

Odhad nákladů na přepracování paliva pokročilých jaderných reaktorů

Bakalářská práce

Vedoucí práce:

Ing. Roman Dubový, MBA.

Ing. Evžen Losa

Brno 2016

Poděkování

Děkuji svým vedoucím bakalářské práce za to, že umožnili její vznik a Martinovi Marečkovi za poskytnutí některých podkladů, které byly použity při modelování.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci: **Odhad nákladů na přepracování paliva pokročilých jaderných reaktorů** vypracoval/a samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom/a, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmetná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne 21. května 2016

Abstract

The thesis is concerning with the cost estimation of the pyrochemical process for spent nuclear fuel reprocessing. This process may in future play important role during the advanced reactor technology deployment. In the text, the guidelines are mentioned, based on them the cost estimation was carried out. The cost was then compared with the prices of fuel reprocessing stated in the literature. The result of this pre-economy screening is that the technology could be feasible based on the assumption stated in the thesis and on results of other studies dealing with PUREX process.

Keywords

Nuclear fuel, reprocessing, fluoride volatility, pyrochemical reprocessing, costs, direct costing, direct analogy, cost modelling.

Abstrakt

Práce se zbývá odhadem nákladů pyrochemického přepracování vyhořelého jaderného paliva, které může v budoucnosti hrát důležitou roli při nasazování pokročilých jaderných reaktorů. V textu je zmíněna metodika, na základě níž byl proveden odhad nákladů a ty byly dále porovnány se světovými cenami přepracování. Výsledkem této studie je, že za daných předpokladů by byla tato metoda v průmyslovém měřítku konkurenceschopná nejpoužívanějšímu procesu s názvem PUREX.

Klíčová slova

Jaderné palivo, přepracování, nestálé fluoridy, pyrochemické přepracování, náklady, kalkulace neúplných nákladů, přímá analogie, modelování nákladů.

Obsah

1	Úvod a cíl práce	11
1.1	Úvod.....	11
1.2	Cíl práce.....	15
1.3	Metodika práce.....	15
2	Literární rešerše	17
2.1	Palivový cyklus.....	17
2.1.1	Přední část palivového cyklu.....	17
2.1.2	Zadní část palivového cyklu.....	17
2.2	Přepřacování jaderného paliva.....	18
2.2.1	Hydrometalurgická metoda PUREX.....	18
2.2.2	Metoda nestálých fluoridů [11].....	19
2.3	Definice nákladů.....	21
2.3.1	Klasifikace podle druhu nákladů.....	21
2.3.2	Klasifikace podle účelu nákladů.....	21
2.3.3	Klasifikace podle závislosti na změnách objemu výroby.....	22
2.3.4	Kalkulace nákladů.....	23
2.4	Metodika určení nákladů pro pokročilé jaderné systémy.....	24
2.4.1	Princip TOP-DOWN odhadů.....	24
2.5	Nejistoty v odhadech.....	28
3	Představení společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o.	29
4	Stanovení nákladů	30
4.1	Popis procesu přepřacování v lince FERDA-2.....	30
4.2	Odhad nákladů pro poloprovozní měřítko.....	32
4.2.1	Stanovení jednotkových nákladů a odhad vlivu nejistot.....	37
4.3	Extrapolace nákladů na průmyslové měřítko.....	41
4.3.1	Konzervativní odhad.....	41
4.3.2	Odhad nákladů na základě exponenciální metody.....	44

5	Diskuse výsledků	51
6	Závěr	53
7	Literatura	54
A	Číselník účtů	58
B	Hodnocení investic	60
B.1.	Metody hodnocení investic [12]	60
B.1.1.	Statické metody	60
B.1.2.	Dynamické metody	61
B.1.3.	Hodnocení investice – poloprovozní měřítko	62
B.1.4.	Hodnocení investice – průmyslové měřítko, konzerv. odhad.....	64
B.1.5.	Hodnocení investice – průmyslové měřítko, best estimate.....	66

Seznam obrázků

Obr. 1	Vývoj ceny uranové rudy. Zdroj: Webové stránky Uranium miner[3].	11
Obr. 2	Kumulovaného množství vyhořelého jaderného paliva podle scénáře 33 % přepracování. Zdroj: IAEA [6].	13
Obr. 3	Vývoj měrné aktivity štěpných produktů a aktinoidů ve vyhořelém jaderném palivu. Zdroj: Výzkumná zpráva Katedry jaderných reaktorů [7].	14
Obr. 4	Schéma procesu PUREX.	18
Obr. 5	Fotka poloprovozní linky FERDA. Zdroj: Uhlíř (2008) [11].	20
Obr. 6	Proces odhadování principem top-down pomocí metodiky [15]. Žlutá – data z příručky, hnědá – data referenčního projektu, zelená – data konceptu, modrá – výpočty konceptu.	27
Obr. 7	Normální rozdělení s parametry μ a σ . Autor Dan Kernler, zdroj: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/Empirical_Rule.PNG	28
Obr. 8	Schéma procesu nestálých fluoridů [11].	31
Obr. 9	Závislost nákladů na přepracování paliva na koeficientu využití linky FERDA2.	35
Obr. 10	Průběh nákladů na jednotku produkce v závislosti na velikosti režie.	36
Obr. 11	Procentuální zastoupení jednotlivých typů nákladů na úplných nákladech výkonu. 36	
Obr. 12	Průběh ceny konverze na UF ₆ . Source: The Ux Consulting Company, LLC, http://www.uxc.com	39
Obr. 13	Závislost nákladů na přepracování paliva na koeficientu využití průmyslového přepracování (konzervativní odhad).	43
Obr. 14	Průběh nákladů na jednotku produkce v závislosti na velikosti režie (konzervativní odhad).	43
Obr. 15	Průběh přímých investičních nákladů podniku v závislosti na velikosti fixní složky investic odhadnuté podle (23) a exponentu n.	45
Obr. 16	Průběh velikosti fixní složky investic v závislosti na exponentu n u projektu ALMR. 46	
Obr. 17	Závislost nákladů na přepracování paliva na koeficientu využití průmyslového přepracování (best estimate).	48
Obr. 18	Průběh nákladů na jednotku produkce v závislosti na velikosti režie (best estimate).	49

Seznam tabulek

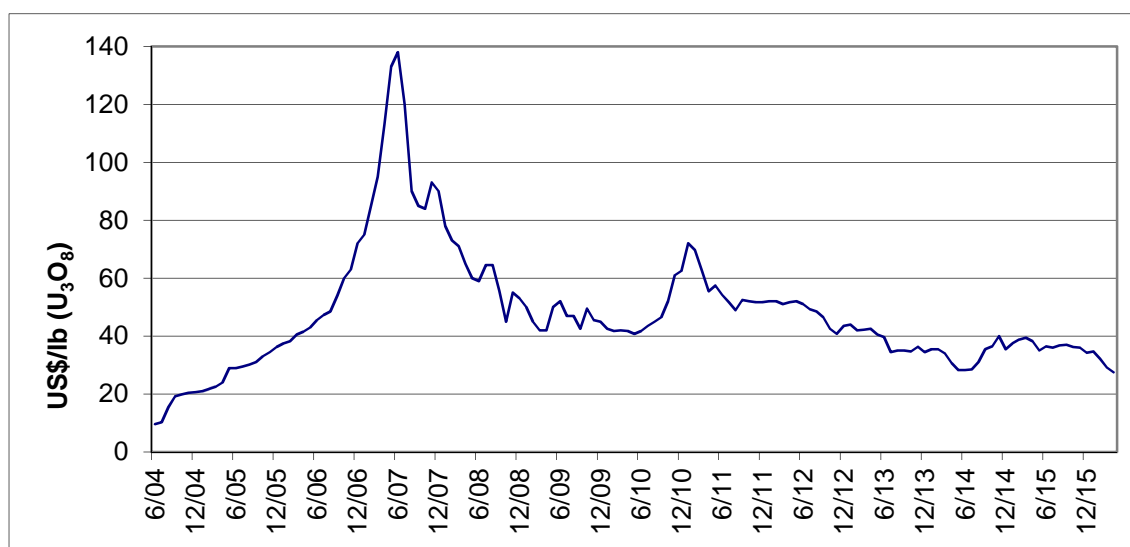
Tab. 1	Přehled zemí s energetickými reaktory v provozu, nebo ve výstavbě.	12
Tab. 2	Všeobecný kalkulační vzorec používaný v ČR.	22
Tab. 3	Přehled metod kalkulace.	23
Tab. 4	Metody pro TOP-DOWN odhady [15].	25
Tab. 5	Přehled exponentů pro vybrané podniky [15].	26
Tab. 6	Přehled nákladů na vybudování poloprovozu p ro přepracování v tis. Kč (poloprovoz).	34
Tab. 7	Příloha č. 4 nařízení vlády 564/2006. Podle této přílohy se řídí mzdy úředníků SÚJB.	37
Tab. 8	Přehled rozdělení celkových nepřímých investičních nákladů v tis Kč.	38
Tab. 9	Přehled celkových přímých investičních nákladů v tis Kč.	38
Tab. 10	Přehled celkových ročních přímých provozních nákladů v tis Kč.	40
Tab. 11	Přehled celkových ročních nepřímých provozních nákladů v tis Kč.	40
Tab. 12	Přehled nákladů na vybudování průmyslového přepracování v mil. Kč (konzervativní).	42
Tab. 13	Přehled nákladů včetně nejistot pro konzervativní odhad v mil Kč.	44
Tab. 14	Přehled nákladů na vybudování průmyslového přepracování v mil. Kč (best estimate).	47
Tab. 15	Přehled nákladů včetně nejistot pro best estimate odhad v mil Kč.	49
Tab. 16	Ekonomické modely pyrochemických závodů s kapacitami 20 a 200 tHM [20].	50
Tab. 17	Přehled výsledků odhadů nákladů.	51
Tab. 18	Přehled výsledků ze studií nákladů přepracování paliva [24].	51
Tab. 19	Globální ceny přepracování pro porovnání nákladů.	52
Tab. 20	Výpočet doby návratnosti investice, poloprovoz.	64
Tab. 21	Výpočet doby návratnosti investice, konzervativní odhad.	66
Tab. 22	Výpočet doby návratnosti investice, best estimate.	68

1 Úvod a cíl práce

1.1 Úvod

Přibližně 19 % celosvětové produkce elektřiny je dodáváno jadernými elektrárnami [1]. Dá se očekávat, že v budoucnosti tento podíl dále poroste, nehledě na současnou nízkou podporu veřejnosti a politiků v některých zemích. Tzv. jaderná renesance byla sice zpomalena historicky třetí významnou nehodou jaderného reaktoru, která se odehrála v březnu roku 2011 v elektrárně Fukushima Daiichi, ale hlavní důvody, které povedou ke zvýšení podílu produkce z těchto zdrojů, však nadále zůstávají. Patří sem snaha o snížení závislosti na fosilních palivech (geopolitické důvody), pokračování v úsilí rozvinutých zemí o snížení emisí oxidu uhličitého a často diskutované ekonomické důvody.

Rostoucí spotřeba jaderné energie přiměje mnoho zemí ke znovuotevření otázky týkající se přepracování použitého jaderného paliva. Doposud praktikovaná filosofie otevřeného palivového cyklu (open cycle, once through cycle) je z pohledu využití přírodních zdrojů neudržitelná, stejně tak jak tomu je i u elektráren využívající fosilní paliva. V současnosti je však cena uranové rudy na tak nízké úrovni, že možnost přepracování, jako ekonomicky životaschopná varianta řešení otázky vyhořelého jaderného paliva, nepřichází v úvahu. Nicméně, vývoj spotových cen na trhu s uranovou rudou vykázal několik píků (viz Obr. 1), které odpovídaly úrovni hranice rentability procesů uzavřeného palivového cyklu. Tyto je možno nalézt v harvardské studii z roku 2003 [2].



Obr. 1 Vývoj ceny uranové rudy.

Zdroj: Webové stránky Uranium miner[3].

Ve zmiňované studii jsou ale náklady odvozovány na základě využití standardního postupu přepracování paliva současných lehkovodních reaktorů (LWR),

který využívá hydrometalurgické metody. V budoucnosti, pokud má být výroba elektřiny z jádra udržitelná, vyvstane nutnost nasazení pokročilejší technologie pro přepracování. Stávající hydrometalurgické metody neumožňují přepracovávat palivo „ihned“ po vyvezení z reaktoru, protože silná radioaktivita způsobuje rozklad organických činidel použitých při těchto procesech. Na druhou stranu, pokud se s přepracováním čeká delší dobu, složení vyhořelého paliva se „kazí“ radioaktivní přeměnou využitelných izotopů na izotopy nevyužitelné, nebo využitelné hůře. Z tohoto hlediska je vhodné, když je vyhořelé palivo přepracováno a znovu použito v reaktoru co nejdříve po jeho vyvezení.

Ke dni 11. 5. 2016 bylo podle údajů na stránkách Evropské nukleární společnosti [4] na celém světě v provozu 442 jaderných reaktorů s celkovým čistým elektrickým výkonem přesahujícím 383 GW. Ke stejnému dni bylo ve výstavbě dalších 66 reaktorů s výkonem přes 65 GW (viz Tab. 1).

Tab. 1 Přehled zemí s energetickými reaktory v provozu, nebo ve výstavbě.

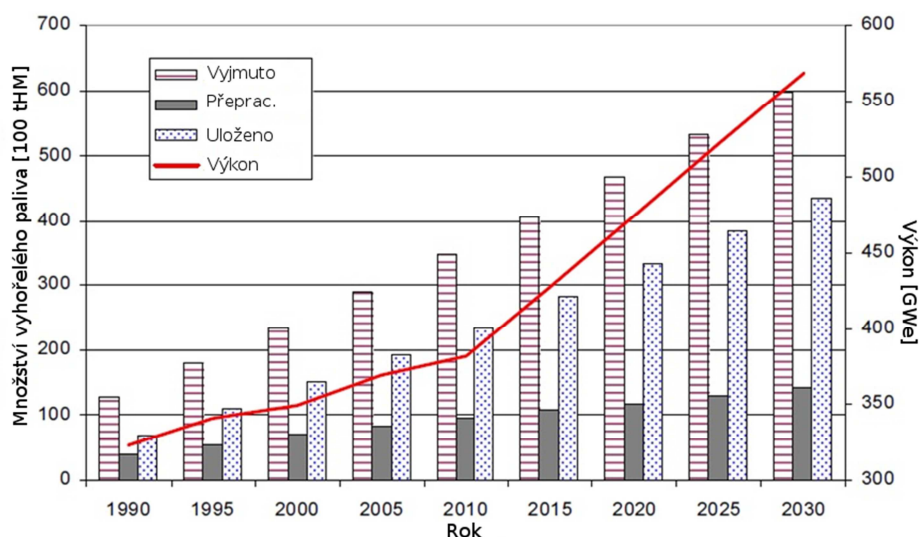
Země	V provozu		Ve výstavbě	
	Počet	Čistý el. výkon MW	Počet	Čistý el. výkon MW
Argentina	3	1 627	1	25
Arménie	1	375	-	-
Bělorusko	-	-	2	2 218
Belgie	7	5 913	-	-
Brazílie	2	1 884	1	1 245
Bulharsko	2	1 926	-	-
Kanada	19	13 500	-	-
Čína	31	26 635	24	24 128
Česká republika	6	3 904	-	-
Finsko	4	2 752	1	1 600
Francie	58	63 130	1	1 600
Německo	8	10 799	-	-
Maďarsko	4	1 889	-	-
Indie	21	5 308	6	3 907
Írán	1	915	-	-
Japonsko	43	40 290	2	2 650
Korea, Republic	25	23 117	3	4 020
Mexiko	2	1 440	-	-
Nizozemí	1	482	-	-
Pákistán	3	690	2	630
Rumunsko	2	1 300	-	-
Ruská federace	35	25 443	8	6 582
Slovenská republika	4	1 815	2	880
Slovinsko	1	688	-	-
Jižní Afrika	2	1 860	-	-
Španělsko	7	7 121	-	-

Země	V provozu		Ve výstavbě	
Švédsko	10	9 648	-	-
Švýcarsko	5	3 333	-	-
Ukrajina	15	13 107	2	1 900
Spojené arabské emiráty	-	-	4	5 380
Spojené království	15	8 883	-	-
Spojené státy americké	99	98 708	5	5 633
Celkem	442	383 513	66	65 028

Zdroj: Stránky Evropské nukleární společnosti [4].

Tyto reaktory každoročně vyprodukují ekvivalent přibližně 10 500 tun těžkých kovů vyhořelého jaderného paliva [5], se kterým je nutno dále nakládat. Podle strategie nakládání vyhořelým palivem říkáme, že palivový cyklus je buďto otevřený, nebo uzavřený.

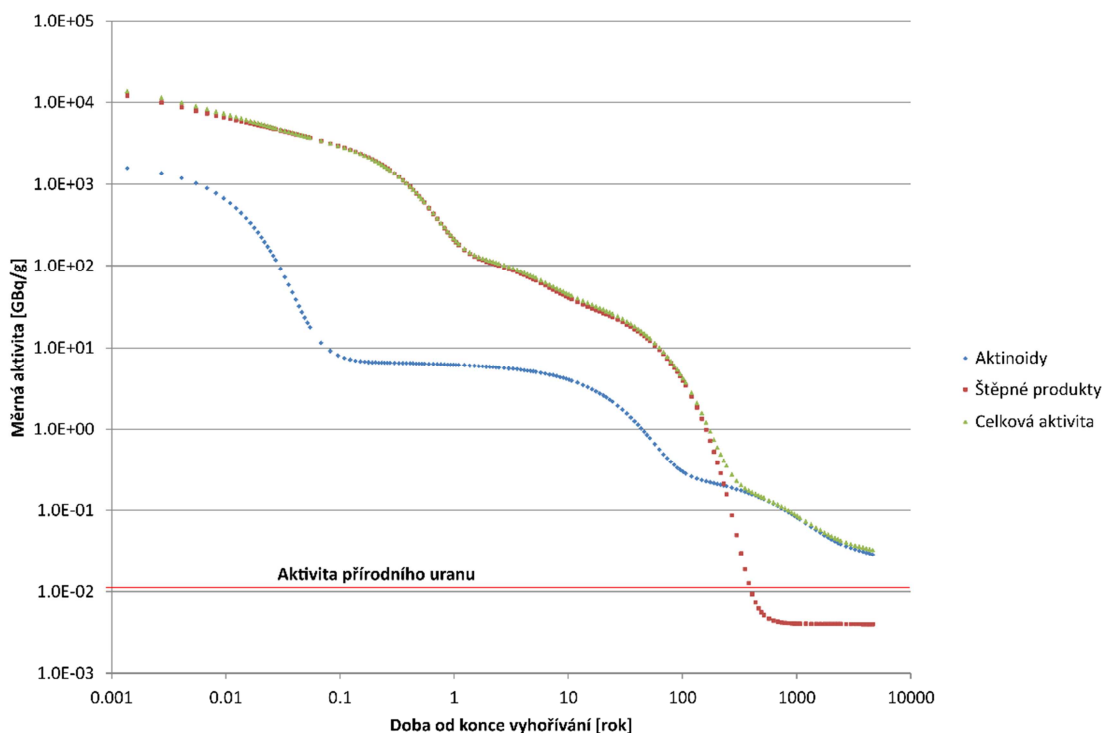
Při otevřeném palivovém cyklu se na vyhořelém palivu neprovádějí žádné další úpravy, které by vedly k jeho dalšímu využití, a po vyjmutí z reaktoru je prohlášeno za odpad. V uzavřeném palivovém cyklu se vyhořelé palivo naopak dále zpracovává a využitelné materiály jsou oddělovány od štěpných produktů, což vede k minimalizaci objemu vysoce aktivního odpadu. Již v počátcích byl jaderný průmysl koncipován pro uzavřený palivový cyklus s mnohonásobnou recyklací paliva.



Obr. 2 Kumulovaného množství vyhořelého jaderného paliva podle scénáře 33 % přepracování.
Zdroj: IAEA [6].

Se vzrůstajícím počtem jaderných elektráren, se zvýší i rychlost kumulace vyhořelého paliva. V současnosti představuje podíl přepracovaného paliva pouhých 33 % z veškerého použitého paliva vyjmutého z reaktorů. Predikce Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA), kde je uvažován scénář, ve kterém podíl přepracování paliva nebude kvůli vyšším nákladům růst, je znázorněn na Obr. 2.

Konkurenceschopnost procesu přepracování je však silně ovlivněna cenou přírodního uranu, která se v současnosti nachází na velice nízké úrovni. Další faktory, které by mohly přispět k upřednostnění přepracování paliva před jeho trvalým ukládáním, jsou obrovské nejistoty v nákladech na hlubinné úložiště a rychlost produkce vyhořelého jaderného paliva. Složení vysoce aktivního odpadu, který generuje teplo a je radiotoxický, má přímé dopady na parametry hlubinného úložiště. Vyhořelé palivo obsahuje tři typy radioaktivních izotopů. Jsou to aktivační produkty konstrukčních materiálů paliva, produkty štěpení jader paliva a aktinoidy. Vývoj aktivity štěpných produktů a minoritních aktinoidů je zobrazen v grafu na Obr. 3.



Obr. 3 Vývoj měrné aktivity štěpných produktů a aktinoidů ve vyhořelém jaderném palivu. Zdroj: Výzkumná zpráva Katedry jaderných reaktorů [7].

Obr. 3 ukazuje kumulativní aktivitu vyhořelého paliva a hlavní přispěvatele. Z grafu je zřejmé, že v době ihned po vyjmutí z reaktoru do přibližně 360 let od vyjmutí z reaktoru hrají nejdůležitější roli z hlediska aktivity štěpné produkty. Po této době jejich význam rychle klesá a celková aktivita paliva se řídí rozpadem minoritních aktinoidů s velmi dlouhým poločasem. Právě minoritní aktinoidy způso-

bují dlouhodobou radiotoxicitu vyhořelého paliva, která klesne na úroveň přírodního pozadí až po několika desetitisíciletích. Jejich separace a „zneškodnění“ v jaderných reaktorech je tedy pro budoucnost zásadním tématem.

V delším časovém období, mimo ekonomiky, hrají ve volbě strategie nakládání s vyhořelým palivem roli také jiné faktory, definované několika mezinárodními iniciativami (GIF, GNEP, INPRO). Mezi tyto faktory patří zejména odolnost proti proliferaci jaderných materiálů a položek dvojího užití, dopady na životní prostředí a na jadernou bezpečnost. Metoda, která by umožnila snížit náklady na přepracování paliva tak, aby jaderná energetika zůstala konkurenceschopná i s využitím uzavřeného palivového cyklu, se neustále hledá. Jednou z nich by mohla být i Metoda nestálých fluoridů, která je známa již dlouhá desetiletí, avšak kvůli své komplexnosti neměla možnost se prosadit.

1.2 Cíl práce

Cílem práce je stanovit náklady přepracování paliva metodou založenou na nestabilních fluoridech (Fluoride volatility method), která zatím jako jediná teoreticky umožňuje přepracování jaderného paliva ihned po vyvezení z jaderného reaktoru, anebo dokonce on-line přepracování v případě velmi pokročilých reaktorů s tekutými palivy.

1.3 Metodika práce

V dosavadních studiích byla teoreticky i prakticky zkoumána pouze technologická proveditelnost separace požadovaných látek od štěpných produktů metodou kapalinové extrakce do organických činidel PUREX. Aby bylo možno novou metodu založenou na nestálých fluoridech uvést na trh, je nutné, aby byla konkurenceschopná v porovnání s ostatními procesy. V této práci je provedeno dvojestupňové stanovení variabilních nákladů a odhad fixních nákladů pro implementaci fluoridové metody. V prvním stupni jsou odhadnuty náklady na proces v laboratorním měřítku. K tomuto účelu vystačí metodika pro stanovení nákladů u běžných podniků, jakou popisuje např. Synek a Kislíngrová [8]. Vzhledem k tomu, že proces zatím neběží ani v experimentálním měřítku s laboratorním množstvím vstupních látek je nutno údaje o nákladech brát jako projektové náklady odhadnuté na základě nejlepší praxe (tzv. best estimate). Odhad v laboratorním, či v dokumentu též nazývaným poloprovodním měřítkem, byl získán při vypočtení maximální teoreticky dosažitelné kapacity linky. Je zřejmé, že projekt linky s takovým provozem nepočítal, avšak pomocí tohoto předpokladu jsou získána data pro další analýzu.

Údaje z laboratorního měřítka je poté možno využít ve druhém stupni jako podklad pro extrapolaci do průmyslového měřítka, přičemž k odhadu nákladů je použita metodika, kterou navrhla pracovní skupina pro ekonomické modelování pod mezinárodní organizací GEN IV International Forum. Při stanovení nákladů jsou použity prvky přímé analogie i modelování se všemi jejich výhodami i nedostatkami.

Protože se jedná o koncepční projekt, je celá investice dále nad rámec zadání jednoduše zhodnocena jak pomocí statických, tak i dynamických metod k posouzení životaschopnosti takovéto investice. Veškerá teorie, popisující použité metody je uvedena v podkapitolách druhé kapitoly této práce. Popsané metody jsou potom aplikovány na získaná data (rešerše + best estimate pomocí přímé analogie) ve čtvrté kapitole. Získané výsledky jsou pak porovnány mezi sebou vzájemně, tak i s výsledky z jiných studií, zabývajících se jinou metodou přepracování paliva (PUREX). Shrnutí práce je obsaženo v páté kapitole a rychlé hodnocení efektivity investic je provedeno v příloze B.

2 Literární rešerše

Literární rešerše obsahuje stručný úvod do problematiky palivového cyklu jaderných elektráren, dále pak popis technologií ve druhé podkapitole, definice pojmů a použitých metod ke stanovení nákladů a hodnocení investice v dalších podkapitolách.

2.1 Palivový cyklus

Cyklus života jaderného paliva popisuje jeho cestu z útrob země do jaderného reaktoru (přední část) a zpět do země, kam se ukládá poté, co posloužilo svému účelu (zadní část). Důležité milníky v palivovém cyklu jsou výroba čerstvého paliva, ozáření čerstvého paliva v reaktoru a trvalé uložení paliva nebo jeho zbytků. Podle toho, jak se s jaderným palivem po vyvezení z reaktoru zachází, můžeme palivový cyklus rozdělit na uzavřený a otevřený. Otevřený palivový cyklus je charakterizován tím, že po využití paliva v reaktoru nedochází k jeho dalšímu zpracování a využití a materiál se tudíž stane odpadem se všemi důsledky, které toto rozhodnutí nese. Protikladem je uzavřený palivový cyklus. V tomto případě se použité jaderné palivo dále zpracovává pomocí procesů, které umožňují separaci využitelných prvků a snížení množství vysoce aktivního odpadu. Odpadem jsou v tomto případě pouze štěpné produkty a ztráty z přepracovacích procesů. Životní cyklus paliva je možné rozdělit na dobu před ozáření v jaderném reaktoru a dobu po ozáření v jaderném reaktoru.

2.1.1 Přední část palivového cyklu

Procesy, které jsou vykonávány v přední části palivového cyklu, popisují cestu uranu ze zemské kůry do reaktoru. Přední část palivového cyklu zahrnuje geologické průzkumy, těžbu, mletí a rafinaci rudy, konverzi oxidů uranu na fluorid uranový (UF_6), obohacování a výrobu jaderného paliva.

2.1.2 Zadní část palivového cyklu

Poté, co dojde k ozáření paliva v reaktoru, je vyvezeno do bazénu chlazení, kde zůstává přibližně po dobu pěti let. Za tu dobu se rozpadnou izotopy s nejvyšší aktivitou a s palivem je možné dále nakládat a skladovat ho v dočasném skladu, který se ve většině případů nachází při každé jaderné elektrárně. V této chvíli může být postupováno dvěma cestami. V případě, uzavřeného palivového cyklu jde použité jaderné palivo do přepracovacího závodu, v případě otevřeného palivového cyklu je skladováno v transportních kontejnerech do doby, než dojde k jeho trvalému uložení.

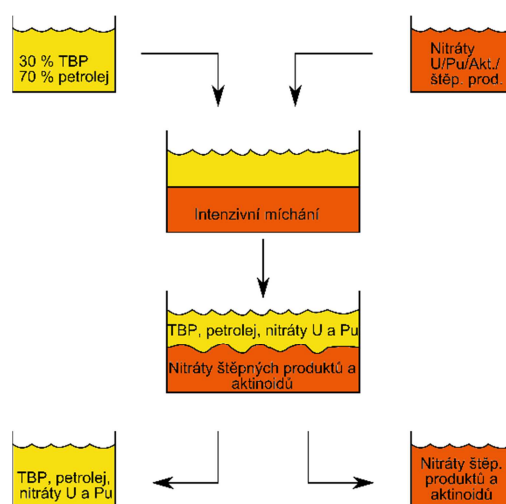
Tato práce se zabývá konceptem ekonomického hodnocení procesu přepracování paliva, což je jeden z procesů uzavřeného palivového cyklu. Uzavřený palivový cyklus je strategie, která z jaderné energetiky dělá energetiku udržitelnou, proto pokud tato energetika má fungovat i v budoucnu, je nutné se touto cestou vydat.

2.2 Přepracování jaderného paliva

První přepracování použitého jaderného paliva bylo provedeno již ve čtyřicátých letech minulého století během programu Manhattan, jehož účelem byl vývoj jaderné zbraně. Od té doby bylo vyvinuto mnoho způsobů, jakým lze proces provádět, ale v průmyslovém měřítku se uchytil pouze jeden, který je založený na hydrometalurgických metodách a nese název PUREX. V současnosti je používán ve Francii, Japonsku, Rusku, Spojeném Království a USA.

2.2.1 Hydrometalurgická metoda PUREX

Metoda PUREX je v současnosti nejlépe vyvinutý proces na přepracování vyhořelého jaderného paliva. Vstupem tohoto procesu je vyhořelé jaderné palivo vyvezené z jaderného reaktoru a výstupem uran, plutonium a odpad, který je složen ze štěpných produktů a minoritních aktinoidů. Dlouholeté zkušenosti přispívají k rostoucí efektivnosti této technologie, která vede k menším množstvím recyklovaných materiálů (U, Pu) v odpadu a tím k podstatnému snížení jeho objemu [9].



Obr. 4 Schéma procesu PUREX.

Na začátku procesu se palivové soubory nařežou na malé kousky a vloží do roztoku kyseliny dusičné, aby se vyloužilo keramické palivo z jeho kovového pokrytí. Výsledné dusičné soli jdou do série procesů založených na extrakci do organických sloučenin, kde jsou smíchány se směsí tributyl-fosfátu (TBP) a petroleje, která absorbuje soli uranu a plutonia. Zbytek se štěpnými produkty zůstává v anorganické fázi [10]. Jednoduché schéma tohoto procesu je ukázáno na Obr. 4.

V následujících krocích jsou od sebe oddělovány uran a plutonium, které se dále převádějí na pevné látky, aby z nich mohlo být vyrobeno nové palivo. V současné době jsou minoritní aktinoidy společně se štěpnými produkty imobilizovány do borsilikátové skelné matrice procesem nazývaným vitrifikace. Za účelem snížení dlouhodobé radioaktivity jsou vyvíjeny pokročilejší způsoby, které umožní separaci minoritních aktinoidů a jejich recyklaci v jaderných reaktorech.

Kvůli zabránění proliferace jaderných materiálů jsou vyvíjeny procesy, které zne-
možní separaci čistého plutonia a zvýší tak přijatelnost přepracování.

2.2.2 Metoda nestálých fluoridů [11]

Tato pyrochemická metoda, vyzkoušená již v padesátých letech minulého století, je vhodná jak pro oxidická paliva, která používají současné lehkovodní reaktory, tak i pro paliva budoucích reaktorů, založených na karbidech, či nitridech. Značnou výhodou procesu s nestálými fluoridy je možnost přepracovávat tzv. horká paliva, to znamená paliva, která nemusejí podstupovat zvláště dlouhou dobu chlazení po vyvezení z jaderného reaktoru. Je to umožněno tím, že se v procesu nevyužívá žádná látka, která by podléhala degradaci, či radiolýze vlivem silné zbytkové radioaktivity vyhořelého paliva.

Přepracování pomocí nestálých fluoridů se zdá být jednodušší než hydrometallurgické metody, protože je založeno na procesech podobných destilaci. Požadované prvky (U, Pu, Np) tvoří nestálé hexafluoridy, které kondenzují v kondenzátorech. Většina ostatních produktů v palivu tvoří stálé fluoridy, které je možno relativně snadno separovat. Přepracování touto technologií spočívá v následujících krocích [11]:

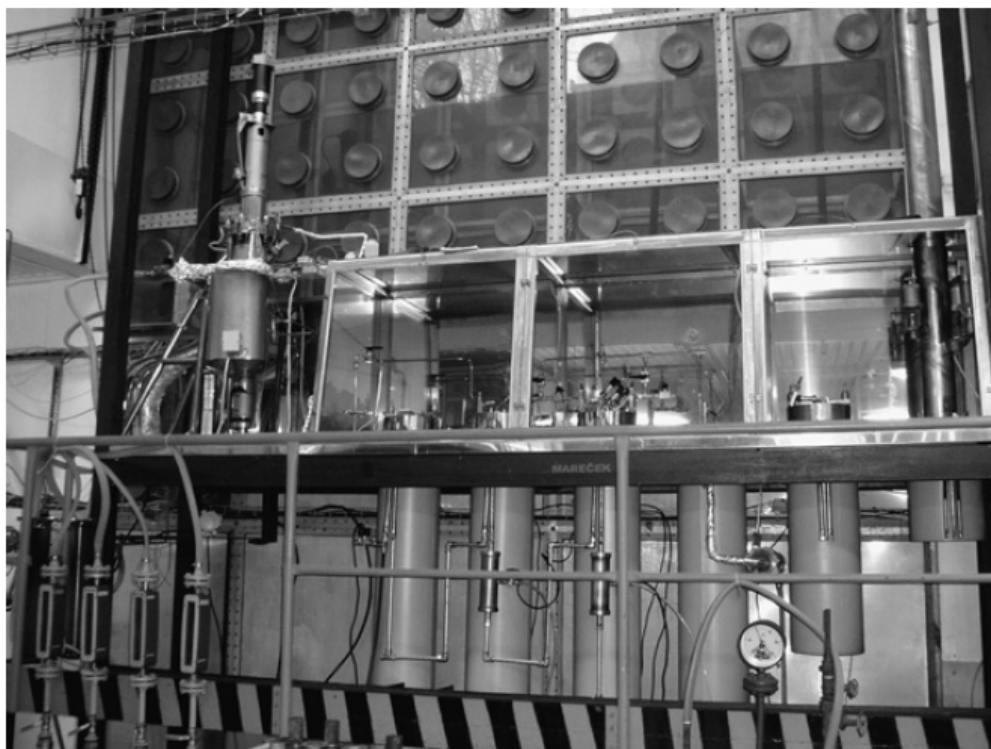
1. *„Odstranění kovového povrchu vyhořelého paliva tavením.*
2. *Rozemletí palivové matrice na prášek.*
3. *Fluorace prášku (umožní separaci uranu, plutonia, minoritních aktinoidů a většiny štěpných produktů).*
4. *Purifikace získaných produktů.“*

Fluorace samotná probíhá v plamenném reaktoru, kde reaguje prášek, získaný namletím jaderného paliva, s plynným fluorem. Reakce mezi fluorem a oxidickými sloučeninami je silně exotermická a proto se fluorace po zapálení sama udržuje. Plamen reaktoru může dosahovat teploty až 1500 °C, a proto je nutné reaktor dobře chladit. Nestálé fluoridy, které obsahují uran a plutonium opouštějí reaktor a stálé fluoridy štěpných produktů zůstávají ve formě popela na spodu plamenného reaktoru.

Na vývoji této metody pro uvedení do průmyslového měřítko se pracovalo i ve výzkumné organizaci Centrum Výzkumu Řež, s.r.o. (dále jen CVŘ), která v roce 2013 převzala laboratorní vybavení a vědecký tým od společnosti ÚJV Řež, a.s. CVŘ v prosinci roku 2011 získala projekt s názvem SUSEN (SUStainable ENergy) financovaný z prostředků Evropské Komise, který je zaměřen na vybudování výzkumné infrastruktury pro zvýšení vědeckého a výzkumného potenciálu České republiky v oblasti aplikovaného výzkumu v energetice.

Experimentální linka pro testování procesu na neaktivních látkách (přírodní, nebo ochuzený uran, který nebyl ozářen v jaderném reaktoru), kterou vlastní sekce JPC nese název FERDA. Hlavními komponentami zařízení jsou plamenný fluorátor, kondenzátory a kolony na čištění pomocí sorpce a destilace. Fotografie linky je uvedena na Obr. 5. Nádoba na levé straně fotografie je plamenný reaktor, ve kte-

rém dochází k fluoraci, plynné hexafluoridy jsou dále odváděny do čtyř kondenzátorů, umístěných napravo od fluorátoru. V kondenzátorech se z plynných fluoridů stávají pevné látky. Poslední dva válce jsou destilační a sorpční kolony, kde probíhá čištění produktu.



Obr. 5 Fotka poloprovozní linky FERDA.
Zdroj: Uhlíř (2008) [11].

Historie vývoje linky sahá do osmdesátých let minulého století, kdy dřívější Ústav Jaderného výzkumu spolupracoval se sovětským Výzkumným ústavem jaderných reaktorů na technologii přepracování jaderných paliv používaných v rychlých jaderných reaktorech. Výzkumný projekt byl nazván FREGAT-2 a čeští výzkumníci přispěli vývojem a konstrukcí některých technologických celků použitých pro výzkum přepracování aktivovaného paliva v horkých komorách.

Projekt byl naneštěstí přerušen kvůli snížení výdajů Sovětů do této výzkumné oblasti, a proto nebyla provedena kompletní verifikace všech částí linky. Po neočekávaném konci výzkumu byly části linky ve vlastnictví Ústavu jaderného výzkumu Řež převezeny zpět do České republiky, kde proběhla jejich rekonstrukce a drobné změny. Během let pak byla na lince provedena řada experimentů, avšak pouze s neaktivními materiály.

Výzkum byl orientován na vývoj schémat pokročilého přepracování (včetně takzvaného „on-line“ přepracování pro reaktory s kapalným palivem), instrumentace a řídicích systémů, verifikaci procesů a materiálové vědy. V současnosti je výzkumný program linky z podstatné části završen, a proto by bylo vhodné přejít do

druhé fáze vývoje, která zahrnuje experimenty s aktivními materiály. Tento typ experimentů se měl provádět v projektu FERDA-2, kde měla být použita zdokonalená linka, avšak s menším materiálovým průtokem. Linka měla být umístěna v horké komoře, a mělo být testováno dálkové řízení a dávkové zpracování materiálů. Předpokládaný začátek provozu linky byl plánován na konec roku 2015.

2.3 Definice nákladů

Problematikou nákladů se ve svých publikacích zabývá množství tuzemských i zahraničních autorů. Obecné informace o struktuře a řízení nákladů uvádí Synek [8], či Kislingerová [12], metody kalkulace nákladů jsou lépe rozebrány v [13], do větších podrobností ve vztahu k investičním celkům jde Roušar [14]. Pro posuzování nových technologií existují standardy a příručky, které mohou sloužit k odhadu nákladů dosud neprovedených projektů a vzájemně je porovnávat [15]. Tato kapitola je zpracována s využitím všech zmíněných zdrojů.

Maximalizace **zisku** při přijatelném riziku je podle teorie podniku cílem existence podniku. Zisk definuje např. Synek [8], na str. 46, jako přebytek **výnosů** nad **náklady**. Rizikem podnikání lze nazvat souhrn všech faktorů, které ovlivňují dosažení zadaného cíle.

Náklady podniku vznikají při spotřebě výrobních faktorů a jsou peněžním vyjádřením této spotřeby, výnosy, naproti tomu vyjadřují ocenění výsledků činnosti podniku [8]. K maximalizaci zisku dochází, pokud náklady dosahují optimální úrovně, jejich řízení je proto umožněno podrobnější klasifikací.

2.3.1 Klasifikace podle druhu nákladů

Druhy nákladů závisí na oblasti působnosti podniku a jsou vždy shrnuty na podnikovém výkazu zisku a ztrát, který umožňuje jejich sloučení do několika základních skupin (nákladových druhů):

- spotřeba materiálu, energie a externích služeb (nebo též provozní náklady [13]),
- osobní náklady,
- odpisy hmotného a nehmotného dlouhodobého majetku,
- finanční náklady.

2.3.2 Klasifikace podle účelu nákladů

Tato klasifikace závisí na velikosti podniku. Větší podnik je možné rozdělit na několik menších nákladových jednotek (středisek) a u těch potom náklady sledovat podle jejich výkonů. Každé středisko, resp. firma, generuje dvě skupiny nákladů, které je možné rozdělit na přímé a nepřímé podle toho, jestli je možné je přiřadit přímo produktu, nebo jsou vynakládány společně k zajištění chodu jednotky. Nepřímé náklady se také nazývají režijními náklady a do ceny produktu se zahrnou

pomocí různých přírážek. Přehled o nákladech na kalkulační jednici je dán všeobecným kalkulačním vzorcem a nazývá se kalkulací nákladů (viz Tab. 2).

Tab. 2 Všeobecný kalkulační vzorec používaný v ČR.

1.	Přímý materiál
2.	Přímé mzdy
3.	Ostatní přímé mzdy
4.	Výrobní (provozní) režie
Vlastní náklady výroby (1+2+3+4)	
5.	Správní režie
Vlastní náklady výkonu (1+2+3+4+5)	
6.	Odbytové náklady
Úplné vlastní náklady výkonu (1+2+3+4+5+6)	
7.	Zisk (ztráta)
Prodejní cena (1+2+3+4+5+6+7)	

Zdroj: Synek 2010, [8]

2.3.3 Klasifikace podle závislosti na změnách objemu výroby

V závislostech na změnách objemu výroby lze v krátkodobém hledisku náklady rozdělit na variabilní a fixní. Variabilní náklady se mění s objemem výroby, fixní zůstávají při různých objemech stejné (pokud nedochází ke změnám výrobní kapacity závodu). Průběh nákladů v závislosti na objemu produkce lze vyjádřit pomocí nákladových funkcí. Variabilní náklady se mohou s růstem objemu produkce vyvíjet třemi způsoby:

- proporcionalně – náklady rostou lineárně s růstem objemu produkce,
- nadproporcionalně – růst nákladů je rychlejší, než růst produkce,
- podproporcionalně – náklady rostou pomaleji, než produkce.

Zmíněné typy klasifikací ukazují základní rozdíly mezi pojmy nákladů a jejich rozdělení do skupin. Při zavádění výroby je nutno jednorázově vynaložit jisté náklady ještě ve fázi před samotnou konstrukcí (nákup pozemků, povolení, atd.) a

dále potom během výstavby. Tyto náklady se označují jako investiční kapitálové a v produkci budou mít charakter fixních nákladů. V projektu je lze rozdělit na [14]:

- přímé – náklady na vše, co se stane trvalou součástí zařízení a budov (včetně nákladů na projektování)
- nepřímé – všechny ostatní náklady (náklady na řízení projektu, spouštění, pojištění, atd.)

Provozem zařízení vznikají provozní náklady, které se platí průběžně. Opět je lze rozdělit na přímé a nepřímé [14]:

- přímé – úměrné množství produkce,
- nepřímé – jejich velikost nezávisí na množství produkce.

2.3.4 Kalkulace nákladů

Význam kalkulací spočívá ve sledování nákladů z věcného hlediska, umožňují také stanovování vnitropodnikových cen, sestavování rozpočtů, nebo kontrole hospodárnosti a rentability výkonů. [13]. Ke kalkulacím ceny se využívá všeobecný kalkulacní vzorec, který je uvedený v Tab. 2. Ten je vhodný zejména v těch případech, kdy cenu neurčí přímo trh, nýbrž je určena podle schématu náklady + zisk = cena. Tento přístup je často používán v zakázkové výrobě nebo projekční činnosti. Kalkulace nákladů je naproti tomu vnitřní informací podniku [13].

Tab. 3 Přehled metod kalkule.

Metoda	Obor využití
Kalkulace dělením	Hromadná produkce identických výrobků, nebo produktů, které se liší pouze velikostí, tvarem, hmotností atd.
Kalkulace přírážkové	Hromadná výroba různých produktů.
Kalkulace ve sdružené výrobě	Výroba různých (mezi)produktů při jednom procesu.
Metoda Activity Based Costing (ABC)	Rozvržení režijních nákladů podle skutečné příčinnosti jejich vzniku.
Target costing	Globální trh určí cenu a z ní jsou odvozeny přípustné náklady.

Zdroj: Synek 2011, [13].

Kalkulace nákladů může být provedena pomocí různých metod, které jsou vhodné pro různé typy výrob. Tyto metody jsou shrnuty v Tab. 3. V následujících kapitolách budou navíc ještě použity následující pojmy a zkratky [15]:

- Celkové kapitálové investiční náklady (Total Capital Investment Cost – TCIC): Zahrnují všechny kapitálové náklady.
- Kontingence (Contingency): Nahodilosti, které zvyšují nejistotu v odhadech nákladů. Kontingence nezahrnuje vlivy způsobené vnějšími faktory, jako jsou změny legislativy, významné změny v projektu, včetně jeho rozsahu, katastrofické události (vyšší moc), stávky, extrémní vlivy počasí a limity ve financování projektu.
- Overnight cost: Tyto náklady tvoří náklady na výstavbu společně se zahrnutím kontingence. V těchto nákladech není zahrnuta časová hodnota peněz a vyjadřují tedy stav, kdy by investice byla realizována „přes noc“.
- BOTTOM-UP přístup: odhad nákladů založený na detailním návrhu a informacích o cenách.
- TOP-DOWN přístup: odhad nákladů odvozený podle referenčního modelu závodu a nikoliv z detailního návrhu a údajů o nákladech

2.4 Metodika určení nákladů pro pokročilé jaderné systémy

Metodika pro stanovení nákladů byla převzata z dokumentu [15], a je postavena na souboru předpokladů a doporučení daných tímto dokumentem. Jako výchozí bod slouží náklady na vybudování linky pracující v laboratorním měřítku, které jsou dány projektem. Dále je aplikován předpoklad maximálního teoretického vytížení linky, na základě kterého jsou odhadnuty variabilní náklady na přepracovací proces.

Pro extrapolaci fixních nákladů na průmyslové měřítko je použit přístup TOP-DOWN, který vyhovuje požadavkům na odhad zavedení nových technologií ve stadiu vývoje. Aby bylo možné srovnávat různé technologie, musí být náklady rozděleny podle unifikovaného systému účtů (Code Of Accounts – COA, viz příloha A), obsahujícího různé typy nákladů. Ještě po dobu několika let bude projekt přepracování paliva v ČR, založeném na nestálých fluoridech pouze ve fázi koncepčního návrhu, který bude postrádat údaje nutné k detailní analýze BOTTOM-UP.

2.4.1 Princip TOP-DOWN odhadů

Tato podkapitola byla zpracována jako kompilát 5. kapitoly v příručce [15]. Ve fázi předběžných návrhů i těch nejpokročilejších technologií postačuje, pokud jsou náklady stanoveny nejjednodušším a nejrychlejším možným způsobem. Výsledky je v různých stádiích projektu možné dále zpřesňovat s tím, jak rostou podrobnosti, do kterých je rozpracován. Při projektování nového konceptu je jasný obecný přehled koncipovaného systému a jeho možných odchylek, avšak konstrukční náklady

nejsou předem známé. Aby bylo možno tyto náklady vyčíslit, je potřeba koncept rozdělit do několika nákladových modulů a najít nejvhodnější metodu odhadu nákladů v jednotlivých modulech. Každý nákladový modul reprezentuje skupinu nákladových položek se stejnými vlastnostmi. Každý modul by měl být rozpracován minimálně do úrovně druhé cifry na struktuře COA.

V petrochemickém průmyslu jsou v raných stádiích projektu náklady modelovány na základě znalosti nutného vybavení pro plánované procesy. Následně se aplikují hrubé objemové faktory pro toky vstupních látek a produktů. Obdobně lze posupovat v raných stádiích projektů pokročilých jaderných zařízení, kde objemové faktory mohou být převzaty jak z existujících závodů, pokud existují, tak i z jiných detailněji zpracovaných nerealizovaných projektů. Náklady na běžné komodity, jako jsou například trubky, beton, elektrotechnika a instrumentace mohou být vyjádřeny jako násobky nákladů na procesní vybavení.

Jak bylo zmíněno, při projektování nových konceptů je obecně znám funkční rámec systému a jeho možné odchylky, avšak nákladová data jsou značně limitovaná. Za účelem zhodnocení nákladů je nutné, aby při projektování byly učiněny následující kroky:

1. rozložení konceptu do několika nákladových modulů,
2. identifikace nejvhodnějších metod k odhadu nákladů každé jednotky v daném nákladovém modulu.

Metodou odhadu nákladů v jednotlivých modulech může být buď přímá analogie, nebo modelování. Přímá analogie se používá tam, kde je dostatek dat o nákladech (potrubí, turbíny, nádoby, atd.), kdežto modelování tam, kde pro přímou analogii data neexistují.

Tab. 4 Metody pro TOP-DOWN odhady [15].

Charakteristika	Přímá analogie	Modelování
Princip	Integrace nákladového prvku do stejnorodé skupiny	Zjištění rozdílů mezi zadaným prvkem a referencí, konstrukce modelu, který napodobuje chování nákladového prvku
Výhody	Rychlá, nízkonákladová transparentní a důvěryhodná metoda pro porovnání stejnorodých zařízení	Rychlá a flexibilní metoda
Nevýhody	Náročná na data, nedostatečná, pokud se vyžaduje vyšší přesnost	Náklady odhadnuté tímto způsobem nejsou transparentní, vyžaduje zkušenosti

Pro účely modelování nákladů pokročilých technologií pro jaderné reaktory budoucí generace jsou nejvhodnější exponenciální metody, avšak lze použít i faktorové metody, založené na poměrech nákladů na vybavení. S využitím exponenciální metody lze náklady na projektované vybavení vypočítat pomocí vztahu:

$$C = A + (B \cdot P^n) \quad (1)$$

Kde

C...náklady na část odhadovaného vybavení

A...fixní komponenta nákladů referenčního vybavení

B...variabilní komponenta nákladů referenčního vybavení

P...poměr sledovaného parametru v projektovaném zařízení k parametru v projektovaném zařízení

n...exponent, který reflektuje úspory z rozsahu

Tab. 5 Přehled exponentů pro vybrané podniky [15].

Typ továrny	Nákladový exponent
Chemické továrny	
Produkce acetonu	0,45
Produkce ethylenu	0,83
Rafinerie	
Destilační závod	0,49
Rafinerie	0,81

Pro budovy existují vzorce k odhadu stavebních nákladů na základě znalosti 1m^3 spotřebovaného betonu, nebo obestavěného 1m^3 prostoru. Náklady na vybavení je možné spočítat na základě poměrů ve srovnání s existujícími zařízeními.

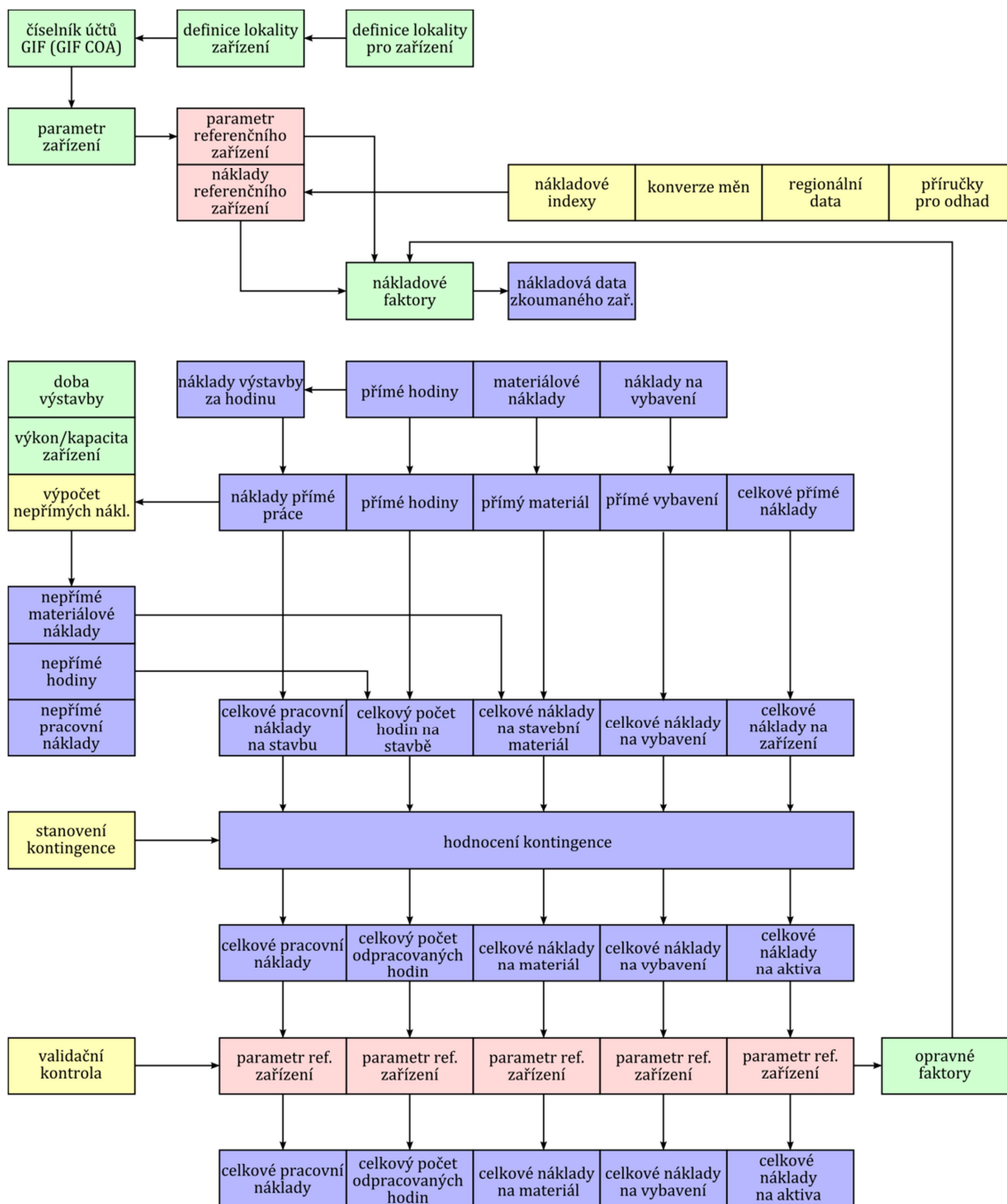
Pro vývoj nákladového modelu jaderně energetického systému je zapotřebí znát minimálně následující informace:

1. Popis procesu a provozní podmínky (energetické a hmotnostní toky).
2. Schémata významných komponent a hlavních systémů a jejich prostorové uspořádání.
3. Typy a hlavní rozměry a objemy budov.

Náklady na vybavení mohou být odvozeny ze známých nákladů podobného vybavení na základě poměrů známých parametrů jako je výkon, kapacita nebo hmotnost. Z poměrů parametrů se odvodí faktory v exponentu, který je potom použit v rovnici podobné rovnici (1). Identifikované rozdíly je možné korigovat na základě odborného odhadu. Obvyklým způsobem stanovení nepřímých nákladů bývá jejich odhad procentem přímých nákladů.

Schéma na Obr. 6 zobrazuje datové toky v ekonomickém modelu, vytvořeném skupinou pro ekonomické modelování pokročilých systémů [15]. Jako data referenčního modelu poslouží data z projektu linky FERDA 2, která měla pracovat

v laboratorním měřítku. Daty konceptu se potom rozumí data extrapolovaná na průmyslové měřítko.



Obr. 6 Proces odhadování principem top-down pomocí metodiky [15]. Žlutá – data z příručky, hnědá – data referenčního projektu, zelená – data konceptu, modrá – výpočty konceptu.

2.5 Nejistoty v odhadech

Při odhadech nákladů je pracováno s nejistými nebo odhadnutými čísly, a proto je vhodné odhadnout na základě racionálních předpokladů také nejistoty v těchto odhadech. Nejistotou v odhadech je míněna míra pochybností o provedeném odhadu, které jsou do něj zaneseny neznámými, nebo nepředpokládatelnými okolnostmi. Tyto pochybnosti se v různých ekonomických modelech označují jako kontingence, a stanovují se na základě praxe projekčního týmu.

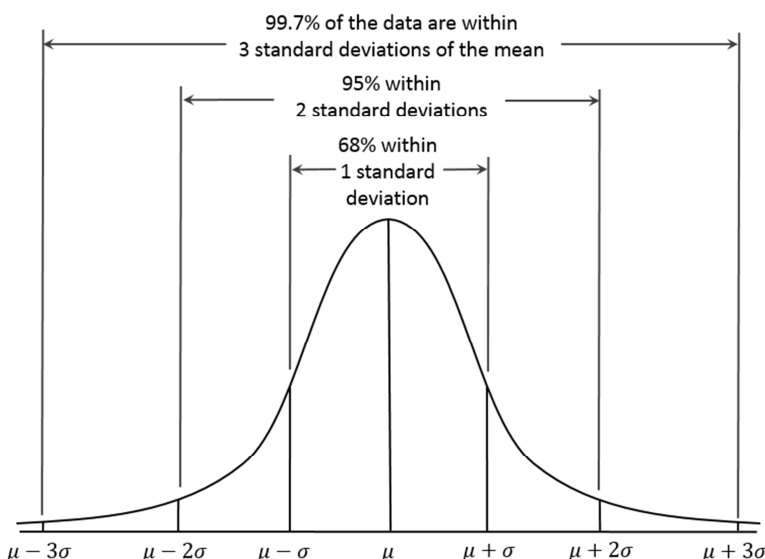
V této práci jsou nejistoty odhadnuty pro každou položku nákladů a zkombinovány do celkové nejistoty pomocí používaného vzorce [16]:

$$u_c = \sqrt{a^2 + b^2 + \dots} \quad (2)$$

Vzorec je ovšem platný pouze pokud jsou jednotlivé nejistoty nezávislé (neko-relované). Dále je při odhadech nejistot počítáno s jejich normálním rozdělením. Hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny x s normálním rozdělením se zapisuje jako:

$$f(x|\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

kde σ je směrodatná odchylka a μ střední hodnota. Pro normální rozdělení platí, že 99,7 % náhodných hodnot se nachází v intervalu $(\mu-3\sigma; \mu+3\sigma)$, viz Obr. 7, a proto pro obdržení 99,7 % intervalu spolehlivosti výsledku je nutné standardní nejistoty odhadů vynásobit třemi.



Obr. 7 Normální rozdělení s parametry μ a σ . Autor Dan Kernler, zdroj: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/Empirical_Rule.PNG

3 Představení společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Výzkumná organizace Centrum výzkumu Řež s.r.o. (CVŘ) byla založena 9. října 2002 jako 100% dceřiná společnost ÚJV Řež, a. s. a zabývá se výzkumem, vývojem a inovacemi zejména v oblasti jaderné energetiky [17].

Počátky jaderného výzkumu v České republice sahají do padesátých let minulého století, kdy bylo s podporou tehdejšího Sovětského svazu založeno výzkumné pracoviště s názvem Ústav jaderné fyziky pod Československou akademií věd. V roce 1957 byl spuštěn výzkumný reaktor VVR-S (dnes LVR-15) a tehdejší Československo tak udělalo první krok ke vstupu mezi jaderné mocnosti. Postupem času byl vybudován další výzkumný reaktor, tentokrát s nulovým výkonem za účelem precizního studia fyzikálních jevů v aktivních zónách energetických reaktorů budovaných na území našeho státu [18].

Zásadní změna nastala v roce 1993, kdy byl ústav privatizován a stal se akciovou společností zaměřenou na výzkum a inženýring. V rámci nové strategie společnosti došlo k nákupu divize Energoprojekt Praha a jejích dceřiných společností, čímž vznikla Skupina ÚJV. V roce 2002 došlo k vyčlenění všech výzkumných aktivit do nově založené dcery CVŘ. V roce 2012 byl změněn název společnosti a z Ústavu jaderného výzkumu se stává ÚJV Řež, a.s.

CVŘ v současnosti disponuje významnou experimentální infrastrukturou včetně dvojice výzkumných reaktorů LVR-15 a LR-0. Další rozšíření probíhá v letech 2012 – 2015 v rámci investičního projektu SUSEN (SUStainable ENergy), který je financován z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace Evropského fondu pro regionální rozvoj.

Cílem projektu SUSEN je zvýšit potenciál České republiky na poli aplikovaného výzkumu v energetice. Podpora je využita na investice do infrastruktury, pro čtyři základní programy projektu [19]:

1. Technologické a experimentální okruhy (TEO),
2. Strukturální a systémová diagnostika (SSD),
3. Jaderný palivový cyklus (JPC),
4. Materiálový výzkum (MAT).

Vývoj technologie přepracování paliv pro pokročilé reaktory je jednou z aktivit v programu JPC, který je zaměřen především na zadní část palivového cyklu. Celý program JPC pokrývá výzkum a vývoj v oblasti materiálů pro efektivní a bezpečné ukládání radioaktivního odpadu, objemové redukce aktivního odpadu, geologického ukládání vysoce aktivního odpadu a vyhořelého jaderného paliva a zmiňované techniky separace minoritních aktinoidů a štěpných produktů z vyhořelého paliva. Neméně důležitým cílem je i vytvoření vědeckotechnické základny pro podporu výstavby hlubinného úložiště v České republice [19].

4 Stanovení nákladů

Podnikání v jaderném průmyslu je investičně velice náročné. Také závod na přepracování bude patřit ke kapitálově náročným podnikům, kde největší roli v nákladech hrají odpisy investic.

V průběhu projektu SUSEN měla být postavena nová linka na přepracování paliva ve zmenšeném měřítku. Kapitálové náklady vybavení jsou dány projektem, celkové náklady však musejí být odhadnuty. K odhadu pro laboratorní účely je vhodné využít kalkulační vzorec (viz kapitola 2.3.2), jehož položky lze stanovit údaji z projektu na základě znalosti počtu zaměstnanců, spotřeby materiálů a předpokládané reže. Položky, které je potřeba odhadnout, jsou odhadnuty na základě metodiky publikované v literatuře [14].

4.1 Popis procesu přepracování v lince FERDA-2

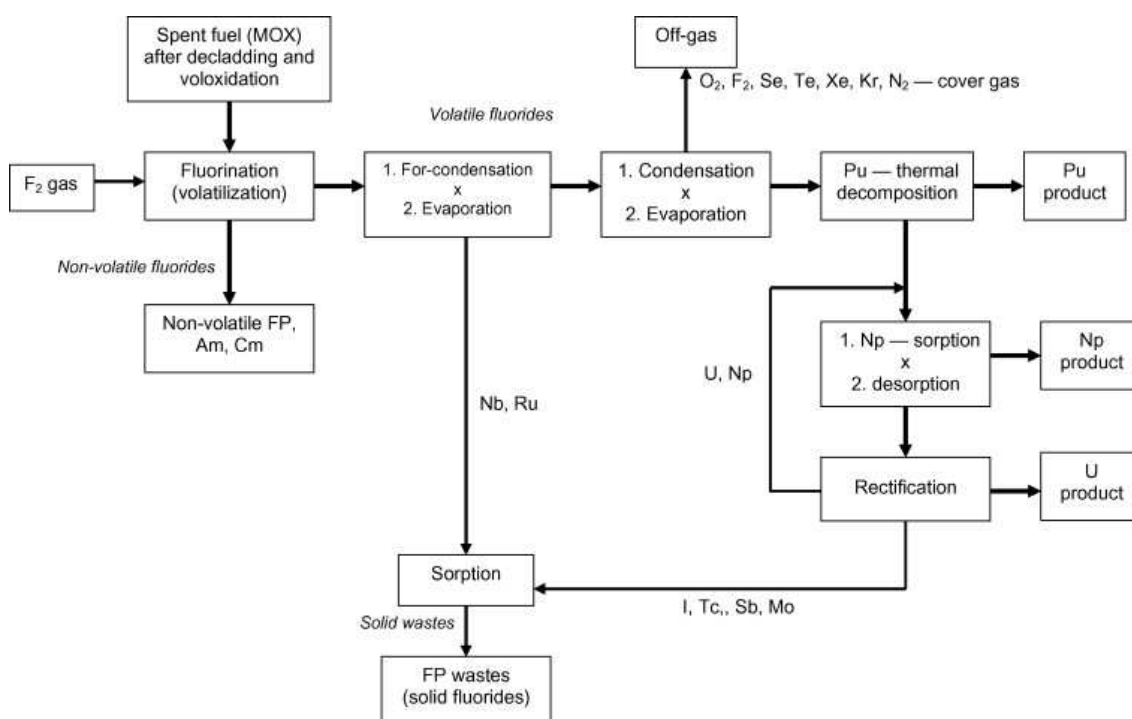
Linka FERDA-2 je umístěna v horké komoře, kde bude probíhat celý proces přepracování. Vstupem do procesu je vyhořelé palivo zbavené pokrytí a konstrukčních prvků. Součástí linky je mlýnek, do kterého se vloží vzorek ozářeného keramického paliva a rozele se na jemný prášek, který je potom dopravován do plamenného fluorátoru, kde probíhá fluorace. Při fluoraci z paliva odejde U, Np a Pu ve formě hexafluoridů, které jsou za takto vysokých teplot v plynné fázi. Hexafluoridy jsou dále vedeny do kondenzátoru, kde sublimují. Nižší fluoridy ostatních produktů v palivu tvoří stále tri- nebo tetrafluoridy, které jsou i za vysokých teplot v pevném skupenství, a proto zůstávají v popelníku fluorátoru. Výstupem procesu jsou separované U, Np, Pu a minoritní aktinoidy ve formě hexafluoridů, které jsou převedeny na oxidy a putují dále do procesu fabrikace nového paliva. Schematicky je proces zobrazen na Obr. 8. Nevyužitelné produkty štěpení jsou zpracovány do podoby imobilizované matrice na vitrifikační lince. Vitrifikace a příprava odpadů pro trvalé ukládání, stejně tak jako fabrikace paliva tvoří odlišné nákladové moduly, při hodnocení ekonomiky palivového cyklu (viz [20]), a proto nejsou tyto výstupy linky dále komentovány.

Projektové předpoklady provozu jsou 5 % ztráty plynného fluoru a celkové ztráty přepracovaného produktu menší, než 1 %. Provoz linky není kontinuální a je dán kapacitou kondenzátorů, která odpovídá 5 kg práškového paliva na vstupu do procesu. Předpokládá se jednosměnný provoz a za jednu směnu je přepracováno a odseparováno právě množství paliva dané kapacitou kondenzátorů, ty jsou potom vyčištěny a připraveny k dalšímu provozu. Je uvažováno, že za jeden rok bude při jednosměnném provozu odpracováno 252 směn. A protože se jedná o laboratorní zařízení, počítá se s jeho častější údržbou a opravami, proto bude počítáno s koeficientem dostupnosti zařízení 0,7.

U jaderných zařízení a pracovišť s otevřenými radionuklidovými zářiči hrají významnou roli náklady za legislativní poplatky za povolení k umístění zařízení, povolení k výstavbě zařízení a první povolení k provozu zařízení. Během provozu

zařízení se potom platí měsíční udržovací poplatek. Maximální výše poplatků je (18/1997 Sb. §3e):

- 30 000 000 Kč za povolení k umístění,
- 150 000 000 Kč za povolení k výstavbě,
- 60 000 000 Kč za první povolení k provozu,
- 60 000 000 Kč za povolení k jednotlivým etapám vyřazování zařízení z provozu,
- 4 000 000 Kč udržovací poplatek za každý kalendářní měsíc, ve kterém trvala poplatková povinnost.



Obr. 8 Schéma procesu nestálých fluoridů [11].

Povolení k umístění jaderného zařízení uděluje Státní úřad pro jadernou bezpečnost na základě zadávací bezpečnostní zprávy zpracované žadatelem o povolení. „Primárním účelem zprávy je poskytnout průkazy o vhodnosti výběru lokality a přijatelnosti umístění navrhovaného jaderného zařízení.[21].“

Povolení k výstavbě jaderného zařízení je uděleno na základě rozhodnutí, jehož podkladem je předběžná bezpečnostní zpráva. Tato zpráva slouží jako průkaz, že navrhované řešení splňuje požadavky na jadernou bezpečnost, radiační ochranu a havarijní připravenost.

Udělení k provozu dává úřad na základě předprovozní bezpečnostní zprávy. V této zprávě jsou zdokumentovány změny od původního projektu a zároveň slou-

zí jako průkaz toho, že nedošlo ke snížení úrovně jaderné bezpečnosti jaderného zařízení.

4.2 Odhad nákladů pro poloprovozní měřítko

Parametry laboratorní linky FERDA 2 jsou dány projektem. Náklady na konstrukci linky včetně jejího systému řízení činí dle projektu SUSEN 28,8 mil. Kč. Linka FERDA2 bude umístěna v horkých komorách, náklady na jejichž vybudování jen pro linku by dle projektu SUSEN byly 61,2 mil. Kč. Celkové projektové konstrukční náklady linky tedy činí 90 mil. Kč. Linka má uvažovanou maximální teoretickou kapacitu 5 kg materiálu paliva denně.

Na základě zmíněných předpokladů a při uvažování dávkování paliva po 5 kg_{HM}, je možné vypočítat teoretickou roční kapacitu **K** zařízení jako:

$$K = 5 \frac{\text{kg}_{HM}}{\text{směna}} \cdot 252 \frac{\text{směn}}{\text{rok}} \cdot 0,7 = 882 \frac{\text{kg}_{HM}}{\text{rok}} \quad (4)$$

Ze znalosti ročního hmotnostního toku linky jsou stanoveny přímé náklady. Při známé roční kapacitě linky je možné vypočíst náklady na spotřební materiál, kterým je plynný fluor. Se započtením ztrát je spotřeba na jednu dávku paliva 2514 g fluoru. Podle projektu linky činí přímé náklady na plynný fluor se započtením technologických ztrát na jednu dávku paliva 30 tisíc Kč. Tento údaj byl získán požádáním u různých dodavatelů. Při vlastním průzkumu trhu je možné zjistit, že ceny fluoru se pohybují od 1,35 do 190 USD/100g podle velikosti odběru. Nejnižší sazba je vypočtena z nákladů na konverzi žlutého koláče na UF₆, což je proces s ohromnou spotřebou fluoru (avšak ne všechno je ve formě plynu), nejvyšší sazba je při objednávce malého množství pro laboratorní účely. V projektu uvedené náklady na fluor odpovídají ceně 50,27 USD/100g plynného fluoru při kurzu 23,73 Kč/USD, což je rozumná aproximace vzhledem k plánovanému odebíranému množství. Z uvedených předpokladů je možno usoudit, že roční náklady na fluor při maximální kapacitě linky budou činit:

$$\text{Fluor} = \frac{882 \frac{\text{kg}_{HM}}{\text{rok}}}{5 \frac{\text{kg}_{HM}}{\text{dávka}}} \cdot \frac{30\,000 \text{Kč}}{\text{dávka}} = 5\,292\,000 \frac{\text{Kč}}{\text{rok}} \quad (5)$$

Počítá se, že provozem linky a její obsluhou bude zaměstnáno 2,5 zaměstnanec, 2 s vysokoškolským a 0,5 se středním vzděláním. Podle úrovně kvalifikace je měsíčně na zaměstnance linky počítáno se mzdovými náklady ve výši 80 000 Kč měsíčně pro pracovníka s VŠ vzděláním a 40 000 Kč pro pracovníka se středoškolským vzděláním. Zaměstnancům pracujícím na lince jsou podle projektové dokumentace každý rok vypláceny přímé mzdy ve výši 2 160 000 Kč.

$$\text{Mzdy} = \left(2 \cdot 80\,000 \frac{\text{Kč}}{\text{měs}} + 0,5 \cdot 40\,000 \frac{\text{Kč}}{\text{měs}} \right) \cdot 12 \text{ měs} = 2\,160\,000 \frac{\text{Kč}}{\text{rok}} \quad (6)$$

Náklady na údržbu mohou být podle [14] odhadnuty jako 2 % z fixních kapitálových investic, avšak konkrétně pro plánované zařízení je nejlépe tyto náklady odhadnout z obdobného provozu. Z předchozího provozu linky FERDA je možné dohledat, že náklady na údržbu linky byly 200 000 Kč/rok. Koeficient využití linky byl mnohem nižší, než 0,7, se kterým se počítá v této studii. Pro linku FERDA2 lze na základě předchozích zkušeností učinit odhad nákladů na údržbu zařízení ve výši 1 %, protože se v principu jedná o jednoduché zařízení. Předpokládaná výše nákladů na údržbu zařízení, při použití diskutovaných předpokladů tak činí 960 000 Kč/rok.

$$\text{Údržba} = 1 \% \cdot 96\,000\,000 \text{ Kč} = \mathbf{960\,000} \frac{\text{Kč}}{\text{rok}} \quad (7)$$

Náklady za spotřební materiál, doporučuje Roušar [14] odhadnout jako 6 % provozních nákladů, nebo jako 0,5 - 1 % investičních. Ze znalosti provozu předchozí linky lze stanovit náklady na spodní hranici doporučené v lit. [14], odhad nákladů na spotřební materiál na základě 6 % přímých provozních nákladů vychází na cca. 505 000 Kč/rok, což znamená, že odhady jsou konzistentní.

$$\text{Spotřební mat.} = 0,5 \% \cdot 96\,000\,000 \text{ Kč} = \mathbf{480\,000} \frac{\text{Kč}}{\text{rok}} \quad (8)$$

Náklady na média a energie jsou společně zahrnuty v režijních nákladech, které činí 10 % přímých provozních nákladů.

$$\text{Režie (včetně energií a médií)} = 10 \% \cdot 96\,000\,000 \text{ Kč} = \mathbf{9\,600\,000} \frac{\text{Kč}}{\text{rok}} \quad (9)$$

Je nutno také počítat s tím, že při manipulacích s chemikáliemi budou vznikat nebezpečné odpady. Náklady na likvidaci odpadů upravuje Zákon o odpadech a změně některých dalších zákonů (185/2001 Sb.). Od roku 2009 činí základní poplatek za uložení 1 t nebezpečného odpadu 1700 Kč a rizikový poplatek 4500 Kč. Předpokládá se, že objem produkce nebezpečných odpadů bude na úrovni maximálně 10 % roční kapacity linky. Doprava nebezpečných odpadů do sběrného místa je zahrnuta ve firemní režii.

$$\text{Nebezpečné odpady} = 10 \% \cdot 0,882 \frac{\text{t}}{\text{rok}} \cdot (4\,500 + 1\,700) \text{ Kč} = \mathbf{547} \frac{\text{Kč}}{\text{rok}} \quad (10)$$

Mezi nejdůležitější nepřímé náklady patří odpisy zařízení. Samotná linka FERDA2 patří do 3. odpisové skupiny, doba odpisování zařízení činí 10 let, horká komora, kde bude linka umístěna je zařazena do 4. odpisové skupiny a odpisovat se bude 20 let.

$$\text{Odpisy FERDA2} = \frac{28\,800\,000 \text{ Kč}}{10 \text{ let}} = \mathbf{2\,880\,000} \frac{\text{Kč}}{\text{rok}} \quad (11)$$

$$\text{Odpisy HK} = \frac{61\,200\,000 \text{ Kč}}{20 \text{ let}} = 3\,060\,000 \frac{\text{Kč}}{\text{rok}} \quad (12)$$

Pokud by linka skutečně komerčně pracovala s vypočtenou přepracovací kapacitou a byla by pracovištěm IV. kategorie podle Atomového zákona (18/1997), nevyhnuła by se poplatkům daným v §3a a §3c jejichž maximální výše je popsána v kapitole 4.1. Protože se jedná o z průmyslového hlediska o velmi malé zařízení, budou náklady na povolení uvažovány ve výši 2 % maximálních nákladů. Tyto náklady spadají do kategorie nepřímých investičních nákladů a ve vstupu pro ekonomické modelování pokročilých jaderných zařízení jsou zařazeny do kategorie kapitalizovaných předkonstrukčních nákladů (viz příloha A, účet 1). Kapitalizované náklady v konstrukční fázi (viz Příloha A, účet 2) linky FERDA2 činí 90 milionů Kč.

Celý provoz musí být pojištěn, roční sazba pojištění se podle literatury [14] odhaduje na úrovni 0,5 – 1 % přímých kapitálových nákladů.

$$\text{Pojištění} = 1 \% \cdot 90\,000\,000 \text{ Kč} = 900\,000 \frac{\text{Kč}}{\text{rok}} \quad (13)$$

Uvedené informace lze pro názornost shrnout do tabulky:

Tab. 6 Přehled nákladů na vybudování poloprovozu pro přepracování v tis. Kč (poloprovoz).

Investiční náklady	Nepřímé	Předkonstrukční fáze	Pov. k umístění zařízení (2 %)	600
			Pov. k výstavbě prac. IV. Kat. (2 %)	3 000
			Pov. k provozu prac. IV. Kat. (2 %)	1 200
		Vyřazování	Povolení k etapám vyřazování (2%)	1 200
	Přímé	Konstrukční fáze	Kapitalizované nákl. v konst. fázi	90 000
Celkem investice Kč				96 000
Provozní náklady	Přímé	Přímý materiál		5 292
		Přímé mzdy		2 160
		Spotř. materiál	0,5 % investičních nákladů	480
		Údržba		960
		Odpady		0,547
	Nepřímé	Odpisy		5 940
		Režie	10 % investičních nákladů	9 600
		Udržovací popl.	2 % maxima	960
		Pojištění	1 % přímých investic	900
		Celkem provoz Kč/rok		

Odhadované provozní náklady, tedy úplné provozní náklady výkonu činí 26 293 tis. Kč/rok. Při roční kapacitě 882 kg paliva, vstupujícího do procesu přepracování, za rok, jsou náklady na přepracování jednoho kilogramu rovny:

$$\dot{U}NV = \frac{26\,293 \frac{\text{tis K}\check{\text{c}}}{\text{rok}}}{882 \frac{\text{kg}_{HM}}{\text{rok}}} = 29\,810 \frac{\text{K}\check{\text{c}}}{\text{kg}_{HM}}. \quad (14)$$

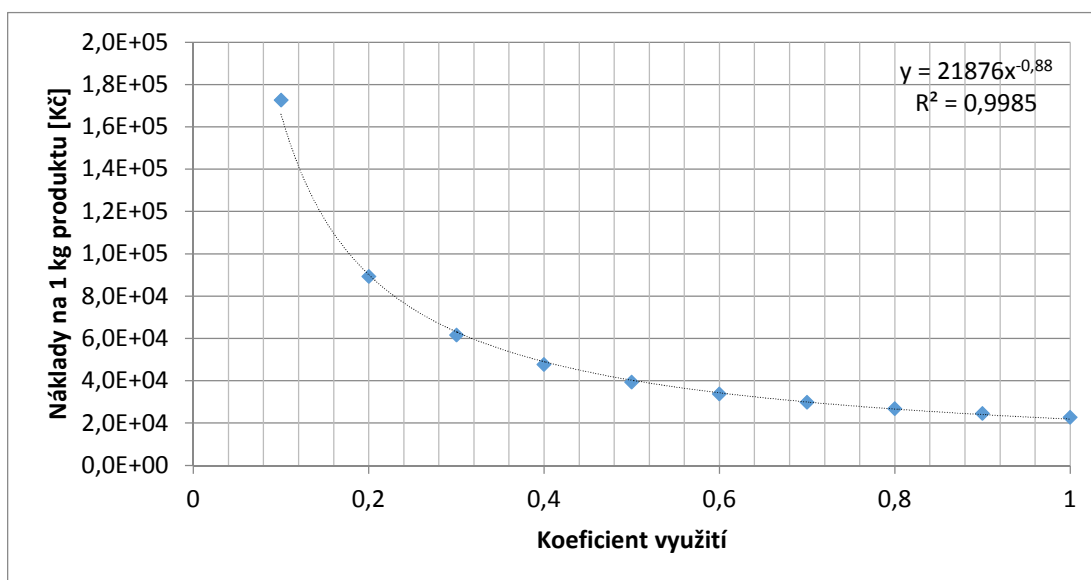
Graf, který udává procentuální zastoupení jednotlivých typů nákladů na celkových nákladech je zobrazen na Obr. 11. Nákladovou náročnost podniku lze určit procentem z investičních nákladů:

$$\frac{\dot{U}NV}{INV} = \frac{26\,293}{96\,000} = 0,2680. \quad (15)$$

Podíl ročních nákladů představuje 26,8 % investičních nákladů.

V tabulce nákladů lze za variabilní náklady považovat přímý a spotřební materiál, údržbu a náklady na likvidaci odpadů. Podíl variabilních nákladů na úplných nákladech výkonu činí:

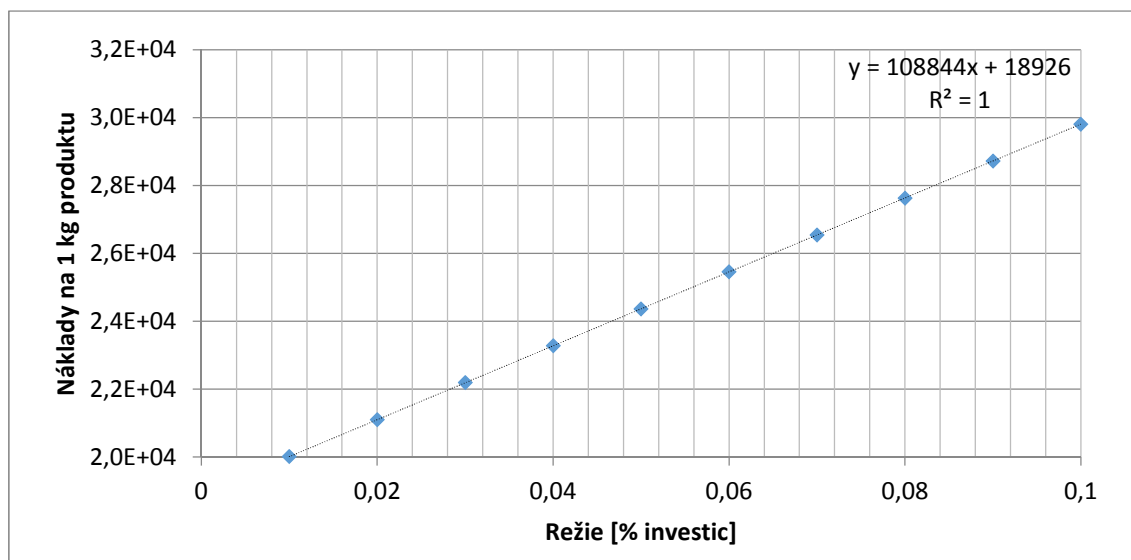
$$\frac{VN}{\dot{U}NV} = \frac{5\,292+480+960+0,547}{26\,293} = 0,2561. \quad (16)$$



Obr. 9 Závislost nákladů na přepracování paliva na koeficientu využití linky FERDA2.

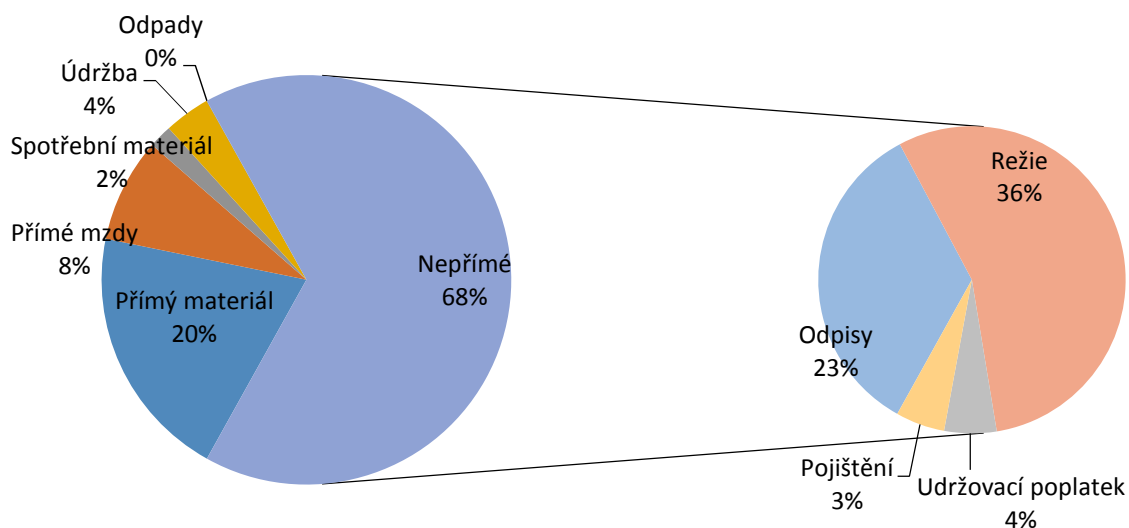
Podíl variabilních nákladů na celkových nákladech činí 25,61 %. Protože se jedná o investičně náročné zařízení, byl tento výsledek očekáván. Úplné náklady výkonu jsou vysoce citlivé na změny koeficientu dostupnosti, či využití zařízení a na velikosti režijních nákladů, které tvoří další významnou položku nepřímých nákladů. V režii jsou zahrnuty nejen náklady na média (voda, teplo, ventilace, odtah a filtrace vzduchu z horkých komor), ale i náklady na ostrahu objektu a na monitorování pohybu a kontaminace osob. U obou těchto položek byla stanovena citlivost na jejich změny. Průběh nákladů na přepracování 1 kg paliva v závislosti na koeficientu využití je znázorněn v grafu na Obr. 9.

Průběh nákladů proložený regresní křivkou vykazuje exponenciální pokles (s exponentem -0,88) jednotkových nákladů s rostoucí produkcí, celkové náklady v závislosti na produkci tedy rostou podproporcionálně a jak bylo řečeno, řídí se zejména fixními náklady. Je-li do grafu vynesena závislost jednotkových nákladů na změně režijních nákladů, lze vysledovat lineární průběh nákladů na jednotkovou produkci (viz Obr. 10).



Obr. 10 Průběh nákladů na jednotku produkce v závislosti na velikosti režie.

Výše popsany postup umožnil získat střední hodnotu úplných vlastních nákladů výkonu. Protože se však jedná o čísla daná projektem a odhadem, je nutno stanovit nejistoty tohoto odhadu a zjistit vliv nejistot na celkový výsledek.



Obr. 11 Procentuální zastoupení jednotlivých typů nákladů na úplných nákladech výkonu.

4.2.1 Stanovení jednotkových nákladů a odhad vlivu nejistot

V dalším kroku je možné uvažovat předpoklady zmíněné v Tab. 6 a zjistit citlivost jednotlivých položek na náklady přepracování jednoho kilogramu paliva. Protože v koncepční fázi projektu není možné stanovit přesné náklady na jednotlivé položky, budou všechny odhady zatížené nejistotami. Nejistoty v jednotlivých parametrech a jejich odhad je diskutován v této podkapitole.

Nepřímé investiční náklady v předkonstrukční fázi

Pro uvažovaný poloprovoz hrají na začátku kapitoly zmíněné legislativní náklady důležitou roli. Legislativní náklady se na celkových konstrukčních nákladech se podílejí 6,25 %. Protože se v tomto případě (projekt SUSEN) bude jednat o výzkumné zařízení, mohlo by být od poplatků osvobozeno, avšak výzkum by musel být hrazen pouze veřejnými prostředky. V hypotetickém provozu nastíněném touto prací bude linka komerčně přijímat k přepracování palivo a poplatky je proto potřeba počítat, i když kapacita linky pro komerční účely je zanedbatelná.

Tab. 7 Příloha č. 4 nařízení vlády 564/2006. Podle této přílohy se řídí mzdy úředníků SÚJB.

Platový stupeň	Počet let započítatelné praxe	Platová třída															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	do 1 roku	7920	8600	9320	10100	10950	11870	12880	13980	15170	16440	17870	19360	20990	22780	24720	26830
2	do 2 let	8210	8920	9670	10490	11390	12330	13360	14510	15730	17060	18530	20080	21790	23630	25660	27840
3	do 4 let	8510	9260	10030	10880	11810	12790	13870	15060	16330	17720	19260	20850	22610	24530	26630	28880
4	do 6 let	8830	9610	10430	11290	12260	13280	14400	15640	16950	18390	19980	21620	23460	25460	27630	29980
5	do 9 let	9190	9980	10820	11730	12730	13790	14950	16240	17590	19080	20730	22450	24340	26410	28670	31100
6	do 12 let	9540	10350	11220	12160	13210	14300	15510	16860	18250	19790	21510	23290	25260	27400	29750	32260
7	do 15 let	9900	10760	11650	12630	13700	14850	16080	17490	18960	20550	22330	24180	26220	28450	30870	33480
8	do 19 let	10270	11160	12100	13100	14230	15400	16690	18150	19670	21320	23170	25100	27210	29510	32050	34750
9	do 23 let	10660	11570	12560	13600	14760	15990	17320	18830	20400	22130	24030	26040	28230	30640	33260	36050
10	do 27 let	11080	12030	13030	14120	15330	16600	17970	19550	21180	22960	24940	27020	29300	31790	34520	37400
11	do 32 let	11490	12470	13530	14650	15920	17230	18670	20300	21990	23840	25880	28040	30400	33000	35820	38830
12	nad 32 let	11930	12950	14040	15200	16530	17880	19370	21070	22810	24750	26870	29100	31550	34240	37160	40290

Osobní náklady na úředníka Státního úřadu pro jadernou bezpečnost definuje nařízení vlády 564/2006 Sb. Platové tarify úředníků tohoto úřadu jsou dány přílohou č. 4, která je uvedena jako Tab. 7. Experti navíc k tomuto platu mohou dostávat podle stupně praxe měsíční osobní příplatek do maximální výše 100 % tarifního platu. Katalog prací odpovídajícím jednotlivým třídám upřesňuje nařízení vlády 469/2002 Sb. Podle tohoto nařízení spadají činnosti spojené s provozem popisovaným v bakalářské práci do 12. – 13. platové třídy. Slovy nařízení jsou do 12. Platové třídy zahrnuti pracovníci, kteří provádějí: „*Výkon ucelených odborných činností ve vymezeném úseku státní správy při využívání jaderné energie a v oblasti radiační ochrany, spojené s teoretickým zvládnutím a praktickým osvojením odborné problematiky včetně účasti při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností a radiační ochranou.*“ V platové třídě 13 jsou pracovníci, kteří provádějí: „*Zpracovávání metodických systémových opatření pro výkon státní inspekce (dozoru) nad jadernou bezpečností a radiační ochranou, nad způsobilostí technických provozů jaderných zaří-*

zení a pracovišť se zdroji ionizujícího záření, nad povinně zavedeným systémem jejich jakosti, nad přepravou a nakládáním s jadernými materiály, nad opatřeními vedoucími ke snížení přírodního ozáření, dohled nad stanovenými látkami, které by mohly být zneužity k porušování zákazu chemických a biologických zbraní s celorepublikovou působností.“

Předpokladem je, že činnost v rámci povolování jaderného zařízení bude provádět expert s praxí do 19 let. Ve své oblasti bude uznávaný, proto mu bude náležet i osobní příplatek v maximální výši. Osobní náklady na tohoto zaměstnance jsou odhadnuty ve výši 100 000 Kč/měs.

V první fázi povolování je počítáno se třemi člověko-měsíci práce úředníků a 100 % režie. Odhad poplatku za povolení k umístění zařízení pomocí uvedených předpokladů odpovídá úrovni 2 % maximálního poplatku.

Druhá fáze licenčního procesu spočívá v udělení povolení k výstavbě zařízení. Poplatek v této fázi byl odhadnut opět na úrovni 2 % maximálního poplatku, což je počítáno jako 15 člověko-měsíců práce plus 100 % režie.

Poslední fází konstrukce je udělení povolení k provozu zařízení. Náklady na rozhodování o udělení k provozu byly odvozeny na základě objemu práce o velikosti 6 člověko-měsíců plus 100 % režie. Ten samý předpoklad byl učiněn i pro náklady na rozhodování o vyřazování jaderného zařízení z provozu. Počítá se s tím, že zařízení bude vyřazeno v jedné fázi.

1 σ interval nejistot v odhadech legislativních nákladů byl stanoven na 20 %.

Tab. 8 Přehled rozdělení celkových nepřímých investičních nákladů v tis Kč.

Fáze	Střední hodnota (S)	S - 3 σ	S + 3 σ	Nejistota (σ)
Povolení k umístění	600	240	960	20 %
Povolení k výstavbě	3 000	1 200	4 800	20 %
Povolení k provozu	1 200	480	1 920	20 %
Povolení k vyřazení	1 200	480	1 920	20 %

Přímé investiční náklady v konstrukční fázi

Do přímých konstrukčních nákladů jsou zařazeny přímé investice do přepravní linky a do výstavby horkých komor. Horké komory byly vystavěny v areálu společnosti, proto do přímých nákladů nevstupují náklady na nákup pozemků. Velikost přímých nákladů daných projektem je uvedena v Tab. 9. Protože je projekt horkých komor i zařízení hotov a probíhalo poptávání materiálů, jsou nejistoty investičních nákladů počítány do maximální hodnoty 10 % na obě strany, což je standardní projektová nejistota.

Tab. 9 Přehled celkových přímých investičních nákladů v tis Kč.

Typ zařízení	Střední hodnota (S)	S - 3 σ	S + 3 σ	Nejistota (σ)
Linka FERDA2	28 800	20 160	37 440	10 %
Výstavba horkých komor	61 200	42 840	79 560	10 %

Přímé provozní náklady

Přímým materiálem je plynný fluor. Ten se ve velkém používá pouze pro výrobu fluoridu uranového, meziprojektu pro výrobu obohaceného uranu, a fluoridu sírového jako dielektrika pro transformátorové aplikace. Jeho cena se řídí hlavně těmito aplikacemi, jiné využití na cenu nemá vliv. Vývoj ceny konverze pro uran je možné nalézt na stránkách konzultační společnosti UxC [22]. Nicméně data v grafech vývoje spotové ceny konverze za posledních 20 let ukazují, že náklady na fluor se mohou v nejbližší době pohybovat v rozmezí -30 % až +30 % referenční ceny. Důvodem prudkého růstu ceny na přelomu let 2010 a 2011 může být vysoká poptávka z důvodu vyvrcholení programu likvidace nahromaděného vysoce obohaceného uranu, ze kterého se vyrábělo palivo [23]. Nejistota v ceně fluoru byla proto odhadnuta na 10 %.

Přímé mzdy jsou v podniku CV Řež velice dobře odhadnutelné, proto bylo počítáno s nejistotami ± 5 %.

Náklady na spotřební materiál byly z důvodu zachování konzervativnosti odhadu stanoveny jako 0,5 % z investičních nákladů ročně. Pokud by byla použita druhá Roušarem [14] doporučená hodnota (6 % z ročních provozních nákladů), výsledek by byl obdobný. Nejistoty ve spotřebě spotřebního materiálu byly opět odhadnuty na ± 10 %.

Náklady údržby byly odhadnuty ze zkušeností s provozem linky FERDA s odchylkami ± 10 %. Množství nebezpečných odpadů vzniklé likvidační technologické ztrát linky bylo stanoveno na 10 % roční kapacity, tj. 88,2 kg s nejistotami ± 50 %. Přehled celkových ročních přímých provozních nákladů v tis Kč je uveden v Tab. 10.



Obr. 12 Průběh ceny konverze na UF₆. Source: The Ux Consulting Company, LLC, <http://www.uxc.com>

Tab. 10 Přehled celkových ročních přímých provozních nákladů v tis Kč.

Typ nákladu	Střední hodnota (S)	S - 3 σ	S + 3 σ	Nejistota
Fluor	5 292	3 704	6 880	10 %
Přímé mzdy	2 160	1 836	2 484	5 %
Spotřební materiál	480	336	624	10 %
Údržba	960	672	1 248	10 %
Odpady	0,546	0	0,711	50 %

Nepřímé provozní náklady

Roční odpisy jsou dány přímými investičními náklady. Jejich výši je možno získat součtem nákladů na konstrukci linky a výstavbu horkých komor, které patří do 3., resp 4. odpisové skupiny.

Náklady na režii zahrnují jak výrobní, tak správní režii. Velikost režie byla odhadnuta na 10 % investičních nákladů a je počítáno s nejistotou 10 % v odhadu režijních nákladů.

Ve spojitosti s provozem jaderného zařízení platí i povinnost hradit měsíčně udržovací poplatek, který pokrývá činnost Státního úřadu pro jadernou bezpečnost v souvislosti s dozorem nad činností držitelů povolení. Velikost poplatku byla ve shodě s ostatními náklady na legislativu odhadnuta na 2 % maximální měsíční sazby, která činí 4 000 000 Kč. Nejistoty ve velikosti poplatku byly odhadnuty jako ± 10 %.

Poslední položkou nepřímých nákladů uvažovaných v této práci je pojištění jaderného zařízení. Náklady na pojištění byly odhadnuty jako 1 % přímých investic s nejistotou ± 10 %.

Tab. 11 Přehled celkových ročních nepřímých provozních nákladů v tis Kč.

Typ nákladu	Střední hodnota (S)	S - 3 σ	S + 3 σ	Nejistota
Odpisy	5 750	4 158	7 722	10 %
Režie	9 480	6 720	12 248	10 %
Udržovací poplatek	960	672	1 248	10 %
Pojištění	900	630	1 170	10 %

Použitím kalkulačního vzorce a sečtením jednotlivých položek nákladů jsou získány úplné náklady výkonu. Z nejistot ve stanovení jednotlivých položek nákladů je vypočítána celková nejistota. Předpokladem je, že položky nákladů nejsou navzájem korelované, proto lze kumulovanou nejistotu v odhadu úplných nákladů výkonu vypočítat jako odmocninu ze součtu druhých mocnin odchylek od nominálních předpokladů. Se započtením nejistot činí roční odhadnuté úplné vlastní náklady výkonu při nominální roční kapacitě přepracování 882 kg použitého pali-
va:

$$\mathbf{\dot{U}NV = 26\,293 \pm 6\,916 \text{ tis. Kč}} \quad (17)$$

Při přepočtu na jednotku přepracovaného paliva činí úplné náklady výkonu:

$$\mathbf{Jedn_ \dot{U}NV = 29\,810 \pm 7\,841 \text{ Kč/kg}_{HM}} \quad (18)$$

4.3 Extrapolace nákladů na průmyslové měřítko

Všech šest bloků jaderných elektráren v České republice ročně vyprodukuje přibližně 70 t odpadu ekvivalentu těžkého kovu (t_{HM}). Aby bylo zajištěno přepracování paliva bez kumulace vyhořelého paliva, musí být přepracovací kapacita průmyslové linky rovna minimálně této hodnotě. Větší podnik bude oproti poloprovozu nebo laboratorní lince docilovat úspor z rozsahu. Extrapolaci kapacity je možno provést pomocí exponenciálního vztahu (1). Ke správné interpretaci je nutno stanovit fixní a variabilní část každé nákladové komponenty a také exponent. Praxe i literatura ukazují, že při škálování výroby z laboratorního do technologického měřítka dochází k významným úsporám z rozsahu díky značné automatizaci procesů a optimalizaci výroby. Pokud by náklady byly odhadnuty pomocí prostého vynásobení faktorem zvýšení výrobní kapacity z poloprovozního, či laboratorního měřítka, lze tento odhad považovat za značně konzervativní a tedy maximální možný. Faktor zvýšení nákladů se vypočte jako poměr kapacit průmyslového závodu k poloprovoznímu (faktor P ze vztahu (1)):

$$P = \frac{70\,000 \text{ kg/rok}}{882 \text{ kg/rok}} = \mathbf{79,37} \quad (19)$$

Ani v konzervativním případě (lineární růst nákladů) nebudou úplné náklady výkonu zvýšeny přesně tímto faktorem, protože ve všech nákladech na legislativu spojenou s provozem jaderného zařízení je dosaženo stropů legislativních poplatků daných Atomovým zákonem. Už tento fakt přinese úsporu v provozním měřítku. Struktura nákladů při konzervativním odhadu je uvedena v Tab. 12.

4.3.1 Konzervativní odhad

Předpoklady konzervativního odhadu jsou uvedeny v předchozím odstavci. Už při lineární extrapolaci nákladů dochází k jisté úspoře díky dosažení legislativních stropů poplatků daných Atomovým zákonem (viz Tab. 12).

Úplné náklady výkonu po zaokrouhlení činí 2 038 mil Kč za rok. Jednotkové úplné náklady výkonu lze vypočítat z roční kapacity závodu, která činí 70 000 kg:

$$\mathbf{\dot{U}NV = \frac{2\,038 \frac{\text{mil Kč}}{\text{rok}}}{70\,000 \frac{\text{kg}_{HM}}{\text{rok}}} = 29\,118 \frac{\text{Kč}}{\text{kg}_{HM}}} \quad (20)$$

Tab. 12 Přehled nákladů na vybudování průmyslového přepracování v mil. Kč (konzervativní).

Investiční náklady	Nepřímé	Předkonstrukční fáze	Pov. k umístění zařízení	30
			Pov. k výstavbě prac. IV. Kat.	150
			Pov. k provozu prac. IV. Kat.	60
	Přímé	Vyřazování	Povolení k etapám vyřazování	60
		Konstrukční fáze	Kapitalizované nákl. v konst. fázi	7 143
Celkem investice Kč				7 443
Provozní náklady	Přímé	Přímý materiál		420
		Přímé mzdy		171
		Spotř. materiál	6 % provozních nákladů, nebo 0,5 % investičních nákladů	40
				37
		Údržba		74
		Odpady		0,04
	Nepřímé	Odpisy		471
		Režie	10 % investičních nákladů	744
		Udržovací popl.	maximum	48
		Pojištění	1 % přímých investic	71
Celkem provoz Kč/rok¹				2 038

Nákladová náročnost podniku vyjádřená jako podíl úplných nákladů výkonu a investičních nákladů:

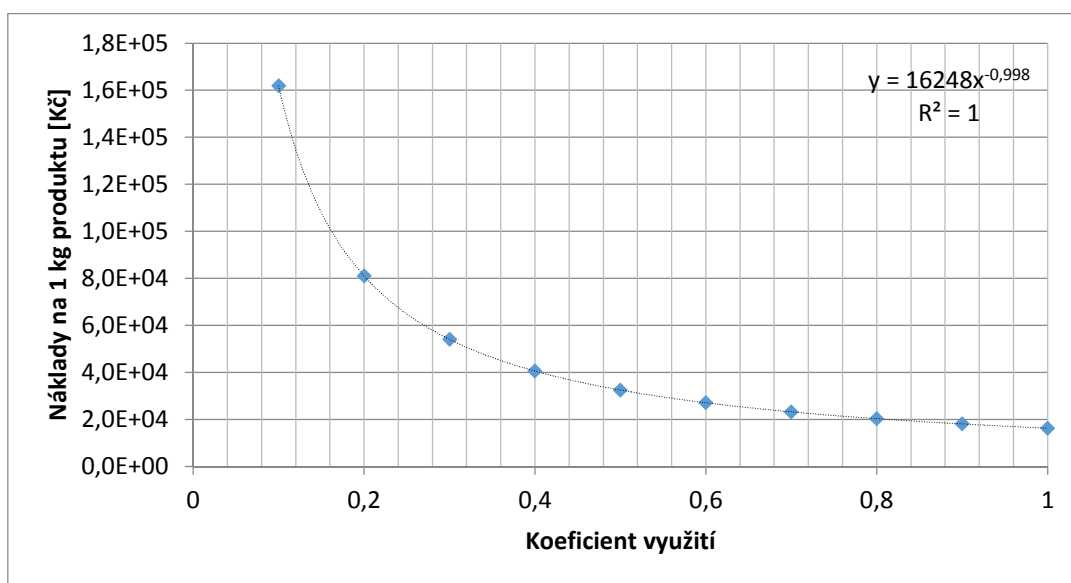
$$\frac{\text{ÚNV}}{\text{INV}} = \frac{2\,038}{7\,443} = 0,2738. \quad (21)$$

Oproti laboratornímu měřítku nákladová náročnost konzervativní varianty nepatrně vzroste na 27,38 %. Podíl variabilních nákladů na úplných nákladech výkonu činí:

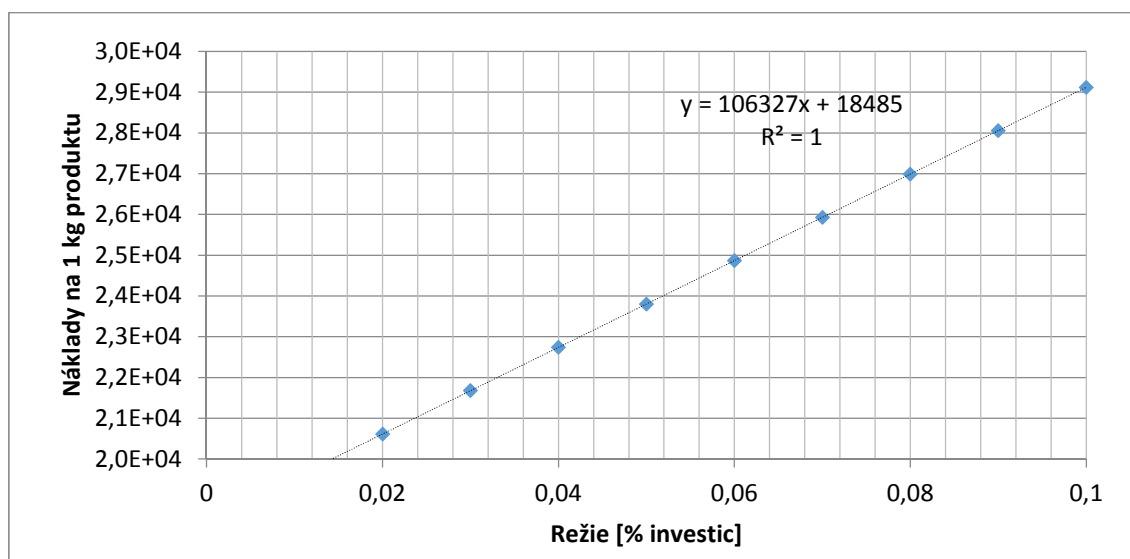
$$\frac{\text{VN}}{\text{ÚNV}} = \frac{531}{2\,038} = 0,2609. \quad (22)$$

Při srovnání podílu variabilních nákladů na úplných nákladech výkonu poloprovozní jednotky je opět vidět nepatrný vzestup tohoto podílu u průmyslové kapacity. Vzestup u obou poměrových ukazatelů je dán stropem legislativních poplatků, které zvyšují nepřímé investiční náklady. Protože jsou rozdíly opravdu nepatrné, budou téměř shodné i trendy funkcí v závislosti na objemu výroby a na velikosti režijních nákladů.

¹ Ve výpočtu byly použity konzervativní hodnoty, tzn. spotřební materiál jako 1 % z investičních nákladů.



Obr. 13 Závislost nákladů na přepracování paliva na koeficientu využití průmyslového přepracování (konzervativní odhad).



Obr. 14 Průběh nákladů na jednotku produkce v závislosti na velikosti režie (konzervativní odhad).

V provozním měřítku ovlivní stropy legislativních poplatků i celkovou nejistotu, která v laboratorním měřítku dosahovala 26,3 %. Lze předpokládat, že v rámci rozhodování o větším závodu na přepracování úřad se 100% jistotou použije maximální možné sazby, proto při odhadu nejistot odpadnou veškeré nejistoty vztahující se k limitovaným poplatkům za legislativu. Odhady ostatních nejistot z provozu jsou aplikovány i na výrobu v průmyslovém měřítku.

Tab. 13 Přehled nákladů včetně nejistot pro konzervativní odhad v mil Kč.

Neřímé investiční náklady				
Typ nákladu	Střední hodnota (S)	S - 3σ	S + 3σ	Nejistota (σ)
Pov. k umístění zařízení	30	-	-	0 %
Pov. k výstavbě prac. IV. Kat.	150	-	-	0 %
Pov. k provozu prac. IV. Kat.	60	-	-	0 %
Vyřazování	60	-	-	0 %
Přímé investiční náklady				
Typ zařízení	Střední hodnota (S)	S - 3σ	S + 3σ	Nejistota (σ)
Přepracovací závod	7 143	5 000	9 286	10 %
Přímé provozní náklady				
Typ nákladu	Střední hodnota (S)	S - 3σ	S + 3σ	Nejistota
Fluor	420	294	546	10 %
Přímé mzdy	171	145	197	5 %
Spotřební materiál	37	26	48	10 %
Údržba	74	52	97	10 %
Odpady	0,043	0	0,109	50 %
Nepřímé provozní náklady				
Typ nákladu	Střední hodnota (S)	S - 3σ	S + 3σ	Nejistota
Odpisy	471	330	613	10 %
Režie	744	521	929	10 %
Udržovací poplatek	48	-	-	0 %
Pojištění	71	50	93	10 %

Předpokládá se, že nejistoty nejsou korelované, proto je celková nejistota spočtena jako odmocnina ze sumy čtverců 1σ nejistot a pro konzervativní odhad nákladů pro závod o kapacitě 70 tun(HM)/rok bude platit:

$$\mathbf{\dot{U}NV = 2\,038 \pm 721 \text{ mil. Kč.}} \quad (23)$$

Při přepočtu na jednotku přepracovaného paliva činí úplné náklady výkonu:

$$\mathbf{\text{Jedn_}\dot{U}NV = 29\,118 \pm 10\,301 \text{ Kč/kg}_{\text{HM}}.} \quad (24)$$

4.3.2 Odhad nákladů na základě exponenciální metody

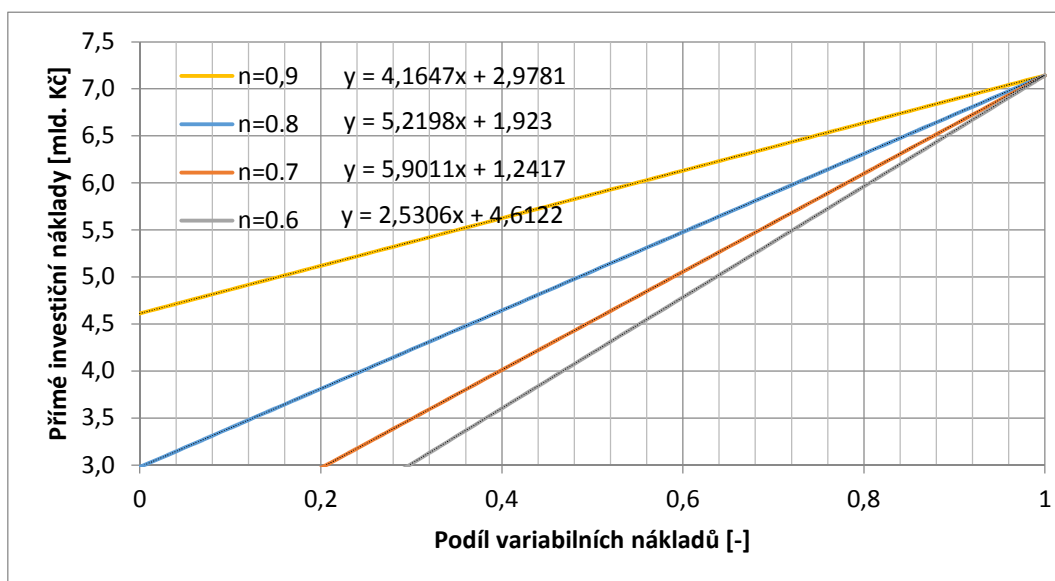
Protože zatím neexistuje žádný obdobný závod, není možné dohledat ani vztahy, které by přesněji popisovaly, jak by bylo možné určit náklady v závislosti na přepracovací kapacitě. Exponenciální metoda pomůže zmírnit konzervativní odhad přímých investičních nákladů. K provedení odhadu pomocí vztahu (1) je potřeba stanovit podíl fixní a variabilní složky nákladů. Pokud by veškeré investiční náklady byly považovány za fixní, je možné škálování nákladů provést pomocí lineární

extrapolace a dojít tak k nákladům, které jsou dány konzervativním odhadem (viz předchozí podkapitola). Ve druhém extrémním případě by bylo možno veškeré přímé investiční náklady považovat za variabilní a jejich růst by byl dán pouze faktorem P^n .

Problémem vzorce (1) je, že je s vysokou pravděpodobností určen pouze pro škálování v rozumném měřítku. Koefficient P je naproti tomu v popisovaném případě obrovský (téměř 80). Velikost fixní komponenty nákladů na výstavbu polo-provozu bude zřejmě jiná, než u podniků s průmyslovou kapacitou a je proto nutno ji odhadnout a extrapolovat. Extrapolace fixní komponenty nákladů kapacity linky může být provedena na základě znalosti laboratorní (poloprovozní) linky, za předpokladu přímé úměry nákladů. Převodní koeficient, který je použit pro extrapolaci fixní části, je vypočten jako poměr (19) a je roven P . Modifikovaný vztah (1) po popsání úvahách lze zapsat jako:

$$C = A \cdot P + (B \cdot P^n) \quad (25)$$

V případě, že je funkce přímých investičních nákladů v závislosti na podílu variabilních nákladů vynesena do grafu, je možné tuto funkci proložit lineární regresí, sklon funkce závisí na parametru n (viz Obr. 15). Úlohu je tedy možné redukovat na stanovení fixní části investičních nákladů a exponentu n , popisujícím úspory ze škálování.



Obr. 15 Průběh přímých investičních nákladů podniku v závislosti na velikosti fixní složky investic odhadnuté podle (23) a exponentu n .

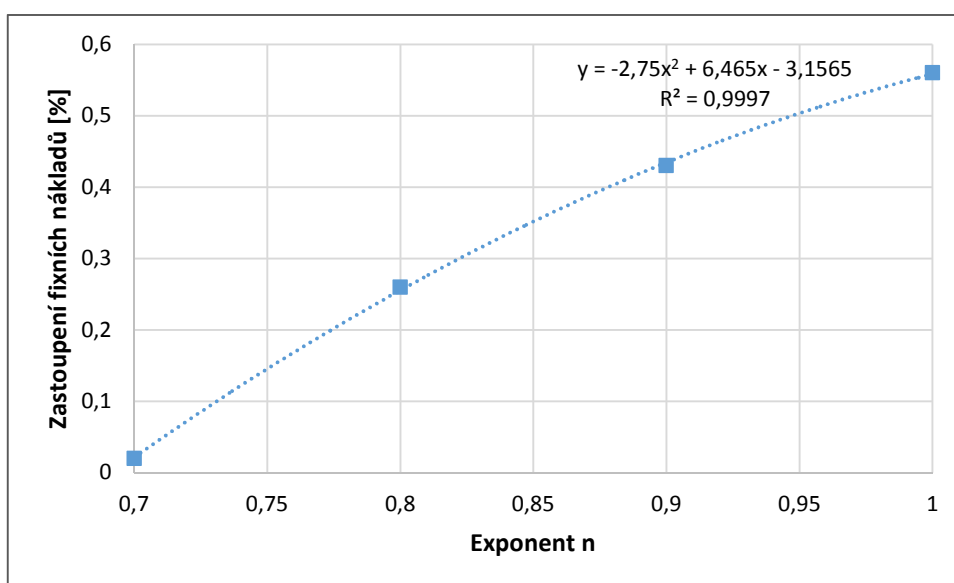
Stanovení poměru fixní a variabilní složky investic a indexu n

Procesy v provozu závodu s pyrochemickým zpracováním budou dávkové (podle [20]), založené na schématu popisovaném u laboratorní linky. Zvětšování kapacity závodu se proto bude provádět pomocí přidávání paralelních linek (viz [20])

modul F2/D2). V osmdesátých letech existoval podrobný projekt na pyrochemický závod o roční kapacitě 20 tHM. Tento projekt byl v devadesátých letech přepracován společností GE a rozšířen na roční kapacitu 200tHM [20] (viz. Tab. 16). Zajímavostí je to, že při projektovém desetinásobném zvýšení kapacity závodu došlo ke zvýšení kapitálových nákladů pouze faktorem menším než 5.

Data z těchto projektů pomohou k rámcovému určení chybějících složek nutných pro využití modifikovaného exponenciálního vztahu. Iteracemi menší jednotky na kapitálové náklady jednotky s desetinásobnou kapacitou lze zjistit průběh závislosti složky fixních nákladů na exponentu n . Výsledky iterací jsou vyneseny v grafu na Obr. 16 a jsou v intervalu (0,7;1) proloženy parabolou. Pro iterace byl použit vzorec (1), to znamená, že fixní část nákladů byla vždy vynásobena faktorem 1 a variabilní faktorem 10^n .

Z průběhu iterací nákladů je patrné, že pro extrapolaci nákladů do průmyslového měřítká bude vhodné volit exponent v intervalu 0,8 – 0,9. Tyto hodnoty odpovídají i doporučeným hodnotám pro extrapolaci nákladů chemickotechnologických závodů, využívající vysokoteplotní procesy (viz Tab. 5), proto je možné metodu i odhad považovat za konzistentní.



Obr. 16 Průběh velikosti fixní složky investic v závislosti na exponentu n u projektu ALMR.

Hodnota exponentu n je v souladu s odhadem a v zájmu dostatečné míry konzervativnosti volena jako 0,85. Pomocí rovnice pro interpolaci je dopočítán podíl fixních nákladů na celkových jako:

$$\frac{FN}{TOT} = -2,75 \cdot n^2 + 6,465 \cdot n - 3,1565 = \mathbf{0,3519}. \quad (26)$$

Tímto byl stanoven exponent jako **0,85** a podíl fixních nákladů jako **35,15 %** pro použití v modifikovaném vztahu (25).

Best estimate odhad

Velikost nejistot zůstane shodná s minulými odhady a pomocí vzorce (25) jsou vypočteny přímé investiční náklady z laboratorního měřítka jako:

$$C = 0,3515 \cdot 90 \cdot 79,37 + (1 - 0,3515) \cdot 90 \cdot 79,37^{0,85} = \mathbf{4\,915 \text{ mil. Kč}} \quad (27)$$

Použitím výsledků starších studií a předpokladů o podobnosti závodu s jiným chemicko-technologickým závodem pracujícím s vysokoteplotními procesy je možné učinit odhad celkových investičních nákladů na závod, který je o 31 % nižší, než konzervativní odhad.

Kromě odpisů (ekonomická životnost podniku je 20 let) se tento odhad projeví i ve všech položkách, které byly odhadnuty procentem z investičních nákladů (tzn. spotřební materiál, údržba, režie a pojištění).

Tab. 14 Přehled nákladů na vybudování průmyslového přepracování v mil. Kč (best estimate).

Investiční náklady	Nepřímé	Předkonstrukční fáze	Pov. k umístění zařízení	30
			Pov. k výstavbě prac. IV. Kat.	150
	Přímé	Vyřazování	Pov. k provozu prac. IV. Kat.	60
		Konstrukční fáze	Povolení k etapám vyřazování	60
Kapitalizované nákl. v konst. fázi				4 915
Celkem investice Kč				5 215
Provozní náklady	Přímé	Přímý materiál		420
		Přímé mzdy		171
		Spotř. materiál	6 % provozních nákladů, nebo	38
			0,5 % investičních nákladů	26
		Údržba		52
		Odpady		0,04
	Nepřímé	Odpisy		245
		Režie	10 % investičních nákladů	521
Udržovací popl.		maximum	48	
Pojištění		1 % přímých investic	49	
Celkem provoz Kč/rok²				1 534

Úplné náklady výkonu po zaokrouhlení činí 1 534 mil Kč za rok. Jednotkové úplné náklady výkonu lze vypočítat z roční kapacity závodu, která činí 70 000 kg:

$$\dot{U}NV = \frac{1\,534 \frac{\text{mil Kč}}{\text{rok}}}{70\,000 \frac{\text{kgHM}}{\text{rok}}} = 21\,916 \frac{\text{Kč}}{\text{kgHM}}. \quad (28)$$

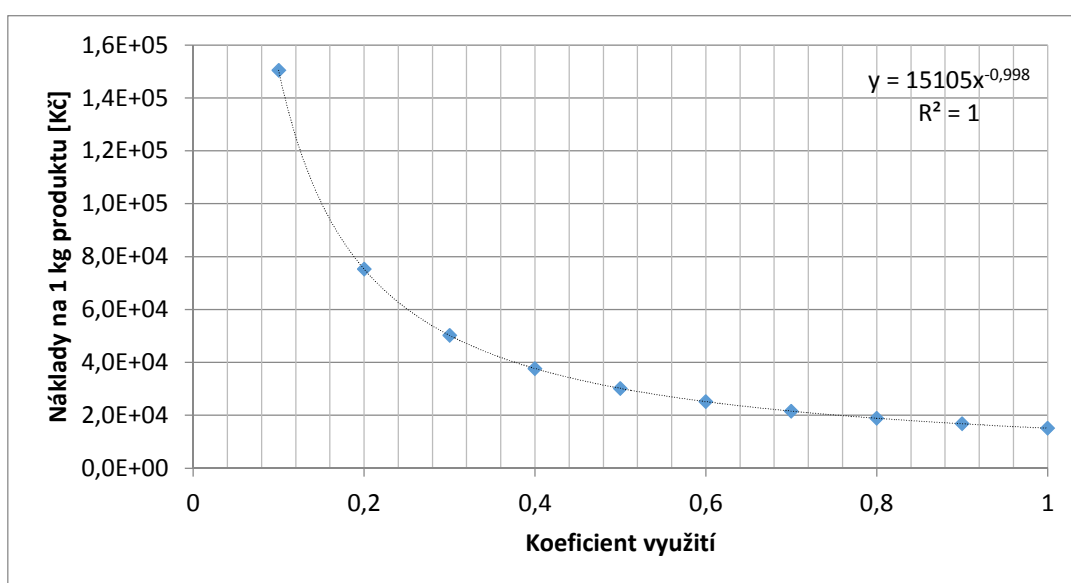
² Ve výpočtu byly použity hodnoty pro spotřební materiál jako 1 % z investičních nákladů.

Nákladová náročnost podniku vyjádřená jako podíl úplných nákladů výkonu a investičních nákladů:

$$\frac{\dot{U}NV}{INV} = \frac{1\,534}{5\,215} = 0,2941. \quad (29)$$

Oproti poloprovoznímu měřítku odhadnutému konzervativním odhadem nákladová náročnost best estimate varianty vzroste na 29,41 %. Podíl variabilních nákladů na úplných nákladech výkonu činí:

$$\frac{VN}{\dot{U}NV} = \frac{498}{1\,534} = 0,32. \quad (30)$$



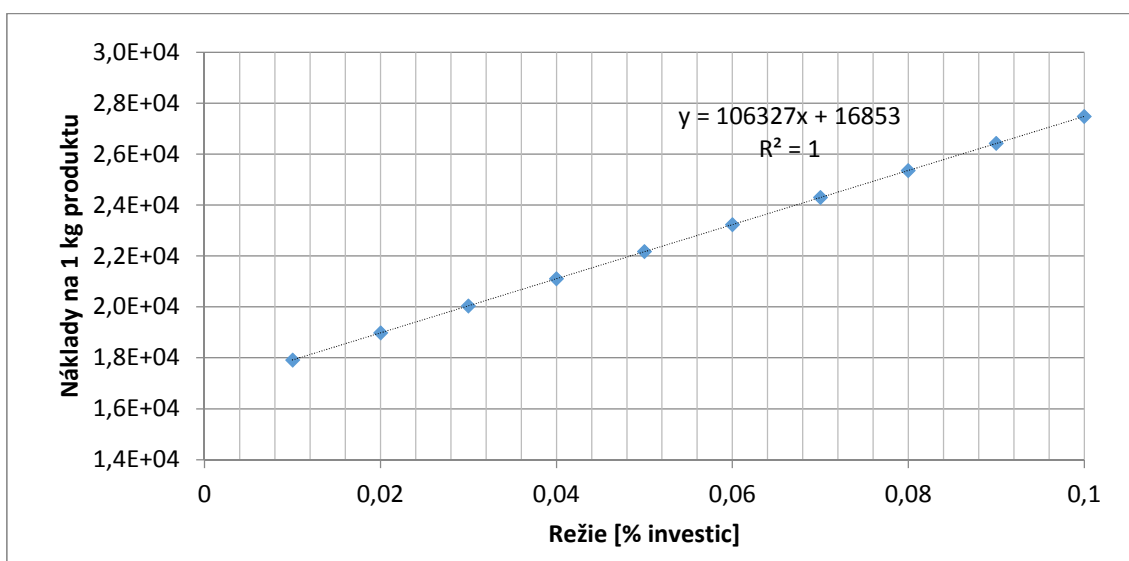
Obr. 17 Závislost nákladů na přepracování paliva na koeficientu využití průmyslového přepracování (best estimate).

Opět se předpokládá, že nejistoty nejsou korelované, proto je celková nejistota spočtena jako odmocnina ze sumy čtverců 1σ nejistot a pro best estimate odhad nákladů pro závod o kapacitě 70 tun(HM)/rok bude platit:

$$\dot{U}NV = 1\,534 \pm 497 \text{ mil. Kč.} \quad (31)$$

Při přepočtu na jednotku přepracovaného paliva činí úplné náklady výkonu:

$$\text{Jedn_}\dot{U}NV = 21\,917 \pm 7\,098 \text{ Kč/kg}_{HM}. \quad (32)$$



Obr. 18 Průběh nákladů na jednotku produkce v závislosti na velikosti režie (best estimate).

Tab. 15 Přehled nákladů včetně nejistot pro best estimate odhad v mil Kč.

Neřímé investiční náklady				
Typ nákladu	Střední hodnota (S)	S - 3σ	S + 3σ	Nejistota (σ)
Pov. k umístění zařízení	30	-	-	0 %
Pov. k výstavbě prac. IV. Kat.	150	-	-	0 %
Pov. k provozu prac. IV. Kat.	60	-	-	0 %
Vyřazování	60	-	-	0 %
Přímé investiční náklady				
Typ zařízení	Střední hodnota (S)	S - 3σ	S + 3σ	Nejistota (σ)
Přepracovací závod	4 915	3 441	6 390	10 %
Přímé provozní náklady				
Typ nákladu	Střední hodnota (S)	S - 3σ	S + 3σ	Nejistota
Fluor	420	294	546	10 %
Přímé mzdy	171	145	197	5 %
Spotřební materiál	26	18	34	10 %
Údržba	52	37	68	10 %
Odpady	0,043	0	0,109	50 %
Nepřímé provozní náklady				
Typ nákladu	Střední hodnota (S)	S - 3σ	S + 3σ	Nejistota
Odpisy	246	172	319	10 %
Režie	522	365	678	10 %
Udržovací poplatek	48	-	-	0 %
Pojištění	49	34	64	10 %

Tab. 16 Ekonomické modely pyrochemických závodů s kapacitami 20 a 200 tHM [20].

Pyrochemical ALMR Reprocessing (central plant)		
Plant annual capacity	200	MTHM/yr
Economic life	20	yrs
Total base capital cost including contingency (FOAK)	518.0	\$M
Imputed interest during construction (2 yrs to construct)	25.9	\$M
Total capital cost (2002\$)	543.9	\$M
Annual ops cost breakdown:		
Manpower	32.8	\$M/yr
Consumables	143.0	\$M/yr
Total annual operations cost	175.8	\$M/yr
Operations contribution to levelized cost of product/service	879.00	\$/kgU
Discount rate for government project (real)	3.80%	
Capital recovery factor (fraction per yr of ops)	0.0723	
Annual payments to recover capital cost of plant over life	39.32	\$M
Capital portion of unit product cost	196.58	\$/kgU
Total levelized product cost (1991\$)	1075.58	\$/kgU
	In 2004\$:	1590.0 \$/kgU
Pyrochemical ALMR Reprocessing (co-located with reactor plant)		
Plant annual capacity	20	MTHM/yr
Economic life	20	yrs
Total base capital cost including contingency (FOAK)	105.0	\$M
Imputed interest during construction (2 yrs to construct)	5.3	\$M
Total capital cost (1991\$)	110.3	\$M
Annual ops cost breakdown:		
Manpower	10.4	\$M/yr
Consumables	17.4	\$M/yr
Total annual operations cost	27.8	\$M/yr
Operations contribution to levelized cost of product/service	1390.00	\$/kgU
Discount rate for government project (real)	3.80%	
Capital recovery factor (fraction per yr of ops)	0.0723	
Annual payments to recover capital cost of plant over life	7.97	\$M
Capital portion of unit product cost	398.47	\$/kgU
Total levelized product cost (1991\$)	1788.47	\$/kgU
	In 2004\$:	2650.0 \$/kgU

5 Diskuse výsledků

Pro různé kapacity přepracování byly odhadnuty náklady s různou mírou konzervativnosti při zachování koeficientu využití závodu o velikosti 0,7. Odhadnuté střední hodnoty je pro přehlednost vhodné srovnat v jedné tabulce (viz Tab. 17).

Tab. 17 Přehled výsledků odhadů nákladů.

Typ odhadu	Náklady na přepracování [Kč/kg _{HM}]	Nejistota σ [Kč]
Poloprovoz FERDA 2	29 810	7 841
Průmyslový závod (70 tHM/rok), konzervativní	29 118	10 301
Průmyslový závod (70 tHM/rok), best estimate	21 917	7 098

Jednotkové náklady spočtené z různých odhadů je vhodné porovnat s údaji uvedenými v dostupných publikacích. S rostoucím tlakem na konečné řešení zadní části palivového cyklu bylo postupně v několika zemích vypracováno několik studií, které hodnotí ekonomickou životaschopnost tohoto způsobu řešení. Výsledky těchto studií pro přepracování paliva metodou PUREX jsou shrnuty ve zprávě [24]. Toto shrnutí je vyneseno i v Tab. 18. Minimální náklady v řádu 677 až 1179 USD(2010)/kg byly vypočteny ve studiích vypracovaných v letech 1999 – 2009. Avšak práce z roku 2011 indikují mnohem vyšší náklady na přepracování (2445 a 4179 USD(2010)/kg).

Tab. 18 Přehled výsledků ze studií nákladů přepracování paliva [24].

		AFCI [20]	MIT [25]	NEA 1994 [26]	NEA 2006 [27]	Rothwe ll [24]	Har. [2]	BCG [28]
UOX rep.	USD2010 za kg _{HM}	1 022	4 179	1 001	1 075	2 446	1 179	677
UOX rep.	USD2013 za kg _{HM}	1 121	4 585	1 098	1 182	2 683	1 293	742

K porovnání nákladů byly ze zjištěných údajů vybrány dvě hodnoty: nejnižší a průměrná (677 a 1654 USD(2010)/kg_{HM}). Dolarové ceny byly s využitím znalosti vývoje inflace v U.S.A. [29] přepočteny na hodnoty roku 2016, které po zaokrouhlení činí 742 a 1 815 USD(2016)/kg_{HM}. Pro porovnání v Kč je nutné znát kurz Kč/USD. Kurz byl stanoven na základě ročního průměrného kurzu v roce 2016, převzatého ze stránek ČNB [30] a činí 24.37 Kč/USD. Studiemi odhadnuté ceny přepracování jsou uvedeny v Tab. 19 a na jejich základě je provedeno porovnání nákladů stanovených v této práci.

Tab. 19 Globální ceny přepracování pro porovnání nákladů.

Typ ceny podle literatury	USD ₂₀₁₀ /kg _{HM}	USD ₂₀₁₆ /kg _{HM}	Kumulativní inflace (2010 - 2016)	Průměrný kurz Kč/USD v roce 2016	Cena v Kč (2016)/kg _{HM}
Minimální	677	742	9.70 %	24.37	18 082
Průměrná	1 654	1 815			44 226

Byla-li by tržní cena dána nejnižší cenou, vycházející se studie [28], pyrochemický proces přepracování paliva, založený na nestálých fluoridech by nebyl konkurenceschopný v žádném z uvažovaných měřítek. Naopak, bude-li cena přepracování dána aritmetickým průměrem, stává se pyrochemický proces konkurenceschopným již při malých kapacitách závodu a je možné i dosahovat zisku. Míra zisku se liší podle kapacity zařízení a podle jednotkových nákladů:

$$\mathbf{Přijmy\ poloprovoz = 44\ 226 \cdot 882 = 39\ 007\ 556\ Kč/rok}$$

$$\mathbf{Výdaje\ poloprovoz = 20\ 352\ 547\ Kč/rok}$$

$$\mathbf{Přijmy\ provoz\ (70\ tHM) = 44\ 226 \cdot 70\ 000 = 3\ 095\ 837\ 760\ Kč/rok}$$

$$\mathbf{Výdaje\ provoz\ (70\ tHM,\ konz.) = 1\ 566\ 829\ 114\ Kč/rok}$$

$$\mathbf{Výdaje\ provoz\ (70\ tHM,\ BE) = 1\ 288\ 405\ 285\ Kč/rok}$$

Výdaje představují součet všech nákladů bez odpisů a dále mohou být použity pro výpočet cash flow.

$$\mathbf{Úplné\ náklady\ výkonu\ poloprovoz = 26\ 292\ 547\ Kč/rok}$$

$$\mathbf{Úplné\ náklady\ výkonu\ provoz\ (70\ tHM,\ k.) = 2\ 038\ 257\ 686\ Kč/rok}$$

$$\mathbf{Úplné\ náklady\ výkonu\ provoz\ (70\ tHM,\ BE) = 1\ 534\ 178\ 610\ Kč/rok}$$

Zisk z přepracování 1 kg_{HM} paliva po odečtení nákladů je roven:

$$\mathbf{Jedn.\ zisk\ poloprovoz = 44\ 226 - 29\ 810 = 14\ 416\ Kč/kg_{HM}}$$

$$\mathbf{Jedn.\ zisk\ provoz\ (70\ tHM,\ k.) = 44\ 226 - 29\ 118 = 15\ 108\ Kč/kg_{HM}}$$

$$\mathbf{Jedn.\ zisk\ provoz\ (70\ tHM,\ BE) = 44\ 226 - 21\ 917 = 22\ 309\ Kč/kg_{HM}}$$

Zisky v poměru k nákladům činí **48,3 %** pro poloprovoz, **51,9 %** pro průmyslovou linku s náklady odhadnutými konzervativním odhadem a **101,8 %** pro průmyslovou linku odhadnutou best estimate odhadem.

6 Závěr

V práci byl proveden odhad nákladů na provoz přepracovací linky v laboratorním měřítku podle projektových pramenů a diskutovaných odhadů. Tento krok byl nutný k následným TOP-DOWN odhadům pro průmyslové měřítko podle metodiky [15]. Konzervativní odhad využíval prosté lineární extrapolace kapacity poloprovozní linky. Už při tomto způsobu odhadu nákladů je dosaženo jistého (2,3 %) snížení nákladů díky dosažení stropů legislativních poplatků.

V dalším kroku byl jako referenční projekt brán starší projekt ALMR z reference [20], který posloužil k odhadu parametrů nutných pro použití exponenciální metody popsané v příručce [15]. Pomocí iterací byl vynesena průběh závislosti podílu fixní části nákladů na exponentu popisujícím snížení nákladů z důvodu zvýšení výroby. Grafický průběh odhadnuté části fixních nákladů v závislosti na exponentu odpovídal očekávání, a proto mohl být interpolován kvadratickou funkcí a mohlo být přistoupeno ke stanovení exponentu. Exponent byl zvolen s jistou dávkou konzervativnosti, avšak jeho hodnota je velice blízká hodnotám pro chemicko-technologické podniky využívající vysokoteplotní procesy. Volbou exponentu byl jednoznačně dán i podíl fixní části investičních nákladů na projekt.

Poslední fází odhadu bylo dosažení odhadnutého poměru fixní a variabilní části investičních nákladů do exponenciálního vztahu (1). Při tomto kroku bylo zjištěno, že vztah (1) definovaný příručkou není vhodné použít pro odhady závodů, jejichž kapacita se liší faktorem 79,37, a proto bylo přistoupeno k modifikaci vztahu (25). Při úpravě vzorce (1) byla fixní část vynásobena faktorem zvýšení objemu výroby, což je podle příručky [15] platný krok. Aplikací modifikovaného vztahu bylo dosaženo odhadu provozních nákladů o 24,7 % nižšího než u konzervativního odhadu.

Při porovnání stanovených nákladů na pyrochemický proces s náklady na proces PUREX je možné konstatovat, že pyrochemický proces tak, jak je definován projektem FERDA 2 by byl s vysokou pravděpodobností proveditelný a konkurenceschopný. Je nutné dodat, že provedené odhady jsou zatíženy vysokými nejistotami a proto je nutné uváděný jednotkový zisk brát s rezervou.

Praktickou aplikaci přepracovacího závodu v České republice poměrně ztěžují mezinárodní smlouvy o nešíření jaderných zbraní, ale výzkum v CVŘ byl v tak pokročilé fázi, že při jeho dotažení do konce bylo možno tuto technologii prodat větším státům, které výzkum sledují.

Další překážkou, která brání rozvoji udržitelné jaderné energetiky, a tedy uzavření palivového cyklu, jsou současné nízké ceny primárních energetických surovin a deformace energetického trhu. Do vyřešení efektivního ukládání vyprodukované elektrické energie je však vhodné ve strategických plánech počítat s udržitelným provozem energetických zařízení poskytující dostatek energie pro pokrytí základního zatížení v síti.

7 Literatura

- [1] EIA. *EIA - Annual Energy Outlook 2014 Early Release* [online]. 12 2013 [vid. 2014-01-13]. Dostupné z: http://www.eia.gov/forecasts/aeo/er/early_elecgen.cfm
- [2] BUNN, Matthew, Steve FETTER, John HOLDREN a Bob VAN DER ZWAAN. *The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel* [online]. Final Report. DE-FG26-99FT4028. 79 JOHN F. KENNEDY STREET CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS 02138: Belfer Centre for Science and International Affairs, John F. Kennedy School of Government Harvard University. 2003 [vid. 2012-11-11]. *Project on Managing the Atom*. Dostupné z: <http://belfercenter.ksg.harvard.edu/files/repro-report.pdf>
- [3] URANIUM MINER. Uranium market price. *Uranium Miner* [online]. zima 2014 [vid. 2014-01-13]. Dostupné z: http://www.uraniumminer.net/market_price.htm
- [4] Nuclear power plants, world-wide. *European nuclear society* [online]. zima 2014 [vid. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plant-world-wide.htm>
- [5] BERKHOUT, Frans a KOL. *Spent Fuel from Nuclear Power Reactors* [online]. B.m.: The International Panel on Fissile Materials. 2011. Dostupné z: <http://fissilematerials.org/library/ipfm-spent-fuel-overview-june-2011.pdf>
- [6] IAEA. *Nuclear fuel cycle information system a directory of nuclear fuel cycle facilities*. [online]. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2009 [vid. 2013-10-26]. ISBN 978-92-0-102109-0. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1613_web.pdf
- [7] HEŘMANSKÝ, Bedřich a KOL. *Studium bezpečnostních charakteristik vysoko-teplotních reaktorů a možnosti jejich realizace v České republice do roku 2030*. B.m.: Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT v Praze. 2011
- [8] SYNEK, Miloslav a Eva KISLINGEROVÁ. *Podniková ekonomika, 5. přepracované a doplněné vydání*. B.m.: Nakladatelství C H Beck, 2010. ISBN 80-7400-336-1.
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Spent fuel reprocessing options*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008. ISBN 978-92-0-103808-1.
- [10] ENS. *PUREX process* [online]. [vid. 2013-11-02]. Dostupné z: <https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/p/purex-process.htm>

- [11] UHLÍŘ, Jan a Martin MAREČEK. Fluoride volatility method for reprocessing of LWR and FR fuels. *Journal of Fluorine Chemistry*. 2008, roč. 130, č. 2009, s. 89–93. ISSN 0022-1139.
- [12] KISLINGEROVÁ, Eva. *Manažerské finance, 3. vydání (+ CD)*. B.m.: Nakladatelství C H Beck, 2010. ISBN 978-80-7400-194-9.
- [13] SYNEK, Miloslav a KOL. *Manažerská ekonomika - 5., aktualizované a doplněné vydání*. B.m.: Grada Publishing a.s., 2011. ISBN 80-247-3494-X.
- [14] ROUŠAR, Ivo. *Projektové řízení technologických staveb*. B.m.: Grada Publishing a.s., 2008. ISBN 978-80-247-2602-1.
- [15] THE ECONOMIC MODELING WORKING GROUP a OF THE GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM. *Cost Estimating Guidelines for Generation IV Nuclear Energy Systems*. B.m.: OECD NEA
- [16] BELL, S. *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement* [online]. B.m.: National Physical Laboratory, nedatováno. ISBN ISSN:1368-6550. Dostupné z: https://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/UK_NPL/mgpg11.pdf
- [17] *Webové stránky Centra výzkumu Řež s.r.o.* [online]. zima 2014 [vid. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.cvrez.cz/>
- [18] Historie reaktorů VVR-S a LVR-15 v ÚJV Řež a.s. *Jaderné informace* [online]. zima 2014 [vid. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://jaderneinfo.webnode.cz/news/historie-reaktoru-vvr-s-a-lvr-15-v-ujv-rez-a-s/>
- [19] *Webové stránky projektu SUSEN* [online]. zima 2014 [vid. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkumne-programy/program-jpc/>
- [20] SHROPSHIRE, D., A. WILLIAMS, J. SMITH a ET AL. *Advanced Fuel Cycle Cost Basis* [online]. B.m.: Idaho National Laboratory. 2009. Dostupné z: <http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/4536700.pdf>
- [21] ČEZ. *Licenční proces* [online]. [vid. 2014-10-05]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/zvazovana-dostavba-elektrarny-temelin/licencni-proces.html>
- [22] *UxC: Ux Consulting - The Nuclear Fuel Price Reporter* [online]. [vid. 2016-05-16]. Dostupné z: <https://www.uxc.com/>
- [23] BUKHARIN, Oleg. Weapons to fuel. *Science & Global Security*. 1994, roč. 4, č. 2, s. 179–188. ISSN 0892-9882.

- [24] NEA, OECD. *The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle* [online]. 2013. Dostupné z: <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2013/7061-ebenfc.pdf>
- [25] DE ROO, Guillaume a John E. PARSONS. A methodology for calculating the levelized cost of electricity in nuclear power systems with fuel recycling. *Energy Economics* [online]. 2011, roč. 33, č. 5, s. 826–839. ISSN 0140-9883. Dostupné z: doi:10.1016/j.eneco.2011.01.008
- [26] NEA, OECD. *The Economics of the nuclear fuel cycle*. B.m.: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, 1994.
- [27] NEA, OECD. *Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management*. B.m.: OECD Publishing, 2006. ISBN 978-92-64-02485-4.
- [28] BCG. *Economic Assessment of Used Fuel Management in the United States* [online]. B.m.: Boston Consulting Group. 2006. Dostupné z: www.bcg.fr/documents/file15203.pdf
- [29] *Inflation Calculator / Find US Dollar's Value from 1913-2013* [online]. [vid. 2014-01-02]. Dostupné z: <http://www.usinflationcalculator.com/>
- [30] ČNB [online]. [vid. 2014-01-02]. Dostupné z: http://www.cnb.cz/cs/financni_trhy/devizovy_trh/kurzy_devizoveho_trhu/prumerne_mena.jsp?mena=USD

Přílohy

A Číselník účtů

Číslo účtu	Název účtu
1	Kapitalizované náklady v předkonstrukční fázi
11	Pozemky a práva k pozemkům
12	Stavební povolení
13	Licencování
14	Povolení k provozu
15	Studie
16	Zprávy
17	Jiné náklady v předkonstrukční fázi
19	Kontingence v předkonstrukční fázi
2	Kapitalizované náklady v konstrukční fázi
21	Budovy
22	Vybavení
24	Elektrické vybavení
25	Chladicí systém
26	Další vybavení
27	Speciální materiály
28	Simulátor
29	Kontingence v přímých nákladech
Přímé náklady	
3	Kapitalizované náklady na nepřímé služby
31	Nepřímé fixní náklady
32	Dohled nad stavbou
33	Náklady na spouštění
34	Náklady na testovací provoz
Fixní kapitálové náklady	
35	Projekční služby mimo místo výstavby
36	Projekční řízení mimo místo výstavby
37	Projekční služby na místě výstavby
38	Projekční řízení na místě výstavby
39	Kontingence v nepřímých službách
Základní náklady na výstavbu	
4	Kapitalizované náklady vlastníka
41	Nábor a výcvik zaměstnanců
42	Pracovní místa zaměstnanců
43	Mzdy zaměstnanců
44	jiné kapitalizované náklady
49	Kontingence nákladů vlastníka

5	Kapitalizované doplňkové náklady
51	Dopravné
52	Náhradní díly
53	Daně
54	Pojištění
58	Náklady na vyřazování z provozu
59	Kontingence v doplňkových nákladech
Náklady na výstavbu bez zahrnutí úroků	
6	Kapitalizované finanční náklady
61	Eskalace nákladů
62	Poplatky
63	Úroky během výstavby
69	Kontingence finančních nákladů
Celkové kapitálové investiční náklady	

B Hodnocení investic

B.1. Metody hodnocení investic [12]

Nejběžnější metody hodnocení investic jsou uvedeny v [12]. K procesu je třeba znát výši počáteční kapitálové výdaje, cash flow v jednotlivých letech, dobu životnosti investice a vážené podnikové náklady na kapitál, které zohledňují zahrnutí faktoru rizika.

B.1.1. Statické metody

Sledují pouze peněžní přínosy z investic, nebo je poměrují s výdaji, není v nich zahrnut faktor rizika a faktor času je reprezentován pouze omezujícím způsobem. Podle literatury [12] je tyto metody vhodné použít pouze u méně významných projektů s krátkou dobou životnosti a nelze je doporučit ke strategickému rozhodování.

Průměrný roční výnos

Je definován jako suma všech cash flow dělený (CF) počtem let životnosti investice (n):

$$\bar{CF} = \frac{\sum_{i=1}^n CF_i}{n} \quad (33)$$

Průměrná doba návratnosti

Tato veličina říká, za jakou dobu dojde ke splacení investice (C_0) při rovnoměrné realizaci cash flow:

$$t = \frac{C_0}{\bar{CF}} \quad (34)$$

Průměrná procentní výnosnost

Udává, kolik % investovaného kapitálu se ročně průměrně vrátí:

$$\bar{r} = \frac{\bar{CF}}{C_0} \quad (35)$$

Doba návratnosti

Udává počet let, za který se kumulované cash flow vyrovná počáteční investici, tzn., když platí následující rovnost:

$$\sum CF - C_0 = 0 \quad (36)$$

B.1.2. Dynamické metody

Oproti statickým metodám přihlížejí k působení faktoru času (diskontováním) a rizika.

Čistá současná hodnota

Ačkoliv se jedná pouze o porovnání kapitálových výdajů a příjmů, je tato metoda je základem pro všechny dynamické metody a je považována za nejsprávnější způsob hodnocení investic, protože bere v úvahu časovou hodnotu peněz, závisí pouze na prognózovaných hotovostních tocích a alternativních nákladech kapitálu a je aditivní (výsledky lze sčítat v portfoliu investic). Výsledkem metody je kolik peněz navíc dostane podnik při realizaci investice.

Nevýhodami metody jsou právě absolutní výsledek, který lze těžko aplikovat na srovnání více investic a citlivost na úrokové míry, které se obtížně predikují. Čistá současná hodnota se vypočte jako:

$$NPV = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+k)^i} \quad (37)$$

Vnitřní výnosové procento IRR

Tato metoda dává relativní výnos, který projekt poskytuje během svého života, nebo také diskontní sazbu, jež vede k $NPV = 0$.

$$0 = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+IRR)^i} \quad (38)$$

Problémy s aplikací metody nastávají tehdy, když se znaménko mezi cash flow v jednotlivých letech mění právě jednou, v opačném případě může IRR nabývat více hodnot. IRR také nemusí existovat vůbec. Dalším problémem je, že IRR není aditivní a nelze jej tedy sčítat při realizaci různých projektů současně.

Index ziskovosti

Index představuje poměr přínosů vyjádřených v současné hodnotě prognózovaných budoucích toků hotovosti a počátečních kapitálových výdajů. Projekt je přijat, jestliže index ziskovosti je větší, než 1. Čím je index vyšší, tím je projekt ekonomicky výhodnější. Index umožňuje srovnávání různých projektů mezi sebou z relativního úhlu pohledu a používá se v případech, kdy bývá k realizaci potřeba vybrat z několika investičních projektů, které nemohou být uskutečněny všechny kvůli nedostatku financí.

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+k)^i}}{C_0} \quad (39)$$

Doba návratnosti

Jedná se o počet let, za které tok výnosů přinese hodnotu rovnající se počátečním kapitálovým výdajům na investici. Nevýhodami metody je to, že přisuzuje stejné váhy všem hotovostním tokům před datem návratnosti a nulovou váhu tokům po tomto datu a subjektivita při určování doby návratnosti. Proto je vhodné metodu použít k hodnocení projektů se stejným časovým horizontem a u projektů s krátkou životností, vysokým rizikem, či jako doplňující kritérium hodnocení.

B.1.3. Hodnocení investice – poloprovozní měřítko

U investice se uvažuje životnost 20 let, náklady na realizaci a roční CF jsou dány v předchozích kapitolách (kap. 5). Počítá se se střední hodnotou nákladů a zisk je dán rozdílem ceny, spočítané z aritmetického průměru cen přepracování, a nákladů na přepracování. Protože se jedná o komerční investiční záměr je diskontní sazba podle doporučení [15] zvolena na úrovni 10 %. Požadovaná výše výnosů je opět 10 %.

Statické metody

Přesto, že statické metody nejsou u větších a dlouhodobých investic doporučeny, lze je využít jako pomocné metody, nebo ke zformování hrubého obrazu o investici. Roční cash flow je rozdíl mezi příjmy a výdaji firmy v daném roce. Příjmy jsou ze služeb přepracování paliva a výdaje vznikají z nákladů analyzovaných výše. Do těchto nákladů se však nezahrnují odpisy.

$$CF = \text{Příjmy} - \text{Výdaje} = 18\,655\,009 \text{ Kč.}$$

Protože se uvažuje ve všech letech se stejnými peněžními toky, činí průměrné cash flow:

$$\emptyset CF = \frac{\sum_{i=1}^n CF_i}{n} = 18\,655\,009 \text{ Kč.}$$

Průměrná doba návratnosti:

$$t = \frac{C_0}{\emptyset CF} = \frac{96\,000\,000}{18\,655\,009} = 5,15 \text{ let}$$

Průměrná procentní výnosnost:

$$\varnothing r = \frac{\varnothing CF}{C_0} = \frac{18\,655\,009}{96\,000\,000} = 0,1943$$

Dynamické metody

Teprve na základě těchto metod lze vyhodnotit, jestli se investice do projektu vyplatí. Požadovaná výnosnost investice je 10 %

Čistá současná hodnota:

$$NPV = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+k)^i} = 62\,820\,607 \text{ Kč}$$

Vnitřní výnosové procento:

$$IRR = 0,1880$$

Index ziskovosti:

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+k)^i}}{C_0} = 1,6544$$

Dobu návratnosti udává Tab. 20.

Tab. 20 Výpočet doby návratnosti investice, poloprovoz.

Rok	CF	CF diskontovaná	Kumulovaná diskontovaná CF	Chybí do splacení
1	18 655 009	16 959 099	16 959 099	79 040 901
2	18 655 009	15 417 363	32 376 462	63 623 538
3	18 655 009	14 015 784	46 392 246	49 607 754
4	18 655 009	12 741 622	59 133 868	36 866 132
5	18 655 009	11 583 293	70 717 161	25 282 839
6	18 655 009	10 530 266	81 247 427	14 752 573
7	18 655 009	9 572 969	90 820 397	5 179 603
8	18 655 009	8 702 699	99 523 096	-3 523 096
9	18 655 009	7 911 545	107 434 641	-11 434 641
10	18 655 009	7 192 314	114 626 954	-18 626 954
11	18 655 009	6 538 467	121 165 421	-25 165 421
12	18 655 009	5 944 061	127 109 482	-31 109 482
13	18 655 009	5 403 692	132 513 173	-36 513 173
14	18 655 009	4 912 447	137 425 620	-41 425 620
15	18 655 009	4 465 861	141 891 481	-45 891 481
16	18 655 009	4 059 873	145 951 355	-49 951 355
17	18 655 009	3 690 794	149 642 149	-53 642 149
18	18 655 009	3 355 267	152 997 416	-56 997 416
19	18 655 009	3 050 243	156 047 659	-60 047 659
20	18 655 009	2 772 948	158 820 607	-62 820 607

B.1.4. Hodnocení investice – průmyslové měřítko, konzerv. odhad

Pro hodnocení investice v průmyslovém měřítku platí stejné předpoklady jako pro hodnocení investice v poloprovozním měřítku (20 let životnost, 10 % požadovaná výnosnost a diskontní sazba):

Statické metody

$$CF = \text{Příjmy} - \text{Výdaje} = 1\,529\,008\,646 \text{ Kč.}$$

Protože se uvažuje ve všech letech se stejnými peněžními toky, činí průměrné cash flow:

$$\bar{CF} = \frac{\sum_{i=1}^n CF_i}{n} = 1\,529\,008\,646 \text{ Kč.}$$

Průměrná doba návratnosti:

$$t = \frac{C_0}{\emptyset CF} = \frac{7\,442\,857\,143}{1\,807\,432\,474} = 4,87 \text{ let}$$

Průměrná procentní výnosnost:

$$\emptyset r = \frac{\emptyset CF}{C_0} = \frac{1\,807\,432\,474}{7\,442\,857\,143} = 0,2054$$

Dynamické metody

Teprve na základě těchto metod lze vyhodnotit, jestli se investice do projektu vyplatí. Požadovaná výnosnost investice je 10 %

Čistá současná hodnota:

$$NPV = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+k)^i} = 5\,574\,455\,390 \text{ Kč}$$

Vnitřní výnosové procento:

$$IRR = 0,1999$$

Index ziskovosti:

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+k)^i}}{C_0} = 1,7490$$

Doba návratnosti:

Tab. 21 Výpočet doby návratnosti investice, konzervativní odhad.

Rok	CF	CF diskontovaná	Kumulovaná diskontovaná CF	Chybí do splacení
1	1 529 008 646	1 390 007 860	1 390 007 860	6 052 849 283
2	1 529 008 646	1 263 643 509	2 653 651 369	4 789 205 774
3	1 529 008 646	1 148 766 826	3 802 418 195	3 640 438 948
4	1 529 008 646	1 044 333 478	4 846 751 673	2 596 105 470
5	1 529 008 646	949 394 071	5 796 145 744	1 646 711 398
6	1 529 008 646	863 085 519	6 659 231 264	783 625 879
7	1 529 008 646	784 623 199	7 443 854 463	-997 320
8	1 529 008 646	713 293 818	8 157 148 281	-714 291 138
9	1 529 008 646	648 448 925	8 805 597 206	-1 362 740 063
10	1 529 008 646	589 499 023	9 395 096 229	-1 952 239 086
11	1 529 008 646	535 908 203	9 931 004 431	-2 488 147 289
12	1 529 008 646	487 189 275	10 418 193 706	-2 975 336 564
13	1 529 008 646	442 899 341	10 861 093 047	-3 418 235 905
14	1 529 008 646	402 635 765	11 263 728 812	-3 820 871 669
15	1 529 008 646	366 032 513	11 629 761 325	-4 186 904 182
16	1 529 008 646	332 756 830	11 962 518 155	-4 519 661 012
17	1 529 008 646	302 506 209	12 265 024 365	-4 822 167 222
18	1 529 008 646	275 005 645	12 540 030 009	-5 097 172 866
19	1 529 008 646	250 005 132	12 790 035 141	-5 347 177 998
20	1 529 008 646	227 277 392	13 017 312 533	-5 574 455 390

B.1.5. Hodnocení investice - průmyslové měřítko, best estimate

Pro hodnocení investice v průmyslovém měřítku platí stejné předpoklady jako pro hodnocení investice v poloprovozním měřítku (20 let životnost, 10 % požadovaná výnosnost a diskontní sazba):

Statické metody

$$CF = \text{Příjmy} - \text{Výdaje} = 1\,807\,432\,474 \text{ Kč.}$$

Protože se uvažuje ve všech letech se stejnými peněžními toky, činí průměrné cash flow:

$$\bar{CF} = \frac{\sum_{i=1}^n CF_i}{n} = 1\,807\,432\,474 \text{ Kč.}$$

Průměrná doba návratnosti:

$$t = \frac{C_0}{\text{ØCF}} = \frac{5\,215\,466\,511}{1\,807\,432\,474} = 2,89 \text{ let}$$

Průměrná procentní výnosnost:

$$\text{Ør} = \frac{\text{ØCF}}{C_0} = \frac{1\,807\,432\,474}{5\,215\,466\,511} = 0,3466$$

Dynamické metody

Teprve na základě těchto metod lze vyhodnotit, jestli se investice do projektu vyplatí. Požadovaná výnosnost investice je 10 %

Čistá současná hodnota:

$$\text{NPV} = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+k)^i} = 10\,172\,225\,032 \text{ Kč}$$

Vnitřní výnosové procento:

$$\text{IRR} = 0,3452$$

Index ziskovosti:

$$\text{PI} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+k)^i}}{C_0} = 2,9504$$

Doba návratnosti:

Tab. 22 Výpočet doby návratnosti investice, best estimate.

Rok	CF	CF diskontovaná	Kumulovaná diskontovaná CF	Chybí do splacení
1	1 807 432 475	1 643 120 432	1 643 120 432	3 572 346 079
2	1 807 432 475	1 493 745 847	3 136 866 278	2 078 600 232
3	1 807 432 475	1 357 950 770	4 494 817 048	720 649 462
4	1 807 432 475	1 234 500 700	5 729 317 748	-513 851 238
5	1 807 432 475	1 122 273 364	6 851 591 112	- 1 636 124 601
6	1 807 432 475	1 020 248 512	7 871 839 624	- 2 656 373 113
7	1 807 432 475	927 498 648	8 799 338 272	- 3 583 871 761
8	1 807 432 475	843 180 589	9 642 518 860	- 4 427 052 350
9	1 807 432 475	766 527 808	10 409 046 668	- 5 193 580 158
10	1 807 432 475	696 843 462	11 105 890 130	- 5 890 423 619
11	1 807 432 475	633 494 056	11 739 384 186	- 6 523 917 675
12	1 807 432 475	575 903 687	12 315 287 874	- 7 099 821 363
13	1 807 432 475	523 548 807	12 838 836 680	- 7 623 370 170
14	1 807 432 475	475 953 461	13 314 790 141	- 8 099 323 630
15	1 807 432 475	432 684 964	13 747 475 105	- 8 532 008 594
16	1 807 432 475	393 349 967	14 140 825 073	- 8 925 358 562
17	1 807 432 475	357 590 880	14 498 415 952	- 9 282 949 441
18	1 807 432 475	325 082 618	14 823 498 570	- 9 608 032 059
19	1 807 432 475	295 529 652	15 119 028 222	- 9 903 561 712
20	1 807 432 475	268 663 320	15 387 691 543	-10 172 225 032