouhou dobu, obvykle 1 rok a více. Raketa je následně po

jednom použití zničena. Pokud se tyto vysoké výrobní náklady rozloží mezi více použití, může dojít ke zlevnění dopravy až o několik řádů. Podobně jako dopravní letadlo, které stojí řádově srovnatelné částky jako nosná raketa, ale je použitelné opakovaně a dlouhodobě. Cena za dopravu letadlem je tedy relativně dostupná.

## 6.2 Kosmická doprava

Následující kapitola se pokusí zodpovědět, jaké jsou dopady levné kosmické dopravy a k jakým účelům je potřeba snížení ceny za start a zvýšení frekvence startů, což jsou cíle vícenásobně použitelných kosmických prostředků.

Zásadním společným důvodem je přínos pro vědecko-technický pokrok, který má následné pozitivní dopady na mnoho dalších oblastí. Levné lety do vesmíru jsou přínosem pro vědu, mají vliv na satelitní průmysl, potažmo na celou ekonomiku. Minulost ukázala, že mnohé kosmické technologie nakonec najdou i pozemské využití. Dopravní mise do vesmírného prostoru lze rozdělit na vědecké a komerční. Často však dochází ke vzájemnému prolínání těchto dvou případů. Typickým zástupcem komerční části je satelitní průmysl, kterému je věnována kapitola 6.2.2. Mezi komerční dopady patří i zpřístupnění kosmické turistiky, která je zatím nedostupná a nákladná. O vývoj v této oblasti usiluje nyní několik projektů (více v kapitole 6.2.3). Nakonec je tu také dnes již velice významná společnost SpaceX, která od svého založení hovoří o svém cíli umožnit lidstvu kolonizaci Marsu, kde považuje z ekonomického hlediska za nutné použít opakovaně použitelné prostředky.

## 6.2.1 Mezinárodní vesmírná stanice

### 6.2.1.1 Význam ISS

Významnou a také prestižní část kosmických letů tvoří mise na Mezinárodní vesmírnou stanici. ISS představuje jeden z největších mezinárodních výzkumných projektů. Na ISS je možné provádět experimenty ve specifickém prostředí kosmické stanice, které se vyznačuje mikrogravitací a dalšími unikátními vlivy. Stanice je přínosem zejména pro biologii (evropský modul Columbus), astronomii, fyziku a meteorologii.

### 6.2.1.2 Doprava na ISS

Dopravu kosmonautů na stanici a zpět zajišťují pouze ruské pilotované kosmické lodě Sojuz. Po raketoplánech STS zatím není k dispozici jiný vhodný dopravní prostředek, jsou však předmětem vývoje.

Zásobování ISS nyní zajišťuje několik subjektů. V případě americké účasti jde o společnost SpaceX s vícenásobně použitelnou lodí Dragon a soukromou společnost Orbital ATK s lodí Cygnus. Obě tyto společnosti provozují dopravu na ISS v rámci programu CRS, viz kapitola 2.5.1. Další část dopravy pak zajišťuje ruský Roskosmos s lodí Progress a japonská JAXA s lodí HTV.

Pro léta 2019 až 2024 v rámci programu CRS-2 se počítá také s vícenásobně použitelným raketoplánem Dream Chaser (viz kapitola 3.1.5).

Lod' Dragon má z pohledu zásobování ISS několik zvláštností. Jako jediná je nyní opakovaně použitelná, dále disponuje systémy na podporu života, tedy dokáže dopravit živé organismy pro experimenty na ISS (např. pokusné myši) a také je v současnosti jediná schopna dopravy zásob jak směrem na ISS, tak zároveň zpět na zem (výsledky experimentů, vzorky). Ostatní lodě jsou po vyložení zásob naplněny odpadem. Po odpojení od ISS dojde k jejich sestupu a zániku v atmosféře.

## 6.2.2 Vynášení satelitů a satelitní konstelace

### 6.2.2.1 Výroba levnějších satelitů

Snížení cen startů zpřístupňuje výrobu levnějších satelitů s kratší životností, které lépe reagují na mnohdy prudký technologický vývoj. U levnějších satelitů je kladen mnohem větší důraz na cenu startu. Satelitní průmysl je dosud přizpůsoben vysokým cenám startů a jejich nízké frekvenci, což vede k situaci, kdy jsou satelity stavěny jako drahá a komplexní zařízení s vysokou životností. Levnější satelity s kratší životností umožňují větší míru inovace a také dostupnější průběžné nahrazování pokročilejšími.

### 6.2.2.2 Satelitní konstelace

Několik společností plánuje obrovské satelitní konstelace, které by měly zajišťovat rychlý a levný internet po celém světě. Společnost SpaceX plánuje vybudovat konstelaci Starlink [3]. Tato konstelace má sestávat ze 4425 satelitů na nízké oběžné dráze. V další fázi se pak počítá s vypuštěním dalších 7 500 satelitů na velmi nízké oběžné dráze. Hlavní účel satelitů na velmi nízké oběžné dráze je zlepšení provozních vlastností sítě. Jedná se zejména o zrychlení odezvy a zvýšení přenosové kapacity. Satelity mají být vzájemně propojeny pomocí laserů.

Starlink má poskytovat gigabitové rychlosti přenosu dat při nízké latenci 25 až 35 ms [43]. Parametry však odpovídají konceptuální fázi projektu a pravděpodobně tedy bude docházet ke změnám.

Jedná se o obrovský projekt, který plánuje vynést několik tisíc satelitů během pouhých pár let. Společnost oznámila, že klíčem k úspěchu bude znovupoužitelnost raket Falcon 9. Část konstelace na nízké oběžné dráze má být dobudována v roce 2024. Časový plán pro část konstelace na velmi nízké oběžné dráze nebyl stanoven. Satelitní konstelace Starlink je dále rozebrána v kapitole 6.2.2.3

Obdobnou satelitní konstelaci představuje projekt OneWeb. OneWeb plánuje konstelaci vybudovat ve spolupráci s Virgin Galactic, Airbus a Arianespace [49]. Konstelace má sestávat až ze 720 satelitů na nízké oběžné dráze a dalších 1280 satelitů na MEO. První

---

satelity by měly být vyneseny již koncem roku 2017. Další satelitní konstelace připravuje například také Boeing [33], Leosat [34] a další.

### 6.2.2.3 *Satelitní konstelace SpaceX Starlink*

#### 6.2.2.3.1 Významný dopad znovupoužitelnosti

Plánované satelitní konstelace pro poskytování globálního internetu představují potenciálně významné využití pro vícenásobně použitelné prostředky. Projekt společnosti Starlink počítá s rapidní znovupoužitelností nosných raket Falcon 9. Jedná se o projekt, v rámci kterého se plánuje vynést tisíce satelitů během několika málo let.

#### 6.2.2.3.2 Současné technologie satelitního internetu

Technologie satelitního internetu je běžně dostupná již nyní. Z pohledu běžného použití má však několik omezení. Zásadním omezením je zpoždění, které je způsobeno značnou vzdáleností trasy signálu. Tok dat probíhá od uživatele přes satelitní síť k pozemnímu internetu a zpět. To už se takřka na první pohled jeví jako problematické. Při použití stávající satelitní technologie se odezva pohybuje průměrně nad 600 ms. To představuje hodnotu znatelnou i při běžném použití. Některé online činnosti ztěžuje, nebo úplně vylučuje.

#### 6.2.2.3.3 Konkurence pro pozemní poskytovatele internetu - rozbor

Starlink slibuje poskytovat gigabitové rychlosti přenosu dat při nízké latenci 25 až 35 ms [43]. S takovými parametry by tedy mohl představovat konkurenci i pro běžné poskytovatele internetu. Nabízí se otázka, zda by tomu tak opravdu mohlo být. Takřka všechny tradiční omezení satelitního internetu je možné pomocí nové technologie úspěšně vyřešit. Zbývá omezení plynoucí ze značných vzdáleností, které musí signál urazit. Tato vzdálenost způsobuje již zmíněné zpoždění. SpaceX s tímto samozřejmě počítá. Zvolí

proto nízkou oběžnou dráhu 1150 až 1320 km.

Signál (data) musí urazit cestu od klienta směrem k nejbližšímu satelitu Starlink, ten jej předá dalšímu satelitu (či satelitům), který jej pošle na pozemní stanici, a ta pak dále k cílovému serveru. Odpověď jde opačnou cestou. Aby to nebylo jednoduché, satelity se pohybují. Z jednoho bodu je konkrétní satelit viditelný po relativně krátkou dobu. Satelity si tedy klienta předávají.

V případě varianty satelitů na LEO, a pokud by bylo počítáno s nejkratší možnou variantou trasy, kde by klient byl hned vedle pozemní stanice, je teoretické minimální zpoždění přibližně rovno 25 ms. Je dáno vzdáleností a rychlostí šíření signálu. Deklarovaná hodnota zpoždění 25 ms je tedy teoretická nejlepší možná hodnota. V praxi bude však odezva několikanásobná, což bude dáno vzdáleností od pozemní stanice a dalším prodlevám při velice složitém směřování.

U konkurenčního projektu satelitní konstelace OneWeb je cesta signálu ještě delší.

Využívá kombinaci satelitů na nízké oběžné dráze a satelitů na MEO (nebo i GSO), která je z pohledu odezvy ještě více nepříznivá.

Závěrem lze tedy říci, že satelitní internet bude stále internet s jistými omezeními, ačkoliv zřejmě podstatně menšími než dosud. V případě návrhu konstelace jako je Starlink by se ale již uživatelská zkušenost blížila běžnému pozemnímu připojení. Je tedy možné i široké rozšíření.

Vybudování takové konstelace je z ekonomického pohledu velice náročné. SpaceX bude usilovat o dostupnou cenu služby. Nebude ale pravděpodobně představovat konkurenci pozemnímu připojení k internetu.

#### 6.2.2.3.4 Levná doprava satelitů na oběžnou dráhu

Starlink má za úkol přinést internet zejména do odlehlejších oblastí a pro speciální využití. Trh pro satelitní internet je v USA poměrně široký. Více než polovina světové populace je zatím bez připojení k internetu. SpaceX má k vybudování tohoto náročného projektu obvyklé předpoklady. Je schopna vybudovat konstelaci z velké části svépomocí, tzv. „in-house“. Produkce tisíců satelitů bude jistě náročná, ale při tak značném množství již nepochybně klesne kusová cena. SpaceX má také k dispozici relativně levnou dopravu na

oběžnou dráhu. Starlink tedy může být ekonomicky zvládnutelný projekt. Společnost již ukázala, že se nebojí netradičních řešení a umí realizovat i náročné projekty. Tento projekt tedy může být dalším krokem na cestě k ještě ambicióznějším projektům, jako je doprava na Mars a další aktivity.

### **6.2.3 Vesmírná turistika**

#### *6.2.3.1 Účastník kosmického letu*

Vesmírná turistika je v současnosti stále příliš nákladná a poměrně těžko dostupná. Správné označení pro „vesmírného turistu“ je účastník kosmického letu. Takových účastníků kosmického letu je zatím pouze několik. Kosmická turistika je na úplném počátku.

#### *6.2.3.2 Náklady na cestu do vesmíru*

Největší překážkou jsou bezesporu současné náklady na cestu do vesmíru. Zároveň ale zatím není k dispozici ani vhodný dopravní prostředek. Lze však předpokládat, že nástup vícenásobně použitelných kosmických prostředků bude mít pozitivní dopad i na kosmickou turistiku.

#### *6.2.3.3 Rozvoj komerční vesmírné turistiky*

O pokrok v oblasti vesmírné turistiky usiluje nyní několik projektů, přičemž některé jsou již v relativně pokročilém stádiu vývoje. Většina těchto prostředků je znovupoužitelná. Pozornost je věnována především suborbitálním kosmickým letům. Nadějným projektem je například suborbitální kosmický raketoplán SpaceShipTwo (viz kapitola 4.1.3) Existuje celá řada dalších zajímavých projektů v oblasti komerční kosmické turistiky, jako jsou projekty kosmických hotelů, nafukovací vesmírné stanice a další. Nápadů a vizí tedy jsou. Technologický pokrok otevírá stále nové možnosti. Tradiční problém ale představuje nedostatek financí a ochota do takových projektů investovat, protože se vždy jedná o

dlouhodobé projekty s určitou mírou rizika. Z ekonomického pohledu jde obvykle o poměrně vysokou míru rizika.

Výraznější rozvoj komerční vesmírné turistiky je možné očekávat nejdříve v řádu nižších desítek let. Lze předpokládat, že jedním z hlavních hybatelů bude právě technologie znovupoužitelnosti.



## Závěr

Dlouhodobou vizí a cílem kosmického průmyslu je vytvoření dopravního prostředku, který by byl schopen rychlého, bezpečného, spolehlivého a relativně levného vynášení užitečného nákladu do vesmíru. Znovupoužitelnost je reakcí na tyto požadavky.

V minulosti nepředstavovala znovupoužitelnost efektivní a ekonomicky přínosné řešení, protože kosmické systémy provází mnohdy až extrémní náročnost v celé šíři aspektů. Díky technologickému pokroku je však široké prosazení znovupoužitelnosti spíše otázkou času. Domnívám se, že znovupoužitelnost bude mít v příštích letech na kosmonautiku výrazný dopad a během několika desítek let se stane samozřejmostí. Dle mého názoru jsou znovupoužitelné prostředky již nyní v kosmonautice fenoménem doby. Přitahují ke kosmonautice nezanedbatelnou pozornost. Příkladem necht' jsou živé přenosy přistávajících prvních stupňů raket Falcon 9, které mají vysokou sledovanost. Tento zájem může do kosmonautiky přinést nové prostředky, kterých v kosmonautice není nikdy dost, snad kromě programu Apollo.

Práce si kladla za cíl popsat současný stav znovupoužitelnosti v oblasti kosmických systémů a rozebrat znovupoužitelnost současných nosných raket Falcon. Dále stanovit využití a dopady technologie znovupoužitelnosti kosmických systémů. Domnívám se, že cíle práce byly splněny. Zpracování tohoto zajímavého tématu prohloubilo můj zájem o kosmonautiku.

---

## Seznam použitých zkratek

NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
ESA	Evropská kosmická agentura
ISS	Mezinárodní vesmírná stanice
STS	Space Transportation System
ASDS	Autonomous Spaceport Droneship
SRB	Solid Rocket Booster (Space Shuttle)
LEO	Low Earth orbit
MEO	Medium Earth orbit
GSO	Geosynchronous orbit
CRS	Commercial Resupply Services
COTS	Commercial Orbital Transportation Services
RLV	Reusable Launch Vehicles
USD	Americký dolar
HTV	H-II Transfer Vehicle
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
F9	Falcon 9
FH	Falcon Heavy
GPS	Global Positioning System
INS	Inerciální navigační systém

## Zdroje informací

1. FORTESCUE, Peter W., John. STARK a Graham. SWINERD. Spacecraft systems engineering. 4th ed. Hoboken, N.J.: Wiley, c2011. ISBN 9780470750124. [cit. 2017-5-20].
2. MÜTSCH, Thomas F. a Matthias B. KOWALSKI. Space technology: a compendium for space engineering. ISBN 978-3-11-041321-2. [cit. 2017-5-25].
3. SPACEX. Press Center. SpaceX. [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://www.spacex.com/press>
4. POLÁK, Michal. Cesty k raketoplánům. Praha: Beletris, 2011. Sputnik (Beletris). ISBN 978-80-87105-24-5. [cit. 2017-5-30].
5. Wertz, J.R.; Larson, W.J.: Space mission analysis and design, Microcosm, Pennsylvania, 1999, ISBN: 978-1881883104. [cit. 2017-5-30].
6. PACNER, Karel a Antonín VÍTEK. Půlstoletí kosmonautiky: kroky, skoky a pády na cestě do vesmíru. Praha: Epoque, 2008. ISBN 978-80-87027-71-4. [cit. 2017-5-30].
7. ISAKOWITZ, Steven J., International reference guide to space launch systems : AIAA American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. ISBN 15-634-7591-X. [cit. 2017-5-30].
8. VÍTEK, Antonín; LÁLA, Petr. Malá encyklopedie kosmonautiky. Praha : Mladá fronta, 1982. [cit. 2017-5-30].
9. BERGER, Brian. [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <https://www.space.com/337-nasa-transfers-37-project-darpa.html>
10. BERGER, Brian. [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <https://www.space.com/13230-secretive-37b-space-plane-future-astronauts.html>
11. Musk, Elon. ISS R&D Conference 2017, July 19. [online]. [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=BqvBhhTtUm4>

12. Sänger, Eugen; 1944. A Rocket Drive For Long Range Bombers [PDF]. Dostupné z: <http://www.astronautix.com/data/saenger.pdf> [cit. 2017-5-30].
13. Spaceflight101 [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://spaceflight101.com/falcon-9-nrol-76/falcon-9-nrol-76-flight-data/>
14. NASA. Ulbrich, Ken [online]. [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/content/sierra-nevada-corporations-dream-chaser-test-vehicle-2>
15. FRANTIŠEK, Martinek. Ruská kosmická loď Kliper [online]. Česká astronomická společnost, 2004 [cit. 2017-5-30].
16. CST-100 STARLINER. BOEING. [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://www.boeing.com/space/starliner/#progress>
17. Blue Origin [online]. Blue Origin. [cit. 2017-5-10]. Dostupné z: <https://www.blueorigin.com/news>
18. Blue Origin gallery [online]. Blue Origin. [cit. 2017-5-10]. Dostupné z: <https://www.blueorigin.com/gallery>
19. NASA. NASA [online]. [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/returntoflight/system/system\\_SRB.html](https://www.nasa.gov/returntoflight/system/system_SRB.html)
20. Arianespace [online]. ArianeGroup. [cit. 2017-5-20]. Dostupné z: <http://www.arianespace.com/press-releases/page/7/?taxonomy%5Bpress-release-category%5D=ariane-5>
21. Hermes. Astronautix. [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://www.astronautix.com/h/hermes.html>
22. Moore, Dennis. Phelps, Willie. Reusable Solid Rocket Motor - Accomplishments, Lessons, and a Culture of Success, American Institute of Aeronautics and Astronautics (PDF) [cit. 2017-5-20].

23. SHOTWELL, Gwynne. SpaceX [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: [cit. 2017-10-1]. Dostupné z: <http://www.spacex.com>
24. Sharp, Tim. [online]. [cit. 2017-10-9]. Dostupné z: <https://www.space.com/16769-spaceshipone-first-private-spacecraft.html>
25. Howell, Elizabeth. [online]. [cit. 2017-10-9]. Dostupné z: <https://www.space.com/19333-paul-allen.html>
26. kliper [online]. [cit. 2017-10-9]. Dostupné z: <http://www.buran-energia.com/kliper-clipper-shuttle/kliper-consti-elements.php>
27. NASA. SLS missions goals [online]. [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <https://www.nasaspaceflight.com/2017/04/nasa-goals-missions-sls-eyes-multi-step-mars/>
28. SPACEX gallery. SpaceX. [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://www.spacex.com/gallery>
29. FOUST, Jeff [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: [https://twitter.com/jeff\\_foust](https://twitter.com/jeff_foust)
30. MUSK, Elon Musk, Elon. SpaceX Hawthorne CA interview 2017. [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <https://twitter.com/elonmusk>
31. Bintoro, Agung. Telkom Bakal Lebih Hemat Berkat Roket SpaceX .Alex J. Sinaga. Telkom. CNNIndonesia. [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <https://www.cnnindonesia.com/teknologi/20170417152745-213-208098/telkom-bakal-lebih-hemat-berkat-roket-spacex/>
32. Musk, Elon. Interview with Elon Musk at MIT's Symposium. [online]. [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_JejJ6ccjY](https://www.youtube.com/watch?v=_JejJ6ccjY)
33. Spacenews. [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://spacenews.com/boeing-proposes-big-satellite-constellations-in-v-and-c-bands/>
34. Leosat. [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://leosat.com/>

- 
35. SPACEX. SpaceX. [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://www.spacex.com/>
36. NASASPACEFLIGHT. [online]. [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <https://www.nasaspaceflight.com/2016/02/spacex-prepares-ses-9-mission-dragons-return/>
37. MARTINEK, František. Z historie a současnosti kosmických raketoplánů. Valašské Meziříčí: Hvězdárna, 1997. ISBN 80-902445-2-1.
38. NASASPACEFLIGHT. [online]. [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: <https://www.nasaspaceflight.com/2016/09/blue-origin-new-glenn-orbital-lv/>
39. The Financial Times. [online]. [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: <https://www.ft.com/content/78d8b22e-1a39-11e7-bcac-6d03d067f81f>
40. New Glenn. BLUE ORIGIN [online]. [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: <https://www.blueorigin.com/new-glenn>
41. Energia. Wikipedia. [online]. [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Energia>
42. Energia. buranru. [online]. [cit. 2017-11-23]. Dostupné <http://www.buran.ru/htm/41-3.htm>
43. arstechnical. arstechnica.[online]. [cit. 2017-11-23]. <https://arstechnica.com/information-technology/2017/05/spacexs-falcon-9-rocket-will-launch-thousands-of-broadband-satellites/>
44. kliper. Astronautix. [online]. [cit. 2017-10-9]. Dostupné z: <http://www.astronautix.com/k/kliper.html>
45. Spaceflight101 [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://spaceflight101.com/spx/spacex-raptor/>
46. William Graham. Nasaspaceflight. [online]. [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <https://www.nasaspaceflight.com/2017/10/falcon-9-koreasat-5a-nasa-approves-flown-boosters/>

47. SPACEX CAPABILITIES & SERVICES. SpaceX. [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://www.spacex.com/about/capabilities>

48. Secretary of the Air Force Public Affairs. [online]. [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://www.afspc.af.mil/News/Article-Display/Article/1297016/air-force-preparing-to-launch-fifth-orbital-test-vehicle-mission/>

49. OneWeb. [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://www.oneweb.world>

50. Shotwell, Gwynne. Caleb Henry. SpaceX aims to follow a banner year with an even faster 2018 launch cadence. [online]. [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <http://spacenews.com/spacex-aims-to-follow-a-banner-year-with-an-even-faster-2018-launch-cadence>

---

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Evropský raketoplán Hermes [21] .....	13
Obrázek 2: rychlostní průběh letu prvního stupně [13] .....	20
Obrázek 3: průběh výšky letu, času a běhu motorů [13] .....	20
Obrázek 4: První stupeň rakety Falcon 9, po přistání na ASDS [28] .....	21
Obrázek 5: Kosmická loď Dragon, návrat z ISS, rok 2015 [28] .....	26
Obrázek 6: Loď Crew Dragon, pad abort test, 2015 [28] .....	26
Obrázek 7: X-37B Orbital Test Vehicle [48] .....	32
Obrázek 8: Raketoplán Dream Chaser [14] .....	33
Obrázek 9: Falcon 9 před startem, Vandenbergova letecká základna [28] .....	37
Obrázek 10: Start New Shepard booster, již jednou letěný stupeň, 2016 [18].....	39
Obrázek 11: Průběh letu New Glenn, přistání prvního stupně na lodi [40] .....	39
Obrázek 12: Kosmická loď Dragon, připojení ISS (pomocí Canadarm) [28] .....	42
Obrázek 13: Boeing CST100 Starliner [16].....	43
Obrázek 14: Loď Kliper [26] .....	44
Obrázek 15: Zachráněné první stupně Falcon 9, rok 2016 [28] .....	54